



**UEPB**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL  
MESTRADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL**

**ALVÂNIA BARROS DE QUEIRÓZ**

**APLICAÇÃO DE UM BIORREATOR DE MEMBRANA DINÂMICA PARA  
TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS**

**CAMPINA GRANDE - PB  
2019**

**ALVÂNIA BARROS DE QUEIRÓZ**

**APLICAÇÃO DE UM BIORREATOR DE MEMBRANA DINÂMICA PARA O  
TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do título de mestre.

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:** Tecnologias de Tratamento de Água e Resíduos

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. Wilton Silva Lopes

**CAMPINA GRANDE - PB  
2019**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

Q38a Queiroz, Alvânia Barros de.  
Aplicação de um biorreator de membrana dinâmica para o tratamento de águas residuárias [manuscrito] / Alvânia Barros de Queiroz. - 2019.  
44 p. : il. colorido.  
Digitado.  
Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2019.  
"Orientação : Prof. Dr. Wilton Silva Lopes, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT."  
1. Biorreatores. 2. Esgoto doméstico. 3. Águas residuárias.  
I. Título

21. ed. CDD 628.3

**ALVÂNIA BARROS DE QUEIRÓZ**

**APLICAÇÃO DE UM BIORREATOR DE MEMBRANA DINÂMICA PARA O  
TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do título de mestre.

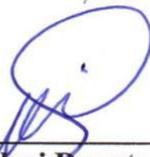
Aprovada em 28 de maio de 2019.

**BANCA EXAMINADORA**



---

**Prof. Dr. Wilton Silva Lopes**  
(Orientador e Presidente da Banca – UEPB)



---

**Prof. Dr. Valderi Duarte Leite**  
(Examinador Interno – UEPB)



---

**Prof. Lígia Maria Ribeiro Lima**  
(Examinador Externo- UEPB)

Dedico este trabalho a **Deus** e a toda minha **família**, por todo amor, carinho, amizade, compreensão, apoio, paciência e cuidado durante essa jornada. E em especial aos meus **pais**, maiores mestres, amigos e professores que tive.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me guiar em todos os passos da minha vida, pela força vinda diretamente do seu trono da graça e por ter me amparado todos os dias dessa caminhada.

Aos meus pais, Mauricio e Miriam, que me apoiaram e mesmo de longe acompanharam e lutaram junto a mim em mais esta etapa da minha vida.

Aos meus irmãos Nicolau, Nicodemus e em especial minha querida e amada irmã Magna que não pode estar presencialmente nessa fase de minha vida, mas sempre me mandando muitas forças para prosseguir, a vocês meu muito obrigada por terem me incentivado a progredir nos meus estudos e amadurecimento profissional, sendo sempre exemplo em tudo, e ao meu sobrinho Áquilla pelos momentos de descontração à distância.

Ao amor da minha vida, meu noivo Marden que a 10 anos juntos, sempre sendo meu companheiro de todas as horas que contribuiu decisivamente para que concluísse essa etapa bastante difícil da minha vida.

A Carla, Julya e Jéssica que me abriram os braços em Campina Grande, e por tantos momentos me acolheram, não há como agradecer tanto carinho!

A Jayne e Vanessa por desde da graduação me amarem como se fosse da família, meu coração só tem gratidão por suas vidas.

A professora Neyliane e Fernando que indiretamente me deram forças para prosseguir, mesmo muitos achando que não podia, vocês são um exemplo de filhos de Deus.

Aos professores responsáveis pelo Laboratório da Estação Experimental de Tratamento Biológico de Esgotos Sanitários, onde foi realizada a etapa experimental do trabalho.

Às grandes amizades e laços criados no âmbito do mestrado e laboratório.

Agradeço em especial a Wilza e Jacob, por serem facilitadores, graças à disponibilidade de auxílio nas análises e discussões de dúvidas, além claro, da descontração necessária para sobreviver a tantas horas diárias de trabalho.

Ao meu ilustre Orientador Professor Dr. Wilton Lopes, que durante esses anos me guiou diante de um assunto inovador para mim, confiou e incentivou meu crescimento no decorrer deste trabalho.

Aos ilustres professores membros da banca examinadora deste trabalho, pela presença e contribuições construtivas que apenas engrandecem o trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela disponibilidade de bolsa de mestrado.

A todos aqueles que, de alguma forma, estiveram e estão próximos a mim, fazendo este caminho valer a pena.

## RESUMO

QUEIRÓZ, Alvânia Barros de. **Aplicação de um Biorreator de Membrana Dinâmica para o Tratamento de Águas Residuárias**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia Ambiental). Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2019.

A integração da tecnologia de separação por membrana representa uma inovação importante na evolução da tecnologia de tratamento biológico de efluentes. O presente trabalho relata o desempenho de um biorreator anaeróbio de membrana dinâmica no tratamento de águas residuárias domésticas, operado com o objetivo de remover ovos de helmintos produzindo um efluente para reuso agrícola. Foi construído um sistema experimental composto por um digestor anaeróbio construído a partir de tubos de e conexões de Policloreto de polivinila (PVC) e um módulo de membrana. O módulo de membrana dinâmica, por sua vez composto de uma estrutura de PVC e apresenta configuração externa de forma circular, com área total de filtração com dimensões de 4x4cm. No seu interior é encontrada uma malha de polietileno (suporte de membrana) com porosidade média de 90 $\mu$ m e uma malha de metal utilizada junto ao suporte de membrana para oferecer maior resistência à mesma quando for submetida a elevados gradientes de pressão dentro do reator, com filtração em fluxo tipo perpendicular. Para tanto, foram realizados os seguintes parâmetros operacionais: DQO<sub>total</sub>, pH, alcalinidade, turbidez, AGV, fósforo, nitrogênio e ovos de helmintos. Obtivemos concentrações de DQO<sub>t</sub> apresentaram uma remoção de 84% resultando em um permeado com concentrações de 268mg/L à 89mg/L, para fósforo e nitrogênio, observou-se uma remoção de 88% e 83% resultando em concentrações de 5,23  $\pm$  1,21mg/L de fósforo total e 36,18  $\pm$  21,2mg/L de NTK, respectivamente. Diante dos resultados de pH, AGV e Alcalinidade Total, observou-se que o reator manteve em um intervalo de pH entre 7,0 e 7,5 intervalos de pH encontrados para esgoto bruto e permeado respectivamente. Os resultados de contagem de ovos de helmintos observaram que, excetuando-se a primeira amostra de esgoto bruto analisada, as demais apresentaram contagens de ovos de helmintos abaixo de 40 ovos/L, com uma média aritmética de 21 ovos/L. No efluente do reator foram obtidas contagens mais reduzidas, com média geral de 8 ovos/L, representando uma eficiência de remoção no reator da ordem de 61%. No qual foi possível verificar que a utilização da membrana dinâmica proporcionou um bom desempenho para a filtração do efluente, produzindo um permeado com características promissoras, demonstrando que a utilização dessa tecnologia consiste em uma alternativa bastante interessante para remoção de ovos de helmintos e possíveis reuso na área agrícola.

**Palavras-chave:** Biorreatores. Membrana Dinâmica. Esgoto Doméstico.

## ABSTRACT

QUEIRÓZ, Alvânia Barros de. **Application of a Dynamic Membrane Bioreactor for the Treatment of Wastewater**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia Ambiental). Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2019.

The integration of membrane separation technology represents a major innovation in the evolution of biological treatment technology for effluents. The present work reports the performance of a dynamic membrane anaerobic bioreactor in the treatment of domestic wastewater, operated with the objective of removing eggs from helminths producing an effluent for agricultural reuse. An experimental system was constructed consisting of an anaerobic digester constructed from polyvinyl chloride (PVC) pipes and connections and a membrane module. The dynamic membrane module, in turn composed of a PVC structure and presents external configuration of circular shape, with total area of filtration with dimensions of 4x4cm. A polyethylene mesh (membrane support) with a mean porosity of 90 $\mu$ m and a metal mesh used near the membrane support are found inside to provide greater resistance to it when subjected to high pressure gradients inside the reactor, with filtration in perpendicular flow type. For that, the following operating parameters were performed: total COD, pH, alkalinity, turbidity, AGV, phosphorus, nitrogen and helminth eggs. We obtained concentrations of DQOt presented a removal of 84% resulting in a permeate with concentrations of 268mg / L at 89mg / L, for phosphorus and nitrogen, a removal of 88% and 83% was observed, resulting in concentrations of 5.23 varying at 1.21mg / L of total phosphorus and 36.18 varying to 21.2mg / L of NTK, respectively. Considering the results of pH, AGV and Total Alkalinity, it was observed that the reactor maintained in a pH range between 7.0 and 7.5 pH ranges found for crude and permeate sewage, respectively. The results of counting of helminth eggs observed that, except for the first sample of raw sewage analyzed, the others had counts of helminth eggs below 40 eggs / L, with an arithmetic mean of 21 eggs / L. In the effluent of the reactor, smaller counts were obtained, with a general average of 8 eggs / L, representing a removal efficiency in the reactor of the order of 61%. It was possible to verify that the use of the dynamic membrane provided a good performance for the filtration of the effluent, producing a permeate with promising characteristics, demonstrating that the use of this technology is a very interesting alternative for the removal of helminth eggs and possible reuse in the agricultural área.

**Keywords:** Bioreactors. Dynamic Membrane. Domestic Sewage.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sequências metabólicas envolvidas na digestão anaeróbia (os números referem-se às porcentagens de Demanda Química de Oxigênio – DQO). .....	16
Figura 2: Esquema da formação da camada de Membrana Dinâmica .....	20
Figura 3: Módulo de membrana externo (a) e submerso (b) aplicado à biorreatores de membrana (Adaptado de Stephenson et al., 2000) .....	23
Figura 4: Filtração de fluxo perpendicular em módulo de membrana de configuração externa.....	23
Figura 5: Esquema do sistema experimental .....	29
Figura 6: Módulo de membrana .....	31
Figura 7: Suporte de PVC e malhas.....	31
Figura 8: Malha de metal .....	31
Figura 9: Malha de polipropileno .....	31
Figura 10: pH do Esgoto Bruto e permeado durante o período de operação .....	34
Figura 11: Alcalinidade Total do Esgoto Bruto e permeado durante o período de operação .....	35
Figura 12: AGV do Esgoto Bruto e permeado durante o período de operação .....	35
Figura 13: Turbidez do Esgoto Bruto e permeado durante o período de operação .....	36
Figura 14: DQOt do Esgoto Bruto e permeado durante o período de operação .....	37
Figura 15: Fósforo Total do Esgoto Bruto e permeado durante o período de operação .....	38
Figura 16 NTK do Esgoto Bruto e permeado durante o período de operação .....	38
Figura 17: Ovos de Helmintos do Esgoto Bruto e permeado durante o período de operação .....	39

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Diretrizes de qualidade microbiologica recomendada para esgotos.....	26
--	----

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>13</b>
2.1 Objetivo Geral .....	13
2.2 Objetivos Específicos .....	13
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>14</b>
<b>3.1 Processo de Tratamento de Esgoto .....</b>	<b>14</b>
3.2 Digestão Anaeróbia .....	15
3.3 Biorreatores Anaeróbios de Membrana Dinâmica .....	18
3.3.2 Influência da Concentração de Sólidos .....	24
3.3.3 Influência da Retrolavagem .....	25
3.4 Dimensões Legais e Regulatórias do Reuso .....	25
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>28</b>
4.1 Localização .....	28
4.2 Descrição do Reator .....	28
4.2.1 Montagem do Módulo de Membrana .....	30
4.2.2 Processo de alimentação do Reator .....	31
4.2.3 Retrolavagem .....	32
<b>5. Monitoramento do Sistema Experimental .....</b>	<b>33</b>
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>34</b>
6.1 Qualidade do Permeado .....	34
<b>7. CONCLUSÕES .....</b>	<b>41</b>
<b>8. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>42</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A população em geral tem direcionado sua atenção aos aspectos ambientais, dentre os quais, talvez o mais preocupante, seja os recursos hídricos. Problemas relacionados à falta de água já fazem parte do cotidiano de muitas pessoas. O comprometimento da disponibilidade de água é causado principalmente por usos inadequados (GIACOBBO *et al.*, 2010). Assim, para atingir um desenvolvimento sustentável é necessário conduzir o crescimento socioeconômico sem agredir os recursos naturais. Para tanto, torna-se necessário a adoção de medidas que visem o uso racional da água; a aplicação de tecnologias e processos que conduzam ao reúso de efluentes industriais e domésticos; garantir as reservas necessárias para os ecossistemas naturais, entre outras ações proativas para o combate ao desperdício da água (PROVENZI, 2005).

Em regiões com carência de água, a utilização de águas residuárias tratadas é uma alternativa para aumentar a disponibilidade de água. Esta é a tendência atual, pois considera o efluente tratado como um recurso hídrico a ser utilizado para diversos fins (VIANA, 2004). Com a reciclagem do efluente tratado para usos não potáveis (irrigação de jardins, lavagem de pisos, agricultura, etc.), libera-se a água de melhor qualidade para, assim, ser utilizada para fins mais nobres, tais como o consumo humano.

A otimização dos tratamentos de águas residuárias busca melhorias no campo social, econômico e ambiental. Os estudos contínuos desses processos de tratamento são direcionados a redução dos custos, utilização de pequenas áreas para implantação da estrutura física, além de solucionar, impedir, mitigar e/ou minimizar, ou mesmo, compensar os efeitos negativos das atividades humanas.

Dentro deste contexto se inserem as tecnologias avançadas de tratamento de efluentes, como os processos de separação por membranas, dentre as quais, uma que tem ganhado destaque é a de biorreator anaeróbio de membrana dinâmica, uma tecnologia moderna e inovadora para tratar esgoto doméstico, que vem se tornando uma tecnologia atraente, por apresentar alta eficiência de remoção da matéria orgânica e de partículas inorgânicas.

As membranas dinâmicas têm sido usadas como dispositivos de separação sólido líquido em tratamento biológico, seja ele aeróbio ou anaeróbio. Essa tecnologia que associa membrana e biorreatores aeróbios ou anaeróbios tem sido objeto de interesse, dando vantagem de uma melhoria na qualidade do efluente (JUDD, 2006).

A membrana dinâmica também é chamada de membrana secundária, é formada em um material de suporte subjacente, como, por exemplo, uma membrana de malha, quando a

solução contém partículas sólidas suspensas, tais como células microbianas e flocos. As partículas orgânicas e coloidais que normalmente resultam em incrustação da membrana serão aprisionadas na camada de filtração de biomassa, evitando a incrustação do material de suporte (Kiso *et al.*, 2005, JEISONAND; VAN LIER, 2007).

No processo de separação por membranas é possível reter material particulado e coloidal, como numa filtração convencional, mas também remover constituintes dissolvidos, dependendo do tipo de membrana (BARBOSA, 2009). Logo a membrana dinâmica tem sua formação por sólidos suspensos, coloides e partículas de células de micro-organismos sobre o material de suporte. Diante dessa disposição forma-se a camada de torta dinâmica como uma membrana secundária.

No entanto, Ersahin *et al.*, (2015) relataram que a camada de membrana dinâmica tem um papel importante na remoção de matéria orgânica. Ambos os materiais orgânicos e inorgânicos contribuem para a formação dessa camada e, assim, é conseguida a retenção eficaz de partículas muito pequenas, pela camada da membrana, sendo essa camada formada por uma diversidade microbiana.

Em decorrente de tal fato, a tecnologia de membrana dinâmica apresenta um cenário favorável para resolver os problemas encontrados nos processos que utilizam membrana. Contudo, o presente trabalho propôs a combinação da digestão anaeróbia com o sistema de membrana dinâmica no tratamento de esgoto doméstico, a fim de investigar a remoção de ovos de helmintos, para que se tenha um efluente para reuso agrícola.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar o desempenho de um biorreator anaeróbio de membrana dinâmica no tratamento de águas residuárias domésticas, visando produzir efluente para reuso agrícola.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Otimizar os parâmetros operacionais do reator para remover matéria orgânica;
- Avaliar a remoção de ovos de helmintos do esgoto doméstico pelo sistema de membrana.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Processo de Tratamento de Esgoto

O tratamento convencional de esgotos ocorre através de um conjunto de processos ou operações unitárias construídas em série nas Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs), assim denominadas: tratamentos preliminar, primário, secundário e terciário. Em cada uma dessas etapas os esgotos são submetidos a um diferente nível de tratamento, melhorando sua qualidade e devem atingir, nas últimas unidades, condições adequadas para o descarte do efluente final ou seu reuso de acordo ao estabelecido pela legislação brasileira (BRASIL, 2011).

Os esgotos domésticos resultantes do uso da água para higiene e necessidades fisiológicas humanas, sua composição varia, por exemplo, com o clima, situação social e econômica e hábitos da população. A composição do esgoto doméstico é de 99,9% de água e apenas 0,1% de sólidos, sendo que cerca de 75% desses sólidos são constituídos de matéria orgânica em processo de decomposição. Nas estações de tratamento de esgoto removem-se os sólidos presentes através de processos físicos, químicos e biológicos (METCALF; EDDY, 2003).

Devido a sua composição, o mesmo deve passar por determinados tipos de tratamentos que estarão condicionados às características do afluente gerado. Estes processos buscam bioestabilizar ou remover a matéria orgânica e os microrganismos patogênicos até níveis adequados para sua descarga no meio ambiente ou para outro destino (VON SPERLING, 2005).

Por causa dos danos ambientais e de saúde pública que esses resíduos podem gerar, é de elevada importância o correto gerenciamento dos mesmos, que inclui seu tratamento antes da disposição final. No entanto, os objetivos gerais do tratamento biológico de esgoto doméstico são transformar constituintes biodegradáveis dissolvidos e particulados em produtos finais aceitáveis, capturar e incorporar sólidos suspensos e coloidais não-sedimentáveis em um floco biológico ou em um biofilme, podendo transformar ou remover nutrientes como nitrogênio e fósforo e em alguns casos remover constituintes e compostos orgânicos traços específicos. (METCALF; EDDY, 2016).

De forma geral, diversas alternativas têm sido buscadas para que se tenha um efluente de melhor qualidade, entre elas encontram-se a disposição em atividades agrícola.

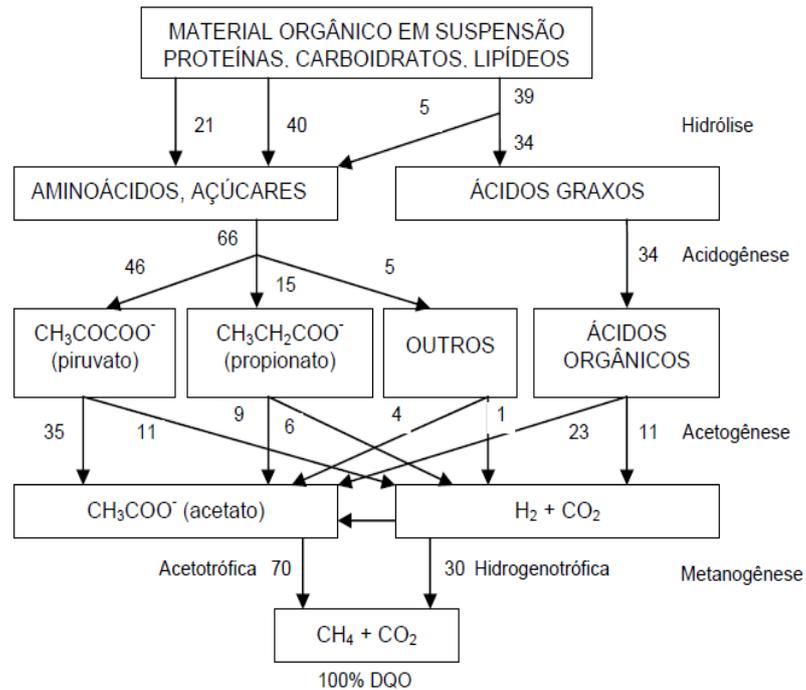
### 3.2 Digestão Anaeróbia

Durante a degradação anaeróbia ocorre a decomposição de matéria orgânica na ausência de oxigênio molecular, envolvendo um amplo espectro de microrganismos anaeróbios facultativos e obrigatórios.

A degradação anaeróbia de matéria orgânica complexa a metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), envolve a interação de quatro diferentes grupos metabólicos de microrganismos, denominados de hidrolíticos, acetogênicos, acidogênicos e metanogênicos (SKOUTERIS *et al.*, 2012). Na Figura 1 distinguem-se os quatro processos principais na conversão do material celular para biogás. (VAN HANDELL; MARAIS, 1999).

Os processos anaeróbios envolvem etapas metabólicas sequenciais, que dependem das atividades de bactérias hidrolíticas fermentativas, as quais solubilizam as moléculas orgânicas complexas ou biopolímeros, facilitando a ação de outro grupo bacteriano que usa como substratos os detritos dos anteriores e que é desenvolvido pelas bactérias produtoras de ácidos ou acidogênicas que, por sua vez, são biodegradados pelas bactérias acetogênicas e, em sequência, os microrganismos metanogênicos usam como substratos os produtos da etapa anterior para produzir biogás com abundante metano (AQUINO; CHERNICHARO, 2005).

Figura 1: Sequências metabólicas envolvidas na digestão anaeróbia (os números referem-se às porcentagens de Demanda Química de Oxigênio – DQO).



Fonte: Van Haandel; Lettinga (1994).

Na hidrólise, as macromoléculas como proteínas, polissacarídeos e gorduras são convertidas por processos biológicos e químicos em moléculas de menor peso molecular que são solúveis em água, como aminoácidos, açúcares e ácidos graxos. A hidrólise é um processo lento e normalmente limita a taxa de digestão anaeróbia de lodo de excesso.

No segundo processo, acidogênese, os produtos solúveis da hidrólise são convertidos em compostos simples de baixo peso molecular como ácidos voláteis (ácido acético, propiônico, butírico, etc.) álcoois, aldeídos, além de gases como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrogênio (H<sub>2</sub>), amônia (NH<sub>3</sub>) e sulfídrico (H<sub>2</sub>S). Enquanto que na acetogênese, os produtos da acidificação são convertidos em ácido acético (CH<sub>3</sub>COOH), hidrogênio e gás carbônico por bactérias acetogênicas.

No último processo da digestão anaeróbia, os produtos da fermentação ácida (hidrólise, acidogênese e acetogênese) são convertidos em produtos gasosos estáveis que se despreendem da fase líquida: metano e dióxido de carbono. Somente, nesta última etapa, há efetivamente remoção do material orgânico da fase líquida.

O tratamento anaeróbio oferece, em geral, algumas vantagens significativas quando comparado ao tratamento aeróbio. Giménez *et al.* (2012) destacam que, enquanto no tratamento aeróbio grande parte da matéria orgânica é apenas convertida para outras formas

como novas células, no tratamento anaeróbio a maior parte dos materiais biodegradáveis é de fato estabilizada (cerca de 78%) e convertida a gás metano. Outras vantagens do tratamento anaeróbio são o reduzido consumo de energia por não haver fornecimento de oxigênio, baixo custo de implantação, baixo requerimento de nutrientes (N e P), geração do gás metano e de nutrientes como subprodutos, possibilidade de preservação da biomassa ativa após longos períodos sem alimentação do reator e capacidade de suportar a aplicação de altas cargas orgânicas (LIN *et al.*, 2013).

Há anos a digestão anaeróbia vem sendo utilizada da matéria orgânica de esgoto doméstico (ABE *et al.*, 2011). A digestão anaeróbia é reconhecida como uma tecnologia importante no tratamento de esgoto doméstico. Apesar das limitações que o tratamento anaeróbio pode oferecer, a maioria destes problemas pode ser contornada com a devida operação e controle dos reatores.

### **3.2 Comparação entre os processos de membrana e tratamento convencional de efluentes**

Em comparação com as técnicas convencionais de tratamento de efluentes, os biorreatores com membrana apresentam uma série de vantagens. A primeira comparação que pode ser feita é a relativa ao número de etapas envolvidas em cada processo. Enquanto que no de técnicas convencionais são necessário 7 etapas, no sistema de biorreatores de membrana são utilizadas geralmente de 2 a 3. Nos biorreatores de membrana, as membranas substituem o decantador secundário e o filtro de areia, pois as membranas são capazes de reter completamente a biomassa produzindo um efluente tratado de melhor qualidade. Além disso, como o efluente tratado deve estar livre de micro-organismos, o processo elimina a necessidade de uma etapa de desinfecção.

Concentrações extremamente altas de biomassa são inaceitáveis em sistemas de tratamento convencional em função da possibilidade de problemas como sobrecarga do processo de clarificação subsequente, bem como da dificuldade de transferência de quantidades de oxigênio adequada.

Logo, no tratamento convencional, o dimensionamento do decantador secundário é dependente da concentração de biomassa no reator biológico e da sedimentabilidade do lodo. Como nos biorreatores de membrana não é necessário esta preocupação com o decantador, é possível trabalhar com concentrações muito elevadas de biomassa no reator biológico. A alta

concentração de micro-organismos no reator permite que picos de cargas orgânicas e macromoléculas de lenta degradação tenham mais chance de serem degradadas.

Com um número reduzido de etapas e considerando que o volume do reator biológico do biorreator de membrana será menor, devido a alta concentração de biomassa, os biorreatores de membrana ocupam áreas muito menores que as técnicas convencionais de tratamento de efluentes, tornando menor o custo com relação à área e facilitando a sua instalação em regiões de grande concentração populacional, podendo ser instalado, inclusive, em condomínios e centros comerciais.

Ainda pode ser considerada a vantagem econômica e ambiental em relação à redução do uso de agentes químicos no processo de tratamento, tais como floculantes, coagulantes, produtos para correção de pH, desinfetantes, entre outros.

Entre as vantagens operacionais, pode ser citado o controle do tempo de detenção celular de forma totalmente independente do tempo de retenção hidráulica que permite a operação com concentrações mais altas de biomassa, isto implica na degradação mais eficiente dos poluentes e uma menor geração de lodo (CHOI *et al.*, 2002).

### **3.3 Biorreatores Anaeróbios de Membrana Dinâmica**

Lin *et al.* (2013) conceituam biorreatores anaeróbios de membrana diante de relatos feitos por Grethlein (1978), que usou membrana externa de fluxo tangencial para tratar efluentes de tanques sépticos. Com três décadas de desenvolvimento, as vantagens do sistema de biorreatores anaeróbio de membrana foram comprovadas na literatura. Reconhecido o valor desse sistema, tanto o setor privado quanto o governamental, realizaram investimentos consideráveis para promover os mesmos. Até a década de 90, os sistemas de biorreatores anaeróbio de membrana disponíveis comercialmente eram em sua maioria de configuração externa. A partir do sucesso de biorreatores de membrana aeróbios submersos, no início dos anos 2000, houve um grande incentivo na exploração de biorreatores anaeróbio de membrana submersos para o tratamento de águas residuárias. Também nos anos 2000, os estudos focaram no desempenho do sistema, nas características de filtração, na caracterização da incrustação e o controle na membrana.

Skouteris *et al.* (2012) relatam que embora os biorreatores de membrana sejam aplicados principalmente em condições aeróbias, os biorreatores anaeróbios têm recebido grande atenção. Os biorreatores anaeróbio de membrana combinam digestão anaeróbia com

separação por membrana e têm sido utilizados no tratamento de resíduos orgânicos e águas residuárias, a fim de melhorar a qualidade do efluente e produzir metano (DHAR *et al.*, 2013).

A integração de membranas com biorreatores anaeróbios tem o potencial de reduzir substancialmente o volume do biorreator por facilitar a separação entre o tempo de detenção hidráulica e o tempo de retenção celular. A operação desses biorreatores ocorre com tempos de detenção hidráulica relativamente mais curtos e longos tempos de retenção celular, ou seja, a biomassa no biorreator é retida por mais tempo que o lodo. Tal fato pode levar a redução o volume do biorreator, enquanto alcança altas taxas de digestão e melhora o desempenho do sistema (DAGNEW *et al.*, 2012).

O processo de biorreator anaeróbio de membranas tem atraído grande interesse nos últimos anos, devido à geração de efluente de alta qualidade, pequeno espaço requerido, alta atividade metabólica, baixa produção de lodo de excesso, recuperação de energia, operação em condições ambientais desfavoráveis (alta salinidade, altas temperaturas, altas concentrações de SS, etc.) e forte capacidade de resistir a choques de carga (DERELI *et al.*, 2012; HO; SUNG, 2010; WEI *et al.*, 2011). Entretanto, ao biorreator anaeróbio de membrana dinâmica está associado um alto consumo de energia, devido as bombas de alta pressão que são utilizadas para a filtração e os problemas de incrustação das membranas (CHEN *et al.*, 2014).

Os biorreatores com membrana são baseados na conjugação de um reator biológico e um módulo de membranas porosas de baixa pressão. Devido ao volume reduzido ocupado pelos Biorreatores de Membrana, o seu uso favorece a descentralização do tratamento de efluentes e pode ser implantado em áreas urbanas.

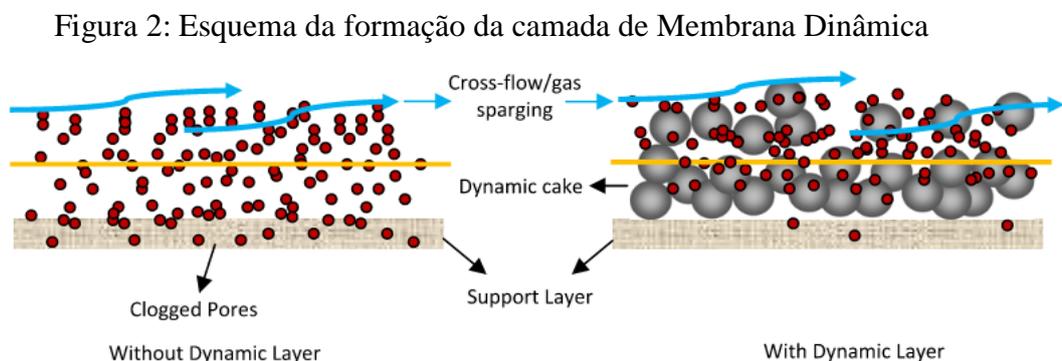
A produção e utilização de membranas sintéticas vêm sendo realizadas há décadas. No entanto, foi a partir dos últimos 50 anos que estas membranas ganharam maior importância como processo de separação, sobretudo, no setor industrial (REIF, 2006). Atualmente, a tecnologia de membranas tem encontrado inúmeras aplicações em diferentes áreas, em que se destaca a sua utilização em processos industriais para produção de alimentos, na dessalinização de água para consumo humano e mais recentemente no tratamento de águas residuárias (FANE *et al.*, 2011).

Os biorreatores de membrana aeróbios são mais amplamente utilizados, mas nos últimos anos têm se intensificado as pesquisas e aplicações dos biorreatores com membrana anaeróbios. Estes últimos têm grande potencial de aplicação, principalmente quando as condições de retenção da biomassa pelos métodos convencionais não podem ser alcançadas, e quando se deseja um efluente clarificado, livre de sólidos suspensos e desinfetado.

Segundo Judd (2008), a aplicação da digestão anaeróbia é uma opção para reduzir a demanda energética em biorreatores com membrana, como resultado do não requerimento de energia para a aeração e da produção de metano, que é um gás com potencial energético.

Neste processo, utiliza-se um material suporte composto por uma membrana de base (constituída por um tecido de algodão ou de polietileno) acoplada a um módulo e acima desta ocorrerá a formação da membrana dinâmica. Esta retém em um material biológico denominado torta, a maior quantidade de partículas orgânicas (que continuam sendo biodegradadas) e inorgânicas, assim como nutrientes e eventuais metais (ERSAHIN *et al.*, 2012).

A membrana dinâmica é uma biomembrana também chamada de membrana biológica ou secundária, por precisar da membrana real que funciona como suporte, possuindo poros relativamente grandes, na ordem de 10 $\mu$ m. Entre as vantagens desta tecnologia estão o alto fluxo de filtração, o baixo custo do módulo de membrana e a facilidade de lavagem. É indispensável no processo de separação por membrana dinâmica a formação de uma camada biológica que se deposita sobre o tecido, constituindo a membrana dinâmica. Esta se forma pela deposição de bactérias e de outros microrganismos do esgoto, lodo com material orgânico e inorgânico, seja na forma de partículas ou de flocos de lodo, sobre a membrana de base (tecido), formando, então, uma membrana biológica (ALIBARDI *et al.*, 2014), como ilustrado na Figura 2.



Fonte: Ersahin *et al.*, 2012.

Esses microrganismos se aderem à membrana de tecido, onde se reproduzem, o colonizam e formam um biofilme que cresce sobre essa membrana suporte. A membrana dinâmica formada sobre a membrana suporte cresce, perde fragmentos, se regenera, aumenta sua espessura e melhora sua capacidade de retenção dos sólidos dos lodos orgânicos,

inorgânicos e metais, entre outros materiais presentes e, assim, se comporta continuamente, por isso é denominada membrana dinâmica. A medição da pressão transmembrana, indica o aumento da resistência à filtração durante o processo, resultante da formação da camada da torta que além dos microrganismos, contém as impurezas que chegam a atingir os poros da membrana basal, causando *fouling* sobre esta membrana suporte, diminuindo o fluxo do permeado. No entanto, o processo de deposição é significativamente mais lento por causa da adsorção dessas partículas na membrana dinâmica (CHU *et al.*, 2014).

A incrustação resulta do acúmulo de fibras e flocos orgânicos e inorgânicos nos poros da membrana da base, incluindo a biomassa suspensa, sólidos coloidais, necessitando, assim, de limpeza periódica, sendo que na membrana dinâmica essa frequência é reduzida. Outro benefício é a substituição natural da membrana biológica (SMITH *et al.*, 2012).

De acordo com Chu *et al.* (2014), o biorreator anaeróbio de membrana dinâmica possui excelente desempenho operacional, como altas eficiências de remoção de poluentes e boa capacidade de filtração de partículas, evitando ou retardando a incrustação nos poros da membrana suporte. O biorreator anaeróbio de membrana dinâmica destaca-se como novo processo de tratamento de águas residuárias pela sua maior eficiência e baixo custo, em comparação com o biorreatores de membrana que possui alto custo, elevado gasto de energia e rápida incrustação.

Hu *et al.* (2018) afirmaram que formando-se a camada de torta sobre a membrana suporte, muito espessa, e com alta resistência de filtração, a mesma será naturalmente removida e substituída por uma nova camada dinâmica que será formada e depositada. A membrana dinâmica uma vez formada e estabilizada atinge uma fase na qual a operação também atinge estabilidade, obtendo-se alta qualidade do efluente devido ao bom desempenho de separação sólido-líquido com a membrana dinâmica formada.

Diferentes tipos de materiais baratos como malhas, tecidos com macroporos e filtros de pano podem ser usados como meio filtrante, ao invés de membranas de microfiltração ou ultrafiltração, para a criação da camada da membrana (CHU; LI, 2006). A lavagem com água, ar ou escovação pode ser o suficiente para limpeza da mesma, sem a utilização de reagentes químicos. No entanto, dependendo do material de suporte, a limpeza pode ser acompanhada pela perda temporária da qualidade do efluente (CHU *et al.*, 2014; ERSAHIN *et al.*, 2012).

Uma das principais vantagens é que o suporte de membrana em si pode não ser mais necessária, uma vez que a retenção dos sólidos é conseguida pela camada da membrana secundária que pode ser formada e reformada no local como uma membrana auto-dinâmica (ERSAHIN *et al.*, 2012). Uma vez que a membrana for gravemente obstruída, a camada

dinâmica pode ser substituída por uma nova deposição da camada. Assim, os custos de compra e substituição física da nova membrana serão poupados (ZHANG *et al.*, 2011).

Hu (2018) viu que configurações com módulo de membrana dinâmica e a formação, desempenharam bem em questão de remoção de poluentes.

A membrana dinâmica além de apresentar quase todas as características pertencentes a uma membrana comum, também tem distintas características, tais como menores despesas, baixo consumo de energia e alto fluxo (LIU *et al.*, 2009). Logo, o processo de Membrana Dinâmica pode ser apontado como uma alternativa promissora para resolver os problemas encontrados em biorreatores anaeróbio de membrana, como, por exemplo, os elevados custos dos módulos das membranas, demanda de energia, redução dos fluxos das membranas (MA *et al.*, 2013).

Os estudos de Alibardi, Bernava e Cossu (2014), utilizaram um biorreator anaeróbio de membrana dinâmica para avaliar o tratamento de águas residuárias à temperatura ambiente, a fim de melhorar a capacidade de filtração e reduzir o consumo de energia. O sistema atingiu remoções orgânicas, média superior a 80% e 90%, para DQO total e filtrada respectivamente, além de que a membrana dinâmica desempenhou um papel significativo na obtenção da eficiência de remoção de orgânicos.

Liao *et al.* (2010) e Direli *et al.* (2012) investigaram como o tempo de detenção hidráulica e tempo de retenção de sólidos em biorreatores anaeróbio de membrana dinâmica pode ser controlada de forma independente para estender a aplicabilidade do processo para o tratamento de águas residuais de indústrias de diferentes dosagens.

Chu (2014) investigou as características do biorreator de membrana dinâmica para tratamento de águas residuais, incluindo o desempenho operação, fluxo crítico da membrana dinâmica e a estrutura da torta, como o processo de tratamento de águas residuais exibiu excelente desempenho da operação, tais como elevada remoção de poluentes, boa capacidade de desempenho da operação.

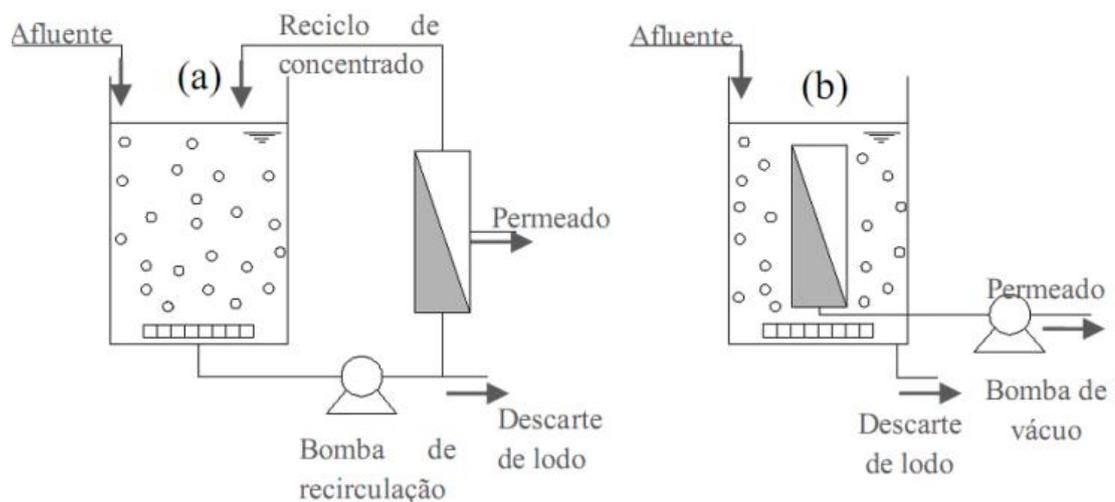
### **3.3.1 Operação do Biorreator Anaeróbio de Membrana Dinâmica**

Esses sistemas são essencialmente implementados baseados em duas configurações: configuração externa, com a membrana externa ao biorreator, ou configuração submersa com a membrana disposta no interior do biorreator. A Figura 3 ilustra essas duas configurações.

Os módulos submersos são inseridos dentro do reator biológico, as membranas são sujeitas a um vácuo no lado do permeado para permitir a filtração da solução das moléculas

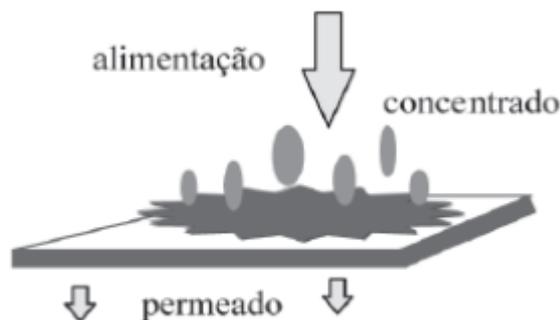
menores que o tamanho dos poros através da membrana, enquanto que os sólidos de tamanho maior que os poros da membrana são retidos no biorreator (SANTOS NEVES *et al.*, 2011). O módulo de membrana externo é acoplado externamente ao reator, dessa forma, a suspensão do biorreator é bombeada em direção ao módulo de membrana, o qual promove a separação em dois canais: o permeado que é removido e o do concentrado o qual retorna ao biorreator (LENS *et al.*, 2002; SANTOS NEVES *et al.*, 2011).

Figura 3: Módulo de membrana externo (a) e submerso (b) aplicado à biorreatores de membrana (Adaptado de Stephenson *et al.*, 2000)



Na configuração externa ou de fluxo perpendicular, a unidade da membrana é separada do biorreator e as membranas são operadas sobre pressão para produzir o permeado. Na Figura 3 é possível observar como ocorre a filtração de fluxo perpendicular na configuração externa.

Figura 4: Filtração de fluxo perpendicular em módulo de membrana de configuração externa



Fonte: SANTOS NEVES *et al.*, (2011).

Ambas as configurações, externa ou submersa, são eficientes e a opção entre uma e outra, dependerá de diversos fatores, como objetivo do uso, meta a ser alcançada, disponibilidade de espaço físico, consumo de energia, etc.

Os materiais das membranas podem ser agrupados em três grandes categorias: poliméricos, metálicos e inorgânicos (cerâmicas). As membranas cerâmicas foram muito utilizadas nos primeiros estudos sobre Biorreatores Anaeróbios de Membrana Dinâmica por apresentarem alta resistência à corrosão, abrasão e incrustações. Enquanto isso, as membranas metálicas também têm sido utilizadas apresentando um melhor desempenho hidráulico, melhor recuperação de incrustações, maior tolerância à oxidação e à altas temperaturas do que as membranas poliméricas. No entanto, as membranas inorgânicas e metálicas são muito mais caras quando comparadas com as poliméricas. Como a economia desses sistemas tornou-se gradualmente uma grande preocupação, as membranas poliméricas se tornaram mais interessantes na comunidade científica e nas aplicações comerciais nos últimos anos. Os materiais das membranas poliméricas podem ser de difluoreto de polivinilideno e polietersulfona, polietileno, polipropileno e polissulfona (LIN *et al.*, 2013).

### 3.3.2 Influência da Concentração de Sólidos

Sólidos dissolvidos (menores que 0,001  $\mu\text{m}$ ), coloidais (0,001 a 1,0  $\mu\text{m}$ ) e em suspensão (maiores que 1,0  $\mu\text{m}$ ) estão presentes no reator biológico e afetam de forma diferente o comportamento da membrana. Vários autores têm procurado investigar melhor a influência destas substâncias (WISNIEWSKI; GRASMICK, 2006; DEFRANCE *et al.*, 2012). Em princípio, mantidos constantes os outros parâmetros, o aumento da concentração de sólidos suspensos totais leva à diminuição do fluxo permeado. No entanto, esse efeito pode ser minimizado à medida que as condições hidrodinâmicas são melhoradas, aumentando a turbulência sobre a membrana.

Rosenberger e Kraume (2012) observaram que, para uma concentração de sólidos suspensos totais variando de 2.000 a 24.000mg/L, a influência da variação da concentração na filtrabilidade do lodo foi muito pequena.

Apesar da deposição de sólidos suspensos sobre a superfície da membrana, formando uma torta, ser o fator que mais afeta o fluxo em um biorreator anaeróbio de membrana dinâmica operado para o tratamento de esgotos, a espessura dessa torta pode ser minimizada melhorando-se as condições hidrodinâmicas.

### 3.3.3 Influência da Retrolavagem

A retrolavagem ajuda principalmente a remover os sólidos que se depositam sobre a superfície da membrana. De acordo com Mores *et al.*, (2000), o fluxo com retrolavagem pode superar em até seis vezes o fluxo sem retrolavagem. Os autores mencionam ainda que, se a pressão de retrolavagem e/ou a frequência forem muito baixas, a membrana pode não ser limpa adequadamente. É necessário verificar antes sob qual faixa de pressão (no sentido inverso ao da filtração) a membrana pode ser operada.

Bouhabila *et al.*, (2006) avaliaram um com membranas fibra oca (tamanho de poro de 0,1  $\mu\text{m}$ ) submersas no tanque de aeração. O estudo foi desenvolvido com uma concentração de SST de 27.000mg/L e com uma vazão de ar de 1,8 m<sup>3</sup>/h. Os autores verificaram que com retrolavagem periódica (quinze segundos a cada cinco minutos), para um fluxo permeado de 20L/m<sup>2</sup>.h, a resistência hidráulica foi reduzida em até dois terços do seu valor correspondente no sistema operado sem retrolavagem.

Kopser *et al.* (2008) descreveram o procedimento de retrolavagem geralmente empregado pela empresa Zenon (biorreator de membrana com módulo submerso, membranas fibra oca). A retrolavagem é realizada com permeado armazenado, no sentido do lúmen para a superfície externa das fibras por pressão positiva. A frequência é controlada por um controlador lógico programável e é tipicamente iniciada a cada trinta minutos com vinte segundos de duração.

### 3.4 Dimensões Legais e Regulatórias do Reuso

Em termos de reúso de água em nível nacional, o Brasil dispõe apenas da NBR 13969 que aborda o reúso como alternativa para destinação dos esgotos tratados e a Resolução 54 de 28 de novembro de 2005, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, que contém somente definições de tipos de reúsos, estabelece critérios de licenciamento e dá orientações gerais. Desse modo, verifica-se que não há uma norma específica sobre reúso de água que estabelece padrões de qualidade da água para quaisquer tipos de reúso. Torna-se, portanto, necessário, até que se disponha de regulamentação e de padrões nacionais, utilizar diretrizes internacionais (TELL; COSTA, 2007).

O uso de esgotos, principalmente para irrigação de culturas é associado a dois aspectos legais: estabelecimento de um status legal para os esgotos e delimitação de um regime legal para a utilização (HESPANHOL, 2002).

A Organização Mundial de Saúde (OMS) estabelece diretrizes que recomendam padrões de qualidade da água de reúso, de acordo com a aplicação da água. Convém destacar que essas diretrizes são recomendações e que se deve levar em conta a realidade econômica, social e climática de cada país onde o reúso será praticado (HESPANHOL, 1994).

De acordo com Organização Mundial de Saúde, as diretrizes para a utilização de esgotos tratados na irrigação de culturas agrícola são apresnetadas na tabela seguinte:

Tabela 1: Diretrizes de qualidade microbiologica recomendada para esgotos

Categoria	Tipos de Irrigação	Grupos de Exposição	Ovos de Helmintos
A	Irrigação de vegetais consumidos crus, campos de esporte, parques públicos	Trabalhadores e consumidores públicos	≤1
B	Irrigação de culturas de cereais, culturas forrageiras e árvores	Trabalhadores	≤1
C	Irrigação localizada de culturas na categoria " B", sem exposição de trabalhadores e do público em geral.	Não existentes	Não aplicável

Como é possível observar na Tabela 1, para a irrigação irrestrita, o efluente deve conter ≤ 1 ovo de nematódeos intestinais por litro e ≤ 1000 coliformes fecais por 100mL. Com esse padrão de qualidade de efluente, pode-se irrigar qualquer tipo de cultura agrícola, a exemplo das culturas listadas na categoria “A”. No caso de prática da irrigação restrita, o principal requisito de qualidade do efluente passa a ser com relação aos ovos de helmintos, uma vez que não há recomendações de padrão para coliformes fecais. No caso, podem ser irrigadas as culturas enquadradas na categoria “B”.

A demanda de água para o setor agrícola brasileira representa atualmente 70% do uso consumptível total, com forte tendência para chegar a 80% até o final desta década. Portanto, o significado que essas grandes vazões assumem em termos de gestão de recursos hídricos é de extrema importância que se atribua prioridade para institucionalizar, promover e regulamentar o reúso para fins agrícolas em âmbito nacional (ANA, 2018).

Hoje em dia, mais do que nunca a aplicação de esgotos e efluentes é vista como uma forma efetiva de controle da população, bem como uma alternativa viável para aumentar a disponibilidade hídrica, uma vez que utiliza água de qualidade inferior e disponibiliza água de melhor qualidade para fins mais nobres. Os maiores benefícios dessa tecnologia são os aspectos econômicos, ambientais e de saúde pública (HESPANHOL, 2002).

### **3.5 Contaminação por Ovos de Helmintos**

O uso de águas residuárias brutas e parcialmente tratadas para irrigação agrícola é uma prática comum no Brasil, porém utilizada de forma indiscriminada e sem proteger a saúde dos trabalhadores agrícolas e dos consumidores. A rega com águas residuárias pode propiciar um grande incremento na produção agrícola, uma vez que fornece os nutrientes necessários às plantas, principalmente o nitrogênio e o fósforo.

Naturalmente, o nível de incremento de produção dependerá de uma série de fatores, como tipo de cultura, disponibilidade de nutrientes nos esgotos e das demandas nutricionais das plantas, além das formas de manejo anteriormente praticadas, a exemplo da utilização ou não de adubação química. Todavia, a rega com águas residuárias apresenta uma potencialidade de risco muito grande no que se refere à contaminação por microrganismos patogênicos.

A exposição dos trabalhadores agrícolas a águas residuárias brutas ou parcialmente tratadas aumenta os riscos de infecção por helmintos em geral e, em especial, pelos nematodas. Os nematodas (*Ascaris*, *Trichuris* e os *Ancilostomídeos*) possuem um período de latência no solo antes de atingirem o hospedeiro e não necessitam de hospedeiro intermediário. Dessa forma, a importância de estudá-los deve-se à relação direta com o tipo de infecção que causam, seja pela inalação e ingestão de ovos ou pela penetração de larvas filarióides pela pele. Porém, o risco para a saúde humana depende do ciclo de vida e da rota de transmissão dos parasitas, além das condições ambientais que podem favorecer ou não a sobrevivência destes.

Desta maneira, para garantir a proteção dos trabalhadores e dos consumidores torna-se importante avaliar a presença de ovos de helmintos e de outros indicadores microbiológicos, além da adoção de medidas integradas de manejo que passam pela escolha da técnica adequada de irrigação e do tipo de cultura a ser utilizada no solo.

## **4. MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 Localização**

Os sistemas experimentais foram projetados, construídos e monitorados nas dependências físicas da Estação Experimental de Tratamento Biológico de Esgoto Sanitário (EXTRABES/UEPB). Esses laboratórios são pertencentes à Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), situados no bairro do Tambor, na cidade de Campina Grande, no estado da Paraíba, a uma altitude média de 551 metros. Nessa área se localizava na antiga depuradora da Companhia de Águas e Esgotos da Paraíba (CAGEPA), passando o interceptor leste que era responsável por tratar 70% de todo esse esgoto município na década de 70.

Com uma perspectiva de melhor estudar o biorreator de membrana dinâmica para tratamento de águas residuárias e sabendo que a pesquisa é um processo continuado e cauteloso que os experimentos necessitam ser embasados em repetições de modo a confirmar estatisticamente a sua validade, foi projetado um experimento de tratamento de esgoto sanitário e foi desenvolvido e operado ao longo de aproximadamente um ano. O experimento recebeu como afluente o esgoto advindo do mesmo ponto de captação. O experimento iniciou com a projeção e os dimensionamentos em dezembro de 2017, a montagem e estabilização do sistema entre janeiro a março de 2018 e, por fim, o desenvolvimento dos experimentos com suas respectivas análises que deu início em abril de 2018, tendo durado 6 meses de monitoramento estabilizado.

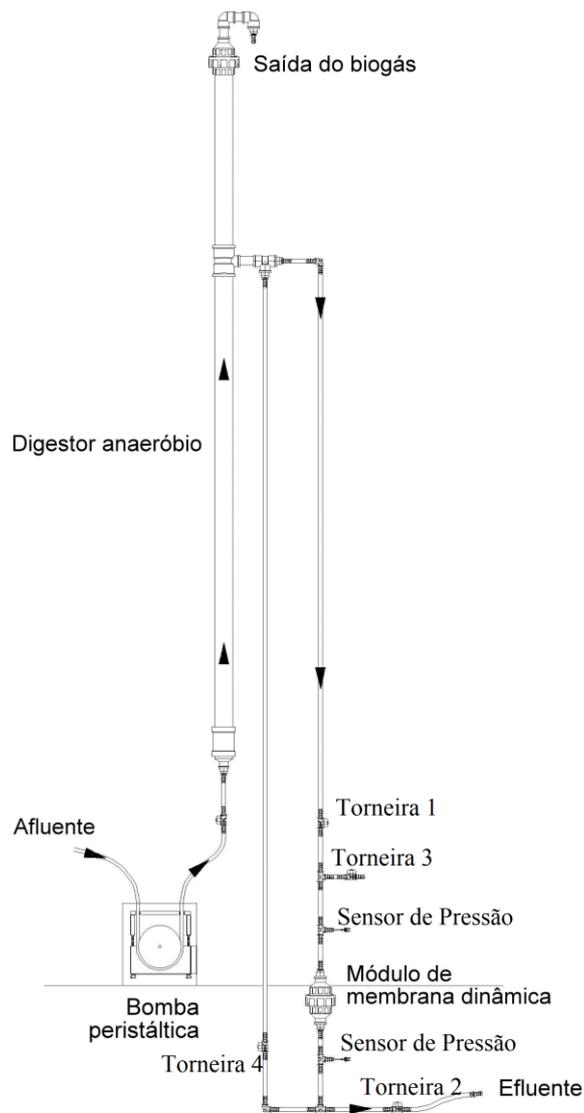
### **4.2 Descrição do Reator**

O sistema experimental utilizado durante o estudo foi composto por um digestor anaeróbio construído a partir de tubos e conexões de Policloreto de polivinila (PVC) e um módulo de membrana. O módulo de membrana dinâmica, por sua vez, é composto de uma estrutura de PVC e apresenta configuração externa de forma circular, com área total de filtração com dimensões de 4x4cm. No seu interior é encontrada uma malha de polietileno (suporte de membrana) com porosidade média de 90 $\mu$ m e uma malha de metal utilizada junto ao suporte de membrana para oferecer maior resistência à mesma quando for submetida a elevados gradientes de pressão dentro do reator, com filtração em fluxo tipo perpendicular.

Sensores de pressão foram instalados próximos ao módulo de membrana para registrar os valores da pressão transmembrana, conforme apresentado por Albuquerque (2017). Através desses foi realizado o acompanhamento do desenvolvimento da membrana dinâmica.

Na Figura 5 pode ser visualizado um esquema do sistema experimental com todos os seus componentes.

Figura 5: Esquema do sistema experimental



O efluente resultante do digestor anaeróbio era encaminhado por pressão hidráulica para o módulo membrana externa. Após passar pela membrana, o efluente saía por gravidade para um recipiente de coleta.

Para o acompanhamento do crescimento da membrana, tinha dois pontos de medição da pressão por sensores de pressão MPX4250, um antes e outro após o módulo de membrana, com acompanhamento constante online através da internet, utilizando a placa micro controladora ATmega328 do Arduino Uno, responsável pela comunicação entre o biorreator e o computador, ou seja, armazena os valores de pressões e, assim, disponibiliza através de relatórios gerados por um *software*. O *software* mostra informações em tempo real, como também disponibiliza uma ferramenta onde é possível consultar dados do biorreator de acordo com a data desejada.

No quadro 2 são apresentados os parâmetros operacionais adotados para o biorreator anaeróbio de membrana dinâmica.

Tabela 2: Parâmetros operacionais do Biorreator anaeróbio de Membrana Dinâmica

<b>Parâmetros Operacionais</b>	
Tempo de detenção hidráulica( TDH)	8 hrs
Tempo de retenção celular( TRC)	160dias
Vazão do permeado	0,3 L/h
Volume útil	3L
Altura do digestor	2m
Forma de Operação	Contínuo
Fluxo	Perpendicular

#### 4.2.1 Montagem do Módulo de Membrana

O módulo de membrana dinâmica, por sua vez, é composto de uma estrutura de PVC e apresenta configuração externa de forma circular (Figura 6), com área total de filtração com dimensões de 4x4cm. No seu interior é encontrada uma malha de metal ( Figura 8) utilizada junto ao suporte de membrana para oferecer maior resistência à mesma quando for submetida a elevados gradientes de pressão dentro do reator e uma malha de polietileno (suporte de membrana) com porosidade média de 90µm (Figura 9), com filtração em fluxo tipo perpendicular.



Figura 5: Módulo de membrana



Figura 6: Suporte de PVC e malhas



Figura 7: Malha de metal



Figura 8: Malha de polipropileno

#### 4.2.2 Processo de alimentação do Reator

O processo de alimentação de esgoto bruto no sistema foi realizado continuamente. Durante esse período de 24h o sistema produzia uma quantidade média de 10L de permeado, que era armazenado em um recipiente de coleta. Para manter o volume do reator constante a bomba ficava ligada constantemente, para que o sistema mantivesse sempre alimentado.

O reator era alimentado com esgoto doméstico bruto, por uma bomba peristáltica, programada para bombear 10L.dia<sup>-1</sup> do esgoto bruto no reservatório de alimentação diretamente para o digestor anaeróbio de fluxo ascensional.

Durante o primeiro dia de operação, o reator foi inoculado com um volume 1L de lodo, o lodo anaeróbio foi utilizado para facilitar a adaptação da biomassa microbiana do sistema para receber o esgoto doméstico. O lodo de inóculo apresenta concentrações de

sólidos voláteis de 24,3g/L, sendo inoculado apenas uma vez durante a operação do reator.

O lodo utilizado para alimentar o sistema tratava-se de lodo em excesso produzido por um reator sequencial em batelada, alimentado com esgoto municipal.

#### **4.2.3 Retrolavagem**

Quando necessário é preciso fazer a retrolavagem do sistema, em que uma porção do permeado era utilizada no sentido inverso ao da permeação, no qual eram empurradas as partículas aderidas à estrutura dos poros da membrana, para que o líquido removesse parcialmente, com uma frequência e vazão de acordo com as condições de operação do sistema.

Quando a retrolavagem é necessária, a saída 1 seja fechada enquanto as saídas 2 e 3 que se encontra fechada durante a permeação, sejam abertas para que aconteça o fluxo inverso no sistema até ser percebido uma diminuição no fluxo.

## 5. MONITORAMENTO DO SISTEMA EXPERIMENTAL

Para execução do projeto foi necessário adotar métodos de análise de padrões conhecidos e validados para pesquisa científica. As determinações da alcalinidade e ácidos graxos voláteis foram realizadas pelo métodos de Kapp (BUCHAUER, 1998). As demais análises físico-químicas: sólidos e suas frações, demanda química de oxigênio total, nitrogênio total, potencial hidrogeniônico, fósforo total, obedeceram às recomendações analíticas preconizadas pelo “*Standard methods for the examination of water and wastewater*” (APHA, 2012). As análises de identificação dos Ovos de Helmintos seguiram um método diferente de acordo com o Lowry (mod. By Frølund et al., (1995)), Dubois et al. (1956) e o método de Bailenger (1979), modificado por Ayres e Mara (1996), respectivamente, também são validados, mas apresentados no subitem 5.1. Nesta tabela 2 são apresentados os parâmetros analíticos utilizados e a descrição da metodologia adotada.

O monitoramento do sistema experimental foi constituído por coletas de amostras de esgoto doméstico que alimentará o biorreator anaeróbio de membrana dinâmica. As análises laboratoriais foram realizadas uma vez na semana, com exceção da análise de cor e turbidez que foram realizadas diariamente.

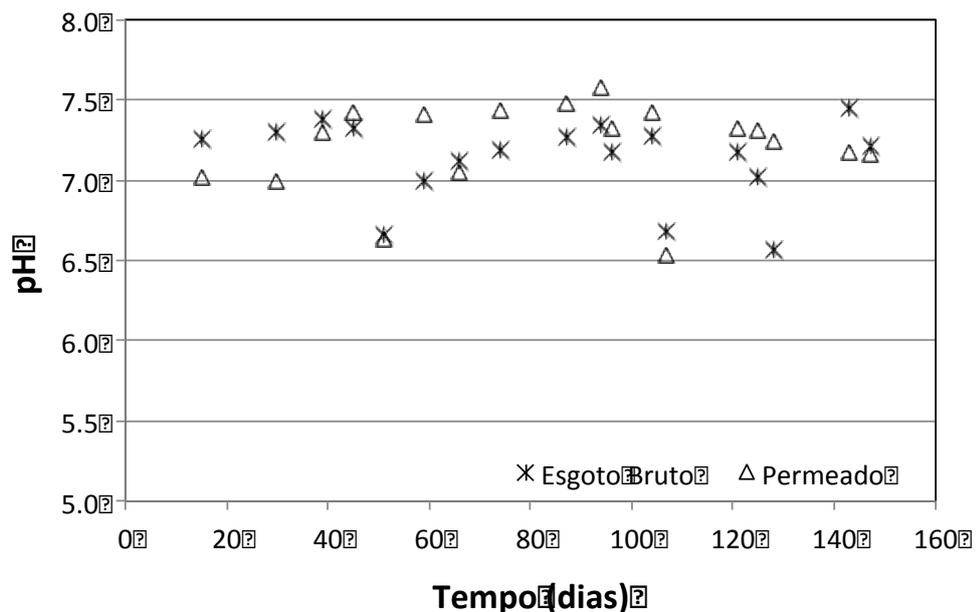
## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Qualidade do Permeado

Com o objetivo principal de avaliar o desempenho de um biorreator anaeróbio de membrana dinâmica no tratamento de águas residuárias domésticas, bem como ter uma melhor informação do processor de filtração com essa tecnologia para o tratamento de águas residuárias para reuso agrícola, foram analisadas com os parâmetros operacionais do reator a remover matéria orgânica e a remoção de ovos de helmintos do esgoto doméstico.

Diante dos resultados de pH, AGV e Alcalinidade Total, observou-se na figura 10 que o reator manteve em um intervalo de pH entre 7,0 e 7,5 intervalos de pH encontrados para Esgoto Bruto e permeado respectivamente. Isso demonstra que os ácidos graxos voláteis estavam na sua grande maioria ionizada. O reator demonstrou boas condições de tamponamento, o que a Figura 10e 11 nos mostra:

Figura 9: pH do Esgoto Bruto e permeado durante o período de operação



Os valores de pH geralmente desejados em um tratamento anaeróbio estão entre 6,7 e 8,0, onde os ácidos orgânicos estão em maioria em sua forma ionizada. Quando o pH diminui, os ácidos graxos voláteis estão menos desassociados. A um pH em torno de 5, os ácidos graxos voláteis estarão desassociados em 50% aproximadamente.

Recomenda-se então manter o reator e um intervalo de pH entre 7,0 e 7,5. Os intervalos de pH encontrados para afluente e efluente do reator UASB foram 6,8 à 7,8 respectivamente de acordo com Campos *et al.* (2010).

Estes três fatores estão inter relacionados, sendo fundamentais para o controle e a operação adequada dos processos biológicos envolvidos nos reatores anaeróbios.

Figura 10: Alcalinidade Total do Esgoto Bruto e permeado durante o período de operação

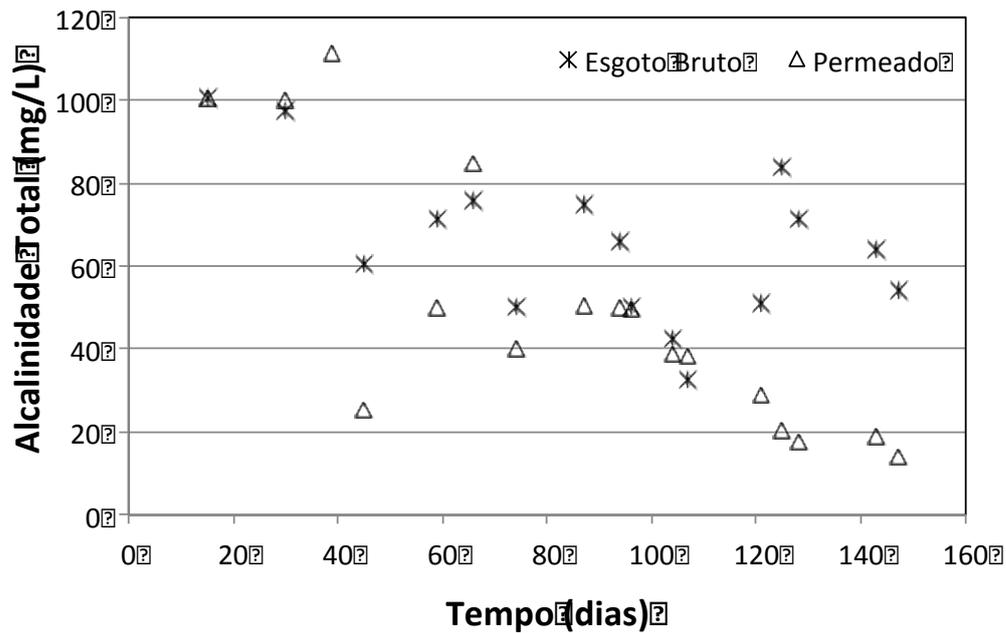
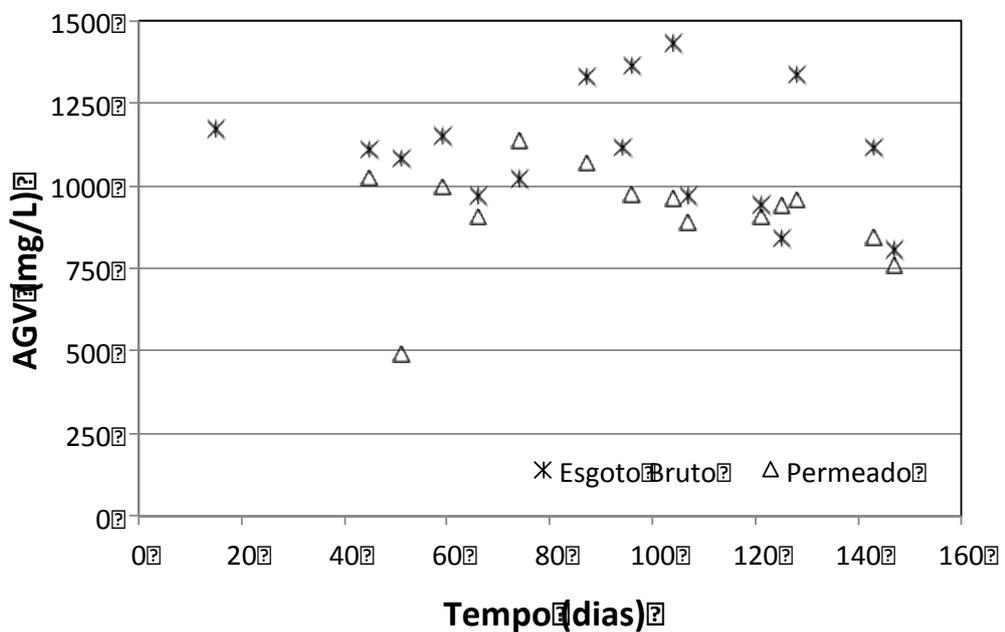


Figura 11: AGV do Esgoto Bruto e permeado durante o período de operação



Morais (2016), durante todo o período experimental, os valores de pH do afluente mantiveram-se no intervalo de 7,0 a 8,5 unidades de pH. Os valores de pH no efluente dos reatores UASB variaram dentro dessa faixa, indicando que a alcalinidade introduzida no afluente foi suficiente para prevenir reduções significativas dos valores de pH.

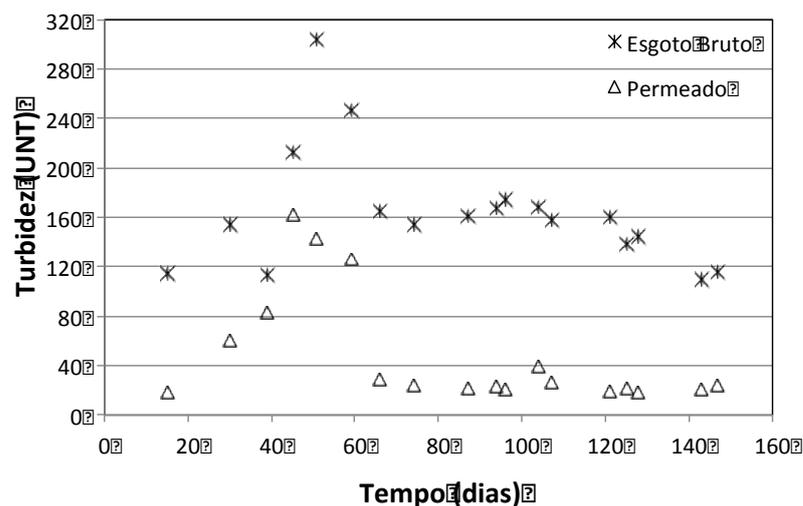
Em dois meses foi observado o estágio de formação da camada de separação e constitui um fator importante na qualidade do permeado. Adotar um tempo de retenção celular abaixo de 60 dias implicaria em um permeado ainda bastante poluente.

Os resultados obtidos nesse estudo estão de acordo com a afirmação de Ersahin *et al.* (2016), ao citarem que em biorreatores com membrana dinâmica baixos de turbidez não podem ser alcançados devido a retenção de partículas nesse tipo de sistema ser realizada por uma torta. Contudo, foram encontrados valores de turbidez semelhantes ao realizar tratamento de esgoto com membrana dinâmica. Resultados semelhantes foram reportados por Fuchs *et al.* (2005) e Chuet *et al.* (2014) ao realizarem o tratamento de esgoto doméstico com essa tecnologia.

Lier *et al.* (2016), descreve que após a inoculação, o reator UASB foi iniciado com as águas domésticas tendo uma remoção estável de turbidez foi alcançando em  $83 \pm 5\%$ .

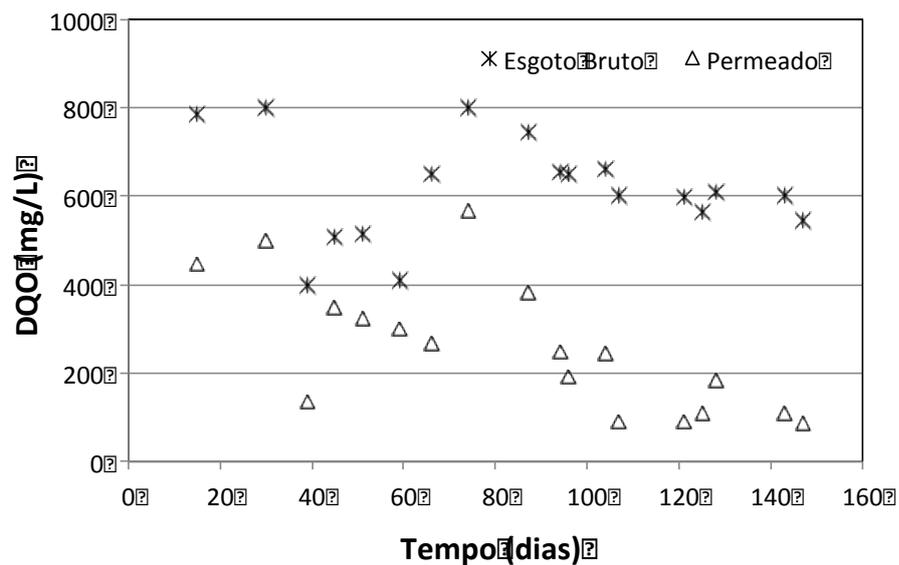
A remoção de material dissolvido pela membrana também foi percebida através dos valores de turbidez do permeado. Na Figura 13 aponta que durante os primeiros dias de operação houve uma pequena remoção da turbidez. Porém, a partir de 60 dias de operação, observa-se um aumento na remoção da turbidez, mantendo uma mesma faixa até os dias finais de operação. A partir de 100 dias de operação, a eficiência de 89,97% e um permeado com turbidez de 18NTU foi alcançado, mantendo-se nessa faixa até o final do experimento.

Figura 12: Turbidez do Esgoto Bruto e permeado durante o período de operação



Na Figura 14 estão apresentados os valores de DQOt e sua eficiência de remoção no permeado. Durante os dois primeiros meses em média de operação, foi observado algumas variações na remoção da DQOt do permeado. No entanto, após esse intervalo observou-se uma variação muito significativa, sendo observada uma eficiência média de remoção de 84%. A partir de 104 dias de operação, concentrações de DQOt abaixo de 248 mg/L foram alcançadas.

Figura 13: DQOt do Esgoto Bruto e permeado durante o período de operação



De acordo com Chu *et al.* (2014), as performances encontradas são comparáveis a biorreatores anaeróbios de membrana, cuja eficiências de remoção da DQOt normalmente variam de 75% a 99%.

Ersahin *et al.* (2014) explicam que as elevadas eficiências de remoção com membranas se devem ao fato de que a DQOt particulada pode facilmente ser removida através da adsorção e biodegradação por microrganismos, bem como pela retenção na própria membrana dinâmica.

Baseado nos valores de remoção da DQOt fica claro a necessidade de um período para que o sistema começasse a desenvolver as condições ótimas.

A maioria das investigações que aplicam a tecnologia UASB, Lew *et al.* (2004) relataram uma remoção de DQO de 48% e 70%, quando da aplicação de um reator UASB para o tratamento de efluentes domésticos. Grin *et al.* (1983) relataram que reatores UASB tratando águas residuárias não tratadas só podem alcançar uma remoção total de DQO entre 30 e 50%.

Elmitwalli *et al.* (2007) descreveram 31% da remoção total de DQO em um reator UASB tratando água residuária.

Outro parâmetro de grande importância para caracterizar o permeado trata-se da presença de nutrientes, como fósforo e nitrogênio. Como vemos nas Figuras 15 e 16, respectivamente, durante o experimento foi possível obter um permeado com uma concentração de  $5,23 \pm 1,21$  mg/L de fósforo total e  $36,18 \pm 21,2$  mg/L de NTK, implicando em uma eficiência de remoção de 88% e 83%, respectivamente.

Figura 14: Fósforo Total do Esgoto Bruto e permeado durante o período de operação

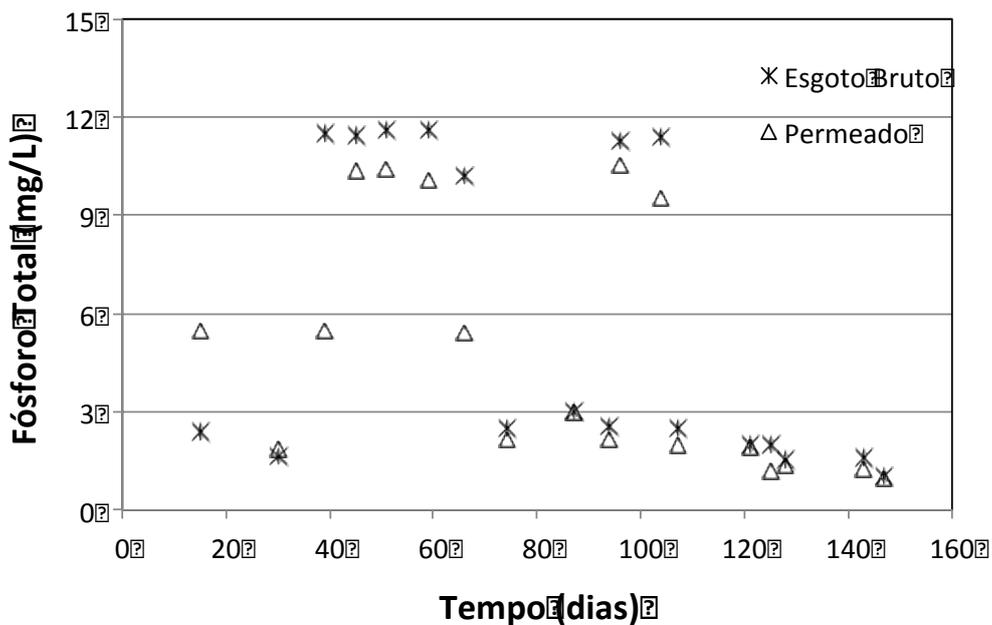
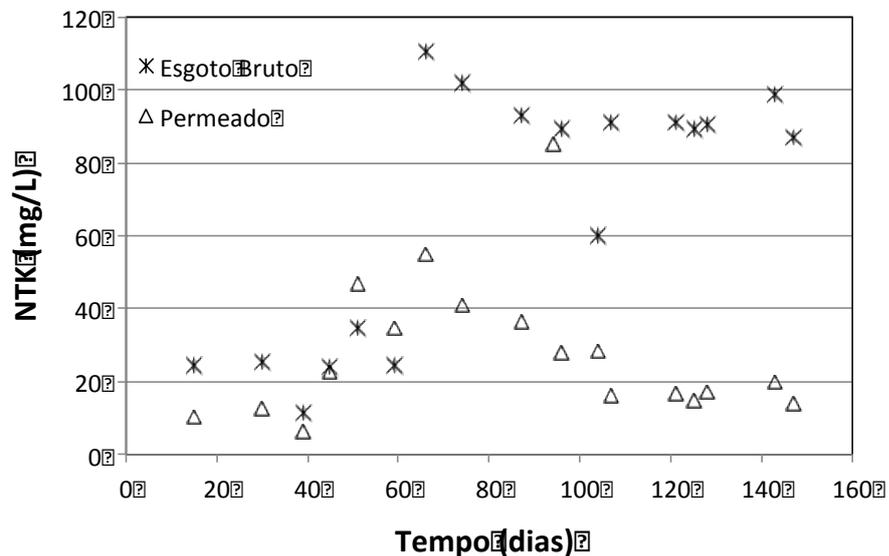
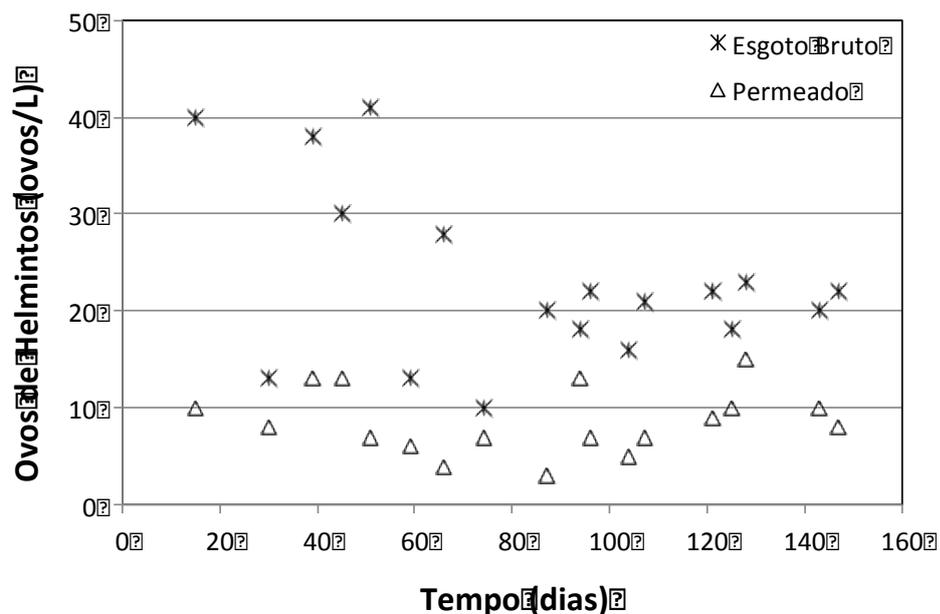


Figura 15 NTK do Esgoto Bruto e permeado durante o período de operação



Os resultados de contagem de ovos de helmintos encontram-se na Figura 17. Pode-se observar que, excetuando-se a primeira amostra de esgoto bruto analisada, as demais apresentaram contagens de ovos de helmintos abaixo de 40 ovos/L, com uma média aritmética de 21 ovos/L. No efluente do reator foram obtidas contagens mais reduzidas, com média geral de 8 ovos/L, representando uma eficiência de remoção no reator da ordem de 61%, conforme pode-se verificar pela Figura 17.

Figura 16: Ovos de Helmintos do Esgoto Bruto e permeado durante o período de operação



Santos *et al.* (2012) avaliando ovos de helmintos em efluentes oriundo de reatores UASB observa-se que houve uma diminuição do número de ovos após o processamento do esgoto digerido por UASB, obtiveram uma eficiência média de remoção desses ovos foi 54%.

Em estudos feitos por Lier *et al.* (2016), encontraram resultados para todo o período da pesquisa uma concentração média total de ovos de helmintos muito alta nas águas residuárias, chegando a  $194 \pm 79$  ovos / L. Estes resultados concordam com pesquisas anteriores no Peru, Colômbia e Brasil (García Palacio, 2010; Navarro e Jimenez, 2011).

No Brasil diversos estudos foram elaborados a respeito da presença de ovos de helmintos no esgoto bruto. Mascarenhas *et al.* (2004), na cidade de Itabira-MG, observaram uma concentração de 111 ovos/L de esgoto bruto, já em Cuiabá-MT, Destro e Amorim (2007) relataram uma concentração de 16,9 ovos/L, enquanto Bastos *et al.*(2010), ao realizarem um

estudo a respeito da concentração de ovos no esgoto bruto da cidade de Viçosas-MG, obtiveram uma concentração média de 30,5 ovos/L.

Concentrações maiores foram observadas em estudos realizados no estado do Ceará por Brandão *et al.* (2002) e no estado da Paraíba, por Figueiredo *et al.* (2005), os quais apontaram uma média de 910 ovos/L e 217 ovos/L, respectivamente.

Em outros países em desenvolvimento como Burkina Faso, México e Índia a concentração de ovos observada no esgoto bruto foi de 15,9 ovos/L, 22,7 ovos/L e 38,12 ovos/L, respectivamente (JIMENEZ *et al.*, 2000; GUPTA *et al.* 2009; KONATÉ *et al.*, 2013).

No presente trabalho a concentração média observada, 22 ovos/L, foi menor que a relatada na maioria das pesquisas realizadas no Brasil, citadas acima. A concentração de ovos de helmintos no esgoto bruto, depende de fatores que vão desde a oferta de saneamento básico até as condições de saúde da população e varia muito conforme as especificidades de cada região.

Segundo Jimenez (2007), os ovos de helmintos nada mais são que partículas presentes no esgoto, deste modo os mecanismos para a remoção deste material são os mesmos utilizados para a remoção de SST: sedimentação, filtração e coagulação/floculação.

O desempenho de reatores anaeróbios na remoção de ovos de helmintos foi relatada por autores como Von Sperling *et al.* (2002), que estudaram a eficiência de um reator UASB (TDH = 5,5 horas) associado a uma lagoa de estabilização em chicana. O trabalho revelou que 75% dos ovos presentes no esgoto bruto foi removido pelo UASB. Já Mascarenhas *et al.* (2004), utilizando um TDH de 7,5 horas, conseguiram obter uma remoção de 85,5% dos ovos presentes.

No entanto, Verbyla *et al.* (2013) observaram uma eficiência de remoção por meio do UASB inferior, apenas 23%.

A remoção dos ovos, nos reatores UASB é decorrente dos processos da adsorção em flocos, além da sedimentação simples. Nos três trabalhos citados a cima uma maior remoção dos ovos foi alcançada após o efluente ser submetido ao pós-tratamento. Neste tipo de tratamento as formas infectantes de patógenos como helmintos e protozoários são removidas por sedimentação, sendo a alta eficiência uma consequência de altos tempos de detenção hidráulica.

De acordo com a Organização Mundial de Saúde, um TDH entre 8 e 10 dias é o suficiente para o cumprimento de suas recomendações, concentração menor que 1 ovo/L de efluente, para o reuso de águas residuárias para a irrigação de culturas (WHO, 2006b).

## 7. CONCLUSÕES

Durante o período experimental o sistema de biorreatores anaeróbio de membrana dinâmica tratando esgoto doméstico teve um desempenho muito promissor. As concentrações de DQOt apresentam uma remoção de 84% resultando em um permeado com concentrações de 268mg/L à 89mg/L.

Para P e N, observou-se uma remoção de 88% e 83% resultando em concentrações de  $5,23 \pm 1,21$ mg/L de fósforo total e  $36,18 \pm 21,2$ mg/L de NTK, respectivamente.

Diante dos resultados de pH, AGV e Alcalinidade Total, observou-se na Figura 12 que o reator manteve em um intervalo de pH entre 7,0 e 7,5 intervalos de pH encontrados para Esgoto Bruto e permeado respectivamente. Isso demonstra que os ácidos graxos voláteis estavam na sua maioria ionizada. O reator demonstrou boas condições de tamponamento.

Os resultados de contagem de ovos de helmintos observam-se que, excetuando-se a primeira amostra de esgoto bruto analisada, as demais apresentaram contagens de ovos de helmintos abaixo de 40 ovos/L, com uma média aritmética de 21 ovos/L. No efluente do reator foram obtidas contagens mais reduzidas, com média geral de 8 ovos/L, representando uma eficiência de remoção no reator da ordem de 61%.

Além disso, baseado nos estágios de desenvolvimento da membrana foi possível compreender que durante o período de formação da camada de separação, o sistema desenvolve condições ótimas para operar com maior eficiência. Durante o período experimental o sistema de biorreatores anaeróbio de membrana dinâmica, foi possível verificar que a utilização da membrana dinâmica proporcionou um ótimo desempenho para a filtração do efluente, produzindo um permeado com características promissoras, demonstrando que a utilização dessa tecnologia consiste em uma alternativa bastante interessante para remoção de ovos de helmintos e possíveis reuso na área agrícola.

## 8. REFERÊNCIAS

- ABE, N.; TANG, Y-Q.; IWAMURA, M.; OHTA, H.; MORIMURA, S.; KIDA, K. Development of an efficient process for the treatment of residual sludge discharged from an anaerobic digester in a sewage treatment plant. In. **Bioresource Technology**. n. 102, p. 7641-7644, 2011.
- ALIBARDI, L.; COSSU, R.; SALEEM, M.; SPAGNI, A. Development and permeability of a dynamic membrane for anaerobic wastewater treatment. In. **Bioresource Technology**. n. 161, p. 236–244, 2014.
- AQUINO, S.F.; CHERNICHARO, C.A. Acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGVs) em reatores anaeróbios sob estresse: causas e estratégias de controle. In. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**. v. 10, n. 2, p. 152-161, 2005.
- AMANI, T.; NORASTI, M.; SREEKRISHNAN, T.R. Anaerobic digestion from the viewpoint of microbiological, chemical, and operational aspects – a review. In. **NRC Research Press**. n. 18, 2010.
- BAE, T-H.; TAK, T-M. Interpretation of fouling characteristics of ultrafiltration membranes during the filtration of membrane bioreactor mixed liquor. In. **Journal of Membrane Science**. n. 264, p. 151-160, 2005.
- BARBOSA, M. A. G. **Calibração e uso de sensores FDR para determinação da umidade e salinidade em dois tipos de solos**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação Irrigação e Drenagem, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró - RN, 2011.
- CHU, H.; ZHANG, Y.; ZHOU, X.; ZHAO, Y.; DONG, B.; ZHANG, H. Dynamic membrane bioreactor for wastewater treatment: Operation, critical flux, and dynamic membrane structure. In. **Journal of Membrane Science**. n.450, p. 265-271, 2014.
- DERELI, R.K.; ERSAHIN, M.E.; OZGUN, H.; OZTURK, I.; JEISON, D.; VAN DER ZEE, F.; VAN LIER, J.B. Potentials of anaerobic membrane bioreactors to overcome treatment limitations induced by industrial wastewaters. In. **Bioresource Technology**. n. 122, p. 160-170, 2012.
- DHAR, B-R.; GAO, Y.; YEO, H.; LEE, H-S. Separation of competitive microorganisms using anaerobic membrane bioreactors as pretreatment to microbial electrochemical cells. In. **Bioresource Technology**. n. 148, p. 208-214, 2013.
- DAGNEW, M.; PARKER, Q.; SETO, P. Anaerobic membrane bioreactors for treating waste activated sludge: Short term membrane fouling characterization and control tests. In. **Journal of Membrane Science**. n. 421-422, p.103–110, 2012.
- DERELI, R.K.; ERSAHIN, M.E.; OZGUN, H.; OZTURK, I.; JEISON, D.; VAN DER ZEE, F.; VAN LIER, J.B. Potentials of anaerobic membrane bioreactors to overcome treatment limitations induced by industrial wastewaters. In. **Bioresource Technology**. n. 122, p. 160-170, 2012.

ERSAHIN, M.E.; OZGUN, H.; DERELI, R.K.; OZTURK, I.; ROEST, K.; VAN LIER, J.B. A review on dynamic membrane filtration: Materials, applications and future perspectives. In. **Bioresource Technology**. n. 122, p. 196-206, 2012.

ERSAHIN, M.E.; OZGUN, H.; DERELI, R.K.; OZTURK, I.; ROEST, K.; VAN LIER, J.B. A review on dynamic membrane filtration: Materials, applications and future perspectives. In. **Bioresource Technology**. n. 122, p. 196-206, 2012.

ERSAHIN, M.E.; OZGUN, H.; TAO, Y.; VAN LIER, J.B. Applicability of dynamic membrane technology in aerobic membrane bioreactor. In. **Water Research**. n. 48, p. 420-429, 2014.

GIMÉNEZ, J. B.; MARTÍ, N.; FERRER, J.; SECO, A. Methane recovery efficiency in a submerged anaerobic membrane bioreactor (SAnMBR) treating sulphate-rich urban wastewater: Evaluation of methane losses with the effluent. In. **Bioresource Technology**. n. 118, p. 67-72, 2012.

HO, J.; SUNG, S. Methanogenic activities in anaerobic membrane bioreactors (AnMBR) treating synthetic municipal wastewater. In. **Bioresource Technology**. n. 101, p. 2191-2196, 2010.

HU, Y.; WANG, X.C.; TIAN, W.; NGO, H.H.; CHEN, R. Towards stable operation of a dynamic membrane bioreactor (DMBR): operational process, behavior and retention effect of dynamic membrane. In. **Journal of Membrane Science**. n. 498, p. 20-29, 2018.

LE-CLECH, P.; CHEN, V.; FANE, T.A.G. Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. In. **Journal Membrane Science**, n. 28, p. 17-53, 2006.

LIU, H.; YANG, C.; PU, W.; ZHANG, J. Formation mechanism and structure of dynamic membrane in the dynamic membrane bioreactor. In. **Chemical Engineering Journal**. n.148, p. 290-295, 2009.

LIN, H.; PENG, W.; ZHANG, M.; CHEN, J.; HONG, H. ZHANG, Y. A review on anaerobic membrane bioreactors: applications, membrane fouling and future perspectives. In. **Desalination**. n. 314, p. 169-188, 2013.

LIU, Y.; LIU, H.; CUI, L.; ZHANG, K. The ration of food-to-microorganism (F/M) on membrane fouling of anaerobic membrane bioreactors treating low-strength wastewater. In. **Dessalination**. n. 297, p. 97-103, 2012.

METCALF & EDDY. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4 ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

MA, Z.; WANG, Z.; ZOU, X.; FENG, J.; WU, Z. Microbial communities in an anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for municipal wastewater treatment: Comparison of bulk sludge and cake layer. In. **Process Biochemistry**. n. 48, p.510-516, 2013.

SKOUTERIS, G.; HERMOSILLA, D.; LÓPEZ, P.; NEGRO, C.; BLANCO, A. Anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment: A review. In. **Chemical Engineering Journal**. n. 198-199, p. 138-148, 2012.

SKOUTERIS, G.; HERMOSILLA, D.; LÓPEZ, P.; NEGRO, C.; BLANCO, A. Anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment: a review. In. **Chemical Engineering Journal**. n. 198-199, p. 138-148, 2012.

SMITH, A.L.; STADLER, L.B.; LOVE, N.G.; SKERLOS, S.J.; RASKIN, L. Perspectives on anaerobic membrane bioreactor treatment of domestic wastewater: A critical review. In. **Bioresource Technology**. n. 122, p. 149-159, 2012.

PEREIRA, L. E.; CAMPOS, C. M. M.; MOTERANI, F.; Efeitos do pH, acidez e alcalinidade na microbiopra de um reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) tratando efluentes de suiocultura. *Revista Ambiente & Água - Na Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v. 4, n.3, 2009.

VAN HAANDEL, A.; MARAIS, G. **O comportamento do Sistema de Lodo Ativado: Teoria e Aplicação para Projetos e Operação**. Campina Grande: Epgraf, 1999, 488 p.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

ZHANG, X.; WANG, Z.; WU, Z.; WEI, T.; LU, F.; TONG, J.; MAI, S. Membrane fouling in an anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for municipal wastewater treatment: Characteristics of membrane foulants and bulk sludge. In. **Process Biochemistry**. n. 46, p. 1538-1544, 2011.

ZHANG, X.; WANG, Z.; WU, Z.; WEI, T.; LU, F.; TONG, J.; ZANG, L. Formation of dynamic membrane in an anaerobic membrane bioreactor for municipal wastewater treatment. In. **Chemical Engineering Journal**. n. 165, p. 175-183, 2010.

ZHANG, X.; WANG, Z.; WU, Z.; WEI, T.; LU, F.; TONG, J.; MAI, S. Membrane fouling in an anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for municipal wastewater treatment: Characteristics of membrane foulants and bulk sludge. In. **Process Biochemistry**. n. 46, p. 1538-1544, 2011.

WEI, Y.; LI, G.; WANG, B. Application of Granular Sludge Membrane Bioreactor in the Treatment of Wastewater. In. **Procedia Environmental Sciences**. n. 10, p. 108-111, 2011.

YE, M.; ZHANG, H.; WEI, Q.; LEI, H.; YANG, F.; ZHANG, X. Study on the suitable thickness of a PAC-precoated dynamic membrane coupled with a bioreactor for municipal wastewater treatment. In. **Desalination**. n. 194, p. 108-120, 2006.