



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

DISSERTAÇÃO

MEMBRANA DINÂMICA APLICADA EM BIORREATORES ANAERÓBIOS
TRATANDO ÁGUAS RESIDUÁRIAS DOMÉSTICAS CONCENTRADAS

ANDRÉ LUIZ MUNIZ BRITO

Campina Grande – PB

2022

ANDRÉ LUIZ MUNIZ BRITO

**MEMBRANA DINÂMICA APLICADA EM BIORREATORES ANAERÓBIOS
TRATANDO ÁGUAS RESIDUÁRIAS DOMÉSTICAS CONCENTRADAS**

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito para obtenção do título de mestre.

Área de concentração: Tecnologias de Tratamento de Água e de Resíduos

Orientador: Prof. Dr. Wilton Silva Lopes

Campina Grande – PB

2022

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.

B862m Brito, André Luiz Muniz.
Membrana dinâmica aplicada em biorreatores anaeróbios tratando águas residuárias domésticas concentradas [manuscrito] / André Luiz Muniz Brito. - 2022.
83 p. : il. colorido.

Digitado.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2022.

"Orientação : Prof. Dr. Wilton Silva Lopes, Coordenação do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT."

1. Tratamento anaeróbio. 2. Biorreator de membrana. 3. Matéria orgânica. I. Título

21. ed. CDD 628.3

ANDRÉ LUIZ MUNIZ BRITO

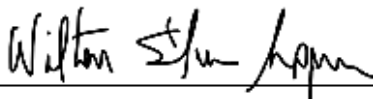
**MEMBRANA DINÂMICA APLICADA EM BIORREATORES ANAERÓBIOS
TRATANDO ÁGUAS RESIDUÁRIAS DOMÉSTICAS CONCENTRADAS**

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito para obtenção do título de mestre.

Área de concentração: Tecnologias de Tratamento de Água e de Resíduos

Dissertação de Mestrado apresentada e aprovada em: 24/02/2022

Banca Examinadora:



Wilton Silva Lopes, Prof. Dr.

(Orientador – Universidade Estadual da Paraíba – UEPB)

valderi duarte leite

Valderi Duarte Leite, Prof. Dr.

(Examinador Interno – Universidade Estadual da Paraíba – UEPB)



Luciano Matos Queiroz, Prof. Dr.

(Examinador Externo – Universidade Federal da Bahia - UFBA)

AGRADECIMENTOS

Ao vasto Universo. A natureza e todos seus fascinantes detalhes, tornando-a uma fonte inesgotável de conhecimento. A todas as estrelas que estiveram me guiando no nebuloso caminho do abismo, completamente cheio de Vazio, e tornando-o menos solitário. Estrelas essas, que em arranjos de ângulos singulares, e em um tempo de duas primaveras, formaram a maravilhosa constelação da minha vida, da qual tenho prazer de viver.

Meus pais, André Fiquene e Ana Cristina Muniz, que foram meu farol e fortaleza durante todas as oscilações desses anos incertos, além de ser uma fonte inesgotável de sabedoria, sem vocês essa dissertação não teria brilho. A minha irmã Arella Brito, por ter trazido leveza e o exemplo de determinação profissional. A todos meus familiares que de alguma forma me auxiliaram com sua ternura.

A minha companheira Ana (Bia) Siqueira, por ter sido minha confidente, musa inspiradora de vida e fonte inesgotável de amor, carinho e força.

Ao professor orientador Wilton Silva Lopes, por ter me guiado e dado suporte e acalmado em momentos de dúvida. Aos professores Valderi Duarte Leite e José Tavares de Sousa, por suas contribuições em encontros presenciais e remotos. Também a banca examinadora. Também ao CNPq pela bolsa concedida.

Aos amigos que a música me deu: Cláudio Monteverdi, Gabriel Pontes, Jaime Guimarães, Jairo Tellys, Pedro (Rot) e Thiago Macedo; nossos encontros e momentos de criação foram uma parcela importante para não perder minha sanidade. Aos amigos que o tempo me trouxe: Arthur Henriques, Laissa Vasconcelos e Nicolas Alves (e mais). Que honraram a definição da palavra “amizade”, por compartilharem ótimos momentos e me ajudarem a compreender a vida.

Ao pessoal do laboratório, Raniery Cirne, Evelyne Morgana, Wanderson Nascimento, Mariana Medeiros, Marília Patrício e Virgínia Albuquerque. Pudemos compartilhar um pouco de nossas angústias, saindo mais fortes para a batalha do dia-a-dia. As pessoas que fazem a EXTRABES funcionar: Diógenes, Paulo, Dona Marleide e Seu Marco Antônio. Sua simplicidade e descontração me fizeram não perder a assiduidade e cuidado com a pesquisa, sem deixar de me “divertir” com ela. E pessoas que encontrei nesse período, das quais, pela lei natural dos encontros, deixei e recebi um tanto.

A presente e breve observação e constatação de uma fração única da natureza - e perfeita em sua totalidade - manifesta em dissertação só foi possível por todas experiências (in)conscientes que pudemos partilhar.

"O mistério da vida é algo que não pode ser calculado, é uma realidade que deve ser experienciada. Não se pode entender um processo interrompendo-o. É preciso acompanhar o fluxo do processo. Devemos nos juntar a ele e fluir junto com ele".

- DUNA, Denis Villeneuve, 2021.

RESUMO

Em busca da sustentabilidade, a tecnologia de Biorreator Anaeróbio de Membrana Dinâmica (BRAnMD) pode ser utilizada como alternativa. O presente trabalho teve como objetivo a avaliação do desempenho da tecnologia de membrana dinâmica no tratamento de águas residuárias domésticas concentradas através da caracterização físico, química e biológica das amostras, observando a formação da membrana dinâmica, além de avaliar o processo de formação da membrana dinâmica operando sob altos fluxos. A pesquisa foi realizada na Estação Experimental de Tratamentos Biológicos de Esgoto Sanitário (EXTRABES), pertencente à Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), com o uso de dois BRAnMD's. Foi operado um reator com configuração de módulo de membrana submerso e outro de módulo externo operando sob altos fluxos, ambos com membrana suporte de 89 μ m. Os dois biorreatores foram constituídos de tubos e conexões de Policloreto de Polivinila (PVC) e de formato cilíndrico. O sistema foi operado por período aproximado de 100 dias e realizadas as análises de pH, AGV, Alcalinidade, Cor real, Sólidos Totais e frações, Demanda Química de Oxigênio Total e Solúvel (DQOt e DQOs), Carboidratos, Proteínas, Viscosidade, Tamanho de Partículas e Potencial Zeta, Ovos de Helmintos e Coliformes Totais em amostras de afluente, licor misto e efluente. Foi possível a identificação do ciclo de formação e dissociação da membrana dinâmica, além de alcançar valores de remoção média para módulos de membrana submerso e externo, respectivamente de 70,5 e 67,5% para o parâmetro DQO. Em operação estável, a remoção de turbidez foi de aproximadamente 78% para ambos os reatores, também sendo possível observar uma diminuição do tamanho da partícula para números próximos a 1 μ m, se assemelhando ao processo de microfiltração. Quanto à fração volátil, a água residuária doméstica apresentou 0,76 \pm 0,24 g.STV.L⁻¹ e valores finais iguais a 0,33 \pm 0,09 g.STV.L⁻¹ e 0,34 \pm 0,15 g.STV.L⁻¹ para o BRAnMD's de módulo submerso e externo respectivamente resultando em remoções na ordem de 56% e 55% para os dois reatores. Os resultados mostraram que o biorreator anaeróbio de membrana dinâmica é uma tecnologia promissora para o tratamento do afluente, com fácil operação e com boa performance em sua limpeza física, porém com alguns percalços a serem sanados.

Palavras-chave: Tratamento Anaeróbio. Biorreator de Membrana. Filtração por Membrana. Matéria Orgânica.

ABSTRACT

Seeking for the sustainability, the Anaerobic Dynamic Membrane Bioreactor (AnDMBR) can be used as option. The present work had as objective the dynamic membrane technology evaluation performance on concentrated domestic wastewaters treatment through the physical, chemical and biological characterization, and watching the dynamic membrane formation. The research was made on the experimental station of biological treatment and sanitary sewage, owned by the State University of Paraíba, with the use of two AnDMBR's with submerge and external membrane modules configuration and with high flux operation, both with support membrane of 89 μ m. Both reactors were constituted by polychloride polyvinyl (PVC) pipes and fittings of cylindrical shape. In about a hundred operation days, analyses of pH, VFA, alkalinity, real color, total solids and fractions, total and soluble chemical oxygen demand, carbohydrates, proteins, viscosity, particle size and zeta potential, helminth eggs and total coliforms in influent, mixed liquor and effluent samples. It was possible to identify the dynamic membrane's cycle of formation and dissociation, reaching the average COD removal for submerged and external membrane modules of 70,5 and 67,5% respectively. With the stable operation, the turbidity removal was about 78% for both reactors, and reaching permeate particles size with an average 1 μ m, resembling to the microfiltration process. As for the volatile fraction, the concentrated domestic wastewater presented 0,76 \pm 0,24 g.VTS.L⁻¹ and final values of 0,33 \pm ,09 e 0,34 \pm 0,15 g.VTS.L⁻¹ for the AnDMBR with submerge and external modules, respectively. The results show that the AnDMBR is a promising technology for the influent treatment, with easy operation and good physical cleaning performance, but with some mishaps to solve.

Key-words: Anaerobic Treatment. Bioreactor Membrane. Membrane Filtration. Organic Matter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação Esquemática dos modos de filtração.	19
Figura 2 - Mecanismos de fouling.....	21
Figura 3 - Pesquisas relacionadas ao sistema de Membrana Dinâmica.	23
Figura 4 – Tamanhos de poro e suas respectivas retenções.	25
Figura 5 – Exemplos de Membranas Suporte (ou Membrana Primária).....	25
Figura 6 - Funcionalidade das Partículas e suas funções de acordo com o tamanho do poro.	26
Figura 7 - Configurações do módulo de Membrana.....	28
Figura 8 - Fases de vida útil da Membrana Dinâmica.....	33
Figura 9 - Esquema descritivo do sistema dos Biorreatores Anaeróbios de Membrana Dinâmica.....	37
Figura 10 - Desenho esquemático do Biorreator Anaeróbio de Membrana Dinâmica Submersa	39
Figura 11 - Módulo de Membrana Submerso acoplado ao Biorreator.....	40
Figura 12 - Desenho esquemático do Biorreator Anaeróbio de Membrana Dinâmica Externa	41
Figura 13 - Módulo de Membrana Externo acoplado ao Biorreator.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características operacionais dos biorreatores anaeróbios de membrana dinâmica submersa e externa.....	38
Tabela 2 - Características físico-químicas do Lodo Inóculo.	46
Tabela 3 - Características do Licor Misto	48
Tabela 4 – Médias e percentagens de remoção referentes aos parâmetros microbiológicos...	71

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Valores médios da Pressão Transmembrana referentes ao BRAnMD de módulo submerso.....	49
Gráfico 2 – Valores médios da Pressão Transmembrana referentes ao BRAnMD de módulo externo	51
Gráfico 3 - Comportamento de Turbidez em BRAnMD de Módulo Submerso.....	53
Gráfico 4 - Comportamento de Turbidez em BRAnMD de Módulo Externo.....	54
Gráfico 5 – Tamanhos de Partícula na primeira semana de Operação	56
Gráfico 6 - Comportamento do tamanho de partícula nas primeiras horas de operação em BRAnMD Submersa.....	57
Gráfico 7 - Variações do tamanho de partícula durante toda operação	58
Gráfico 8 - Concentrações de Carboidratos em tratamento por BRAnMD's.....	60
Gráfico 9 - Concentrações de Proteínas em tratamento por BRAnMD's.....	60
Gráfico 10 - Comportamento do parâmetro pH.....	62
Gráfico 11 - Variação da Alcalinidade ao longo da pesquisa.....	62
Gráfico 12 - Comportamento de AGV ao longo da pesquisa.....	63
Gráfico 13 – Evolução temporal de DQO_t no processo de filtração por Membrana Dinâmica	64
Gráfico 14 – Evolução temporal DQO_s no processo de filtração por membrana dinâmica	66
Gráfico 15 – Comportamento de Sólidos Totais em BRAnMD.....	67
Gráfico 16 – Comportamento de concentrações de Sólidos Totais Voláteis em BRAnMD ...	68
Gráfico 17 – Comportamento de concentrações de Sólidos Suspensos	69
Gráfico 18 – Comportamento de concentrações de Sólidos Suspensos Voláteis.....	69
Gráfico 19 – Comportamento da Cor real	70

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

μ	Viscosidade Dinâmica
A/M	Relação Alimento/Microrganismo
AGV	Ácidos Graxos Voláteis
A_m	Área Média
APHA	American Public Health Association
BRAnM	Biorreator Anaeróbio de Membrana
BRAnMD	Biorreator Anaeróbio de Membrana Dinâmica
BRM	Biorreator de Membrana
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
D	Diâmetro
d	Dia
D_m	Diâmetro Médio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DQOs	Demanda Química de Oxigênio solúvel
DQOt	Demanda Química de Oxigênio total
EC	Economia Circular
<i>E. Coli</i>	<i>Escherichia Coli</i>
EPS	Substâncias Poliméricas Extracelulares
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
EXTRABES	Estação Experimental de Tratamentos Biológicos de Esgoto Sanitário
h	Hora
kPa	Quilopascal
L	Litro
m	Metros
MF	Microfiltração
Mg	Miligramma
mL	Mililitro
NTU	Unidade Nefelométrica de Turbidez
OMS	Organização Mundial da Saúde
pH	Potencial hidrogeniônico
POAs	Processos Oxidativos Avançados
PPGCTA	Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental
PTM	Pressão Transmembrana
PVC	Policloreto de vinila
Q_e	Vazão de Entrada
q_e	Fluxo de Entrada
R_t	Resistência a filtração
SISMOBIO	Sistema de Monitoramento Online de Biorreatores
SMP	Produtos Microbianos Solúveis
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SS	Sólidos Suspensos
ST	Sólidos totais
STF	Sólidos totais fixos
STV	Sólidos totais voláteis
TDH	Tempo de Detenção Hidráulica
TRC	Tempo de Retenção Celular
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
UF	Ultrafiltração

Sumário

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. Objetivo geral	16
2.2. Objetivos específicos	16
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1. Tratamento de águas residuárias	17
3.2. Biorreatores anaeróbios de membrana dinâmica	21
3.2.1. Membrana suporte e configurações de módulo	24
3.2.2. Formação da membrana dinâmica e fatores intervenientes.....	29
4. MATERIAL E MÉTODOS	36
4.1. Descrição do sistema experimental.....	37
4.1.1. Módulo de membrana submerso.....	39
4.1.2. Módulo de membrana externo	41
4.1.3. Cálculo da pressão transmembrana	43
4.1.4. Cálculo da resistência a filtração	43
4.2. Caracterização das amostras	44
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
5.1. Caracterização do lodo inóculo.....	46
5.2. Caracterização do licor misto.....	48
5.3. Formação da membrana dinâmica	49
5.3.1. Pressão transmembrana e resistência a filtração.....	49
5.3.2. Turbidez.....	53
5.3.3. Tamanho de partícula	55
5.3.4. Produto Microbiano Solúvel (SMP).....	59
5.4. Comportamento do pH, alcalinidade e ácidos graxos voláteis	61
5.5. Eficiência de remoção da matéria orgânica	64
5.6. Desempenho de filtração (sólidos e suas frações e cor real)	67
5.7. Parâmetros microbiológicos	71
6. CONCLUSÕES.....	73
7. PERSPECTIVAS FUTURAS	74
REFERÊNCIAS	75

1. INTRODUÇÃO

O uso sustentável da água é uma questão importante globalmente, contemplado dentro dos objetivos do desenvolvimento sustentável que estabelece metas a serem cumpridas até o ano 2030. O objetivo de número “6” afirma: “*Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos*” (ODS BRASIL, 2021). A Legislação Federal (BRASIL, Lei nº 9.433/97) também destaca a importância do manejo da água com prudência. Outra tendência que está levando os países a adotar a postura sustentável é a da Economia Circular, contemplada no Plano da União Europeia para economia circular e o Acordo de Paris. A ideia da concepção da economia circular se baseia num processo produtivo sustentável em circuito fechado, reaproveitando o que normalmente seria descartado (OLIVEIRA et al., 2019; TRATA BRASIL, 2021).

Segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2019), a água residuária é a água de abastecimento que foi utilizada nas diversas atividades humanas, dos quais contém constituintes de natureza física, química e biológica, que sem devido tratamento, são uma das principais causas da poluição ambiental. A água residuária doméstica, em específico, se caracteriza pela água residuária provinda de atividades domésticas. Seu lançamento sem tratamento no ambiente provoca forte impacto poluidor nos solos e corpos hídricos, afetando a qualidade da água. Cada tipo de esgoto possui sua particularidade, com tratamentos específicos para cada tipo de água residuária. Santos (2019) afirma que a composição de águas residuárias domésticas concentradas evidencia situações com baixo consumo de água e/ou baixa infiltração na rede coletora, receptora das águas pluviais e subterrâneas.

As Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) tratam as águas residuárias, podendo ser destinadas para o meio ambiente e reúso, além da possibilidade de produzir bioenergia (por biogás). O Brasil, país em desenvolvimento, enfrenta problemas decorrentes da precariedade no saneamento, onde aproximadamente 35 milhões de brasileiros não possuem acesso ao serviço de saneamento básico (Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento -SNIS, 2017). Chaoua et al. (2018) afirmam que a baixa disponibilidade de água em regiões áridas e semiáridas se configura num grande problema. Dentro deste quadro pode ser incluído o Nordeste brasileiro, devido suas características climáticas e vegetação.

Dentre as possíveis alternativas de tratamento, processos convencionais ainda são amplamente utilizados, porém, ainda são encarados problemas custo. O tratamento de

efluentes por via anaeróbia se apresenta como uma alternativa interessante, principalmente em locais onde a temperatura é elevada e não há sua brusca variação, como no caso do Nordeste brasileiro. O processo possui vantagens como: baixo consumo de energia, baixa produção de lodo, possibilidade de utilização de biogás e menor custo (HU et al., 2020)

O uso da tecnologia de membrana (que envolve a separação física do concentrado e a água tratada) vem sendo amplamente utilizada, configurando-se com os processos aeróbios e anaeróbios. A combinação da tecnologia com o processo anaeróbio atraiu um interesse ascendente no tratamento de águas residuárias municipais e industriais, por unir as vantagens inerentes do processo anaeróbio com a produção de um efluente livre de sólidos. Porém, devido às propriedades do lodo e das partículas presentes, o *fouling* das membranas é frequente, demandando gastos remediadores exacerbados. Tal *fouling* se configura como o problema mais significativo para sua aplicação em larga escala, por trazer percalços operacionais do reator, além do gasto de tempo para remediação da problemática (ERSAHIN et al., 2013; MAHAT et al., 2021).

Em busca de sanar ou minimizar tal inconveniente e ao observar a capacidade de biodegradação pela camada formada acima da membrana convencional, pesquisadores buscaram aperfeiçoar esta camada da torta, denominando-a de membrana dinâmica - também chamada de membrana secundária, camada de torta e biofilme -, um novo tipo de biorreator de membrana. O seu processo de formação se baseia na coesão e adesão das partículas suspensas no licor misto acima da membrana de suporte (ou membrana primária), de menor custo e com tamanho de poros maior que os de membrana convencional. A membrana dinâmica proporciona alta taxa de fluxo na filtração, boa estabilidade operacional, baixa resistência à filtração, economia no custo da membrana comparado a tecnologias de micro e ultrafiltração, fácil limpeza, ideal para tratar águas residuárias (YANG et al., 2019; MOHAN et al., 2020; MAHAT et al., 2021).

Informações e características ideais acerca da sua formação, configuração de localização do módulo de membrana (externo ou submerso) ainda não possuem convergência absoluta nas diversas pesquisas relatadas. Yang et al. (2019) afirmam que apenas por volta de 2010 que as pesquisas aliadas ao processo anaeróbio começaram a ser notórias. Em sua maioria, os trabalhos focaram em tratamento de águas sintéticas, pouco contemplando esgotos municipais e domésticos, com conhecimento ainda mais escasso com relação a águas residuárias concentradas. Poucos estudos focaram na influência de outros parâmetros como tempo de retenção celular (TRC), tamanho de partícula, concentração do licor misto e relação Alimento/Microrganismo (A/M) (GUAN et al., 2018; VERGINE et al., 2021a).

Portanto, tendo em vista a necessidade do tratamento das águas residuárias aliado às concepções de sustentabilidade, o presente trabalho se insere buscando estudar o uso do Biorreator Anaeróbio de Membrana Dinâmica (BRAnMD) em configurações de módulo submerso e externo, objetivando compreender o desenvolvimento da membrana dinâmica e em obter um efluente de qualidade.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Tratar água residuária doméstica concentrada com a aplicação de tecnologias de biorreatores anaeróbios de membrana dinâmica.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar física, química e biologicamente as amostras obtidas;
- Avaliar o desempenho de Biorreatores Anaeróbios de Membrana Dinâmica com configurações de módulo submerso e externo;
- Avaliar o processo de formação das membranas dinâmicas com relação ao tempo de operação e sob altos fluxos.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Tratamento de águas residuárias

As ETEs buscam o tratamento águas residuárias, com intenção de reciclar a água. Seu tratamento varia em níveis, geralmente denominados de: tratamento primário (processo físico), secundário (processo biológico) e/ou terciário (processo químico). Várias opções de configurações se apresentam para tratamento e destinação final do efluente. Os exemplos mais comuns são as tecnologias de Lodo Ativado e Lagoas de Estabilização, alternativas consolidadas das quais acarretam em uma crescente exigência por parte dos órgãos ambientais nos seus padrões de lançamento. Por outro lado, seus processos não se enquadram totalmente na concepção da sustentabilidade, devido ao alto consumo de energia (no caso dos lodos ativados), alto investimento de capital e alta produção de lodo. Conjuntura que deve ser ponderada para a realidade socioeconômica do Nordeste brasileiro, tendo em vista a crescente visão da água residuária como recurso de valor (VON SPERLING, 2002; HU et al., 2020).

Como alternativa a tratamentos dispendiosos, evidencia-se a digestão anaeróbia: um tratamento biológico que se utiliza das condições ideais de temperatura, pH e meio estritamente anaeróbio (ausente de O_2) para que aconteça o desenvolvimento das espécies microbianas. Essas atuam através de relações simbióticas responsáveis pela degradação da matéria orgânica, podendo também transformá-la em biogás [dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4)] e gerar uma baixa taxa de produção de lodo. Além disso, é uma tecnologia considerada “amigável” para o meio ambiente e de prático manejo econômico. Assim, em escala mundial, o tratamento por via anaeróbia é usado de forma extensiva para o tratamento de águas residuárias, de característica municipal até uso industrial (SKOUTERIS et al., 2012; VISVANATHAN & ABEYNAYAKA, 2012; SIDDIQUI et al., 2021).

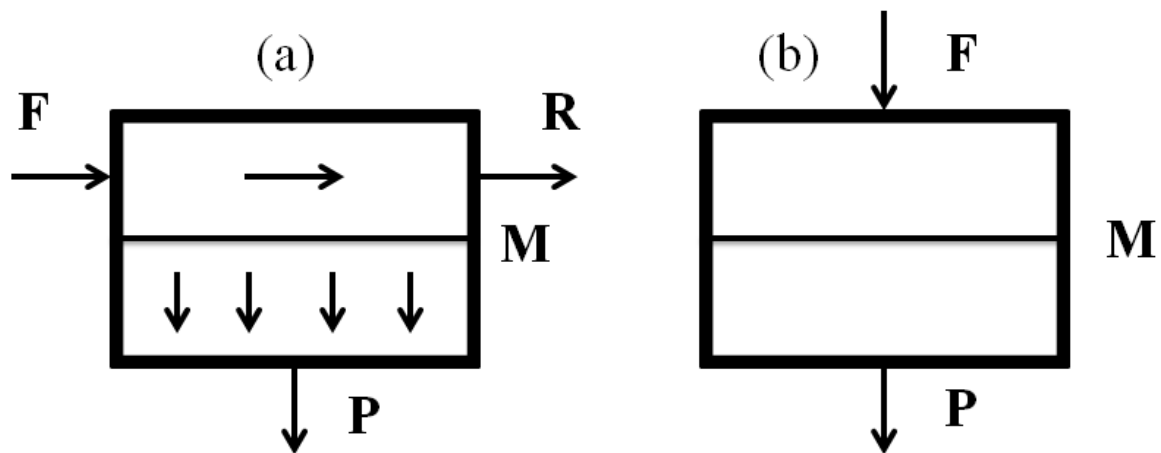
Diante disso, a digestão anaeróbia é um processo que se destaca cada vez mais dentro da concepção da sustentabilidade. No entanto, devido às lentas taxas de crescimento e a sensibilidade às mudanças ambientais dos microrganismos (especialmente os hidrolíticos e metanogênicos), como mudanças bruscas de pH, temperatura, disponibilidade de nutrientes e a presença de elementos traços, eventualmente acarreta-se a baixa eficiência na biodigestão dos sólidos orgânicos, quase sempre necessitando um pós-tratamento do efluente, como processos oxidativos avançados (POAs), processos de separação por membrana, com a escolha do processo em consonância com a finalidade de utilização do efluente (METCALF & EDDY, 2016; HU et al., 2018; HU et al., 2020).

Para Hernández e Haza (2021), nas últimas duas décadas a tecnologia de biorreator de membrana (BRM) vem sendo adotada em uma crescente exponencial na substituição de processos convencionais de tratamento de águas residuárias, principalmente em pesquisas acerca do tratamento de águas municipais e industriais, produzindo efluentes de qualidade, reatores de melhor controle operacional e com menor impacto ao meio ambiente. O processo de separação por membrana consiste na passagem do afluente, geralmente com altas concentrações de sólidos suspensos (SS), por uma membrana porosa com a capacidade de separar a biomassa presente no afluente através da filtração. A tecnologia se mostra eficiente por auxiliar em problemas relacionados à operação e com a biota presente, produzindo um efluente livre de SS. Através da sua barreira semipermeável e seletiva, a membrana pode até remover moléculas e íons (VISVANATHAN & ABEYNAYAKA, 2012; METCALF & EDDY, 2016; VERGINE et al., 2021).

Xiong et al. (2016) definem os Biorreatores de Membrana (BRM) como os sistemas que unem o tratamento biológico com o processo de separação por membrana, sendo considerado um dos métodos mais competentes em termos de tratamento de águas residuárias municipais e industriais. Os processos podem funcionar como Microfiltração (MF), Ultrafiltração (UF), Nanofiltração e Osmose Reversa. As tecnologias de Micro e Ultrafiltração geralmente são utilizadas para processos que objetivam a separação de sólidos suspensos e microrganismos das fases. Quando se deseja a remoção de íons, a via de tratamento se dá pela Nanofiltração e Osmose Reversa, a primeira quando se refere à remoção de íons polivalentes, a última quando se deseja a remoção de íons monovalentes. No processo, umas das grandes vantagens é a possibilidade de manejar os conceitos de tempo de detenção hidráulica (TDH) e tempo de retenção celular (TRC), contribuindo assim para o aumento da eficiência (METCALF & EDDY, 2016).

A filtração ocorre de duas maneiras distintas: de forma tangencial (fluxo cruzado) e pelo fluxo perpendicular (frontal), a Figura 1 mostra as formas de fluxo.

Figura 1 - Representação Esquemática dos modos de filtração.



Fluxo (F), Membrana (M), Permeado (P), Retido (R)

Fonte: Adaptado de KOROS et al. (1996).

O primeiro [Figura 1(a)] é onde o fluxo de circulação se faz de forma paralela ao da membrana, no fluxo perpendicular [Figura 1(b)] (KOROS et al., 1996; METCALF & EDDY, 2016). Quando o fluxo é reduzido ou a pressão transmembrana (PTM) aumenta até um valor pré-estabelecido, é necessária a realização de um processo limpeza. Metcalf & Eddy (2016) apresentam formas desobstrução das membranas: a limpeza química convencional e a retrolavagem seguida de adição de químicos, ambas acarretam altos custos (ERSAHIN et al., 2017; HU et al., 2018).

Os Biorreatores Anaeróbios de Membrana (BRAnM's) são desenvolvidos pela integração da filtração por UF ou MF com digestores anaeróbios. A combinação dos sistemas está se mostrando uma opção interessante, uma vez que processos anaeróbios de alta taxa de degradação são caracterizados pela separação do TDH e do TRC, a opção une as vantagens do processo com baixa produção de sólidos dos efluentes. Podendo-se afirmar que as pesquisas acerca do processo anaeróbio aliado à tecnologia de membrana encontrou-se em crescente no início do século, chegando a ultrapassar as pesquisas envolvendo apenas a digestão anaeróbia (VISVANATHAN & ABEYNAYAKA, 2012; HU et al., 2018; HU et al. 2020).

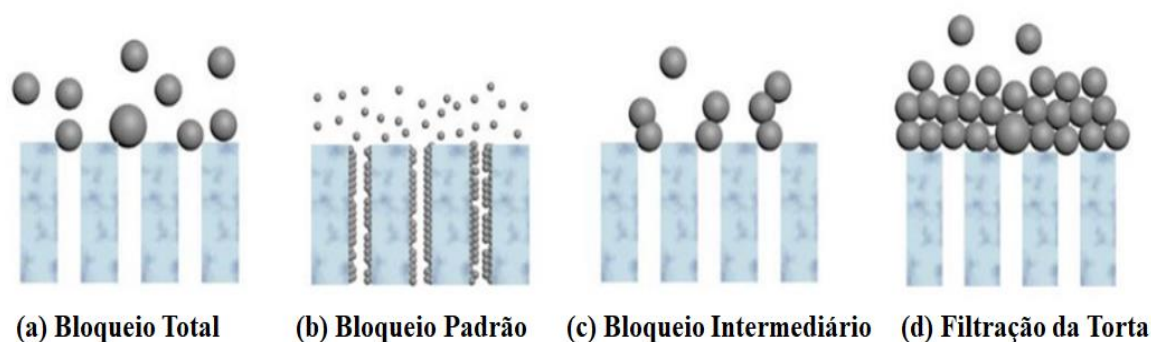
Esses reatores vêm sendo aplicados com um relativo sucesso em várias escalas, pois o elevado TRC mantém os microrganismos anaeróbios fixos e em atividade, além de reter micropoluentes, tratando águas de origem industrial e municipal com um bom nível de qualidade. Outras vantagens podem ser elencadas: bom tempo de start-up, operação estável e

efluente livre de patógenos, redução dos gases do efeito estufa. A tecnologia é atrativa por substituir a fase de adensamento nos tratamentos convencionais (ERSAHIN et al., 2013, SIDDIQUI et al. 2019; HU et al., 2020).

Porém, pesquisas evidenciaram que ainda há bastante dificuldade de aplicação da membrana em sistemas anaeróbios devido ao *fouling*, baixa capacidade de fluxo na operação e alto custo. Pesquisas focam na estratégia de adotar materiais de filtração mais baratos e frágeis, que requerem baixa energia de uso e não precisam de limpezas químicas (SIDDIQUI et al., 2019; VERGINE et al., 2021b).

O processo de *fouling* se caracteriza pelo acúmulo de matéria na superfície da membrana convencional, tornando-se cada vez mais densa ao longo do tempo, formando uma camada grossa, reduzindo ou limitando totalmente o fluxo. Isso se dá após a contínua repetição do processo de retrolavagem, por ocorrer uma inevitável perda da permeabilidade na membrana, com os depósitos irreversíveis por partículas de diversos tamanhos, dando origem ao fenômeno. Geralmente as responsáveis pelo depósito são partículas orgânicas, inorgânicas e microrganismos, outra contribuição para a ocorrência do processo é a alta viscosidade e grande quantidade de biopolímeros presentes no lodo - principalmente em tecnologias de lodo ativado, devido à presença do floco biológico; acentuando a questão limitante da tecnologia. Tal fenômeno se divide em duas categorias: a formação da camada de torta na superfície da membrana e o entupimento dos poros; sendo responsável por 80% da resistência total da filtração. O fenômeno se torna a principal barreira em sistemas de membrana, perturbando a seletividade do processo e a qualidade do permeado. Algumas pesquisas focam em determinar as características e mecanismos do *fouling*, bem como seu controle direto e indireto (HU et al., 2018; YANG et al., 2019, WANG et al., 2020).

Segundo Wang et al. (2020), existem quatro mecanismos de formação do *fouling*, dispostos na Figura 2.

Figura 2 - Mecanismos de fouling.

Fonte: Adaptado WANG et al. (2020).

Os mecanismos se dão por: bloqueio total [4(a)]; bloqueio padrão [4(b)]; bloqueio intermediário [4(c)] e a filtração da torta [4(d)]. O que determina o tipo de *fouling* é a relação do tamanho do *foulant* (df) e o tamanho do poro (dp):

- I. $df < dp$: foulant é adsorvido para a superfície da membrana ou suas partículas podem passar pela membrana;
- II. $df \approx dp$: bloqueio dos poros ou formação de “torta”;
- III. $df > dp$: bloqueio da superfície da membrana e formação da “torta”.

O bloqueio total, bloqueio padrão e bloqueio intermediário são os processos que caracterizam o processo irreversível de *fouling*, ditos como obstáculos. Já o bloqueio por filtração de torta pode funcionar como um aliado, sob as devidas condições, ocorrendo a biodegradação da água residuária na fase anterior à sua passagem pela membrana propriamente dita, tal possibilidade de tratamento foi percebida por pesquisadores, sendo nomeada de Membrana Dinâmica, uma nova categoria de biorreatores de membrana (GUAN, et al. 2018).

Dando suporte à afirmação anterior, Van Lier et al. (2015) confirmaram que capacidade de retenção pode ser utilizada para manter as comunidades microbianas, podendo degradar determinados poluentes, a tecnologia aliada com o crescimento favorecido da biomassa, devido a possibilidade de altos tempos de TRC, se torna uma remediação ao problema de retrolavagem.

3.2. Biorreatores anaeróbios de membrana dinâmica

Ao investigar a formação da torta no sistema convencional de membrana, pesquisadores perceberam que a membrana secundária formada pela deposição das partículas

proporcionava a biodegradação da água contaminada, funcionando como um filtro adicional e potencializando o poder de retenção do sistema. Em outras palavras, a maior desvantagem do processo por membranas se torna uma vantagem competitiva, além de possibilitar a utilização de um sistema com alta taxa de fluxo na filtração, baixa resistência à filtração, economia no custo da membrana comparado a tecnologias de MF/UF, fácil limpeza, ideal para tratar águas residuárias. A membrana primária apenas fornece o suporte para o desenvolvimento da membrana dinâmica. (GUAN et al. 2018; YANG et al., 2019; ZHU et al., 2020).

Anantharaman et al. (2020) definem o mecanismo da membrana dinâmica como sendo uma camada de partículas depositadas via arraste do licor misto em uma membrana com as partículas depositadas agindo como uma membrana secundária. É interessante destacar que os poros dentro da membrana dinâmica formada são muito menores dos que os poros da membrana suporte, camada fina é também formada por lodo, atuando como um processo de microfiltração. O termo “dinâmico” cunhado à tecnologia faz referência à espessura constantemente variável da torta, conseqüente da sua lavagem e reformulação periódica (VERGINE et al, 2021a, SIDDIQUI et al., 2021).

Hu et al. (2018), em revisão bibliográfica, desenvolveram um estudo comparativo entre as tecnologias de BRAnM e BRAnMD. Apresentado no Quadro 1:

Quadro 1: Comparação entre Tecnologias de Membrana.

Item	BRAnM	BRAnMD
Eficiência de Remoção Orgânica	Alta	Alta
Qualidade de Efluente	Alta	Moderada/ Alta
Taxa de carga orgânica	Alta	Alta
Produção de Lodo	Baixa	Baixa
Recuperação de Bioenergia	Sim	Sim
Modo de tratamento	Total ou pré-tratamento	Total ou pré-tratamento
Preço do Módulo de Membrana	Elevado	Baixo
Fluxo de aplicação da Membrana	2 – 30 L/m ² .h	2 – 65 L/m ² .h
Retenção de Biomassa	Total	Alta a Total
Requerimento de Nutrientes	Baixo	Baixo
Requerimento de Alcalinidade	Moderada a Alto	Moderada a Alto
Requerimento de Energia	Baixo	Muito Baixo
Sensibilidade de Temperatura	Baixa a Moderada	Baixa a Moderada
Tempo de start-up	< 2 semanas	< 2 semanas
Limpeza	Complicada	Fácil

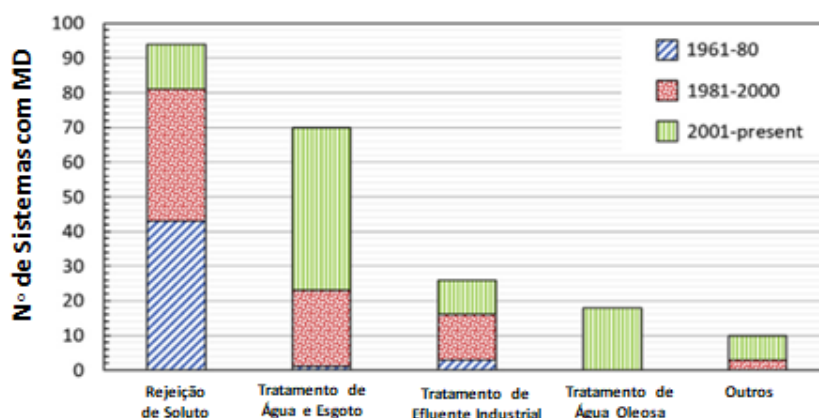
Fonte: Adaptado HU et al. (2018).

É possível examinar que não há grande diferença quanto à produção de lodo, requisitos de nutrientes e alcalinidade, o módulo da membrana suporte é mais barato, mas sua performance é ligeiramente menos eficaz, isso se dá devido a menor retenção de partículas e colóides no momento da formação da membrana dinâmica, apesar disso, a capacidade de aplicação de fluxo máximo nos sistemas de membrana dinâmica são de aproximadamente o dobro. Os dados também mostram que a tecnologia é eficiente para pré-tratamento e reúso da água para irrigação. Na pesquisa, se afirmou que ainda não há um conhecimento hegemônico acerca da produção de biogás, isso se dá devido ao grande número de pesquisas apenas envolvendo o tratamento de águas sintéticas. Apesar disso, a produção média de biogás pesquisada foi de $0,34 \text{ L.g}^{-1}$ de DQOremovida.

Em estudo mais recente, Hu et al. (2020) traçou um paralelo entre as capacidades de tratamento da membrana dinâmica com relação a águas residuárias, e concluíram que enquanto esgotos “simulados” e sintéticos apresentam remoção de DQO entre faixas de 90 a 99%, esgotos “reais” apresentaram remoções por volta de 62%. A diferença pode ser explicada devido a forma sintética possuir orgânicos muito mais solúveis e de fácil degradação dos que os apresentados em casos práticos.

Li et al. (2018), também destacaram a capacidade da membrana dinâmica oferecer baixa resistência de filtração, bem como uma baixa PTM, elucidaram também que em alguns casos, a operação pode ser desenvolvida completamente pela força gravitacional, dispensando o uso de bombas. Algo que aliado com as questões levantadas anteriormente levou os pesquisadores nas últimas duas décadas a focar sua atenção, principalmente quando concernem ao tratamento de águas, esgotos e água oleosa. Como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Pesquisas relacionadas ao sistema de Membrana Dinâmica.



Fonte: Adaptado, ANANTHARAMAN et al (2020).

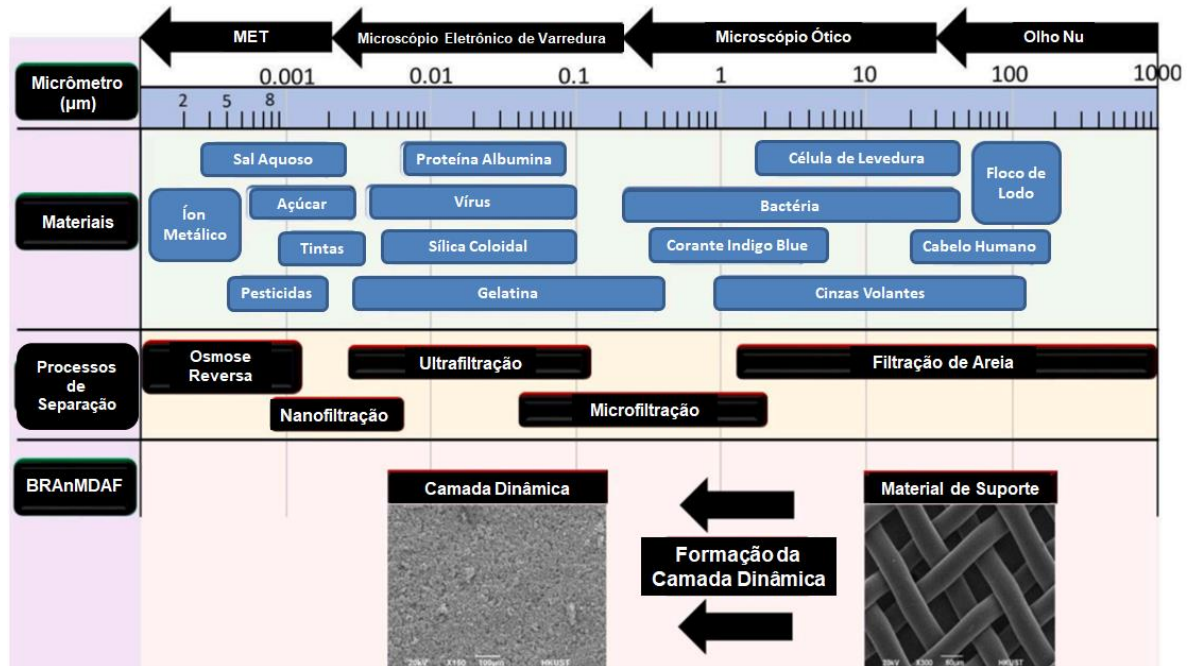
Também é possível inferir que a procura do uso da tecnologia para usos de rejeição de solutos foi bastante utilizada no século passado, porém com uma grande diminuição nos últimos anos. Para a efetiva formação e consolidação da camada da membrana dinâmica, é necessária uma seleção do material suporte apropriado, tamanho dos poros e avaliação da disponibilidade e custos.

3.2.1. Membrana suporte e configurações de módulo

Para Anantharaman et al. (2020), as características da membrana suporte (ou membrana primária) são uma das informações mais importantes para o bom desenvolvimento da membrana dinâmica, os autores constataram que as membranas dinâmicas formadas com maior facilidade e velocidade apresentaram melhores performances, mas ainda não sabem com clareza a relação do tamanho do poro com a espessura da torta.

O tamanho dos poros da membrana suporte é um diferencial importantíssimo na distinção do processo da MBR convencional, nas pesquisas referenciadas seu tamanho variou entre os valores de 10 e 200 μm , valores maiores quando comparados a processos de filtração por membrana convencional, que de forma geral abrange tamanhos de 0,01 até 1,0 μm . Isso justifica a possibilidade de altos fluxos imposta aos trabalhos. (MOHAN & NAGALAKSHMI, 2020; SIDDIQUI et al., 2021). A Figura 4 faz um comparativo no tamanho de poro e retenção do tamanho de partícula do material de suporte e a capacidade de tratamento da membrana dinâmica.

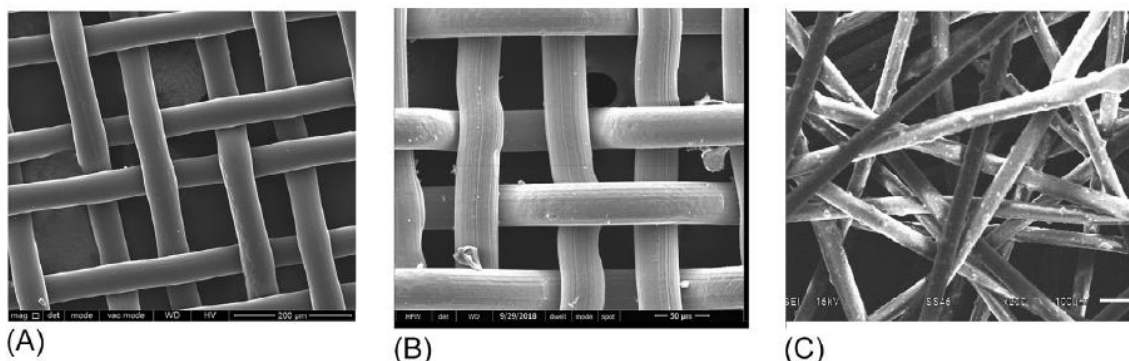
Figura 4 – Tamanhos de poro e suas respectivas retenções.



Fonte: Adaptado, SIDDIQUI et al. (2021).

A imagem sugere que após a formação de uma membrana dinâmica madura, há a possibilidade de retenção de materiais como: bactérias, gelatinas, vírus. Os materiais para suporte da camada de membrana dinâmica geralmente utilizados são: nylon, não tecido, fabricados (tecidos, filtros de pano), monofilamentos de poliéster, polímeros em geral e ferro inoxidável. (HU et al., 2020). Alguns exemplos estão dispostos na Figura 5.

Figura 5 – Exemplos de Membranas Suporte (ou Membrana Primária).



(A) Nylon (75 μm); (B) Ferro Inoxidável (48 μm); (C) Não Tecido (60 μm).

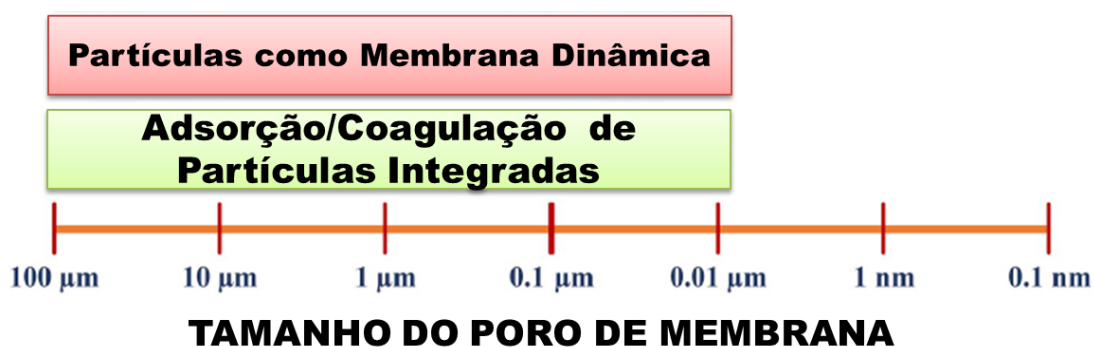
Fonte Hu et al. (2020).

Para exemplificar a variedade e boa capacidade de remoção de matéria orgânica, podem-se evidenciar pesquisas que buscaram tratar águas residuárias municipais e domésticas pela tecnologia de membrana dinâmica por diferentes tipos de materiais. Wang et al. (2012) e Fan e Huang (2002), trataram águas municipais por materiais de Nylon ($80\mu\text{m}$) e Dacron ($100\mu\text{m}$), respectivamente, e obtiveram remoções de Demanda Química de Oxigênio (DQO) acima de 83%, com Wang et al. (2020) apresentando Turbidez abaixo de 2 NTU. O que pode explicar a remoção abaixo de taxas de 90% é a característica mais recalcitrante da água residuária municipal. Já em pesquisa em escala piloto e testando o poder de remoção de um filtro não tecido para água residuária doméstica, obteve-se a remoção de 91,6% da DQO (SEO et al., 2003).

Berkessa et al. (2020), tratando águas residuárias industriais com configuração de módulo de membrana externa e com fluxo de permeado variando de 14 a $28\text{ L m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, puderam chegar a uma eficiência média de remoção de DQO total de 93% e de DQO solúvel e 98,5%. Liu et al. (2016), em sua pesquisa testemunharam que uma DQO solúvel menor que a DQO total pode ser resultado da presença de substratos solúveis com baixo peso molecular serem destinados para consumo dos microrganismos.

Investigando o papel das partículas na formação da membrana secundária, Wang et al. (2020) observaram a relação do tamanho dos poros. Na pesquisa viram que para formação da membrana e para sua capacidade adsortiva o tamanho dos poros deve estar entre $0,01 - 100\mu\text{m}$ (Figura 6).

Figura 6 - Funcionalidade das Partículas e suas funções de acordo com o tamanho do poro.



Fonte: WANG et al., 2020.

Wang et al. (2020) uderam destacar que as partículas não podem ser usadas para poros menores que os utilizados em UF, além de que as partículas que são ideais para formação e

limpeza só podem ser aplicadas em membranas de MF. Concluindo importância da escolha do tamanho do poro.

Em oposição ao afirmado anteriormente, ao investigar a eficiência do papel do poro no processo de tratamento pela tecnologia de DM, Cai et al. (2018), testou a influência de poros de tamanhos 1, 5, 10, 25 e 50 μm , e também foi concluída que a produtividade do sistema dependia de outras condições operacionais. Em consonância com Cai et al. (2018), Vergine et al. (2021b) utilizaram membranas suporte de nylon e poros de 20, 50 e 100 μm sob TRC's de 15 e 50 dias, e também concluíram que não houve diferença significativa entre os resultados na eficiência de remoção de Turbidez, apenas maior velocidade na formação da membrana dinâmica em poros de menor tamanho, porém, era necessária maior frequência de limpeza da membrana. Na pesquisa, também foi observado que o maior TRC influenciou muito mais nas características do permeado.

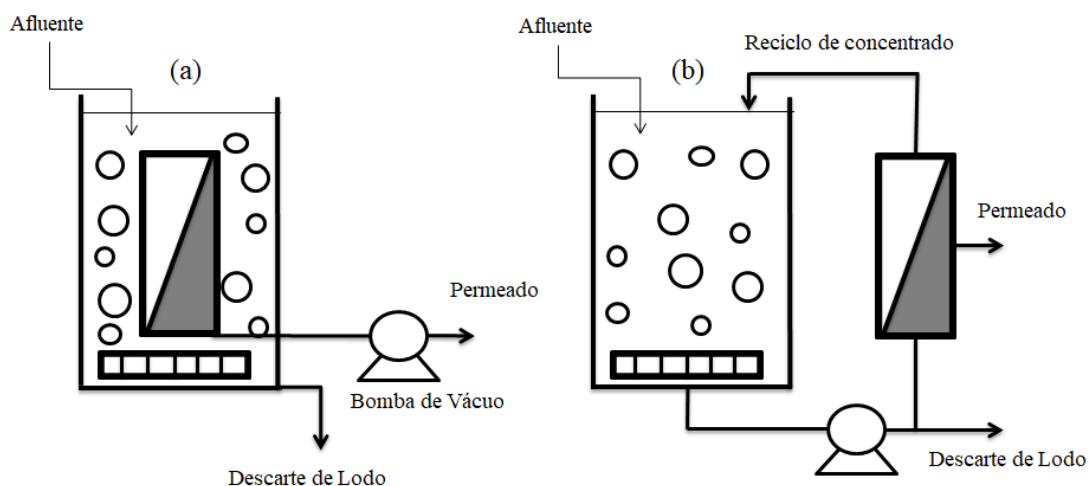
Para investigar a influência do tamanho de poro na retenção de partículas aliado à curtos Tempos de Detenção Hidráulica (TDH) no tratamento de águas residuárias, Yang et al. (2019) utilizaram um BRAnMD de módulo de membrana submerso de mesh 75 μm a temperatura ambiente, observaram que o TDH inferior a 2 horas pode começar a influenciar na capacidade de formação da torta, deixando-a bastante compacta e diminuindo a taxa de remoção da DQO. Recomendou-se adotar um TDH acima de 2 horas, pois a partir do tempo estipulado, obtiveram uma remoção de 70%. Na análise da torta, também observaram a diminuição do tamanho da partícula do lodo (em média 98 μm) e que as partículas em média eram maiores que o tamanho do poro (86 μm).

Se tratando da configuração do módulo de membrana, evidências mostram-na uma variável importante, pela possibilidade de proporcionar uma maior remoção na matéria orgânica, podendo até refletir na qualidade biológica do efluente final, isso é importante em tratamentos que demandam desempenho de excelência da tecnologia. Mohan et al. (2020) e Hu et al. (2020) afirmam que suas configurações podem ser denominadas de módulo submerso e externo (quanto à localização) e de leito plano e tubular (quanto à morfologia). Também afirmaram que ainda não existem módulos disponíveis no comércio, apenas os desenvolvidos por autonomia. Geralmente o módulo de leito plano é o mais utilizado, por haver maior facilidade em sua construção e operação.

No módulo de membrana submersa [Figura 7(a)], o permeado é extraído sob pressão de sucção e/ou por pressão estática (gravidade), em tal configuração, há baixo consumo de energia e geralmente requer uma membrana larga. Quando a localização é externa [Figura 7(b)], há uma maior flexibilização operacional, nessa configuração, a água permeia sob alta

pressão, conseqüentemente acarretando em uma PTM alta, havendo maior consumo energético (MAESTRI, 2007; MORAES, 2018).

Figura 7 - Configurações do módulo de Membrana.



(a) Módulo de membrana submerso; (b) Módulo de membrana externo.

Fonte: Adaptado de Melo (2018).

De modo geral, a tecnologia garante uma remoção satisfatória dos poluentes, independentemente da sua configuração (MOHAN & NAGALAKSHMI, 2020). Porém deve-se atentar à finalidade da utilização e os fatores que impedem a formação total da membrana dinâmica.

Quanto à morfologia, foi observado que em trabalhos utilizando a tecnologia de UASB aliada ao uso da membrana submersa, o grupo de pesquisadores de An (2009) e Zhang (2011) utilizaram as configurações morfológicas tubular e de leito plano e com TDH's de 2,6h e 8h, respectivamente, e obtiveram as respectivas remoções de DQO: 70 e 64%, sugerindo a melhor performance no módulo tubular. Porém a alta DQO e concentração de Nitrogênio investigado no segundo trabalho podem ter contribuído na capacidade recalcitrante do efluente.

Em trabalho de dissertação, Santos (2019) utilizou BRAnMD com módulo de membrana localizado de forma submersa, membrana suporte de polietileno com poros de 89 μm , temperatura ambiente e TDH de 8 horas, nele tratou águas residuárias domésticas e conseguiu obter uma remoção de DQO de 77,4%, além de uma remoção de turbidez de 83,2%, chegando a valores médios de 48,3 NTU.

Sob as mesmas condições de ambiente e tratando a mesma água residuária, diferindo apenas na localização do módulo de membrana, configurado em localização externa, Nascimento et al. (2021) conseguiu uma remoção de material orgânico de apenas 56% e remoção de turbidez de 60%. Sugerindo que a formação da torta ocorreu de com maior êxito no primeiro trabalho.

Contradizendo a grande diferença evidenciada no caso citado anteriormente, Ersahin et al. (2017) ao fazer estudo comparativo entre configurações de módulo submerso e externo, com material suporte de monofilamento de polipropileno e poros de 10 μm conseguiram obter taxas de remoção da DQO acima de 99%. Porém, é mister ressaltar que na operação do reator de módulo externo, demandou-se maior tempo para uma boa formação da camada da torta.

Tais características sugerem que em procedimentos que é necessária a formação mais rápida da membrana dinâmica, assim como mantimento da alta remoção da matéria carbonácea do reator, é preferível o uso do BRAnMD com configuração submersa.

3.2.2. Formação da membrana dinâmica e fatores intervenientes

A formação da camada de torta é um fator importante para a filtração, principalmente para o fluxo do permeado. Outros fatores como as características do material suporte, a morfologia e configuração do reator, concentração do lodo no interior e o tipo de substrato presente do mesmo são essenciais para uma membrana dinâmica com boa capacidade de filtração. O maior desafio vem da ênfase na necessidade de manter a torta de ótima variação em sua espessura (MAHAT et al., 2021).

A formação da MD envolve mecanismos biológicos e o hidrodinâmicos. O tipo de estruturação é comumente classificado em dois tipos: (I) por membrana pré-revestida: se dá pela deposição de um ou mais componentes coloidais em uma solução sobre o material de suporte, os materiais geralmente utilizados são óxidos metálicos, compostos a base de solo, carvão ativado, caolita, nanopartículas e polímeros – sua maior desvantagem é inerente ao próprio uso do material por acarretar maior custo; (II) membrana autoformada: ocorre pela deposição de materiais orgânicos (frequentemente de alto peso molecular, EPS's em sua maioria), colóides e sólidos suspensos advindos do licor misto – o mecanismo possui maior destaque pela facilidade operacional, porém, estudos afirmam que, nas primeiras horas ou até dias de operação, a qualidade do efluente é bastante baixa e há considerável perda de lodo. Em suma, independente do tipo de formação da membrana secundária, a tecnologia aumenta o

desempenho da filtração da membrana primária e a protege do *fouling* (SIDDIQUI et al., 2018; MOHAN & NAGALAKSHMI, 2020; ANANTHARAMAN et al., 2020).

Para Mohan & Nagalakshmi (2020), a membrana dinâmica autoformada pode se dividir em dois tipos de camada: a camada da torta – formada nas primeiras horas; e a camada de gel – formada após maior tempo de operação pelos colóides, produtos microbianos solúveis (SMPs), EPS's. Essa última exercendo um importante papel na rejeição de partículas finas, se assemelhando assim às membranas convencionais. Ambas possuem sua importância no papel de filtração.

O processo de formação da membrana dinâmica envolve 3 estágios: formação, operação estável e limpeza para regeneração. Todos os processos podem ser observados por simples parâmetros: fluxo do permeado, PTM e turbidez. (YU et al., 2018; WANG et al., 2020).

O estágio mais delicado e que merece bastante atenção é o estágio de formação, pois será determinada a capacidade de filtração. O estágio se divide em duas fases: adesão e coesão. A primeira ocorre inicialmente, devido às interações entre a superfície da membrana suporte com os flocos do lodo; a segunda ocorre após a primeira camada se formar, onde a superfície já coberta por flocos interage com o lodo, também chamada de maturação, marcada por caracterizar o início da operação estável; a identificação da sua formação pode se dar a partir do momento em que a turbidez atinge valores baixos, geralmente abaixo de 5 NTU. A operação estável é identificada pela PTM ou fluxo constante, Hu et al. (2020) afirmam que o tempo para se alcançar uma membrana dinâmica estável é em média de 10 a 25 dias. Ao se atingir um determinado valor pré-estabelecido, é necessário o momento de limpeza da membrana, a fim de evitar o *fouling* ou rompimento da membrana (YU et al., 2018, MOHAN & NAGALAKSHMI, 2020).

Vergine et al. (2021b) alertam sobre a debilidade do processo encontrada após a fase de limpeza da membrana dinâmica, pois é observado um decréscimo temporário da qualidade do efluente. Com a finalidade de obter melhor desempenho e economia de tempo, sugerem uma frequência menor de limpeza, algo que deve ser acompanhado do estudo dos TRC's.

Anantharam et al. (2020) alertam que as pesquisas, por analisarem fatores isolados, determinaram condições por tentativa e erro, portanto, ainda é bastante difícil prever todos os fatores influenciadores de formação de membrana, para cada caso específico. Além do tamanho de poro da membrana suporte, alguns parâmetros de formação convergem nas bibliografias, no Quadro 2, apresenta-se um breve apanhado dos parâmetros que envolvem a formação das Membranas Dinâmicas.

Quadro 2: Fatores que afetam a formação da Membrana Dinâmica.

Fator	Observação	Referência
Tamanho de Partícula	Partículas de tamanho similar ao poro podem causar fouling; Grandes partículas ajudam na formação da membrana autoformada; partículas pequenas em demasia: maior probabilidade de resistência à filtração e baixo fluxo do permeado;	(3); (5)
Lodo	Inoculação do lodo ajuda na performance de remoção de DQO, ajuda no aumento da atividade microbológica; Propriedade termodinâmicas e físico-químicas que auxiliam na adesão e coesão;	(1); (2);
EPS's	Apesar de ajudar, sua presença em excesso, afeta a formação da membrana; Alta quantidade de proteínas no EPS contribui para a hidrofobia da membrana, afetando na capacidade de adesão; Relação Proteínas/Carboidratos deve estar em harmonia;	(5)
SMP's	Atuam como uma “cola”: ajudam no aumento da viscosidade do lodo; Capacidade penetrar nos poros e causa fouling, podendo até causar fouling irreversível;	(5)
Tempo de Retenção Celular	Parâmetro importante por atuar nas propriedades da atividade da comunidade microbiana, população de predadores e produção de EPS e SMP; Altos TRC's contribuem para uma melhor remoção da Demanda Química de Oxigênio (DQO), além de auxiliar na estabilidade do processo, sem necessitar de altas frequências de limpeza;	(1); (5); (6)
Licor Misto	Alta concentração de sólidos ajuda na formação rápida, porém o parâmetro depende do tamanho da partícula, caso seja muito pequeno, o parâmetro se torna irrelevante; Auxilia na escolha do diâmetro do poro; Depende também das características do lodo; Esgotos municipais e domésticos em sua maioria apresentam: biodegradabilidade, baixa toxicidade e baixa carga orgânica;	(1); (4); (5)
Pressão Transmembrana	Pressão muito alta pode afetar a compressibilidade e grossura da torta; Controlar a PTM é imprescindível para todo processo em si;	(3); (5)
Configuração do Reator	Poucas diferenças observadas, porém o módulo submerso apresentou uma performance ligeiramente superior;	(1); (4)
pH	Baixos pH's auxiliaram na sua formação; Obs.: Deve-se atentar para não inibir o desenvolvimento da população microbiana	(3)
Fluxo	Afeta o efeito de mistura do licor misto com o lodo, conseqüentemente no tempo de formação da torta e o ciclo de operação; Relação com a PTM: alta velocidade as partículas pode formar uma estrutura mais compacta; Para mistura mecânica: intensidades muito baixas são negativas para as propriedades de remoção;	(1); (3); (4)

Fonte: (1) HU et al., 2018; (2) YU et al., 2018; (3) ANANTHARAMAN et al., 2020; (4) WANG et al., 2020; (5) MOHAN & NAGALAKSHMI, 2020; (6) VERGINE et al., 2021a.

Suspeita-se que a sua compactação varia com fatores a respeito da PTM, fluxo do permeado e modo de operação, tendo relação direta com a performance dos biorreatores de membrana dinâmica autoformadas, porém informações como a estrutura física da camada dinâmica e sua relação com o permeado ainda não são tangíveis (GUAN et al., 2018). Pesquisadores em seus trabalhos e revisões bibliográficas reportaram operações de BRMD's com variados valores máximos de pressão transmembrana passando por números de: 10; 20; 40; 45; 54,6; 60; 80 e até 122,28 kPa (HU et al., 2017; ERSAHIN et al., 2018; GUAN et al., 2018; NUNES, 2018; ISIK et al., 2019; SANTOS, 2019; WANG et al.; 2020; VERGINE et al., 2021; MAHAT et al., 2021a; MAHAT et al.; 2021b).

Apesar da ideia convencional do estabelecimento de uma PTM para retrolavagem ou observação da diminuição do fluxo, Hu et al. (2017) também afirmam que apesar de uma grande variação na pressão transmembrana, o fluxo pode-se manter constante por até 5 dias, outro curioso fato afirmado pelo grupo foi a observação de uma diminuição na capacidade do fluxo máximo após a retrolavagem, isso se dá pela presença de partículas residuais que ficam agregadas nos poros, comprovaram a afirmação ao exemplificar a diminuição de um fluxo aplicado de 350 para 300 L.m⁻².h⁻¹.

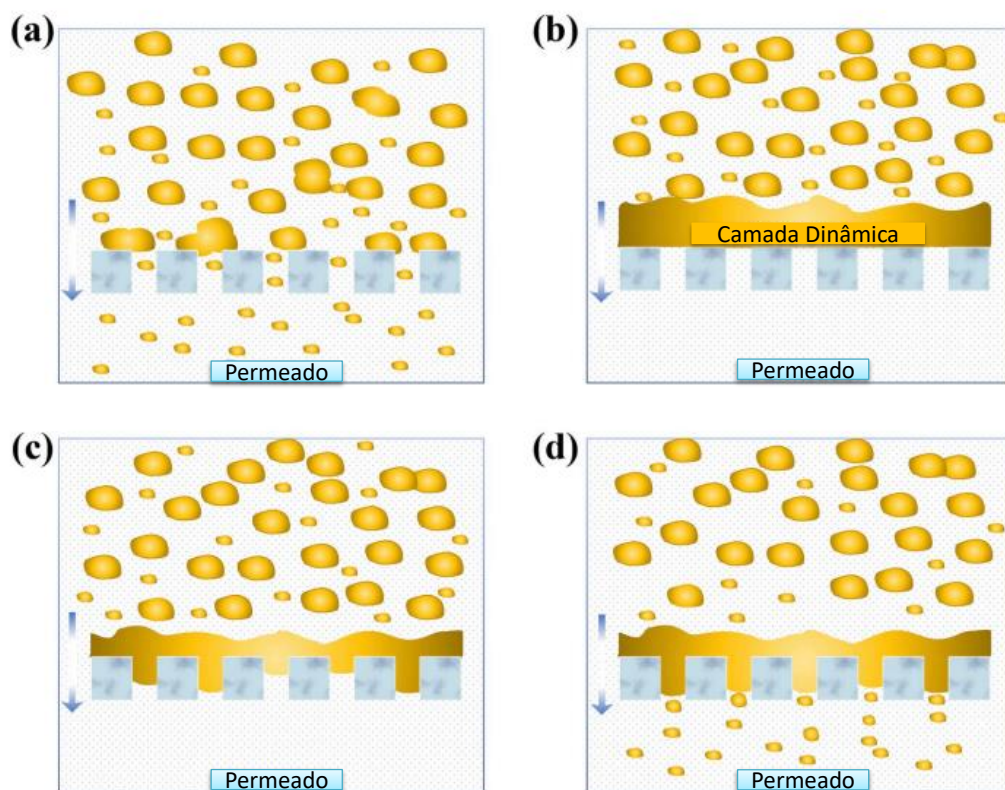
Buscando compreender a formação da Membrana Dinâmica relacionada pela influencia do lodo, Yu et al. (2018) e Pei et al. (2020) realizaram experimentos tratando águas residuárias doméstica e esgoto sintético, respectivamente, ambos processos aeróbios. O primeiro utilizou uma placa de cloreto de Polivinil como módulo de membrana, e duas camadas de malhas como membrana suporte, composta de Nylon (25 µm) e Ferro inoxidável (5 mm), na pesquisa concluiu-se que partículas de grandes tamanhos auxiliam na formação da membrana dinâmica, mas apenas o parâmetro em si não é suficiente para atribuir uma formação bem sucedida, indicando que a baixa floculabilidade e/ou interações repulsivas de energia do lodo podem impedir a formação ideal, outra influencia pode se dar pelas suas características capacidade de desidratação e sedimentação, analisadas pela quantidade de EPS's, afetando até na sua porosidade.

Já Pei et al. (2020) utilizaram uma malha suporte de Ferro Inoxidável 500 (25 µm), e em sua pesquisa, utilizaram um lodo de concentração de Sólidos Totais (ST) de 18g.L⁻¹, e que apresentou como tamanho de partícula de 113 µm, o trabalho variou a concentração de entrada de lodo (de 3 a 7 g.L⁻¹), e em todas as concentrações obtiveram uma boa performance de filtração, alcançando remoções de DQO de 92,22%. Também discutiram a relação dos EPS's com o Potencial Zeta, e viram que no início do estudo o conteúdo de EPS era baixo, obtendo valores de Potencial Zeta de -14,75mV, após a diminuição da concentração de EPS, o

Potencial Zeta aumentou até $-11,3\text{mV}$, estabelecendo assim uma relação de proporção inversa. Então, se houver grande concentração de EPS, aumenta-se a repulsão eletrostática das partículas, diminuindo a interação das partículas e conseqüentemente diminuindo a floculação e capacidade de adesão/coesão, tudo isso levando ao fato de haver uma necessidade de observação meticulosa das características do lodo.

Já Guan et al. (2018), ao investigarem as propriedades física da camada dinâmica, analisaram o tamanho da partícula do lodo e do permeado sob diferentes tamanhos de poros, o primeiro apresentou um tamanho médio de aproximadamente $75\ \mu\text{m}$, enquanto os tamanhos de partículas decresceram de acordo com a diminuição do tamanho do poro, estabelecendo uma relação direta com o mesh da membrana suporte. Em sua pesquisa, foi sugerida uma fase adicional no ciclo de vida da membrana, um processo final de três subfases chamadas de: compressão, quebra e dissociação da membrana secundária autoformada. Caracterizada pela diminuição da performance de tratamento físico e químico, num momento em que há a maior passagem de sólidos pela membrana. O processo pode ser exemplificado pela Figura 8.

Figura 8 - Fases de vida útil da Membrana Dinâmica



(a) Antes da formação da membrana dinâmica; (b) Membrana dinâmica formada; (c) Compressão da camada da membrana dinâmica; (d) Quebra e dissociação da camada da membrana dinâmica. Fonte: WANG, et al. (2020).

Sun et al. (2018) buscaram tratar águas residuárias municipais sintéticas pela tecnologia de BRAnMD autoformada, afim de investigar a mudança temporal na estrutura da membrana secundária em uma membrana suporte não-tecido de tamanho médio de poro 30 μm , com três módulos de membrana de leito plano que foram utilizados em configuração submersa, todos com área de filtração de $0,04\text{m}^2$. As amostras foram coletadas em três momentos distintos do processo, no (1) processo de formação, (2) no meio do desenvolvimento do fluxo sustentável e (3) no final do fluxo sustentável. Em termos de remoção, obteve-se uma remoção de 89,4% de DQO e de 99,77% de Turbidez. Quanto à formação da membrana dinâmica, observou-se uma rápida formação da mesma (por volta de 50 minutos) com um abrupto decréscimo do fluxo, configurando-se em um fluxo sustentável por volta de 10 a 30 $\text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$.

Na pesquisa, ao comparar o tamanho de partículas do licor misto com as 3 amostras coletadas, observou-se os respectivos tamanhos: 31,8 (licor misto); 41,5 (1); 31,1 (2); e 29,5 (3) μm , sugerindo que as partículas maiores estão propensas a se depositar e acumular no material de suporte durante o processo de formação, inicialmente liberando a passagem das partículas menores, o que pode explicar o maior tamanho de partícula presente na amostra (1) é a deposição do lodo. Porém com o desenvolvimento da membrana dinâmica a proporção das partículas menores retidas começa a aumentar, chegando ao último estágio retendo partículas menores ao tamanho da membrana suporte, também havendo o aumento da densidade e diminuição da porosidade, contribuindo para uma capacidade de retenção de sólidos maior. Na análise de EPS, foi observada uma maior predominância na quantidade de proteínas, além da conclusão de que os EPS's possuem grande importância na membrana dinâmica autoformada apenas após a formação da mesma, com forte papel no aumento da sua resistência específica, também estudada na pesquisa. Para concluir, também analisaram o Potencial Zeta, encontrando valores estáveis (de -19,67 a -21,37 mV), afirmando que a interação eletrostática possui baixa influência no processo de filtração, contradizendo a pesquisa realizada por Pei et al (2020).

No Brasil, no âmbito do desenvolvimento de pesquisas em ciências e tecnologias ambientais acerca do estudo da Membrana Dinâmica em biorreatores anaeróbios tratando águas residuárias domésticas e lodos, pode-se destacar o estado da Paraíba, em específico do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA), da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). Os estudos tomaram início por volta do ano de 2016, na Estação Experimental de Tratamento de Águas e Esgotos (EXTRABES), pertencente à instituição, rendendo publicações de dissertações, teses e artigos.

No Quadro 3 são expostos os trabalhos desenvolvidos na linha de pesquisa em Membranas Dinâmicas, conduzidos pelo PPGCTA.

Quadro 3: Trabalhos de pesquisas realizados na EXTRABES

Título	Autor	Orientador	Ano
Tratamento de Lodo em Biorreator Anaeróbio de Membrana Dinâmica	MELO.; N., N. de	SOUSA.; J., T. de	2018
Remoção de Nutrientes e Produção de Biogás de Lodo Aeróbio em Biorreator Anaeróbio de Membrana Dinâmica	DUARTE.; A., T., G.	SOUSA.; J., T. de	2019
Aplicação de um Biorreator de Membrana Dinâmica Para o Tratamento de Águas Residuárias	QUEIRÓZ.; A., B. de	LOPES.; W., S.	2019
Caracterização, Solubilização e Tratamento de Lodos de Esgotos com Recuperação de Subprodutos	LOPES.; W. da, S.	SOUSA.; J., T. de	2019
Aplicação de Biorreator de Membrana Dinâmica Submersa no Tratamento de Águas Residuárias Domésticas	SANTOS.; R., B.	LOPES.; W., S.	2019
Utilização de Biorreator Anaeróbio de Membrana Dinâmica no Tratamento de Esgoto Doméstico para Uso Agrícola	NASCIMENTO.; J., N.	LOPES.; W., S.	2021
Pós-Tratamento de Esgoto Doméstico em Filtros Lentos, com diferentes Meios Filtrantes	ALVES.; M., P.	SOUSA.; J., T. de	2020
Desempenho do Biorreator Anaeróbio de Membrana Dinâmica no tratamento de Águas Residuárias Domésticas	CHIMUCA, J.; F.; J.	SOUSA.; J., T. de	2021(a)

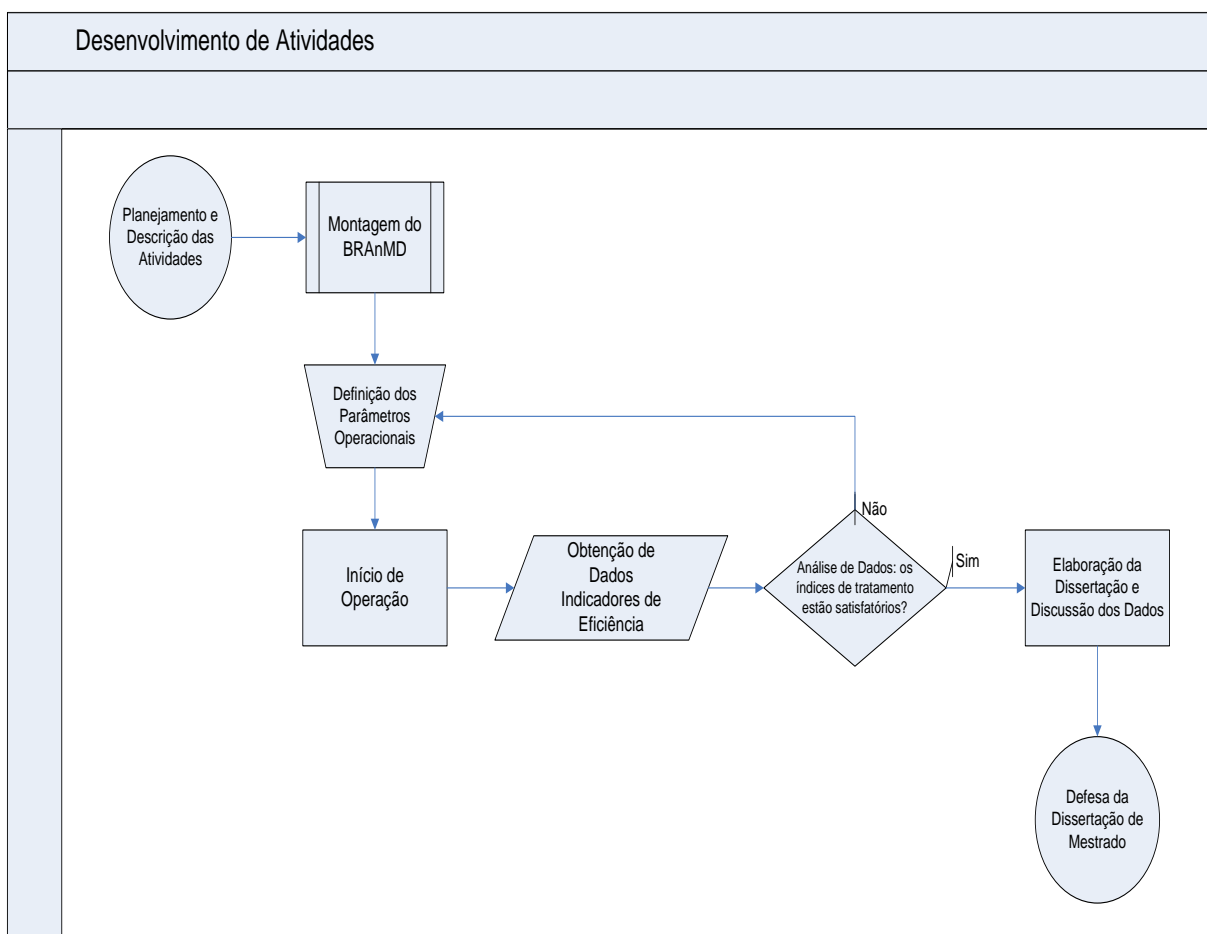
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Observa-se que a linha de pesquisa relacionada de cunho sanitário e ambiental aliado ao desenvolvimento da membrana dinâmica é uma promissora tecnologia alternativa para a realidade da região semiárida do Nordeste, bem como todo o território nacional, vista a alta média de temperatura do país e também o baixo custo da membrana suporte. As pesquisas sugerem a força da tecnologia emergente, como também a melhora dos parâmetros operacionais e investigação dos fatores que afetam a formação da membrana secundária.

4. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada nas dependências físicas da Estação Experimental de Tratamento de Águas e Esgotos (EXTRABES), localizada no bairro do Tambor, na cidade de Campina Grande (Latitude $7^{\circ} 13' 51''$ Sul, Longitude $35^{\circ} 52' 54''$ Oeste), Paraíba, a uma altitude média de 551 metros, pertencente à Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). A pesquisa foi realizada seguindo as etapas descritas no Fluxograma 1.

Fluxograma 1 - Desenvolvimento das Atividades de pesquisa



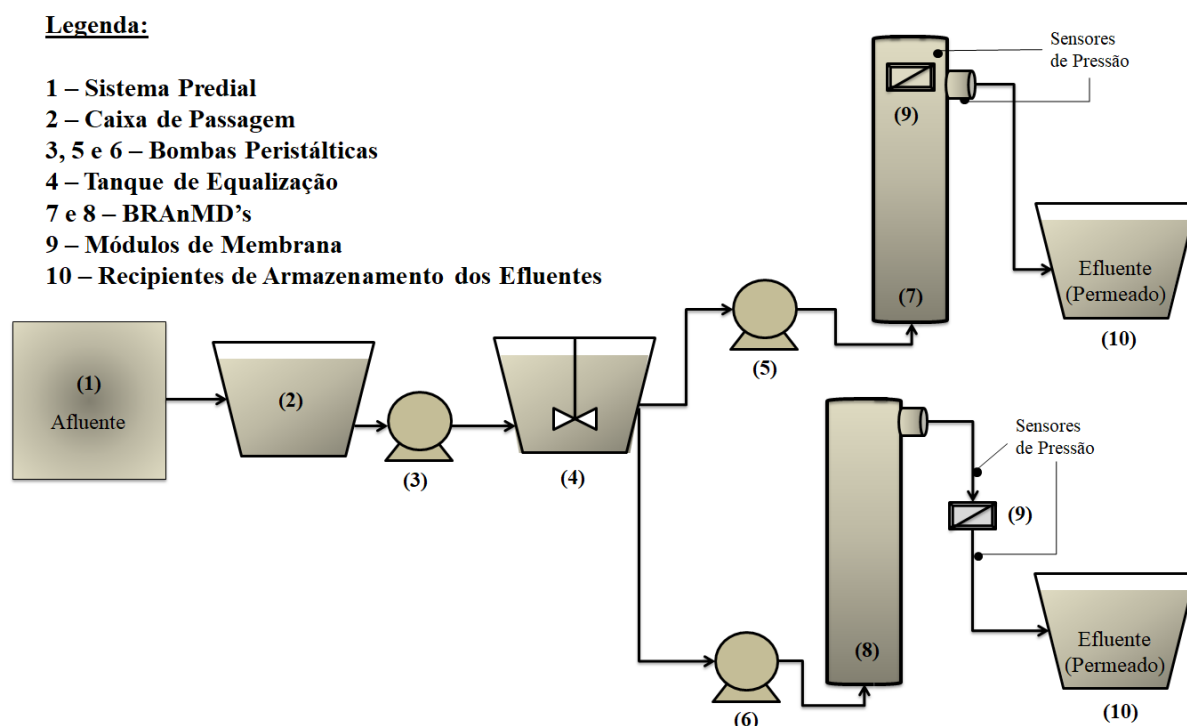
Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

O fluxograma foi desenvolvido com o intuito de estabelecer critérios para considerar a boa aclimação e operação estável dos biorreatores de membrana dinâmica em questão.

4.1. Descrição do sistema experimental

O sistema experimental foi projetado e construído e monitorado como exemplificado na Figura 9, composto da captação e armazenamento do afluente, aplicação aos dois biorreatores anaeróbios de membrana dinâmica e por fim a retirada do efluente (permeado).

Figura 9 - Esquema descritivo do sistema dos Biorreatores Anaeróbios de Membrana Dinâmica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O experimento teve como afluente o esgoto advindo do ponto de captação (1), procedente de um condomínio constituído por 72 apartamentos que fornecem uma vazão média de $30 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, localizada a 200 metros de distância da EXTRABES, o afluente pode ser classificado como água residuária de origem doméstica (esgoto doméstico), em seguida a mesma era direcionada para o tanque receptor (2). O tanque receptor foi responsável pela distribuição do afluente para as pesquisas os respectivos sistemas de BRAnMD's elaborados na EXTRABES. Na pesquisa, o afluente era conduzido com ajuda de um conjunto motor-bomba (3) de fabricante KSB[®], 220 V (modelo 50-160K) para o tanque de equalização (4), sendo responsável pelo acondicionamento da água residuária doméstica e a alimentação diária dos sistemas, o tanque se encontrava elevado 80 centímetros do solo para facilitar o bombeamento para os biorreatores.

Após sua captação e armazenamento, o afluente é transportado através de uma bomba dosadora ProMinent (Concept Plus[®]) (5) ao Biorreator Anaeróbio de Membrana Dinâmica Submersa (7) e para o Biorreator Anaeróbio de Membrana Dinâmica Externa (8), ambos operaram em uma faixa de temperatura classificada como mesofílica (25-35°C).

Com o decorrer da operação, a resistência a filtração do licor misto presente nos reatores BRAnMD's possui a tendência de aumento. Tendo isso como nota e a necessidade do mantimento do fluxo constante, eram realizadas alterações na frequência e força da bomba.

Ambos constituídos de tubos e conexões de Policloreto de Polivinila (PVC) e de formado cilíndrico, com as devidas necessárias para o fechamento hermético dos biorreatores. Na Tabela 1 são apresentados os parâmetros objetivados para a operacionalização do biorreator anaeróbio de membrana dinâmica.

Tabela 1 - Características operacionais dos biorreatores anaeróbios de membrana dinâmica submersa e externa.

BIORREATOR	DIMENSÕES	MÓDULO DE MEMBRANA	PARÂMETROS OPERACIONAIS
BRAnMD SUBMERSA	H = 163cm D = 7,5 cm V = 7,2L	$D_m = 3,5\text{cm}$ $A_m = 9,62\text{cm}^2$ P = 89 μm	TDH = 8h TRC = 104d $Q_e = 0,9 \text{ L.h}^{-1}$ $q_e = 519 - 935,55$ L/m ² .h
BRAnMD EXTERNA	H = 196cm D = 5cm V = 6L	$D_m = 7,0\text{cm}$ $A_m = 38,485\text{cm}^2$ P = 89 μm	TDH = 10h TRC = 104d $Q_e = 0,6 \text{ L.h}^{-1}$ $q_e = 157,89 \text{ L/m}^2.\text{h}$

Fonte: Autor (2022).

A escolha do tempo de detenção hidráulica maior para o BRAnMD de módulo de membrana externa possuiu embasamento na prévia pesquisa de dissertação desenvolvida por Nascimento et al. (2021), também realizada na EXTRABES. A escolha do aumento do parâmetro TDH foi observar a melhora de sua performance, para alcançar dados de remoções próximos aos reportados em BRAnMD de módulo de membrana submerso, por pesquisa realizada por Santos et al (2019b).

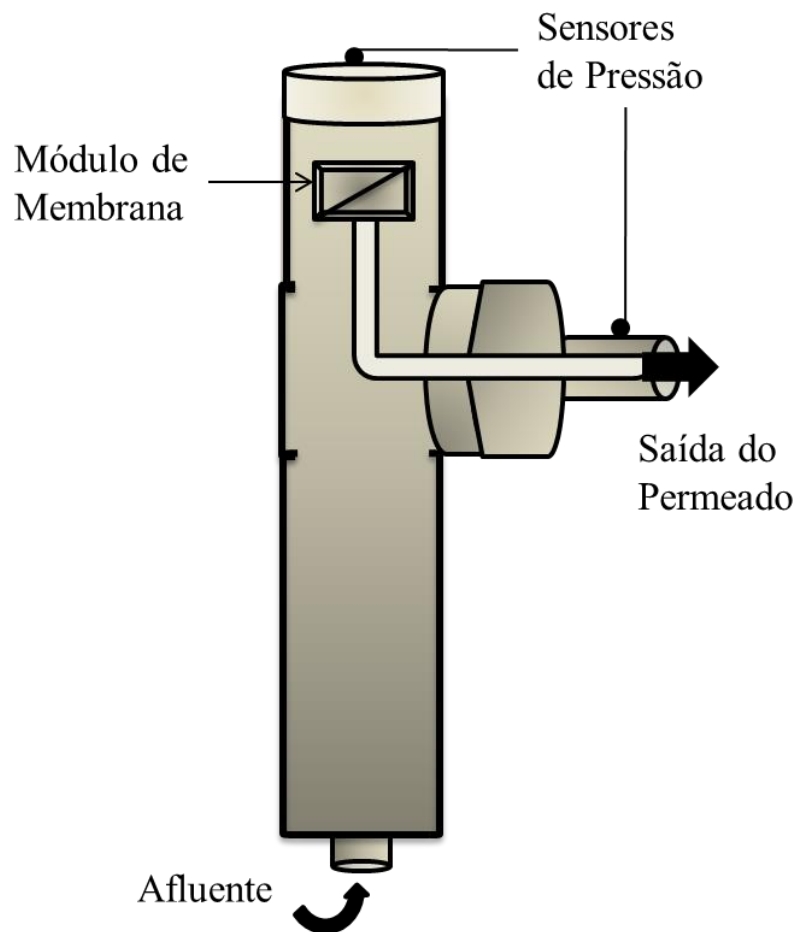
Para melhor aclimação e desenvolvimento da biota necessária para digestão anaeróbia, foi utilizado Lodo como inóculo, obtido de outras pesquisas desenvolvidas na EXTRABES, seu volume de preenchimento se deu pela entrada de aproximadamente 40% do volume total de cada reator. Sua caracterização foi descrita no Item 5.3.

A retirada do permeado no BRAnMD Submersa ocorreu de forma contínua, por ação da gravidade; a saída do permeado no BRAnMD Externa ocorria pela pressão gravitacional exercida pela coluna de água acima do módulo de membrana, cuja altura era de aproximadamente 180 centímetros, configurando em uma pressão de 1,8 m.c.a. Em locais próximos prévios à passagem do afluente pela membrana foram retiradas amostras. Os permeados foram armazenados em recipientes (10) e encaminhados para análises físico-químicas.

4.1.1. Módulo de membrana submerso

A Figura 10 apresenta a o BRAnMD de módulo de membrana submerso.

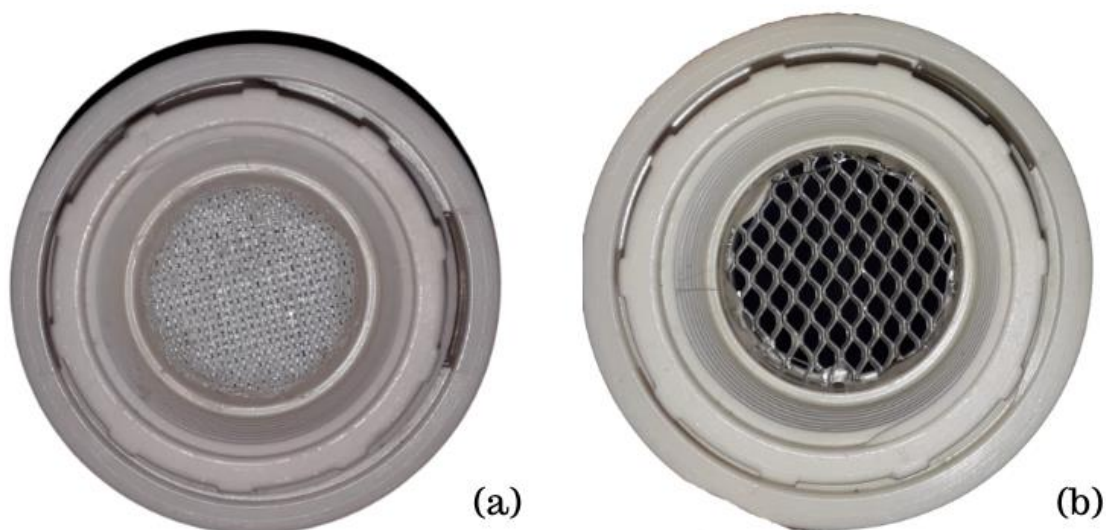
Figura 10 - Desenho esquemático do Biorreator Anaeróbio de Membrana Dinâmica Submersa



Fonte: Autor (2022).

Nele, estão acoplados dois sensores de pressão (MPX5700AP[®]) ao sistema, ao captar a pressão os dados eram encaminhados para uma placa Arduino ATmega328[®], visando acompanhamento constante da Pressão Transmembrana (PTM) em tempo real pelo software SISMOBIO[®], patenteado por Ramos et al. (2020). Isso possibilitou o acompanhamento do processo de desenvolvimento da membrana dinâmica ao longo de todo processo do experimento. Acima do reator havia uma tampa rosqueável, cuja sua finalidade era ser retirada para coleta do Licor Misto, que seria armazenado para realização de posteriores análises. O módulo de membrana possuía uma mangueira acoplada à saída do biorreator. Sua imagem é exposta na Figura 11.

Figura 11 - Módulo de Membrana Submerso acoplado ao Biorreator.



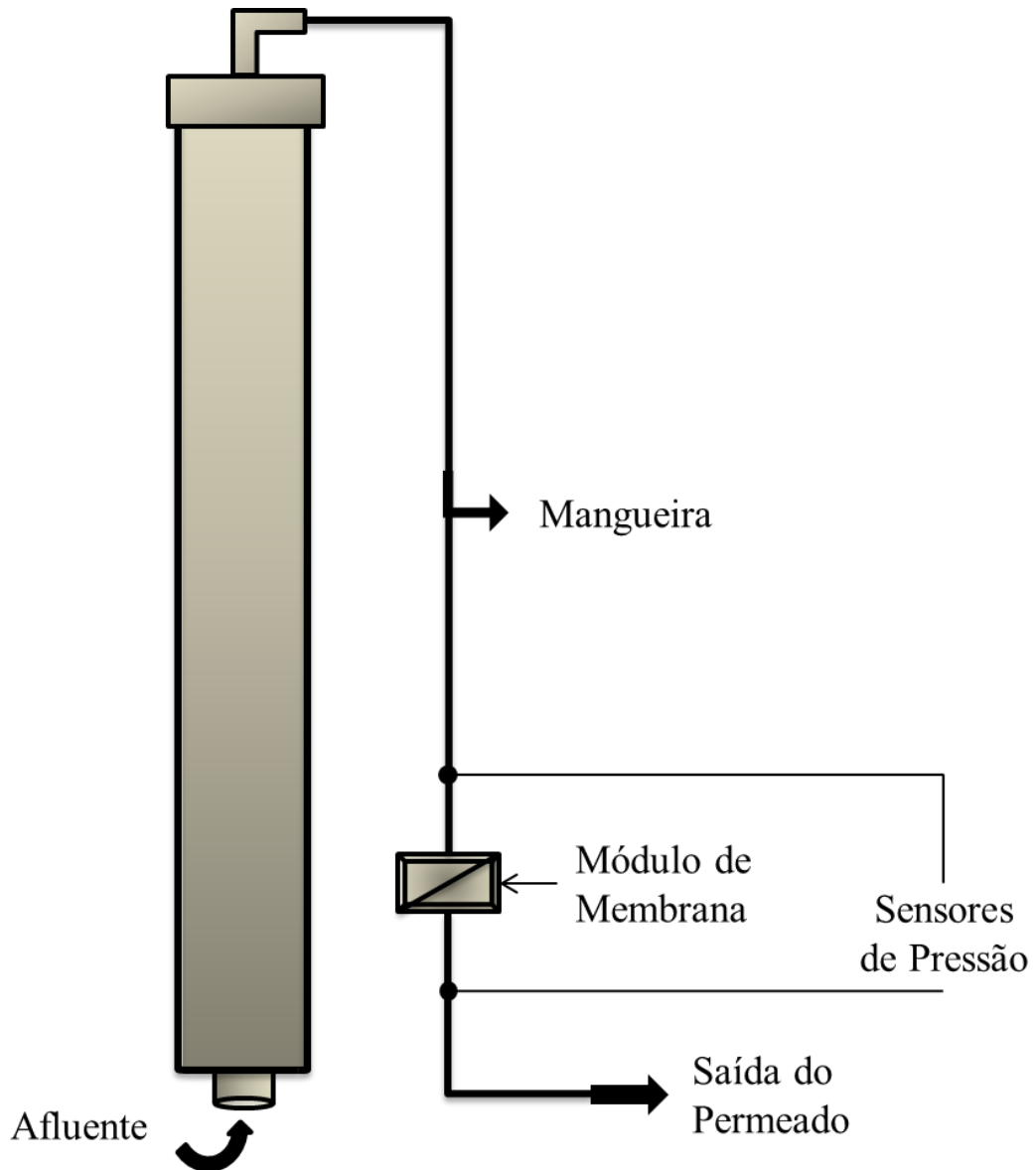
Fonte: Autor (2022).

O módulo de membrana (a) era composto por uma estrutura de PVC, de formato circular e diâmetro menor do biorreator, fixado internamente para a passagem do afluente pelas laterais, o módulo de membrana possui sua superfície inferior acoplada à saída do permeado, para a sustentação para o módulo foram acopladas ligas metálicas (Figura 2(b)) para resistir às variações de pressão. Para a aplicação do módulo de membrana, foi colocada uma tela metálica abaixo da membrana suporte como apoio, com intuito de evitar deformidade no material suporte. O material suporte utilizado foi de malha de polietileno.

4.1.2. Módulo de membrana externo

A Figura 12 apresenta a configuração do módulo de membrana submerso acoplado ao biorreator. No local indicado por “Mangueira” ocorria a retirada do Licor Misto para posterior análise.

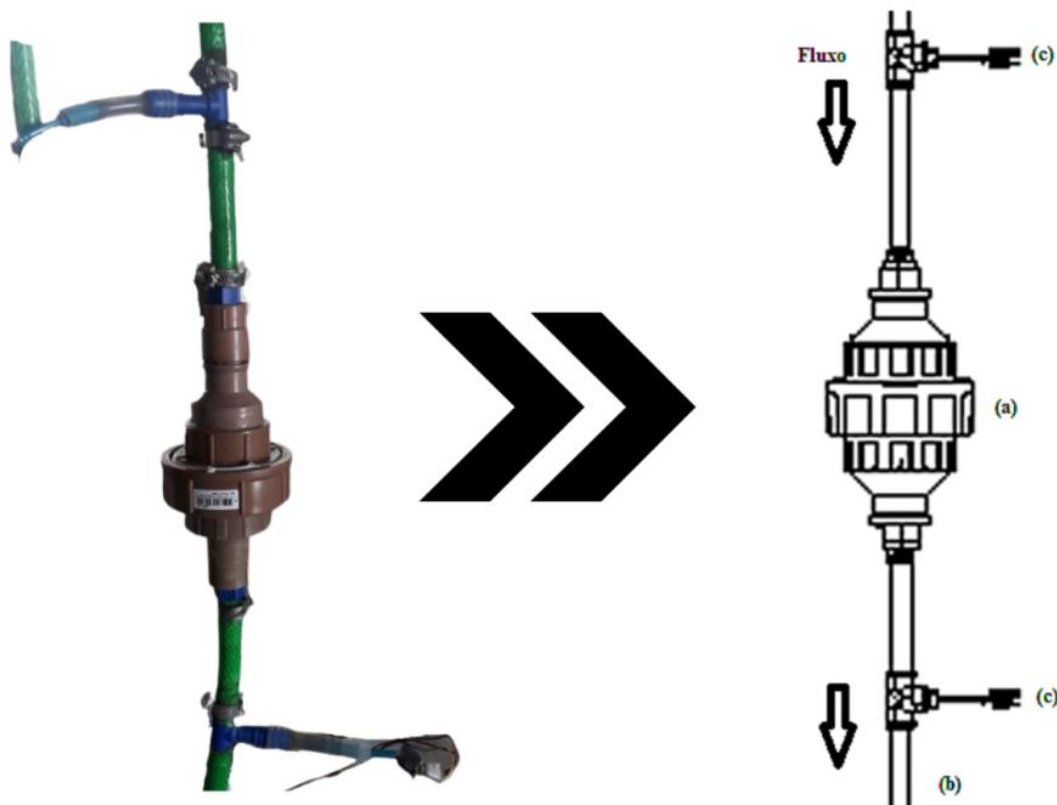
Figura 12 - Desenho esquemático do Biorreator Anaeróbico de Membrana Dinâmica Externa



Fonte: Autor (2022).

A Figura 13 apresenta a configuração do módulo de membrana acoplado ao biorreator.

Figura 13 - Módulo de Membrana Externo acoplado ao Biorreator.



Fonte: (1) Autor, 2022 e (2) Adaptado, NASCIMENTO et al., 2021.

O módulo de membrana (a) era composto por uma estrutura de PVC, de formato circular e que por sua vez foi acoplada a mangueira de saída do biorreator. Dentro do módulo de membrana, também foi colocada uma tela metálica como apoio para evitar deformidade no material suporte. A membrana suporte também era composta por uma malha de polietileno. Após a passagem do afluente, o através da diferença de pressão hidráulica, ocorria a saída do permeado (b).

Também estão acoplados dois sensores de pressão (c) (MPX5700AP[®]) ao sistema, ao captar a pressão os dados serão encaminhados para uma placa Arduino ATmega328[®], visando acompanhamento constante da PTM em tempo real pelo software SISMOBIO[®], desenvolvido por Ramos et al. (2020).

4.1.3. Cálculo da pressão transmembrana

Uma placa micro controladora foi conectada aos sensores de pressão, para controle e coleta de dados, os sensores forneceram os valores de pressão em tempo real, e ao fim do dia o software realizava a média aritmética dos dados colhidos, obtendo o valor da PTM diária. O cálculo da PTM foi realizado através da Equação 1:

$$PTM = P_e - P_s$$

Em que: P_e : Pressão de entrada;

P_s : Pressão de saída.

4.1.4. Cálculo da resistência a filtração

Com a obtenção da PTM e a viscosidade, pode-se calcular a resistência a filtração, o cálculo está disposto na Equação 2:

$$R_t = \frac{PTM}{\mu * q_e}$$

Em que: R_t : Resistência a filtração (m^{-1})

PTM: Pressão Transmembrana (Pa)

μ : Viscosidade Dinâmica (Pa.s)

q_e : Fluxo ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)

A viscosidade utilizada no cálculo foi a encontrada na água residuária doméstica concentrada foi de 1,425 mPa.s.

4.2. Caracterização das amostras

O monitoramento geral dos biorreatores e investigação da formação da membrana dinâmica se deram principalmente pelos parâmetros da pressão transmembrana, turbidez e tamanho de partícula do permeado, a primeira era realizada diariamente pelo software SISMONBIO[®] (Ramos et al., 2020), e contempla o acompanhamento de desempenho do reator com o intuito de mitigar eventuais problemas, pelo menos duas vezes ao dia. Já a turbidez, foi medida pelo turbidímetro digital portátil TB-1000P TECNOPON[®], com medição de seis dias na semana, enquanto o tamanho de partícula foi analisado no start-up, do segundo até o oitavo dia de operação, e após isso, a análise era feita por duas vezes por cada semana, através da máquina Brookhaven[®] 90plus PALS, as diluições utilizadas para o lodo, afluente e permeado fora de 1:200, 1:5 e 1:2, respectivamente, as diluições possuíam intuito de facilitar a leitura realizada pelo equipamento.

O critério de estabilização da operação consistiu na observação do fluxo inicial constante, bem como a observação da necessidade manutenção das bombas e mangueiras presentes. Após estabilização das condições operacionais dos biorreatores, foram realizadas as análises de pH [método Seção 4500/APHA (2012)], AGV [método de BUCHAER *et al* (1999)], Alcalinidade [método 2320 B/APHA (2012)], Cor real [método 1209 D/APHA (2012)], Sólidos Totais, Sólidos Totais Dissolvidos e Fixos, Sólidos Suspensos Voláteis e Fixos [método 2540 E./APHA (2012)]. Demanda Química de Oxigênio Total e Solúvel (DQOt e DQOs), feita pela metodologia 5220 C/APHA (2012); Carboidratos - Lowry modificado por Frølund *et al.* (1995); Proteínas - Dubois *et al.* (1956), a partir das duas últimas foram quantificadas as concentrações de SMP; Viscosidade Dinâmica, que foi analisada pelo Viscosímetro Rotativo Microprocessado-Q860M26[®]; Tamanho de Partículas e Potencial Zeta – analisada pela máquina Brookhaven[®] 90plus Pals; Ovos de Helminhos - (WHO, 1989) modificado por Bailenger; e Coliformes Totais – Colilert, as últimas foram realizadas após a estabilização operacional dos bioerratores.

As análises realizadas do Licor Misto possuíram a finalidade de monitorar a mistura da água residuária com o Lodo após o processo de Tempo de Detenção Hidráulica e para comparação de suas características após a passagem na membrana dinâmica, foram: Tamanho de Partícula; Potencial Zeta; Proteínas e Carboidratos (SMP); as caracterização buscou o entendimento das características do estado do efluente prestes a passagem da filtração por membrana.

A caracterização do Lodo Inóculo foi realizada com o intuito de compreender a sua influência no processo anaeróbio (população microbiana) de formação da membrana dinâmica. Tendo isso em vista, as análises realizadas foram: pH, Sólidos Totais e Sólidos totais Voláteis; DQO_t, Viscosidade, Tamanho de Partículas e Potencial Zeta. Todas as análises foram realizadas seguindo as metodologias especificadas anteriormente.

4.3. **Análise dos dados**

O tempo de operação estipulado foi de aproximadamente quatro meses. A coleta das amostras foi realizada semanalmente. O desenvolvimento dos gráficos e cálculos, bem como a obtenção de médias e porcentagem, foi realizado através do software Microsoft Excel.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O processo de partida nos reatores se deu no mês de fevereiro de 2021, com a adição do lodo inóculo seguido da água residuária doméstica concentrada. Porém, devido a problemas operacionais, necessidade de ajuste de vazão nos biorreatores, a saída do efluente (permeado) se caracterizou de uma forma em que os índices de tratamento não se tornaram satisfatórios para a continuidade das atividades, sendo necessários ajustes. A variação de vazão no sistema indicou a crescente resistência à filtração, devido ao processo de formação da membrana dinâmica aliada à característica analógica da bomba, demandou a necessidade da adição de uma válvula de retenção localizada na entrada de cada biorreator. Efetuados os devidos ajustes nos biorreatores, o êxito de partida se deu no mês de Agosto, por fim, a operação do sistema se deu por 104 dias.

5.1. Caracterização do lodo inóculo

A Tabela 2 exibe os resultados obtidos da caracterização do lodo inóculo.

Tabela 2 - Características físico-químicas do Lodo Inóculo.

Parâmetro	Valor
pH	7,45
ST (g.L ⁻¹)	9,05 ± 0,47
STV (g.L ⁻¹)	5,23 ± 0,73
DQO _t (g.L ⁻¹)	7,06 ± 0,25
Tamanho de Partícula (µm)	243,66 ± 205,85
Potencial Zeta (mV)	-17,60 ± 1,21
Viscosidade dinâmica (mPa.s)	1,99

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Conforme a Tabela 2, o pH se mostrou dentro da normalidade, indicando baixo risco de inibição da atividade microbiana. Os resultados dos sólidos e suas frações apresentados evidenciam um lodo de biomassa com características que próximas ao equilíbrio, uma vez que a relação STV/ST se deu por aproximadamente 0,58, sendo uma relação importante para evidenciar a estabilidade do lodo. Uma relação que poderia se configurar de modo mais

elevado, uma vez que é de interesse da pesquisa um lodo com maior quantidade de biomassa, que pode ser atestada por um maior valor no parâmetro de STV.

Com relação ao parâmetro de DQO foi observado uma média de $7,06 (\pm 0,26) \text{ g.L}^{-1}$, podendo ser atribuída ao lodo com elevada carga de matéria orgânica. Com respeito ao tamanho de partícula, foi obtido valor médio de $243,66$ com variação de $\pm 205 \mu\text{m}$, um valor relativamente alto, com ampla variação do tamanho, com valores aproximadamente iguais ao dobro pelo relatado por Yang et al (2019) e o triplo por Guan et al. (2018), portanto, auxiliou a formação da membrana sem causar o entupimento total dos poros, ajudando na formação da membrana sem causar o entupimento do tipo (a), apresentado anteriormente na Figura 4, de outra maneira pequenas partículas presentes no lodo poderiam passar junto ao efluente, aumentando a turbidez, trazendo baixa retenção de biomassa.

Isik et al. (2019) constataram que com relação ao tempo, a formação da membrana dinâmica pode ser encurtado no momento em que ocorre a suspensão de lodo no Licor Misto nos biorreatores, desde que as partículas do mesmo se caracterizem com diâmetros médios maiores aos do poro da membrana suporte.

Deve ser salientado que esses resultados foram provenientes de uma diluição de 1:200. Essa diluição foi necessária devido à faixa de leitura do equipamento, especialmente na análise de tamanho de partícula, que possui limitação ao lidar com amostras bastante turvas e de altas concentrações, além disso, há uma limitação na capacidade de leitura de grandes partículas, o que pode ter contribuído para uma variação exacerbada no valor do tamanho da partícula.

O valor do potencial zeta também se mostrou propenso para a formação da membrana, com valores recorrentes a pesquisa de Yu et al. (2018) e Pei et al (2020), potencial zeta, foi obtido o valor médio de $-17,60 (\pm 1,20) \text{ mV}$, os quais afirmaram que a característica de instabilidade eletrostática conferida às partículas do lodo ajuda no processo de adesão das partículas na superfície da membrana suporte.

A viscosidade, como parâmetro de força resistiva ao fluxo, se apresentou em média o dobro da característica da água (1 mPa.s), ou seja, duas vezes a resistência oferecida à passagem do líquido pelas tubulações, mais uma vez expondo a capacidade de aglutinação do lodo, além disso, mostrou que a fase do lodo se mantém na parte inferior do reator, evitando a mistura em demasia com o afluente, o que é necessário para mitigar o entupimento da membrana, provavelmente devido ao parâmetro da escolha do fluxo, que encontrou conformidade com as características do lodo.

5.2. Caracterização do licor misto

A Tabela 3 apresenta médias de dados relacionados ao Potencial Zeta e Tamanho de Partícula do licor misto proveniente dos biorreatores, mistura do lodo com esgoto que se forma no biorreator anaeróbio.

Tabela 3 - Características do Licor Misto dos BRAnMD's

Parâmetro	Valor	
	BRAnMD Submersa	BRAnMD Externa
Potencial Zeta (mV)	-18,95±7,5	-17,31±3,66
Tamanho de Partícula (µm)	67,48±27,26	68,82±58,19
Carboidratos (mg.L ⁻¹)	37,51±12,32	39,49±7,67
Proteínas (mg. L ⁻¹)	82,70±10,89	79,40± 22,57

Fonte: Autor (2022).

É possível observar pequena diferença entre potencial zeta do licor misto e o lodo inóculo, indicando o mantimento da capacidade de adesão e coesão na membrana primária e entre partículas presentes na membrana dinâmica.

Quanto ao tamanho de partícula, valores inferiores foram encontrados quando comparados com o tamanho da partícula do lodo, depreendendo-se que a digestão anaeróbia se fez presente no biorreator, devido ao fato de promover a quebra das partículas com maiores tamanhos. No BRAnMD de membrana Externa foi possível constatar uma maior variabilidade no tamanho de partícula.

Outro fator que traz a possibilidade de inferir que a biodigestão anaeróbia ocorreu é a temperatura, que se encontrou em valores mesofílicos, com a maioria do período de operação com valores próximos a 30°C, uma temperatura considerada favorável por Siddiqui et al (2021), pois uma temperatura muito elevada pode auxiliar a atividade microbiana, porém pode trazer a defloculação do lodo e aumentar a produção de produtos microbianos solúveis em uma quantidade demasiada, acelerando o *fouling* e conseqüente diminuição do fluxo.

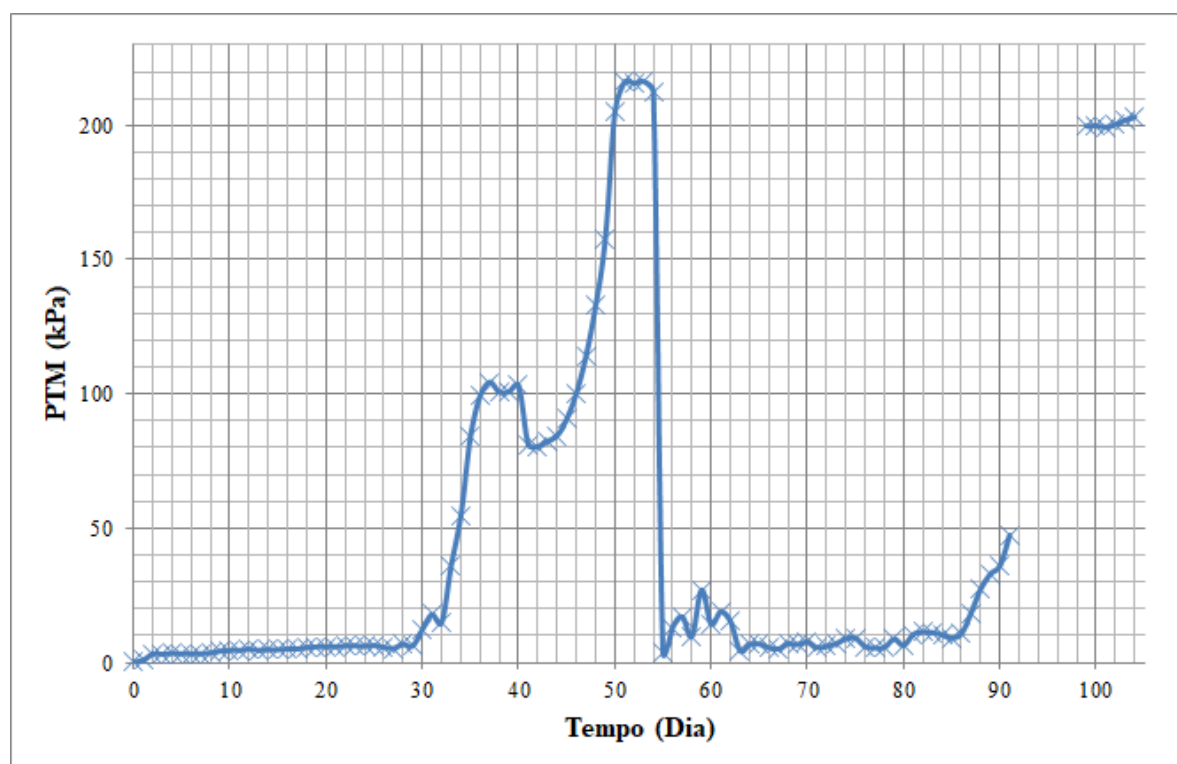
Com relação ao teor de carboidratos e proteínas, os valores nos biorreatores anaeróbios de membrana submersa e externa, foram praticamente semelhantes.

5.3. Formação da membrana dinâmica

5.3.1. Pressão transmembrana e resistência a filtração

Como discutido em referencial teórico, no Quadro 2, pertencente ao tópico 3.2.2., os valores de pressão transmembrana possuem importância de destaque na avaliação dos estágios de formação da membrana dinâmica, bem como o momento que demanda a retrolavagem. Buscou-se investigar o mecanismo de formação da membrana dinâmica, então foram desenvolvidos os **Gráfico 1** e **Gráfico 2** que mostram as variações da pressão transmembrana durante toda operação em BRAnMD's. O Gráfico 1 e sua discussão seguem em sequência.

Gráfico 1 - Valores médios da Pressão Transmembrana referentes ao BRAnMD de módulo submerso



Fonte: Autor (2022).

Nos dois primeiros dias, foi observado o aumento da pressão de 0 para aproximadamente 3kPa, indicando a primeira fase da formação da membrana secundária, a adesão das partículas, formando a camada da torta. Em seguida valores médios de 3 a 6 kPa são observados, mostrando o momento de formação reconhecido pela literatura como camada

de gel, obtendo a coesão das partículas, como indicado por Yu et al. (2018) e Mohan & Nagalakshmi (2020).

Apesar do alto fluxo, o valor da PTM se mostrou constante durante o tempo de operação após o start-up e retrolavagem, o que não afetou os dados de remoção de DQO, sugerindo uma membrana estável, como levantado por Yu et al. (2018). Apenas a partir do 30º dia, a pressão aumentou para 12 kPa e cresceu vertiginosamente até médias de 100 kPa.

Entretanto, com intuito de se observar a capacidade de operação do BRAnMD, manteve-se a operação durante mais duas semanas, até a observação de um processo inviável, tanto pela queda abrupta do fluxo, quanto pela qualidade do permeado (a ser contemplada na discussão da Turbidez, DQO e Tamanho de Partícula), sendo necessária uma retrolavagem no 55º dia de operação.

Após a retrolavagem foi observado uma operação com valores de pressão entre 13 e 27 kPa, o que poderia ainda ser resquícios de partículas presentes na membrana suporte, como levantado por Hu et al. (2017), após esse tempo, a operação voltou a se manter em níveis menores, oscilando entre 5 e 10kPa, médias maiores que o primeiro ciclo de operação. Na sequência, após praticamente o mesmo número de dias de operação, notou-se um aumento semelhante à primeira fase de operação.

Do 92º ao 98º dia, ocorreu um problema operacional no software, decorrente da fiação de energia, do qual não foi possível a recuperação dos dados. Com a volta da possibilidade de observação da pressão, foram reportados valores de 199 a 203 kPa, aproximadamente.

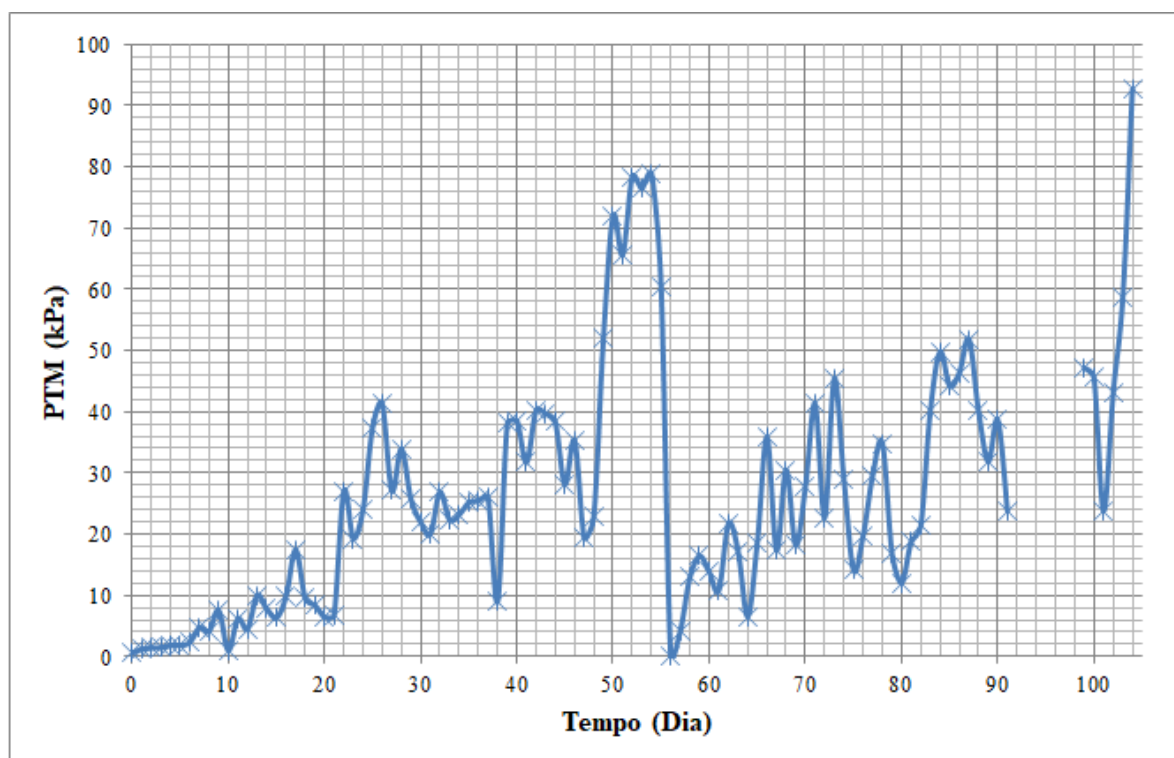
Os valores mostram-se, aproximadamente, o dobro do relatado por Santos et al. (2019b), que operou um reator de configuração semelhante, isso traz uma nova perspectiva em relação a capacidade de operação da membrana dinâmica, além de confirmar a influencia do tipo de configuração de reator na capacidade de formação e desempenho da membrana dinâmica, porém deve-se levar em conta outros fatores, como o lodo, concentrações de sólidos, substâncias extracelulares e tamanho da partícula.

Com relação à resistência de filtração, foi possível observar três momentos de aumento de magnitude no parâmetro em questão para o ciclo de partida até a retrolavagem, o primeiro momento pode-se caracterizar no momento de partida e após retrolavagem, em que ocorreu a pressão constante, com médias de $1,2 \cdot 10^{10}$ e $2,5 \cdot 10^{10} \text{ m}^{-1}$, respectivamente. O segundo momento se caracteriza com os primeiros picos de pressão, apresentando-se com valores próximos a $2 \cdot 10^{11}$ e $3,6 \cdot 10^{10} \text{ m}^{-1}$, o segundo valor pode ter se caracteriza ameno devido a lacuna de dados disponíveis. E por fim, no último pico de pressão, números médios de $4,7 \cdot 10^{11}$ e $4,6 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-1}$.

Em suma, é possível inferir que a operação estável da membrana dinâmica se deu durante praticamente todo o processo, e mesmo como aumento da pressão, não houve perda imediata na estabilidade do permeado.

Dando continuidade ao levantado, no **Gráfico 2** é apresentado, o comportamento da PTM em BRAnMD Externa.

Gráfico 2 – Valores médios da Pressão Transmembrana referentes ao BRAnMD de módulo externo



Fonte: Autor (2022).

Com o alto fluxo, o valor da PTM se mostrou com variações em intervalos de tempo, porém foi nítida a crescente de valores durante a operação, o que pode ter afetado nos dados de remoção de material orgânico. Nos primeiros sete dias a pressão pouco oscilou, com valores abaixo de 5 kPa.

No início da operação, foi observado a pressão transitando com valores entre 0 e 0,6 kPa, isso pode se dar pela pressão da coluna d'água, após isso a PTM se manteve em aproximadamente 1,5 kPa nos cinco primeiros dias, somente após o sexto dia a pressão aumentou para valores próximos a 5 kPa.

Do 9^o ao 21^o dia a pressão se mostrou entre valores de aproximadamente 7 a 17,4 kPa, com média de 7,8 kPa durante essa fase de operação, indicando o primeiro momento de

formação da membrana na adesão das partículas à superfície da membrana dinâmica indicando o primeiro momento de formação da camada da torta, sendo a adesão das partículas, e a partir do vigésimo segundo dia médias de pressão praticamente triplicaram, essa mudança brusca pode indicar a formação da camada de gel, como indicado por Yu et al. (2018) e Wang et al. (2020).

Do dia 48^o ao 55^o, foi notado um aumento da PTM para números próximos a 80 kPa, como relatado por Mahat et al. (2018) e Guan et al. (2018), neste caso, foi optado pela realização da retrolavagem, também tendo em vista a inviabilidade do aumento da pressão exercida pela bomba quanto pelo abrupto declínio do fluxo.

É interessante observar que após a retrolavagem a pressão se apresentou, em média, com 13 kPa, a constatação reforça o velocidade acentuada de formação da membrana secundária após a realização da limpeza da torta. O crescimento subsequente da pressão, em média, dobrou na segunda e terceira semana. Havendo um salto para aprox. 38 kPa, e após o problema operacional para 43 kPa, apresentando valores próximos aos de Ersahin et al. (2018), Isik et al. (2019) e Chimuca (2021b). Por fim, no último dia de operação, ainda foi observado um aumento da pressão para 92 kPa.

O comportamento dos dados de resistência a filtração, de certo modo, são análogos aos apresentados ao BRAnMD Submersa, no primeiro momento de formação, encontraram-se valores médios de $2,5 \cdot 10^{11}$ e $4,4 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-1}$. O segundo momento foi o mais destoante quando comparado, de valores de $4,9 \cdot 10^{11}$ e $2,7 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-1}$, também possivelmente pelo fato da perda de dados. E por fim, resistências de $1,2 \cdot 10^{12}$ e $7,8 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-1}$.

Os dados de resistência à filtração, quando comparados a trabalhos por de Ersahin et al. (2018), que resultaram em valores de magnitude de 10^{16} m^{-1} , apresentando baixíssimos valores. Enquanto Li et al. (2018) observaram valores na ordem de 10^9 m^{-1} , exibindo maior proximidade ao presenciado em pesquisa vigente. Então, pode-se deduzir que a baixa resistência de filtração pode trazer benefícios na força aplicada em bombas e reduzir gastos de operação em energia.

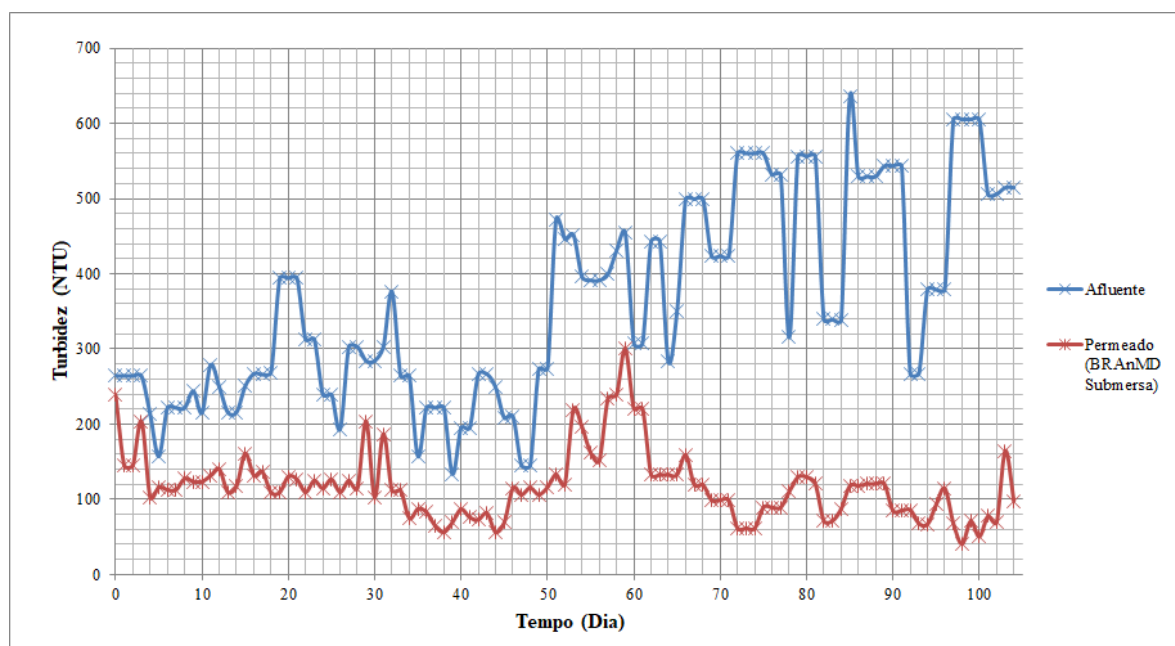
Nos dois biorreatores, foi notória a capacidade de resiliência da membrana dinâmica às variações de pressão, com rápida formação da membrana após a retrolavagem. Os valores de resistência a filtração levam a corroborar com a afirmação da capacidade rápida de regeneração da membrana e a permanência de algumas partículas na membrana primária, o que trouxe praticamente o dobro da resistência oferecida na filtração após a efetuação da retrolavagem física. Tal fato pode levar a conclusão da definição de uma limpeza química esporádica em determinados ciclos de operação, ou troca da membrana primária após longos

períodos de tempo, devido seu baixo custo. Ademais, para o tipo de lodo e água residuária utilizada na pesquisa, a configuração do módulo de membrana localizado de modo submerso, quando comparado com o módulo de membrana externa, ofereceu uma melhor estabilidade e capacidade formação da membrana dinâmica.

5.3.2. Turbidez

Para melhor elucidação da relação com parâmetro da Turbidez, os gráficos com relação ao seu comportamento dos BRAnMD serão expostos separadamente. O gráfico 3 demonstra o comportamento da grandeza em biorreator de módulo submerso.

Gráfico 3 - Comportamento de Turbidez em BRAnMD de Módulo Submerso



Fonte: Autor (2022).

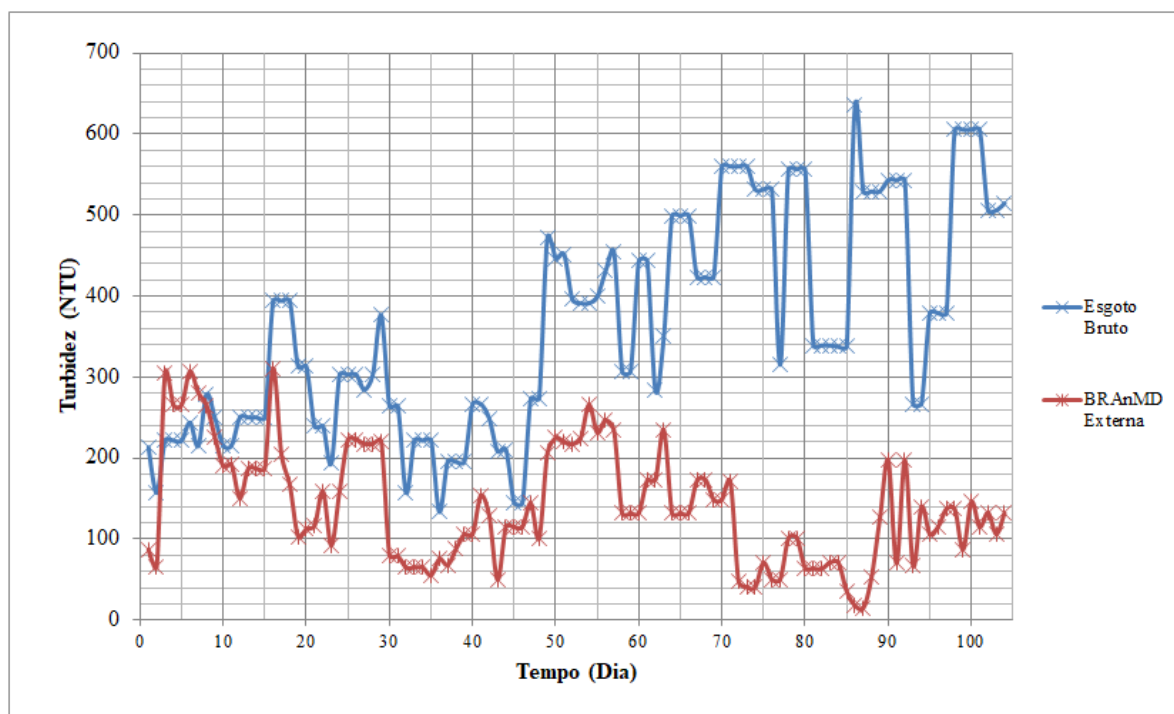
No afluente é possível observar que os valores de turbidez se mostraram altos e com grande oscilação, com média de $360,4 \pm 134,2$ NTU, e com valores ainda mais altos quando analisados os últimos 30 dias de operação, sendo 487 ± 89 NTU.

A primeira semana pode ser caracterizada pelo momento de formação da membrana dinâmica. Após a segunda semana de operação da membrana, pode-se destacar o nível de remoção da Turbidez acima de 50%, o que sugere a formação de uma membrana estável. Com a turbidez chegando à valores próximos de 55 NTU.

Após a retrolavagem, a subsequente primeira semana de operação apresentou remoções na turbidez na faixa de 28 a 60%. Na sequência, a faixa de remoção de turbidez apresentou uma faixa de remoção que transitou de 70 a 90%, de média geral de 78%, com destaque para o 98º dia, no qual foi possível relatar uma remoção de 93% (número de 40,1 NTU), valor abaixo da média relatada por Santos (2019b) justamente em um dia em que o valor de entrada foi um dos mais altos em pesquisa (605,3 NTU).

O Gráfico 4 apresenta os resultados de turbidez obtidos com relação ao biorreator de módulo de membrana externo.

Gráfico 4 - Comportamento de Turbidez em BRAnMD de Módulo Externo



Fonte: Autor (2022).

É observado que o desempenho de remoção da turbidez do biorreator na primeira semana se mostrou baixo, com momentos dos quais a turbidez se fez maior que os valores de entrada. Levando a afirmação da não formação da membrana dinâmica na primeira semana de operação, o que pode ser afirmado por literaturas explícitas em referencial teórico.

A partir da segunda semana, a média de remoção já se figurou por volta dos 19%; na terceira semana já foi observado um índice de remoção de 48% e, por fim, sendo alcançada uma média de remoção de 53% até a primeira retrolavagem, já levando a conclusão da formação de uma membrana dinâmica matura após 21 dias de operação.

Após a retrolavagem e a primeira semana de reformação da membrana dinâmica, valores de turbidez com médias de $102 \pm 48,9$ NTU (média de remoção $77,9 \pm 11\%$) no permeado, trouxeram mais animosidade para a performance relatada na observação.

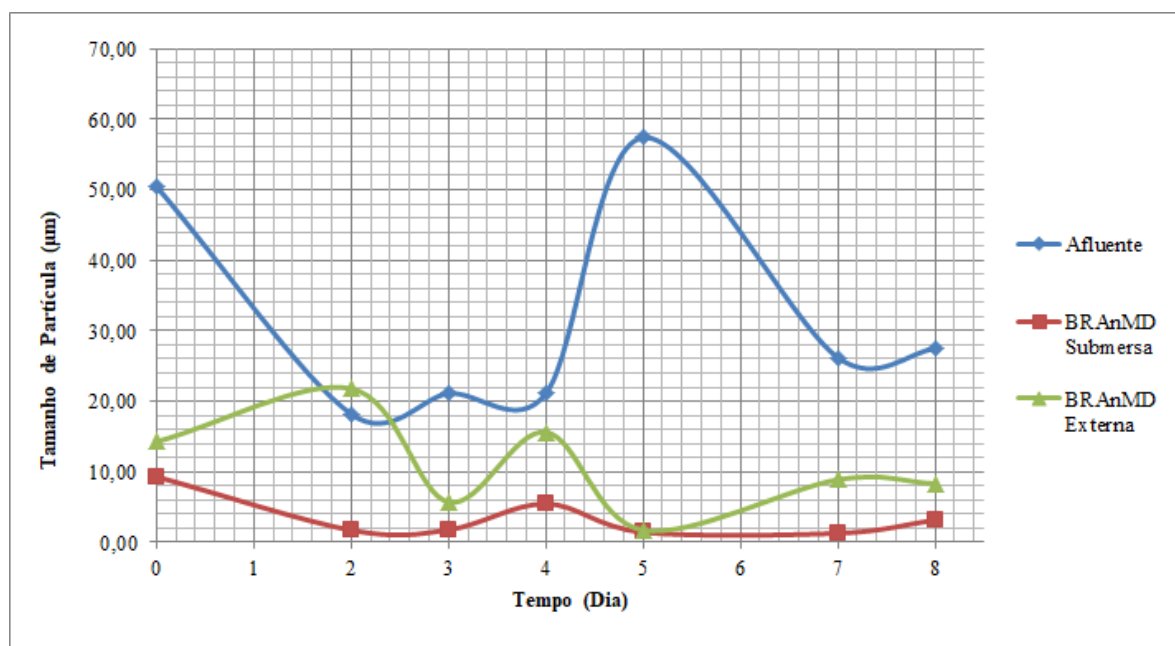
A combinação da coluna d'água com o tamanho de poro acima da média utilizada em pesquisas pode ter influenciado negativamente na formação da membrana dinâmica, como também levantado por Siddiqui et al. (2019) ao constatar que o poro grande aumenta o tempo de formação e valor de turbidez, além de diminuir o poder de separação sólido-líquido. Do mesmo modo ao relatado pela revisão bibliográfica citada, com o fim da operação, foi possível concordar com o enunciado da melhora gradativa do poder de tratamento da tecnologia quando se há o prolongamento da operação.

A discussão análoga à operação dos BRAnMD's que pode ser trazida é uma queda na qualidade do efluente tanto no momento de dissociação da membrana, quanto após a efetivação da retrolavagem, assertiva que pode ser reforçada pela referencia de Vergine et al. (2021b). Outra questão importante que se pode evidenciar no desempenho das membranas secundárias, é a estabilidade nos valores de turbidez apesar das variações nos valores de entrada da água residuária doméstica concentrada aliados a vultosos fluxos impostos à operação, sendo uma boa opção de tecnologia para afluentes com altos valores e grandes oscilações.

Os valores de turbidez abaixo de 5 NTU indicados por Wang et. al (2012), Yu et. al (2018) e Mohan & Nagalakshimi (2021) ainda se mostram distantes, não obstante, é importante destacar que os estudos relatados contemplaram em sua maioria águas residuárias com valores de turbidez abaixo de 250 NTU, serem águas sintéticas e além do fato de relatarem os estudos com uso de membranas dinâmicas com materiais pré-depositados, o que auxilia na remoção da membrana dinâmica.

5.3.3. Tamanho de partícula

O parâmetro destacado no tópico auxilia no conhecimento da tendência de formação da MD e na comparação da capacidade de filtração da membrana dinâmica em relação às membranas convencionais. O Gráfico 5 apresenta a primeira semana de operação dos BRAnMD's, o intuito tinha como base a análise da estruturação da membrana dinâmica no início da operação, considerado um dos momentos determinantes da operação, onde pode definir a capacidade de tratamento da tecnologia. O Gráfico 5 mostra o comportamento do tamanho das partículas na primeira semana de operação.

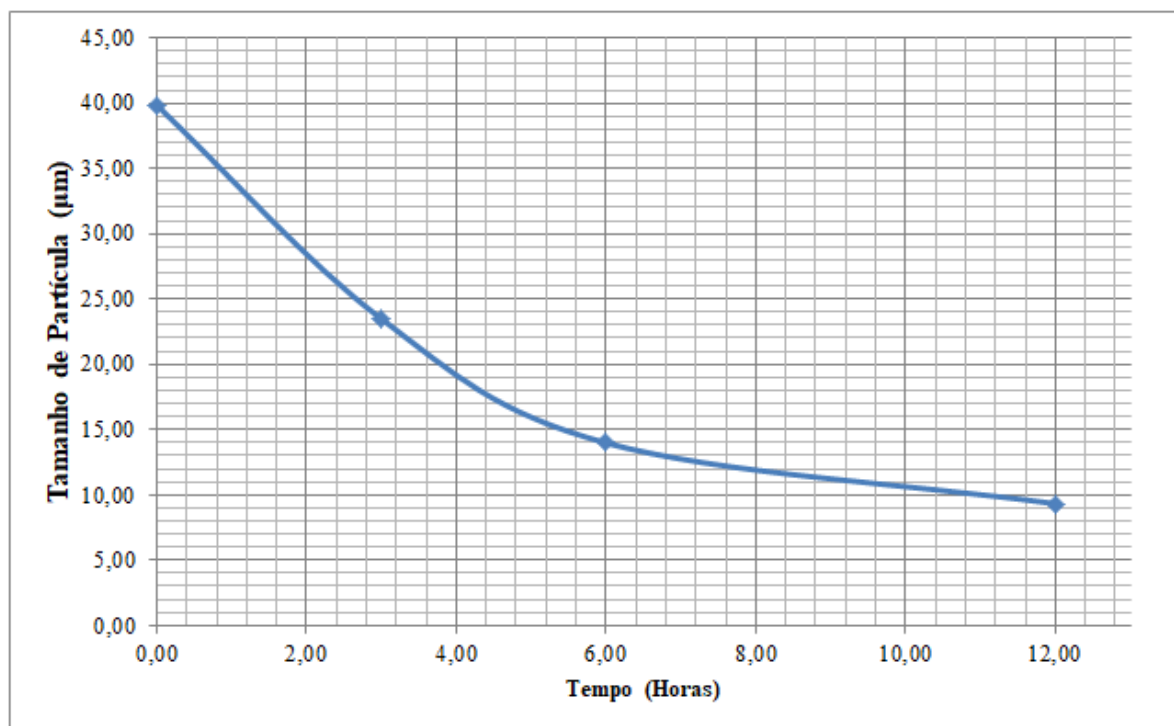
Gráfico 5 – Tamanhos de Partícula na primeira semana de Operação

Fonte: Autor (2022).

É possível notar que no 2º dia de operação o tamanho da partícula do permeado relativo ao módulo de membrana externo se apresentou maior que o valor presente no esgoto bruto, comportamento semelhante aos valores apresentados nos parâmetros de turbidez observados anteriormente. Isso leva a crer na carência de um processo inicial de formação da membrana dinâmica, o aumento do tamanho da partícula pode ter se dado pelo acúmulo das partículas na superfície da membrana suporte, mas não de uma forma que pudesse resistir à pressão da coluna d'água, porém, após isso – e ao longo de toda a operação - os valores sempre se mostraram abaixo do tamanho de partícula de entrada. Após o 5º dia de operação os tamanhos de partícula já se mostraram abaixo dos 10 µm, sendo um valor próximo da caracterizada microfiltração (SIDDIQUI et al., 2021).

Destaca-se o BRAnMD de módulo de membrana submerso, no qual foi possível analisar a diminuição do tamanho da partícula nas primeiras horas de operação. Foram coletadas amostras no primeiro dia de operação, e com três e seis horas em seguida, para ambos os biorreatores, porém apenas foi notada uma diminuição gradativa no BRAnMD de membrana submersa, que pôde ser percebida no rápido aumento da pressão no primeiro dia de operação. O intento foi de testemunhar o primeiro momento de formação da membrana, a camada de gel, que pode ser observado no Gráfico 6.

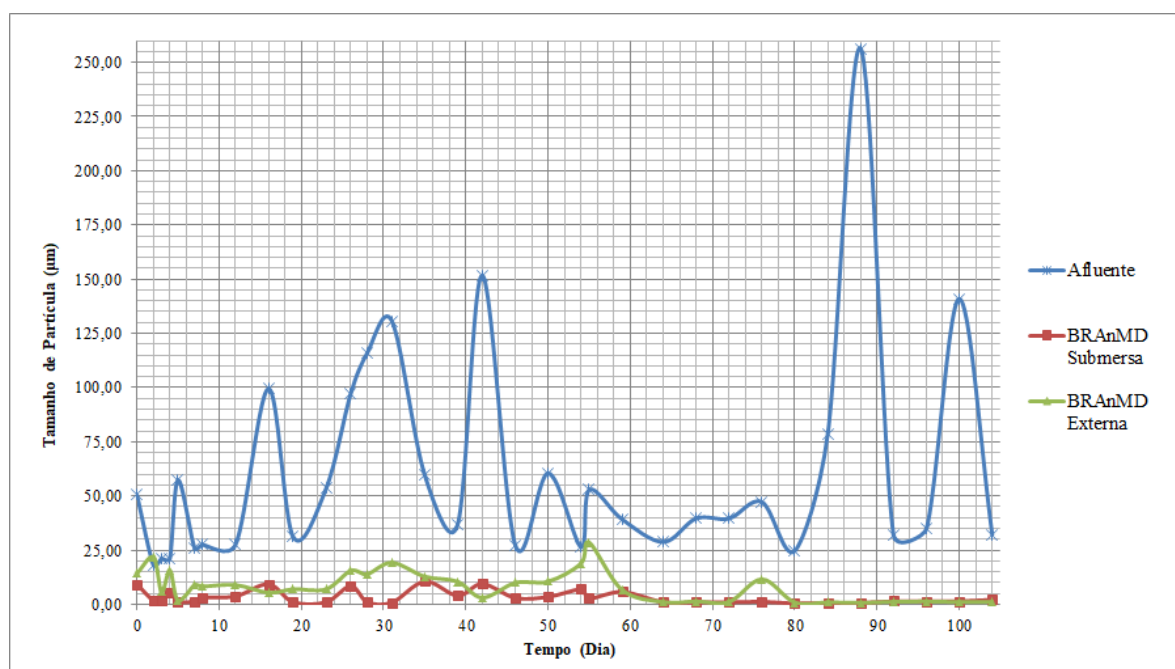
Gráfico 6 - Comportamento do tamanho de partícula nas primeiras horas de operação em BRAnMD Submersa.



Fonte: Autor (2022).

É notado que já no primeiro dia, após 12 horas de operação, o tamanho da partícula se apresentou com valores abaixo de 10 µm, e a partir do 2º dia todos os valores se apresentaram por volta de 1 e 5 µm. O valor dos tamanhos de partícula já se mostraram com significativa diminuição quando comparado aos valores de entrada e com a pesquisa de Sun et al (2018), que em estágio inicial do experimento obteve valores maiores no tamanho de partícula e em seguida uma discreta diminuição do tamanho, é evidente o sucesso na formação da membrana dinâmica no início da operação. No Gráfico 7 a seguir é possível focar nos comportamentos do tamanho da partícula em totalidade da operação.

Gráfico 7 - Variações do tamanho de partícula durante toda operação



Fonte: Autor (2022).

Inicialmente, é necessário um breve comentário a respeito do tamanho da partícula do esgoto afluente, do qual apresentou grande oscilação nos valores de entrada. Tal variação encontra harmonia com a turbidez, oscilações na PTM e em parâmetros exibidos em análises subsequentes. A não preditibilidade do tamanho da partícula é inerente da escolha da água residuária doméstica concentrada.

Dando continuidade à discussão do biorreator de membrana submersa e trazendo à reflexão o discutido por Anantharaman et al. (2020) e Mohan & Nagalakshmi (2020) a respeito do tamanho de partícula, tem-se a certeza que os tamanhos obtidos em análise não contribuíram para a formação do *fouling* de forma prejudicial e nem para o baixo fluxo do permeado.

É observada a capacidade de formação da membrana e semelhança do poder de retenção de partículas da microfiltração, pelo fato de se observar a passagem apenas de partículas de tamanhos inferiores a 10 µm. Quando alcançados momentos de operação estável, valores próximos ao destacado só foram observados no 16º, 35º e 46º dias de operação, com valores médios de $9,32 \pm 7,26$; $10,56 \pm 7$ e $9,48 \pm 4,13$ µm, respectivamente, em momentos dos quais o tamanho de partícula se encontravam acima de valores de 50 µm, e com ampla variação no desvio padrão o que pode também sugerir uma relação direta entre o tamanho médio de entrada da partícula e sua capacidade de retenção. Não obstante disso, não

é possível afirmar que tal fato influencia na capacidade de remoção de matéria orgânica danosa ao meio ambiente.

Ao observar o gráfico 7, com relação ao BRAnMD Externo, pode-se notar que o tamanho da partícula se mostrou abaixo ou próximo a valores de 10 μm o 15^o e o 22^o dia de operação, indicando formação e estabilidade da membrana dinâmica, porém, também destaca-se que como o aumento do tamanho da partícula da água residuária doméstica concentrada e PTM, houve um pequeno aumento no tamanho da partícula do permeado, chegando até valores próximos a 20 μm .

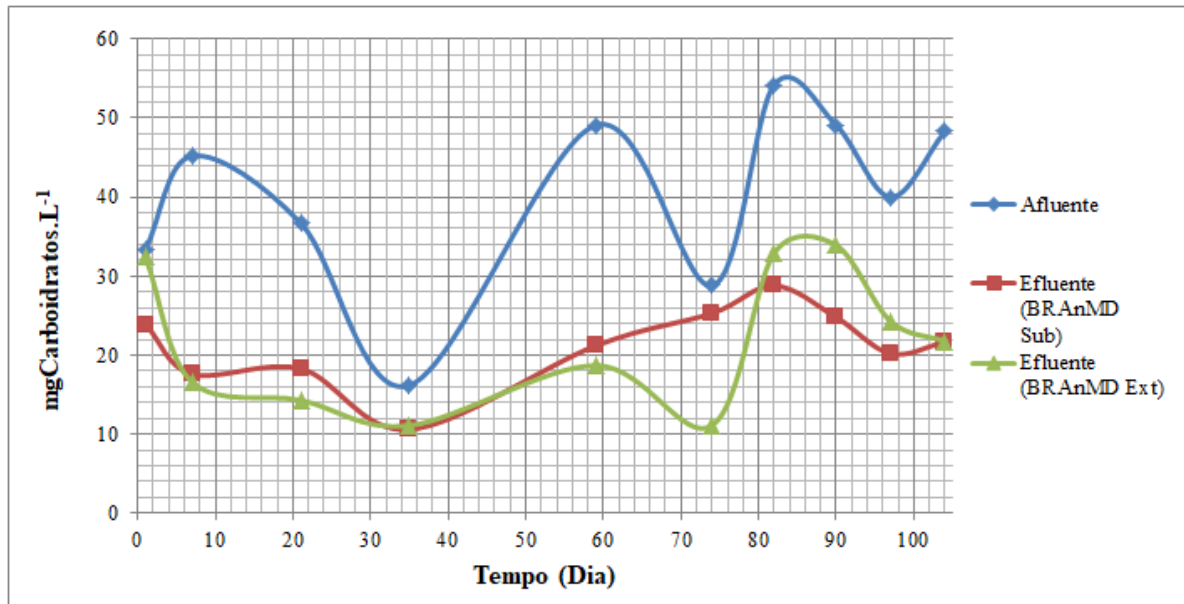
O que também pode ter contribuído foi o uso do alto fluxo imprimido ao módulo de membrana, a configuração de coluna d'água com a membrana robusta pode ter levado o arraste de partículas, mesmo sem a chegada fase de dissociação propriamente dita, que foi levantada por Wang et al. (2020); sendo concebível a ideia da adoção de um valor pré-estabelecido de pressão transmembrana que determine a diminuição do fluxo, para não haver perda da capacidade de remoção de DQO no decorrer da operação.

Também é interessante observar que após a retrolavagem, apenas no 76^o dia de operação que o valor do tamanho de partícula se apresentou maior que 10 μm . Em adendo, após o fato citado, as médias de tamanho de partícula em membrana dinâmica estável para BRAnMD's submersa e externa foram de $1,53 \pm 0,67$ e $2,47 \pm 1,16$ μm , respectivamente, enquanto os valores encontrados antes da retrolavagem foram de $4,12 \pm 2,73$ e $10,81 \pm 6,4$ μm , na devida ordem. Relatos que uma vez atestam a boa capacidade de reformulação da membrana e melhora do poder de tratamento com a operação prolongada.

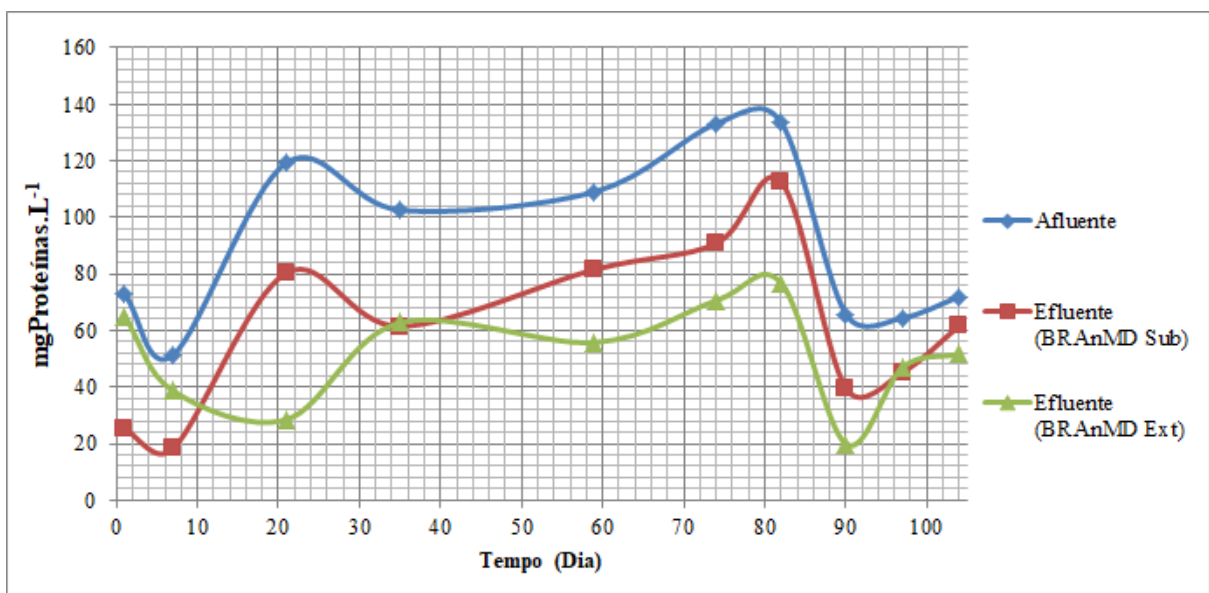
Ainda é carente o conhecimento profundo acerca do comportamento do tamanho da partícula e sua relação com o a estruturação, capacidade de filtração e remoção de material orgânico presente em águas residuárias.

5.3.4. Produto Microbiano Solúvel (SMP)

O produto microbiano solúvel, de modo geral, é oriundo da soma das concentrações dos compostos orgânicos originários do metabolismo do substrato. As concentrações de Carboidratos e Proteínas encontram-se expressos nos Gráficos 8 e 9, respectivamente.

Gráfico 8 - Concentrações de Carboidratos em tratamento por BRAnMD's

Fonte: Autor (2022).

Gráfico 9 - Concentrações de Proteínas em tratamento por BRAnMD's

Fonte: Autor (2022).

Nos gráficos 8 e 9 é possível verificar concentrações médias de $40,10 \pm 11,59 \text{ mg.L}^{-1}$ e $92,46 \pm 30,61 \text{ mg.L}^{-1}$ para carboidratos e proteínas, respectivamente, no afluente. Enquanto nos permeados de BRAnMD submersas e externas, foram constatadas, na devida sequência, concentrações médias de $21,24 \pm 5$ e $21,70 \pm 8,88 \text{ mg.L}^{-1}$ (para Carboidratos) e $61,70 \pm 30,00$ e $51,69 \pm 18,39 \text{ mg.L}^{-1}$ (para proteínas). As porcentagens de remoção se apresentaram em

valores de $\approx 43\%$ para ambos os reatores em magnitudes referentes a carboidratos e, com relação às concentrações de proteínas, valores de 38,34 e 42,89% para os módulos de membrana submersos e externos para BRAnMD's.

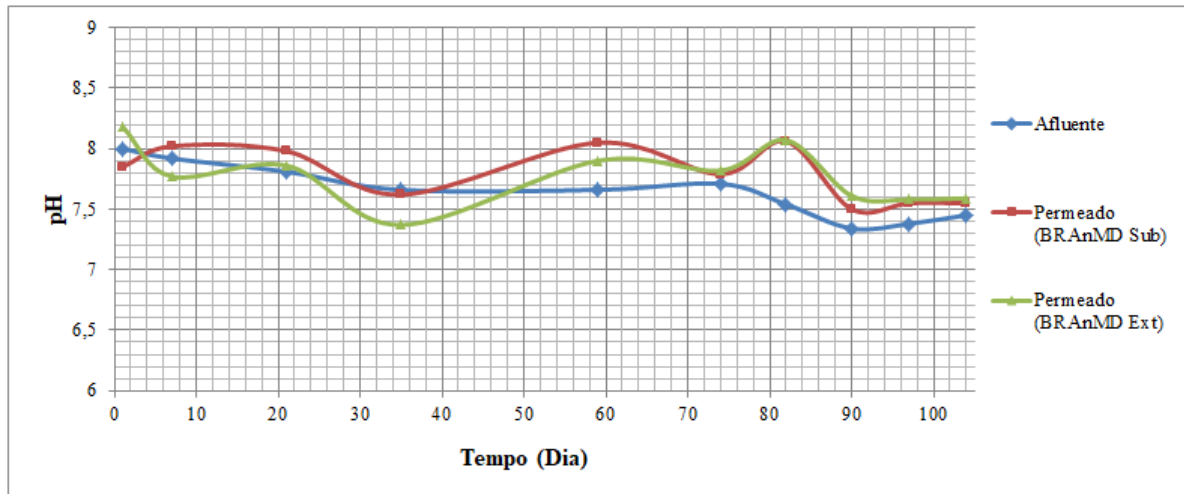
O destaque para o aumento de proteínas, ao final da operação, pode indicar um novo momento de dissociação da membrana secundária, uma vez que a grandeza citada auxilia na aglutinação das partículas, e que seu aumento na concentração assinala o arraste de tais substâncias no permeado. De forma geral a diminuição das concentrações foi capaz de demonstrar uma função de interceptação de substâncias solúveis na membrana dinâmica (YANG et al., 2019).

Os dados levam a concluir que os SMP's exerceram influência a formação da camada de gel na membrana dinâmica, a assertiva encontra reforço ao se observar a média na quantidade de carboidratos e proteínas encontrados no licor misto dos reatores, pois, apesar de haver uma diminuição na quantidade de produtos microbianos advindos do próprio metabolismo das bactérias anaeróbias, ainda seriam valores de baixa remoção em termos de eficiência.

Em contrapartida, também é possível inferir que a sua alta quantidade auxiliou no *fouling* e necessidade de limpeza, como indicado por Shin & Bae (2018). A afirmação também encontra embasamento pelos altos valores de proteínas encontrados na pesquisa, o que pode ter levado à menor taxa de rejeição, quando comparada com a taxa de carboidratos. Teoricamente, o fato oposto deveria ter ocorrido, pois Yu et al. (2019) alegam maior tendência a aglutinação com o lodo, em termos de afinidade.

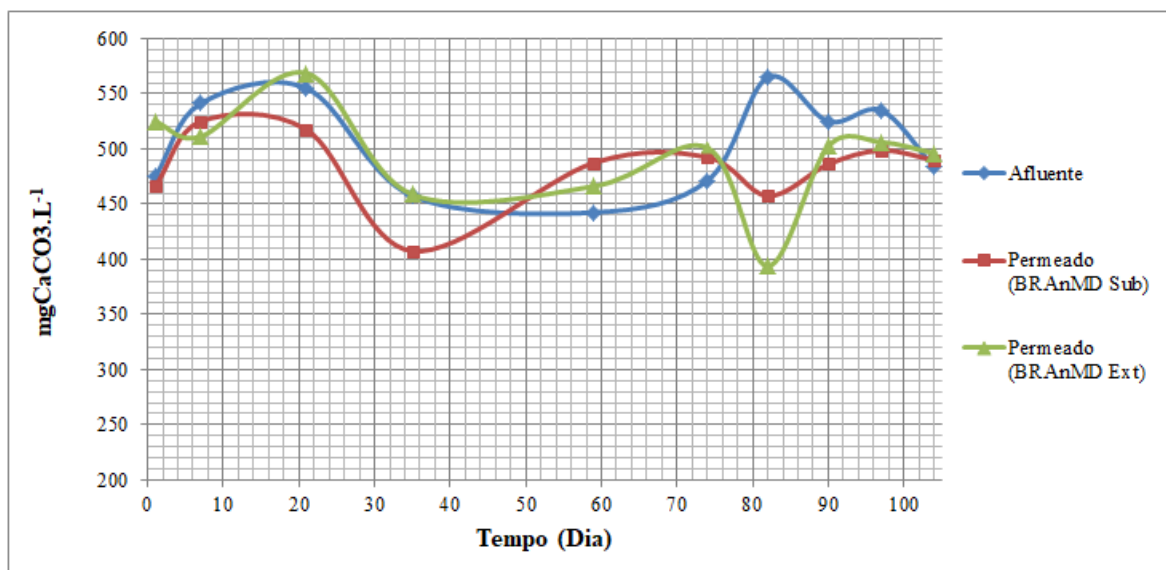
5.4. Comportamento do pH, alcalinidade e ácidos graxos voláteis

Os parâmetros de pH, acidez e alcalinidade são de grande importância para a digestão anaeróbia. O pH auxilia na análise das condições de acidez e alcalinidade, devida a inibição do processo anaeróbio por ácidos graxos voláteis estar associado ao potencial hidrogeniônico. O Gráfico 10 mostra o comportamento de pH do afluente e permeados no decorrer do monitoramento.

Gráfico 10 - Comportamento do parâmetro pH

Fonte: Autor (2022).

Em relação ao parâmetro apresentado no Gráfico 10, observa-se a tendência alcalina do pH. Para sistemas anaeróbios a bibliografia preconiza a faixa ideal entre 6,5 a 7,5 (METCALF & EDDY, 2016). Logo, os valores de pH medidos no afluente e permeado, durante a maioria do período, foram levemente acima do limite em relação a faixa modelo. Apesar de Anantharaman et al (2020) estipular que pH dentro de faixas menores (próximas de 6,5) a formação da membrana secundária se faz de uma forma mais eficaz, os presentes resultados expostos no tópico 5 provam o êxito na sua formação. Os Gráficos 11 e 12 expressam as variações de Alcalinidade e Ácidos Graxos Voláteis, respectivamente.

Gráfico 11 - Variação da Alcalinidade ao longo da pesquisa

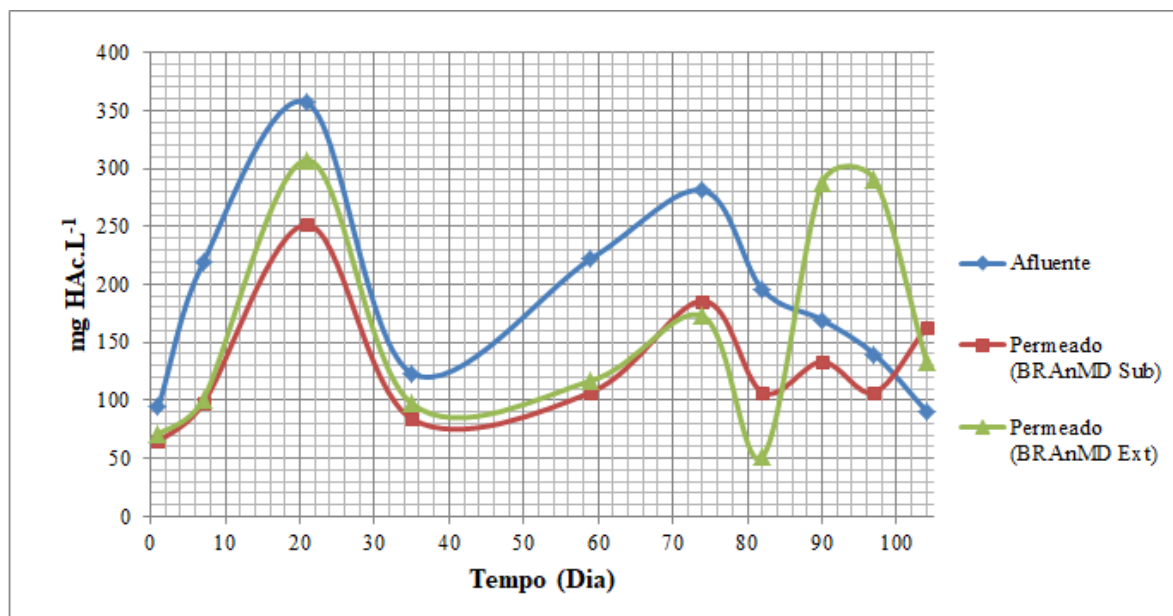
Fonte: Autor (2022).

A alcalinidade média da água resíduária doméstica concentrada se apresentou por volta de $505,12 \pm 43,93 \text{ mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ e os permeados de BRAnMD de configuração de membrana Submersa e Externa apresentaram valores de $482,87 \pm 33,34$ e $493 \pm 46,16 \text{ mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$, respectivamente. A partir disso, denota-se uma ligeira diminuição dos valores do parâmetro.

Para se considerar um biorreator anaeróbio estável, é necessário um equilíbrio na taxa de produção e consumo dos ácidos graxos voláteis (AGVs), porém mudanças nas condições do ambiente e na operação podem causar um grande acúmulo de ácidos graxos voláteis devido a limitações cinéticas ou termodinâmicas.

Tal acúmulo dos AGVs pode ter um efeito deletério na digestão anaeróbia se a capacidade de tamponamento for extrapolada, podendo trazer uma queda abrupta no pH, tal queda na faixa de ideal pH afeta diretamente o crescimento das bactérias responsáveis pelo processo (MESQUITA, 2013). Isoldi e Koetz (2005) afirmam que uma relação AGV/Alcalinidade precisa se manter dentro uma faixa de 0,1 a 0,35 para considerar-se um processo estável.

Gráfico 12 - Comportamento de AGV ao longo da pesquisa



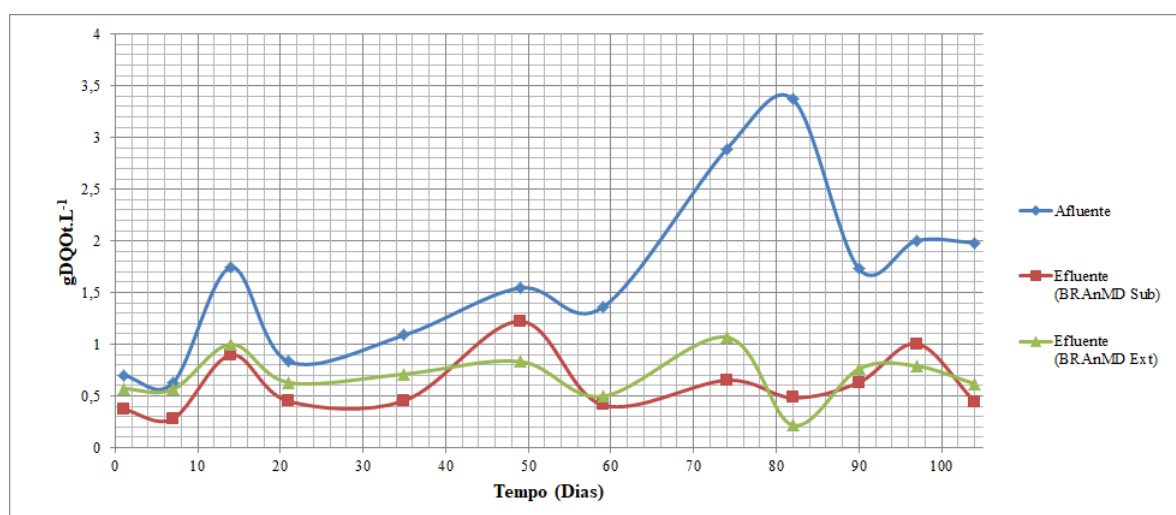
Fonte: Autor (2022).

As médias obtidas no processo para o afluente e permeados de BRAnMD submersa e externa se apresentam, na devida ordem: $189,14 \pm 84,57$; $130,05 \pm 55,82$ e $162,88 \pm 97,19 \text{ mg HAc} \cdot \text{L}^{-1}$. Ao fim do processo, é possível observar uma produção de AGV.

5.5. Eficiência de remoção da matéria orgânica

O gráfico 13 e 14 demonstram o comportamento da evolução temporal da Demanda Química de Oxigênio total e solúvel nos biorreatores de membrana dinâmica ao decorrer do experimento. Em primeiro lugar, deve-se ressaltar a característica da água residuária em questão, que se configurou em valores de $1,66 \pm 0,84 \text{ gDQO}_t \cdot \text{L}^{-1}$ e de $0,39 \pm 0,19 \text{ gDQO}_s \cdot \text{L}^{-1}$. Características que se mostraram praticamente o dobro do denominado de água residuária doméstica concentrada por Santos (2019a).

Gráfico 13 – Evolução temporal de DQO_t no processo de filtração por Membrana Dinâmica



Fonte: Autor (2022).

A respeito do BRAnMD submersa, a remoção da matéria orgânica se figurou constante com as variações nos valores de entrada, sugerindo um bom start-up, com o 1º dia de operação apresentando uma eficiência de remoção de 46,77%, o lodo inóculo também auxiliou no processo. O primeiro momento de operação apresentou uma remoção média de DQO de 50,9%, nos primeiros 34 dias de operação. Com destaque para a semana de análise que foi obtida remoção de 58,21%.

Com 52 dias após o início da operação, notou-se uma disparidade de remoção da DQO_t com relação a média geral, trazendo uma remoção de apenas 20,86%, sendo necessária uma retrolavagem física, a ocorrência pode indicar a alta compressibilidade da torta, levando ao arraste de partículas presentes na membrana dinâmica. Após a retrolavagem, foi possível observar novamente a rápida formação da membrana dinâmica, pelo índice de remoção de

69,57%, que se manteve constante no resto da operação, afirmação que pode se atestada com uma média de remoção 70,59%.

Os valores de remoção foram análogos aos obtidos por An (2009), Zhang (2011) e Yu et al. (2019) (remoções de DQO: 70, 64 e 74,4%) e, na segunda pesquisa apesar tempo de TDH semelhante ao presente trabalho, a presente pesquisa obteve uma melhor operação. No 83º dia, foi obtida uma extração semelhante ao processo de Fan e Huang (2002), um ponto positivo do tratamento em comparação com a pesquisa citada é que os valores da água residuária tratada são aproximadamente quatro vezes menores ao observado pelos pesquisadores. Santos (2019b) com sua remoção de DQO de 77,4% se mostrou maior, porém o fluxo da pesquisa foi baixo, cerca de quatro vezes menor.

Ao se tratar do BRAnMD externa, os valores de remoção de DQO se mostraram crescentes após a primeira semana de operação. O valor inicial e da primeira semana se evidenciaram menores que 20%, trazendo a conclusão de que na primeira semana não houve completa formação da membrana dinâmica. Após esse momento, houve um comportamento na taxa de remoção de matéria orgânica próximo à estabilidade da membrana dinâmica. Indicando a formação da torta e conseqüente aumento do desempenho do biorreator, chegando a valores de remoção de 46% até a retrolavagem, que ocorreu com a dificuldade do mantimento do alto fluxo constante e aumento da PTM. Após o ocorrido, a formação da membrana dinâmica ocorreu de uma forma mais acelerada, trazendo melhor desempenho para o tratamento, que obteve médias de remoção de $67,51 \pm 13,43\%$.

Ao contemplar a pesquisa elaborada por Guan et al. (2018), os dados da presente pesquisa levam a concordar que na operação do reator de módulo externo demandou-se maior tempo para uma boa formação da camada da torta. Tal afirmação corrobora com o fato do índice de remoção apenas se fazer minimamente satisfatório a partir do segundo mês de operação.

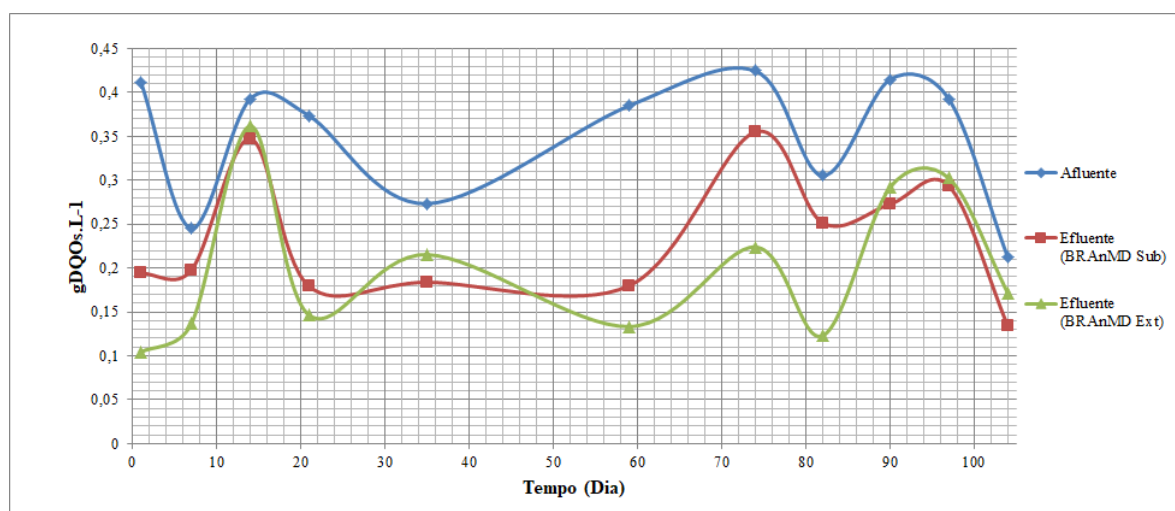
Em ambas operações destaca-se também o 83º dia de tratamento, que o tratamento chegou a obter índices de remoção de DQO total de 85,65 e 93,53% para BRAnMD's de membrana submersa e externa, respectivamente.

A remoção de 56% DQO obtida por Nascimento et al. (2021) levou ao aumento do TDH da pesquisa para 10h e a diminuição do fluxo do permeado, isso foi capaz de aprimorar o tratamento, porém, ainda é evidente a menor capacidade do poder de remoção de matéria orgânica do módulo de membrana externo, afirmação que entre em choque com a afirmação da insignificância na escolha da configuração do módulo de membrana afirmado em pesquisa de Ersahin et al (2017).

Os altos valores e variações do afluente explicitam resistência da tecnologia de membrana dinâmica ao suportar variações nos valores de afluente na entrada do biorreator, e que independentemente do tipo de água residuária, há a possibilidade do seu tratamento. As médias de remoções de 99% reportadas em referencial teórico se mostram moderadamente distantes, porém deve-se atentar ao destacado por Hu et al. (2020), que levantou a maior facilidade em remoção de material orgânico em sistemas que utilizaram material sintético, e quando comparados com análise de águas residuárias “reais”, o tratamento se encontra em perfeita consonância com o indicado pelo trabalho de revisão.

Os dados das médias apresentadas na presente pesquisa levam a corroborar com a conclusão elucidada por Siddiqui et al. (2021) que afirmou que o sistema com configuração de membrana submersa apresenta melhores índices de remoção de DQO. A discussão acerca da remoção de DQO solúvel se apresenta no Gráfico 14 e nos parágrafos subsequentes.

Gráfico 14 – Evolução temporal DQO_s no processo de filtração por membrana dinâmica



Fonte: Autor (2022).

Os resultados referentes às concentrações da DQO solúvel validam o afirmado por Li et al (2016), porém os índices de remoção não seguem a lógica do apresentado por Berkessa et al (2020), que por sua vez apresentaram melhores valores de remoção na fração solúvel.

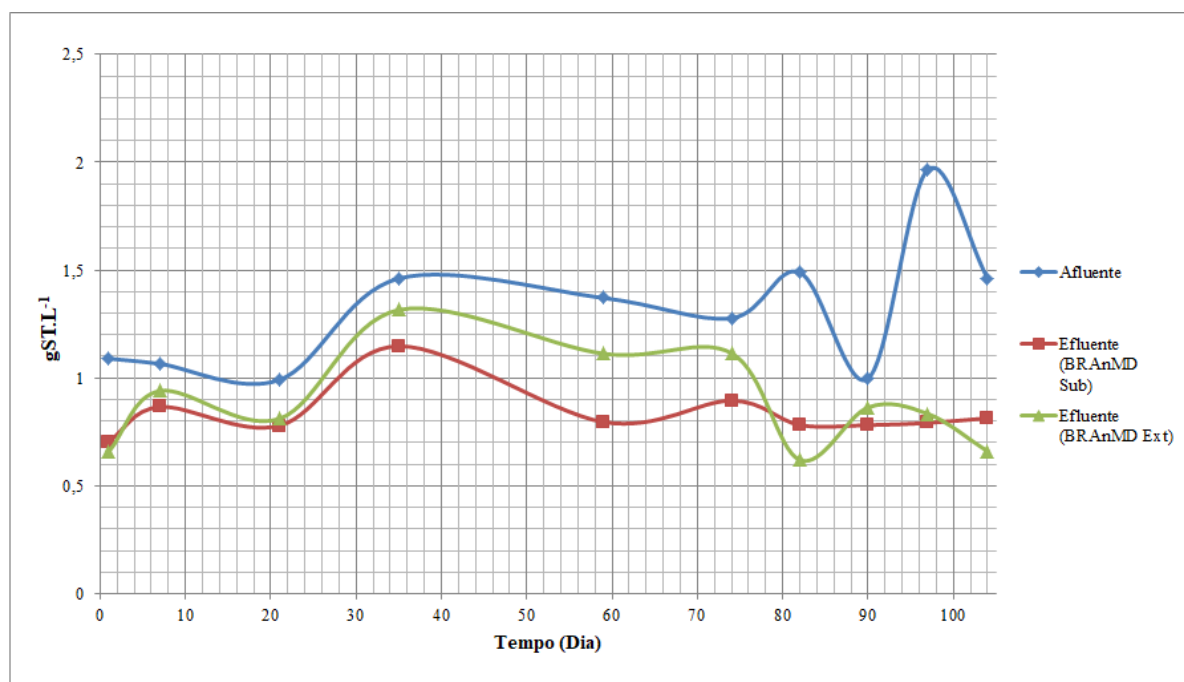
No presente trabalho, os índices apresentaram valores de $32 \pm 15,46\%$ e $41,18 \pm 22,23\%$ para os BRAnMD's submerso e externo, respectivamente. Isso pode se justificar pelo alto fluxo imposto aos biorreatores, que reduziu o tempo de contato dos substratos solúveis, como AGV, que se encontraram em altos níveis na presente pesquisa.

Outro fator que pode justificar a baixa eficiência de remoção solúvel é o cálculo da razão média $DQOs/DQOt$, que se apresentou com o valor 0,38 e 0,29 para BRAnMD submersa e externa, na devida ordem, este resultado indica que a fração de saída de DQO junto ao permeado é, em sua maioria, de forma particulada. Também é possível afirmar que o biorreator de membrana dinâmica de módulo externo, por apresentar menor fluxo, apresentou uma melhor remoção na DQO solúvel.

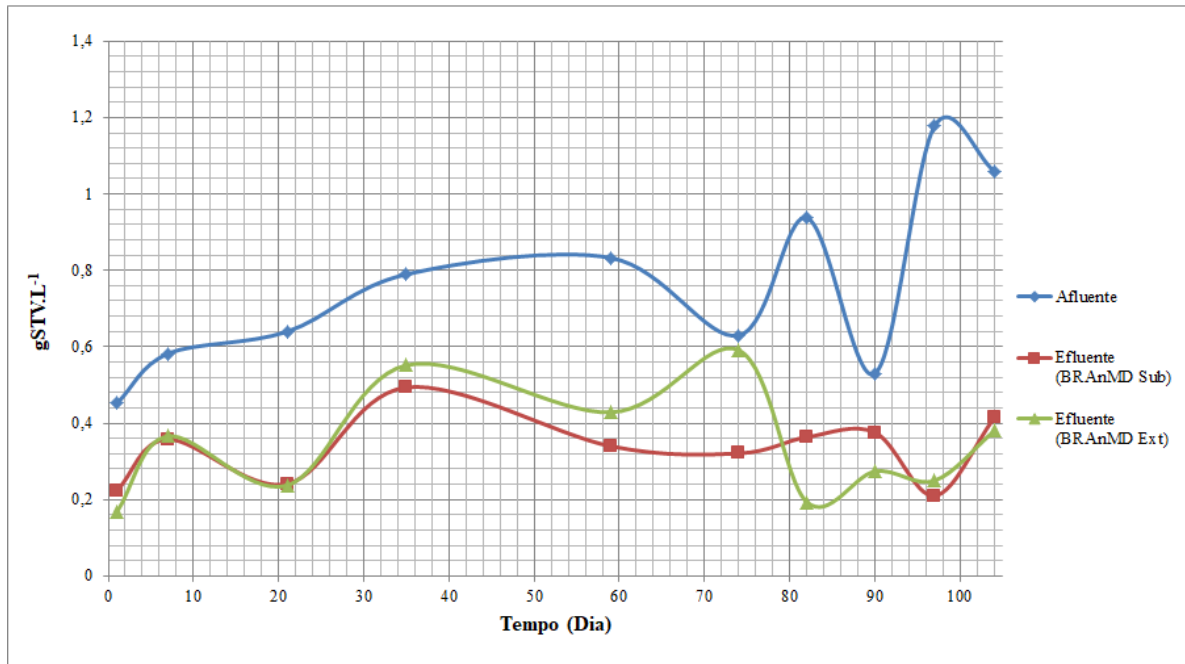
5.6. Desempenho de filtração (sólidos e suas frações e cor real)

Os gráficos 15 e 16 exibem o comportamento das concentrações dos sólidos totais e sólidos totais voláteis, respectivamente.

Gráfico 15 – Comportamento de Sólidos Totais em BRAnMD



Fonte: Autor (2022).

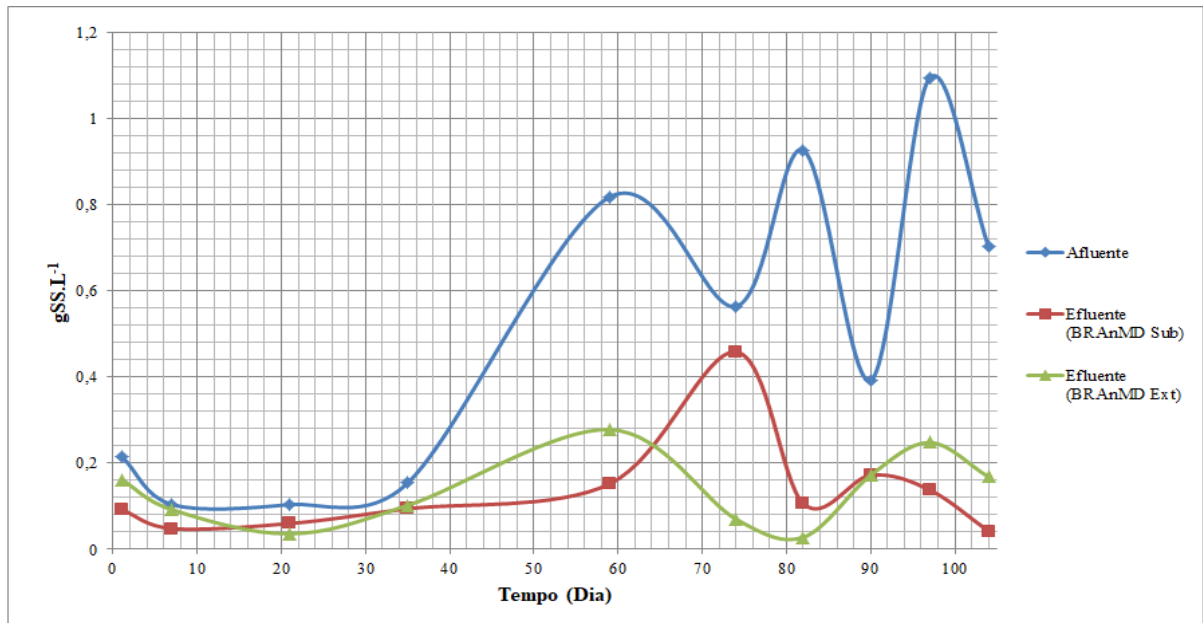
Gráfico 16 – Comportamento de concentrações de Sólidos Totais Voláteis em BRAnMD

Fonte: Autor (2022).

Foi possível observar uma média de concentração do afluente de $1,3 \pm 0,30$ gST.L⁻¹ e de $0,84 \pm 0,10$ gST.L⁻¹ em BRAnMD Submersa (remoção média de 36,74%) e $0,89 \pm 0,19$ gST.L⁻¹ para BRAnMD Externa (remoção média de 31,27%). Quanto à fração volátil observada foi de $0,76 \pm 0,24$ gSTV.L⁻¹ para a água residuária doméstica concentrada e valores médios de $0,33 \pm 0,09$ gSTV.L⁻¹ e $0,34 \pm 0,15$ gSTV.L⁻¹ para BRAnMD's de módulo submerso e externo, respectivamente, resultando em remoções de ordem de 56% e 55%. Com base nos dados, infere-se que mais da metade dos sólidos presentes ficaram retidos durante a filtração desde o início da operação, ou seja, ocorreu uma efetiva formação da membrana dinâmica.

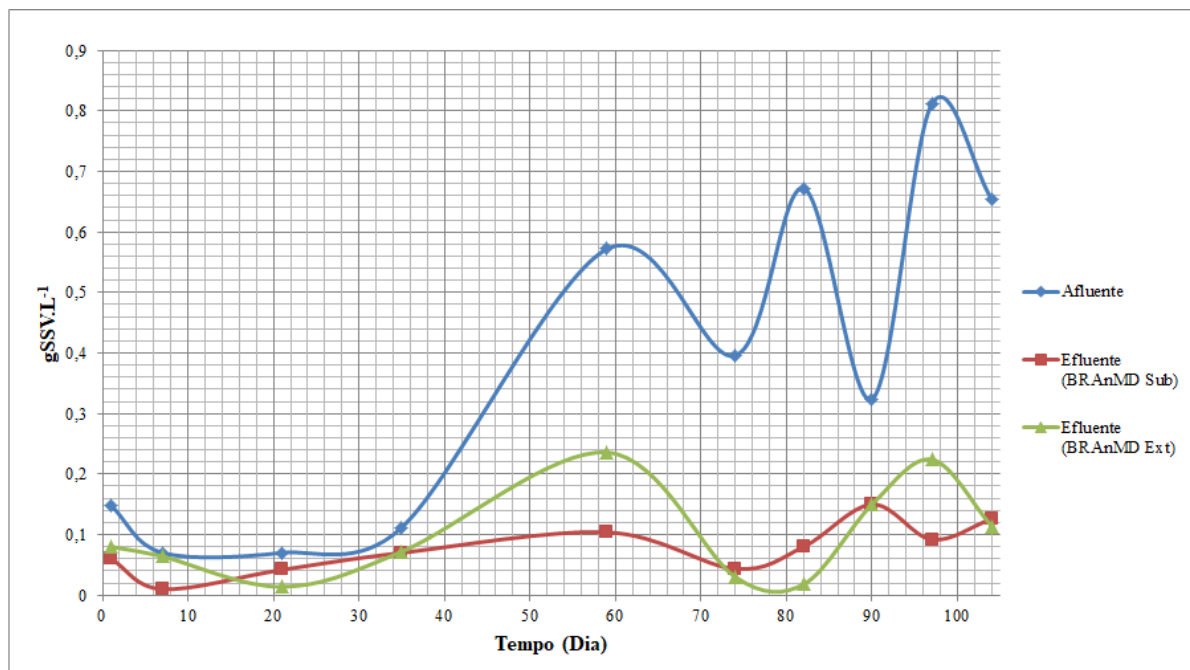
Quanto à fração suspensa, os Gráficos 17 e 18 mostram seu comportamento durante a operação.

Gráfico 17 – Comportamento de concentrações de Sólidos Suspensos



Fonte: Autor (2022).

Gráfico 18 – Comportamento de concentrações de Sólidos Suspensos Voláteis



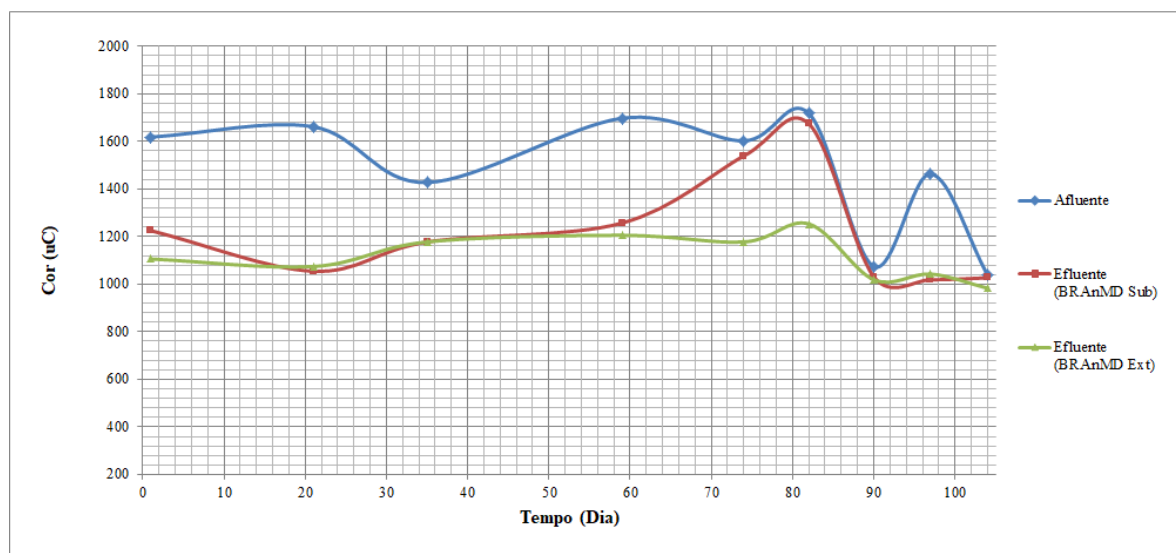
Fonte: Autor (2022).

Para as frações de sólidos suspensos do afluente, foi possível analisar uma média equivalente a $0,51 \pm 0,36 \text{ gSS.L}^{-1}$ e, para sólidos suspenso voláteis, $0,38 \pm 0,28 \text{ gSSV.L}^{-1}$. Quanto aos permeados, é possível a constatação de valores de $0,14 \pm 1,2$ e $0,13 \pm 0,08 \text{ gSS.L}^{-1}$, para a fração de sólidos suspensos em configurações de módulos de membrana submerso e externo, respectivamente. E para sólidos suspensos voláteis, se apresentam valores iguais a $0,07 \pm 0,04$ e $0,10 \pm 0,08 \text{ gSSV.L}^{-1}$, na mesma ordem apresentada anteriormente, seguindo a mesma ordem os taxas de remoção alcançadas foram de 68,63 e 71,49%. Enquanto os valores de entrada de esgoto foram de $0,38 \pm 0,27 \text{ gSSV.L}^{-1}$.

A proximidade nos dados ratifica mais uma vez o sucesso na escolha do aumento do tempo de detenção hidráulico para o biorreator anaeróbio de membrana dinâmica externa. Os dados expressos em ST e SS nas três primeiras semanas de operação evidenciam o afirmado por Zhang et al (2011) em referencial teórico, quando verificaram uma grande perda de lodo e baixa eficiência na retenção de sólidos nos estágios iniciais da formação da membrana, principalmente na fração suspensa, afirmação solidificada também por Vergine et al. (2021).

A seguir o Gráfico 19 mostra o comportamento da Cor real das amostras durante o processo de filtração.

Gráfico 19 – Comportamento da Cor real



Fonte: Autor (2022).

Os dados de cor do permeado inicialmente se demonstraram promissores, porém, após o 80º dia, houve uma brusca diminuição de sua capacidade de tratamento, com valores de

remoção levando a discretos nos BRAnMD 13,19% para módulo submerso e 19,75% para módulo externo.

A escassez de trabalhos que tratem da remoção de cor acaba por não esclarecer a diminuição do poder de remoção de cor na tecnologia. Porém, com a pesquisa de Yu et al. (2019), é possível comparar que mesmo sob alto fluxo ($510\text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$) foi obtida uma grande remoção de cor real, alcançada por 86%. Porém, pesquisa citada encontrou uma abrupta diminuição do fluxo, chegando a valores próximos às pesquisas levantadas por Hu et al. (2018) em estudo comparativo no Quadro 1. Além do disso, o referido trabalho se valeu de um tratamento com lodo ativado e uma membrana dinâmica pré-revestida por carbono ativado, tratamentos que trazem maior qualidade ao efluente, porém mais dispendiosos.

5.7. Parâmetros microbiológicos

Com a estabilização da operação nos biorreatores anaeróbios de membrana dinâmica, foram, realizadas quatro análises biológicas dos parâmetros de ovos de helmintos, coliformes totais e *E. Coli*, expostos a seguir na Tabela 4.

Tabela 4 – Médias e percentagens de remoção referentes aos parâmetros microbiológicos

Parâmetros	Afluente	BRAnMD Submersa (Remoção (%))	BRAnMD Externa (Remoção (%))
Ovos de Helmintos (Ovos.L ⁻¹)	873,33 ± 565,80	11,11 ± 5,09 (98,73)	37,56 ± 25,29 (95,7)
Coliformes Totais (NMP.100mL ⁻¹)	1±0,38.10 ¹⁰	2,1±0,43.10 ⁹ (79)	1,2±0,41.10 ⁹ (88)
<i>E. Coli</i> (NMP.100mL ⁻¹)	2,7±0,18.10 ⁹	1,1±0,10.10 ⁹ (59)	6,35±0,01.10 ⁹ (76)

Fonte: Elaborada pelo Autor (2022).

Os dados assinalam características de uma água residuária doméstica concentrada com altos valores nos índices microbiológicos, trazendo um alto risco de infecção biológica, caso haja contato com a população humana.

De acordo com as diretrizes da OMS (2006), o reúso da água tratada para a tecnologia estipulada apenas se encaixa na categoria (c), que define irrigação para culturas de cereais,

industriais, forrageiras, pastagens e árvores que não haja contato com trabalhadores e público em geral, o contato pode se dar pela interação com o solo contaminado.

Apesar dos altos índices de remoção de Ovos de Helmintos para BRAnMD de configuração de módulo submerso e externo, são observados baixos índices de remoção de coliformes totais e *Escherichea Coli*. Para buscar um manejo de contato humano direto, recomenda-se um pós-tratamento de desinfecção.

6. CONCLUSÕES

Dentro do exposto no estudo, é possível elencar pontos a respeito da formação da MD bem como seu desempenho:

- Foi possível observar o ciclo de formação e dissociação da membrana dinâmica em ambos biorreatores anaeróbios;
- O lodo ajuda no processo de adesão e coesão da formação da membrana dinâmica, porém, há grande perda do mesmo nas primeiras horas e dias de operação;
- Os valores de potencial zeta das amostras coletadas influenciaram de forma positiva nos mecanismos de adesão e coesão da membrana;
- Após a retrolavagem, a capacidade estruturação da membrana dinâmica se mostrou eficiente e rápida, com um pequeno aumento na resistência a filtração;
- Com a estabilidade de altos fluxos de operação, uma MD madura não necessariamente se caracteriza pela indicação de turbidez menor que 5 NTU;
- O processo de filtração encontra semelhanças com o processo de microfiltração;
- Os produtos microbianos solúveis se mostraram importantes para as fases de adesão e coesão das partículas na camada dinâmica;
- Após a estabilidade do processo, a remoção de DQO se mostrou estável, mesmo com a variação dos valores de entrada do afluente;
- O TDH de 10h para o BRAnMD de módulo externo contribuiu para a remoção de DQO similar ao BRAnMD de módulo submerso;
- O BRAnMD de módulo submerso apresentou maior facilidade no processo de formação da membrana.

7. PERSPECTIVAS FUTURAS

Para um entendimento de forma que abranja todas as nuances da tecnologia, recomenda-se:

- A otimização do tamanho de partícula com relação à membrana de suporte, deste modo, é sugerido a escolha do tamanho do poro após a análise do tamanho da partícula;
- Realização da modelagem cinética do tempo de formação da MD;
- Realização de estudos da relação da PTM com a queda da qualidade do permeado;

REFERÊNCIAS

ALIBARDI, L. et al. Anaerobic dynamic membrane bioreactor for wastewater treatment at ambient temperature. *Chemical Engineering Journal*, v. 284, p. 130–138, 2016.

ALVES.; M., P. Pós-Tratamento de Esgoto Doméstico em Filtros Lentos, com diferentes Meios Filtrantes. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental - PPGCTA) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2020.

AN, Y.; WANG, Z.; WU, Z.; YANG, D.; ZHOU, Q. Characterization of membrane foulants in an anaerobic nonwoven fabric membrane bioreactor for municipal wastewater treatment, *Chem. Eng. J.* 155 (3) (2009) 709–715.

ANANTHARAMAN, A. CHUN, Y.; HUA, T.; CHEW J. W.; WANG, R. Pre-deposited dynamic membrane filtration e A review. *Water Research* 173 (2020) 115558.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115558>

APHA; AWWA; WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater. 22. ed.. Washington: APHA, 2012.

BAILINGER, J. Mechanisms of parasitological concentration in coprology and their practical consequences. *Journal of American Medical Technology*, 41; p. 65-7, 1979.

BERKESSA, Y. W.; YAN, B.; LI, T.; JEGATHEESAN, V. ZHANG, Y. Treatment of anthraquinone dye textile wastewater using anaerobic dynamic membrane bioreactor: performance and microbial dynamics. *Chemosphere*, v 238, p. 1-11, 2020.

CAI, D.; HUANG, J.; LIU, G.; LI, M.; YU, Y.; MENG, F. Effect of support material pore size on the filtration behavior of dynamic membrane bioreactor. *Bioresour. Technol.* **2018**, 255, 359–363.

CHAUOA, S. *et al.* Efficiency of two sewage treatment systems (activated sludge and natural lagoons) for helminth egg removal in Morocco. *Journal of Infection and Public Health* 11. Elsevier, 2018, p. 197-202.

CHIMUCA, J.; F.; J. Desempenho do Biorreator Anaeróbio de Membrana Dinâmica no tratamento de Águas Residuárias Domésticas. Tese (Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental - PPGCTA) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2021.(a)

CHIMUCA, J. F. J. ; SOUSA, José Tavares de ; Lopes, Wilton da Silva ; CANTO, C. S. A. ; LEITE, Valderi Duarte . Fouling mechanism in dynamic membrane anaerobic bioreactor treating domestic sewage: filtration performance. *Desalination and Water Treatment*, v. 236, p. 26-44, 2021.(b)

DUARTE.; A., T., G. Remoção de Nutrientes e Produção de Biogás de Lodo Aeróbio em Biorreator Anaeróbio de Membrana Dinâmica. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental - PPGCTA) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2019.

DUBOIS, M.; GILLES, K.A; HAMILTON, J.K.; REBERS, P.A.; SMITH, F. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, v. 28, p. 350-356, 1956.

ERSAHIN, M. E.; GIMENEZ, J. B.; OZGUN, H.; TAO, Y.; VAN LIER, J. B. Anaerobic dynamics membrane bioreactors for high strength wastewater treatment. Recovering (Bio)Resources for the World". Santiago de Compostela, Spain, 25-28, June, 2013.

ERSAHIN, Mustafa Evren *et al.* Impact of anaerobic dynamic membrane bioreactor configuration on treatment and filterability performance. **Journal Of Membrane Science**, [s.l.], v. 526, mar. 2017. Elsevier BV.

FAN, B.; HUANG, X.; Characteristics of a self-forming dynamic membrane coupled with a bioreactor for municipal wastewater treatment, *Environ. Sci. Technol.* 36 (2002) 5245–5251, <https://doi.org/10.1021/es025789n>.

FRØLUND, B.; PALMGREN, R.; KEIDING, K.; NIELSEN, P. H.; Extraction on extracellular polymers from active sludge using a cation exchange resin. *Water Research*, v. 30, n. 8, p. 1749-1758, 1995.

HU, Y., WANG, X.C., HAO NGO, H., SUN, Q., YANG, Y., Anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for wastewater treatment: A review, *Bioresource Technology* (2017), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.101>

HU, Y.; WANG, X. C.; NGO H. H.;SUN, Q.; YANG Y. Anaerobic dynamics membrane bioreactor (AnDMBR) for wastewater treatment: A review. *Bioresource Technology* 247, pg. 1107–1118, 2018.

HU, Y; YANG, Y; ZANG, Y; ZHANG, J; WANG, X, C. Anaerobic dynamic membrane bioreactors (AnDMBRs) for wastewater treatment. *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, 2020. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819852-0.00011-7>

ISIK, O.; ABDELRAHMAN, A. M.; OZGUN, H.; ERSAHIN, M. E; DEMIR, I.; KOYUNCU, I. Comparative evaluation of ultrafiltration and dynamic membranes in an aerobic membrane bioreactor for municipal wastewater treatment. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, v 26, p. 32723–32733, 2019.

ISOLDI, L. A; KOETZ, P. R.. Pós-tratamento de efluente nitrificado da parboilização de arroz utilizando desnitrificação em reator UASB. *Eng. sanit. Ambient.*, v 10, n. 4, p. 271-27, 2005.

KOROS, W. J.; MA, Y. H.; SHIMIDZU, T.. Terminology for membranes and membrane processes (IUPAC Recommendations 1996). **Pure And Applied Chemistry**, [s.l.], v. 68, n. 7, p.1479-1489, 1 jan. 1996.

LI, L.; XU, G.; YU, H.; XING, J. Dynamic membrane for micro-particle removal in wastewater treatment: Performance and influencing factors. *Science of the Total Environment* 627 (2018) 332–340. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.239>

LIU, Jiadong et al. Membrane fouling behavior in anaerobic baffled membrane bioreactor under static operating condition. *Bioresource Technology*, [s.l.], v. 214, p.582-588, ago. 2016. Elsevier BV.

LOPES, W. da, S.; DE LUNA, Y. H. D. M.; SOUSA, J. T. de; LOPES, W. S.; LEITE, V. D. Evaluation of acidogenic sludge from anaerobic reactors running at low solids retention times to reduce sludge generation and enhance biogas production. *Water SA (Online)*, v. 45, p. 632-637, 2019.

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

MAHAT, S. B; OMAR, R.; CHE MAN, H.; MD IDRIS, A., I.; MUSTAPA KAMAL, S. M.; ABDULLAH, L. C.; SHREESHIVADASAN, C. Dynamic anaerobic membrane bioreactor (DAnMBR) with phase separation for food processing wastewater treatment at mesophilic temperature: Characterization of cake layer. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9, 105718; 2021a

MAHAT, S. B; OMAR, R.; CHE MAN, H.; MOHAMAD IDRIS, A. I.; MUSTAPA KAMAL, S. M.; IDRIS, A; SHREESHIVADASAN, C; JAMALI, N. S.; ABDULLAH, L. C. Performance of dynamic anaerobic membrane bioreactor (DAnMBR) with phase separation in treating high strength food processing wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9, 105245. 2021b.

MELO, N. N. TRATAMENTO DE LODO EM BIORREATOR ANAERÓBIO DE MEMBRANA DINÂMICA. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental - PPGCTA) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2018.

METCALF; EDDY. Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. 5^a ed. Porto Alegre, AMGH, 2016.

METCALF & EDDY. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. 5 th ed. Boston: McGraw-Hill, 2012.

MESQUITA, P. L. et al. Validação de método de cromatografia líquida para a determinação de sete ácidos graxos voláteis intermediários da digestão anaeróbia. *Eng Sanit Ambient*, v.18, n.4, p. 295-302, out/dez. 2013.

MOHAN, S, M & NAGALAKSHMI, S. A review on aerobic self-forming dynamic membrane bioreactor: Formation, performance, fouling and cleaning. *Journal of Water Process Engineering* 37 (2020) 101541. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101541>

MORAES, C. E. P. de. BIORREATOR DE MEMBRANAS APLICADO AO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE UMA INDÚSTRIA DE PROCESSAMENTO DE FRUTAS. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental)- Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2018.

MULDER, M., Basic Principles of Membrane Technology., **Kluwer Academic Publishers**, p. 557, 2003.

NASCIMENTO, J. N.; SANTOS, R. B.; CIRNE, J. R. R.; LOPES, W. S. ; DE SOUSA, J. T.; LEITE, V. D.; ALVES, M. P. . Utilização de biorreator anaeróbio de membrana dinâmica no tratamento de esgoto doméstico para uso agrícola. *REVISTA DAE*, v. 69, p. 124-139, 2021.

OLIVEIRA, Fábio Ribeiro de; FRANCA, Sergio Luiz Braga; RANGEL, Luís Alberto Duncan. Princípios de economia circular para o desenvolvimento de produtos em arranjos produtivos locais. **Interações (Campo Grande)**, Campo Grande , v. 20, n. 4, p. 1179-1193, Dec. 2019 . Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1518-70122019000401179&lng=en&nrm=iso>. Access on 02 Mar. 2021. Epub Dec 05, 2019. <https://doi.org/10.20435/inter.v20i4.1921>.

PEI, Q.; LUO, J.; CHEN, M. Studies on a new stainless steel mesh dynamic membrane for wastewater treatment. *Bioresource Technology* 297 (2020) 1224052. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122405>.

PROVENZI, G. **Biorreator à membrana submersa para tratamento biológico de efluentes: estudos hidrodinâmicos e físico-químicos no controle da colmatação**. Tese

(Doutorado em Engenharia Ambiental). Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2005.

QUEIRÓZ.; A., B. de. Aplicação de um Biorreator de Membrana Dinâmica Para o Tratamento de Águas Residuárias. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental - PPGCTA) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2019.

RAMOS, R.O; ALBUQUERQUE, T.L.Q; LOPES, W.S. Sistema de Monitoramento On-line de Biorreatores (SISMOBIO). 2020, Brasil. Patente: Privilégio de Inovação. Número do Registro: BR512020002858-6, título: “Sistema de Monitoramento On-line de Biorreatores (SISMOBIO)”. Instituição de registro: INPI – Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Linguagem: HTML; JAVA SCRIPT; PHP. Campo de aplicação: BL-04; EN-02; EN-03; EN-04; SM-01; SM-02; SM-05. Tipo de programa: IT-04. Expedido: 22/12/2020.

SANTOS, A. B.. (Org.).Caracterização, Tratamento e Gerenciamento de Subprodutos de Correntes de Esgotos Segregadas e Não Segregadas em Empreendimentos Habitacionais. Fortaleza: Imprece, 2019a.

SANTOS, R. B. APLICAÇÃO DE BIORREATOR DE MEMBRANA DINÂMICA SUBMERSA NO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS DOMÉSTICAS. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental - PPGCTA) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2019b.

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Esgotos - Água de Reúso. Disponível em: < <http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=569>> . Acesso em 16 de setembro de 2019, 16h30min.

SEO, G.T.; MOON, B.H.; LEE, T.S.; LIM, T.J.; KIM, I.S.; Non-woven fabric filter separation activated sludge reactor for domestic wastewater reclamation, Water Sci. Technol. 47 (2003) 133–138.

SHIN, C and BAE, J. Current Status of the pilot-scale anaerobic membrane bioreactor treatment of domestic wastewaters: A critical review. *Bioresource Technology*, v 247, p.1038-1046, 2018.

SIDDIQUI, M. A.; DAI, J.; GUAN, D.; CHEN, G. Exploration of the formation of self-forming dynamic membrane in AN upflow anaerobic sludge blanket reactor. *Separation and Purification Technology* 212 (2019) 757–766. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.11.065>

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

SUN, F.; ZHANG, N.; LI, F.; WANG, X.; ZHANG, J.; SONG, L.; LIANG, S. Dynamic analysis of self-forming membrane (SFDM) filtration in submerged anaerobic bioreactor: Performance, characteristic and mechanism. *Biosource Technology* 270 (2018) 383-390. <https://doi.org/10.10016/j.biortech.2018.09.003>

TRATA BRASIL, SANEAMENTO É SAÚDE & GO ASSOCIADOS. Novo Ranking do Saneamento evidencia: melhores cidades em saneamento investem 4 vezes mais que as piores cidades no Brasil. Disponível em: < http://www.tratabrasil.org.br/images/estudos/itb/ranking-2019/PRESS_RELEASE___Ranking_do_Saneamento___NOVO.pdf > Acesso em 15 de outubro de 2019, 22:15.

ODS BRASIL, OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, OBJETIVO 6 – ÁGUA POTÁVEL E SANEAMENTO. Disponível em: < <https://odsbrasil.gov.br/objetivo/objetivo?n=6> > Acesso em 03 de Agosto de 2021, 18:06.

OMS – Organização Mundial da Saúde. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Policy and regulatory aspects. WHO Library Cataloguing-in Publication Data, v.1, 2006.

VAN LIER, J.B.; VAN DER ZEE, F.P.; FRIJTERS, C.T.M.; ERSAHIN, M.E. Celebrating 40 years anaerobic sludge bed reactors for industrial wastewater treatment. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v. 14, 2015.

VERGINE, P, SALERNO, C; BERARDI, G; POLLICE, A. Self-Forming Dynamic Membrane BioReactors (SFD MBR) for municipal wastewater treatment: Relevance of solids retention time and biological process stability. *Separation and Purification Technology* 255 (2021) 117735.(a)

VERGINE P.; SALERNO, C.; CASALE, B.; BERARDI, G.; POLLICE, A. Role of Mesh Pore Size in Dynamic Membrane Bioreactors. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2021, 18, 1472.(b)

VISVANATHAN, C & ABEYNAYAKA, A. Developments and future potentials of anaerobic membrane bioreactors (AnMBRs). *Membrane Water Treatment*, Vol 3, No 1 (2012) 1-23.

VON SPERLING, M.; PRINCÍPIOS DO TRATAMENTO BIOLÓGICO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS: LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO. 2ª edição. SEGRAC, 2002. p. 11-17.

WANG, Y.K.; SHENG, G.P.; LI, W.W.; YU, H.Q., A pilot investigation into membrane bioreactor using mesh filter for treating low-strength municipal wastewater, *Bioresour. Technol.* 122 (2012) 17–21, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.04.020>.

WANG, J; CAHYADI, A; WU, B; PEE, W; FANE, A, G; CHEW, J, W. The roles of particles in enhancing membrane filtration: A review. *Journal of Membrane Science* 595 (2020) 117570. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117570>

XIONG, J.; FU, D.; SINGH, R. P.; DUCOSTE, J. J. Structural characteristics and development of the cake layer in a dynamic membrane bioreactor. *Separation and Purification Technology* 167 (2016) 88–96 89. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2016.04.040>

YANG, Y.; ZANG, Y.; HU, Y.; WANG, X.C.; NGO, H.H. Upflow anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for wastewater treatment at room temperature and short HRTs: Process characteristics and practical applicability, *Chemical engineering Journal* (2019), doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123186>

YAYA-BEAS, R. E. *et al.* Presence of Helminth eggs in domestic wastewater and its removal at low temperature UASB reactor in Peruvian highlands. *Water Research* 90. Elsevier, 2016, p. 286-293.

YU, Z; HU, Y; DZAKPASU, M; WANG, X, C. Thermodynamic prediction and experimental investigation of short-term dynamics membrane formation in dynamics membrane bioreactors: Effect of Sludge Properties. *J Environ. Sci.* (2018), <https://doi.org.10.1016/j.jes.2018.06.017>

ZHANG, X.; WANG, Z.; WU, Z.; WEI, T.; LU, F.; TONG, J.; MAI, S. Membrane fouling in an anaerobic dynamics membrane bioreactor (AnDMBR) for municipal wastewater treatment: characteristics of membrane foulants and bulk sludge, *Process Biochem.* 2 (4) (2011) 1538–1546.

ZHU, Y; CAO, L.; NI, L.; WANG, Y. Insights into fouling behavior in a novel anammox self-forming dynamic membrane bioreactor by the fluorescence EEM-PARAFAC analysis. *Environmental Science and Pollution Research* (2020) 27:40041–40053. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09944-1>