

II-1378 - MEMBRANA DINÂMICA APLICADA EM BIORREATORES ANAERÓBIOS TRATANDO ÁGUAS RESIDUÁRIAS DOMÉSTICAS CONCENTRADAS SOB ALTO FLUXO

André Luiz Muniz Brito⁽¹⁾

Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental (UEPB). Doutorando em Engenharia Ambiental pela UEPB.

Wilton Silva Lopes⁽²⁾

Químico Industrial pela Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente (UEPB). Doutor em Química (UEPB). Pós-doutorados em Engenharia pela Universidade de São Paulo (USP) e pela Universidade de Tecnologia de Delft (TU-DELFT), na Holanda. Professor do departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (UEPB).

André Luiz Fiquene de Brito⁽³⁾

Químico pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente (UFPB). Doutorado em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Professor do departamento Engenharia Química (UFCG).

Ana Cristina Silva Muniz⁽⁴⁾

Química pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente (UFPB). Doutorado em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Professora do departamento Engenharia Química (UFCG).

Evelyne Morgana Ferreira Costa⁽⁵⁾

Engenheira Sanitarista e Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental (UEPB). Doutoranda em Engenharia Ambiental pela UEPB.

Endereço⁽¹⁾: R. Arthur Monteiro Viana, 120 – Bairro Universitário – Campina Grande - PB - CEP: 58429-045 - Brasil - Tel: (83) 999926305 - e-mail: andrebruito@gmail.com

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 análise 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), com o uso de dois BRAnMD's. Foi operado um reator com configuração de módulo de membrana submerso e outro de módulo externo, ambos operando sob altos fluxos e com membrana suporte de 89µm. 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 Helminhos 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 1µm, se assemelhando ao processo de microfiltração. Quanto à fração volátil, a água residuária doméstica apresentou 0,76±0,24 g.STV.L-1 e valores finais iguais a 0,33±0,09 g.STV.L-1 e 0,34±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 o 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.

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).

As águas residuárias contêm constituintes de natureza física, química e biológica, que sem devido tratamento, são uma das principais causas da poluição ambiental. A água residuária doméstica, provinda de atividades domésticas, se configura como um problema crescente a medida que a população aumenta. 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.

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 processo de formação da membrana dinâmica e avaliar seus desempenhos sob altos fluxos em obter um efluente de qualidade.

OBJETIVOS

Objetivo geral

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

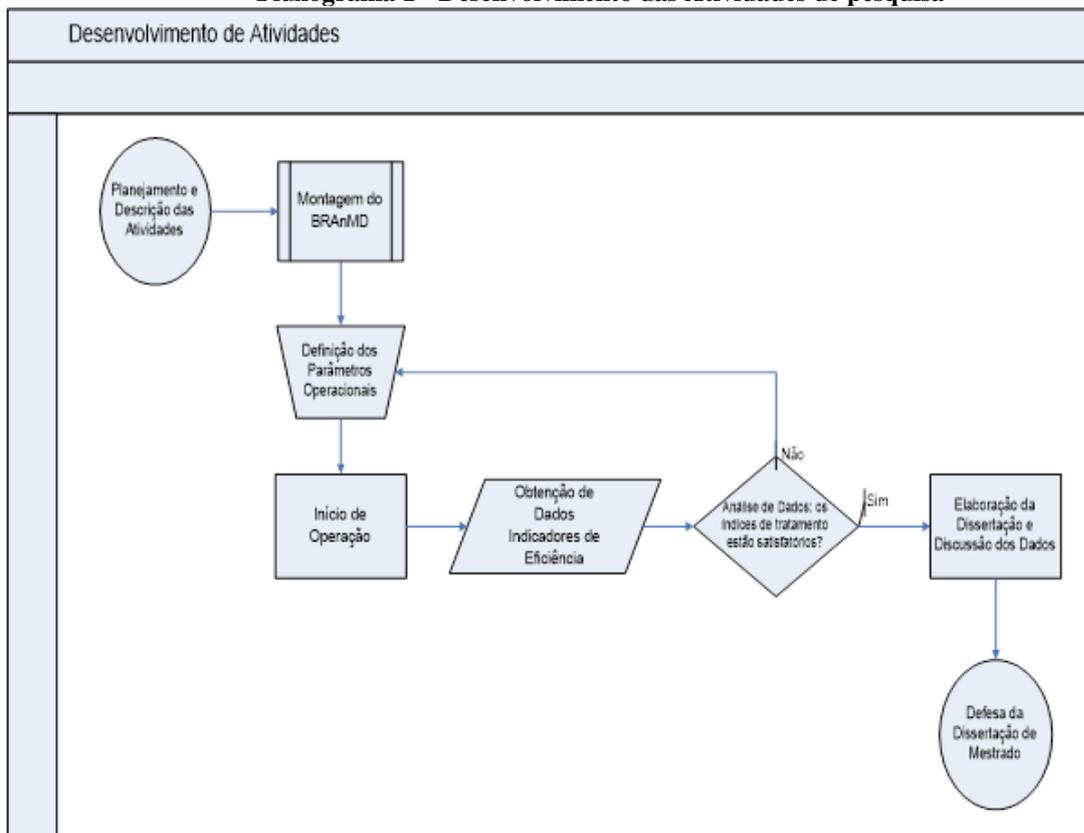
Objetivos específicos

- 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.

MATERIAIS 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 70° 13' 51" Sul, Longitude 350° 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



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.

DESCRIÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL

O sistema experimental foi projetado e construído e monitorado como exemplificado na Figura 1, composto da captação e armazenamento do afluente, aplicação aos dois biorreatores anaeróbios de membrana dinâmica e por fim a retirada do efluente (permeado).

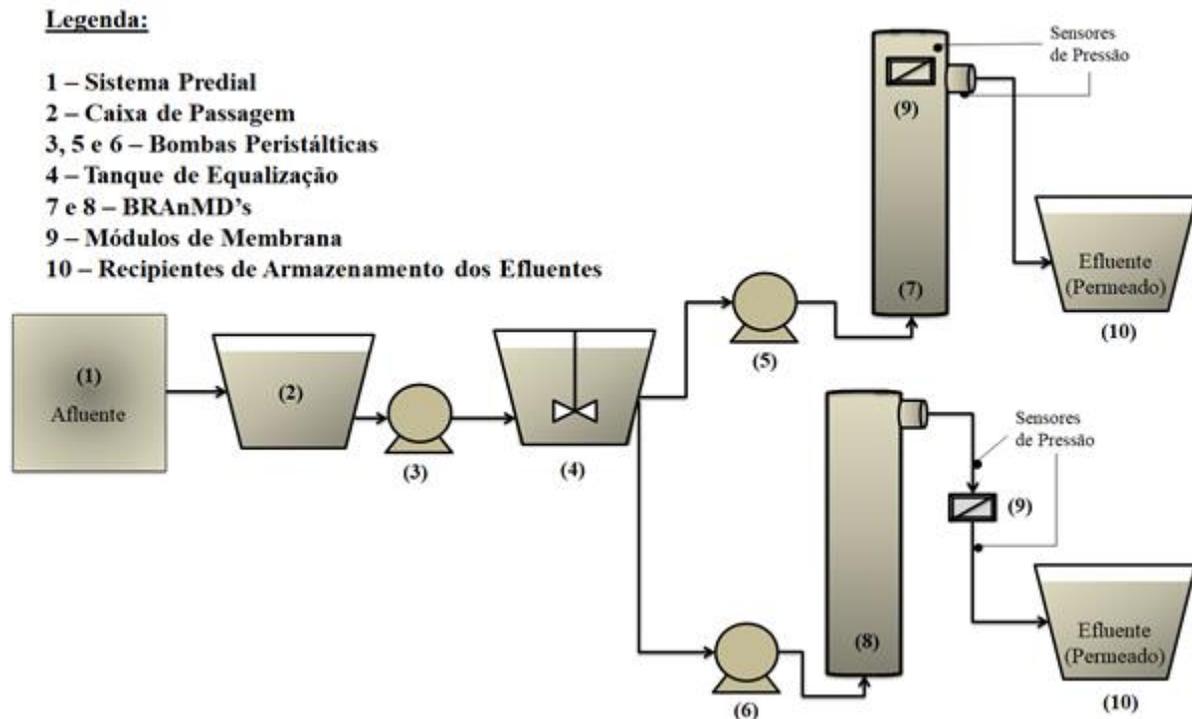


Figura 9 - Esquema descritivo do sistema dos Biorreatores Anaeróbios de Membrana Dinâmica.

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 m³.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 uma tendência de aumento. Tendo isso como nota e a necessidade de manutenção 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 formato 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	$D_m = 3,5\text{cm}$ $A_m = 9,62\text{cm}^2$ $P = 89 \mu\text{m}$	TDH = 8h TRC = 104d $Q_e = 0,9 \text{ L.h}^{-1}$ $q_e = 519 - 935,55 \text{ L/m}^2.\text{h}$
BRAnMD EXTERNA	H = 196cm D = 5cm V = 6L	$D_m = 7,0\text{cm}$ $A_m = 38,485\text{cm}^2$ $P = 89 \mu\text{m}$	TDH = 10h TRC = 104d $Q_e = 0,6 \text{ L.h}^{-1}$ $q_e = 157,89 \text{ L/m}^2.\text{h}$

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 em resultados e discussão. 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.

Módulo de membrana submerso

A Figura 2 apresenta a o BRAnMD de módulo de membrana submerso.

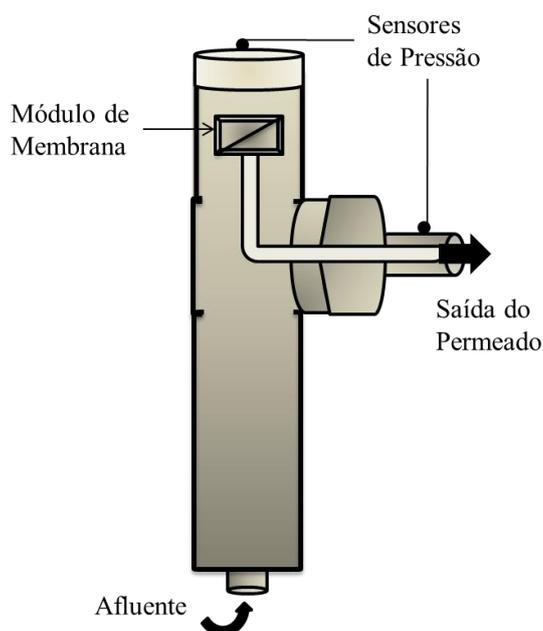


Figura 2 - Desenho esquemático do Biorreator Anaeróbio de Membrana Dinâmica Submersa

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.

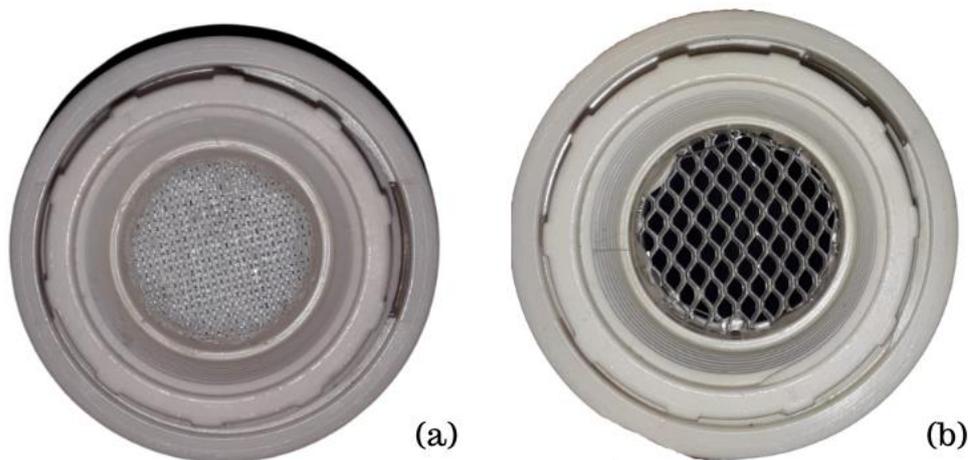


Figura 3 - Módulo de Membrana Submerso acoplado ao Biorreator.

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.

Módulo de membrana externo

A Figura 4 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.

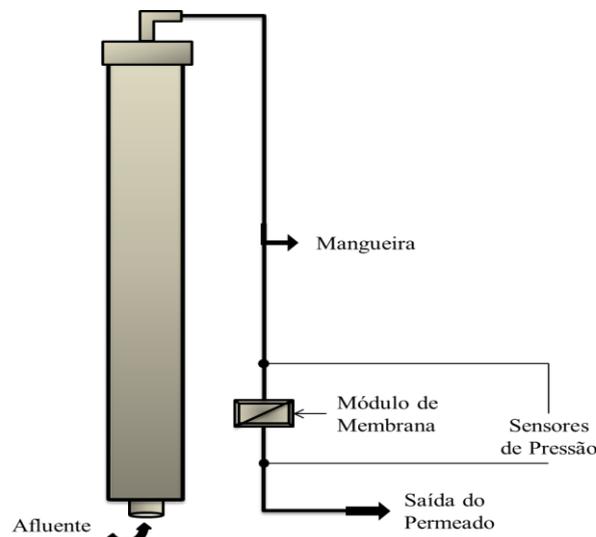


Figura 4 - Desenho esquemático do Biorreator Anaeróbio de Membrana Dinâmica Externa

A Figura 5 apresenta a configuração do módulo de membrana acoplado ao biorreator.

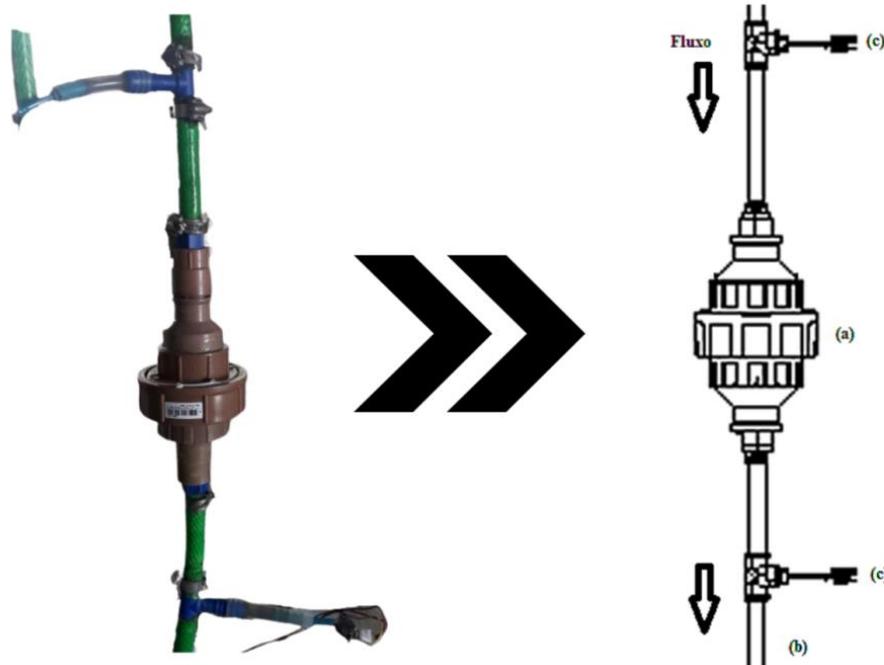


Figura 5 - Módulo de Membrana Externo acoplado ao Biorreator.

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).

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:

$$PTM = P_e - P_s \quad \text{equação (1)}$$

Em que:

P_e : Pressão de entrada;

P_s : Pressão de saída.

Cálculo da resistência à filtração

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

$$R_t = PTM / (\mu * q_e) \quad \text{equação (2)}$$

Em que:

Rt: Resistência a filtração (m^{-1})

PTM: Pressão Transmembrana (Pa)

μ : Viscosidade Dinâmica (Pa.s)

qe: 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.

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 Helminthos - (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 possuíam 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; DQOt, Viscosidade, Tamanho de Partículas e Potencial Zeta. Todas as análises foram realizadas seguindo as metodologias especificadas anteriormente.

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.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Caracterização do lodo inóculo

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

Tabela 1 - 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

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 (± 0,26) 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 ± 205 µm, 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 (± 1,20) 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.

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 anaeróbico.

Tabela 2 - 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

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

FORMAÇÃO DA MEMBRANA DINÂMICA

Pressão transmembrana e resistência a filtração

Yu et al (2018) e Wang et al (2020) afirmam que a pressão muito alta pode afetar a compressibilidade e grossura da torta, portanto, controlar a PTM é imprescindível para todo processo em si. 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 Figuras 6 e 7 mostram as variações da pressão transmembrana durante toda operação em BRAnMD's.

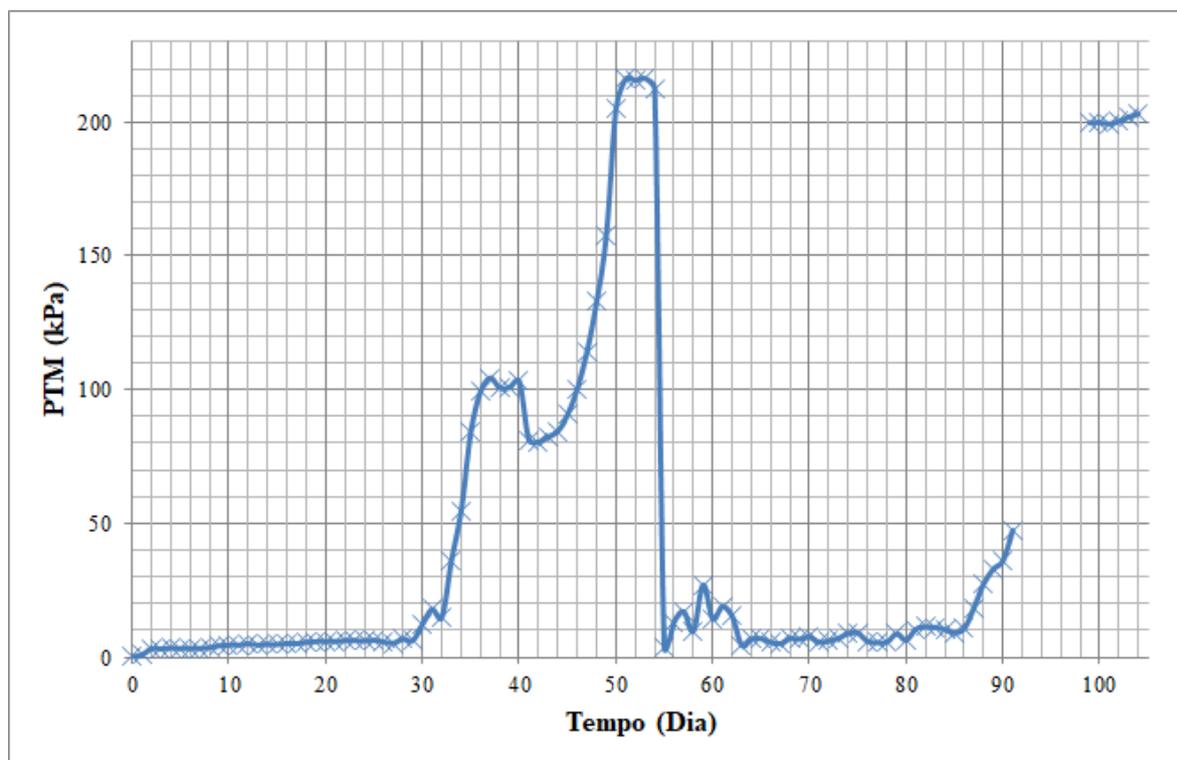


Figura 6 - Valores médios da Pressão Transmembrana referentes ao BRAnMD de módulo submerso

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 observada 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 2.10^{11} e $3,6.10^{10} \text{ m}^{-1}$, 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 $4,7.10^{11}$ e $4,6.10^{11} \text{ m}^{-1}$.

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, na Figura 2 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é apresentado o comportamento da PTM em BRAnMD Externa.

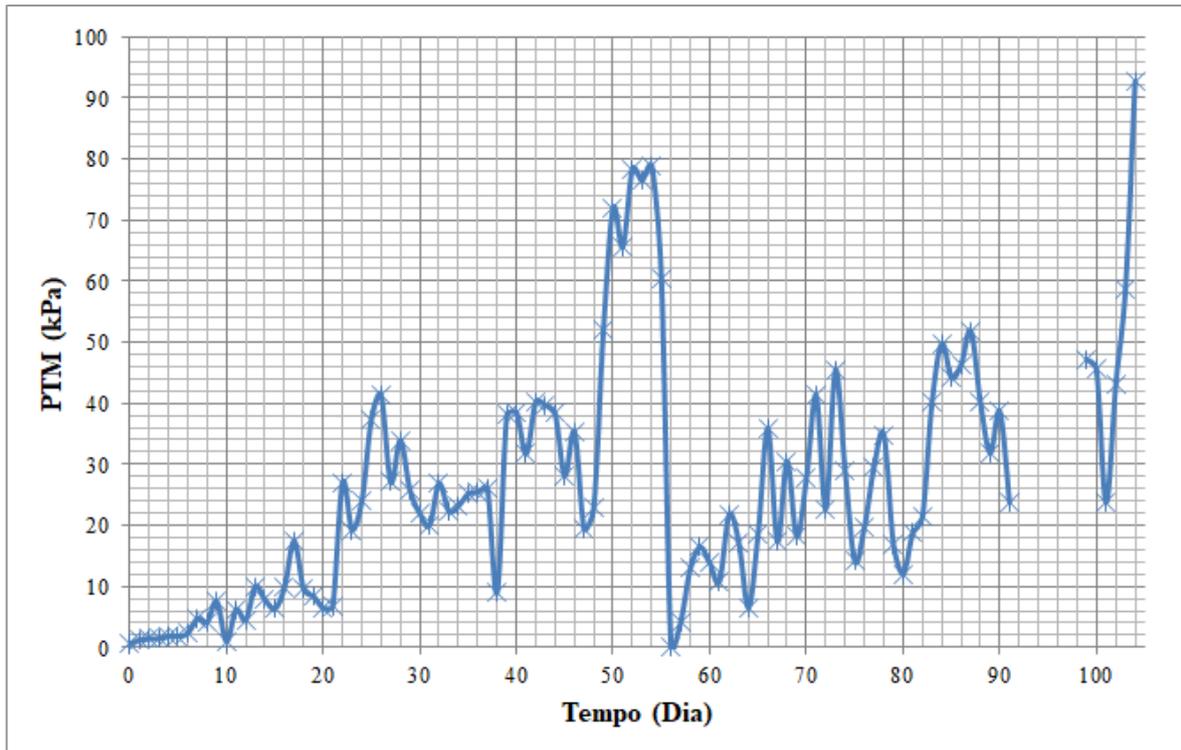


Figura 7 – Valores médios da Pressão Transmembrana referentes ao BRAnMD de módulo externo.

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 9º ao 21º 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 48º ao 55º, 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 (2021). 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.

Turbidez

Para melhor elucidação da relação com parâmetro da Turbidez, as figuras com relação ao seu comportamento dos BRAnMD serão expostos separadamente. O Figura 8 demonstra o comportamento da grandeza em biorreator de módulo submerso.

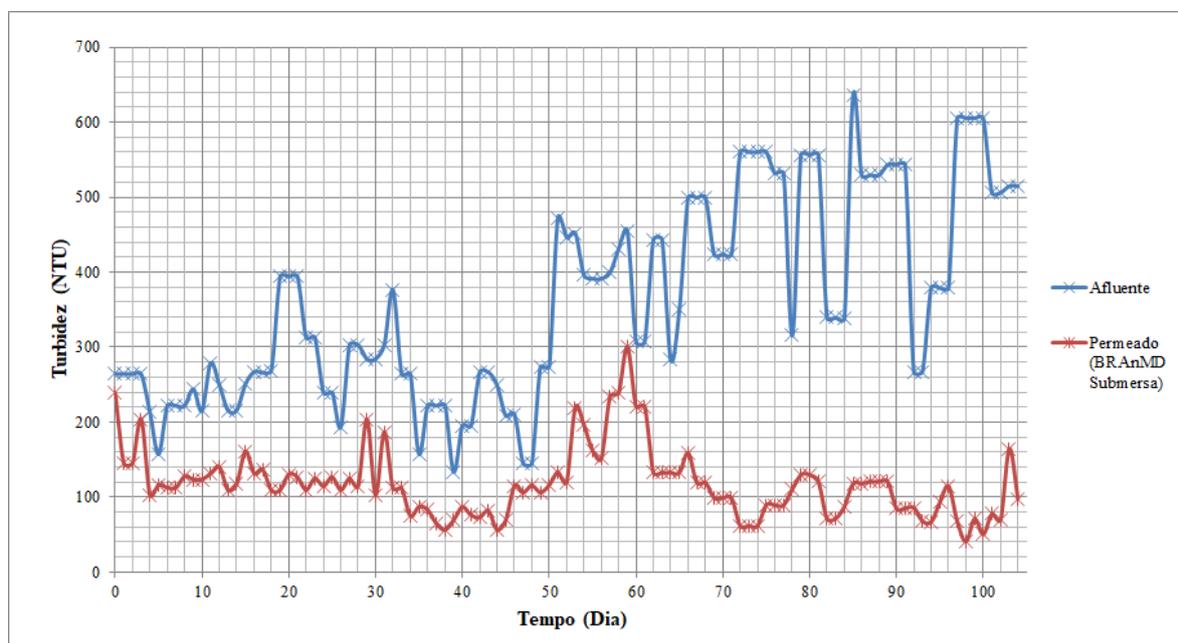


Figura 8 - Comportamento de Turbidez em BRAnMD de Módulo Submerso

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 a 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). A figura 9 apresenta os resultados de turbidez obtidos com relação ao biorreator de módulo de membrana externo.

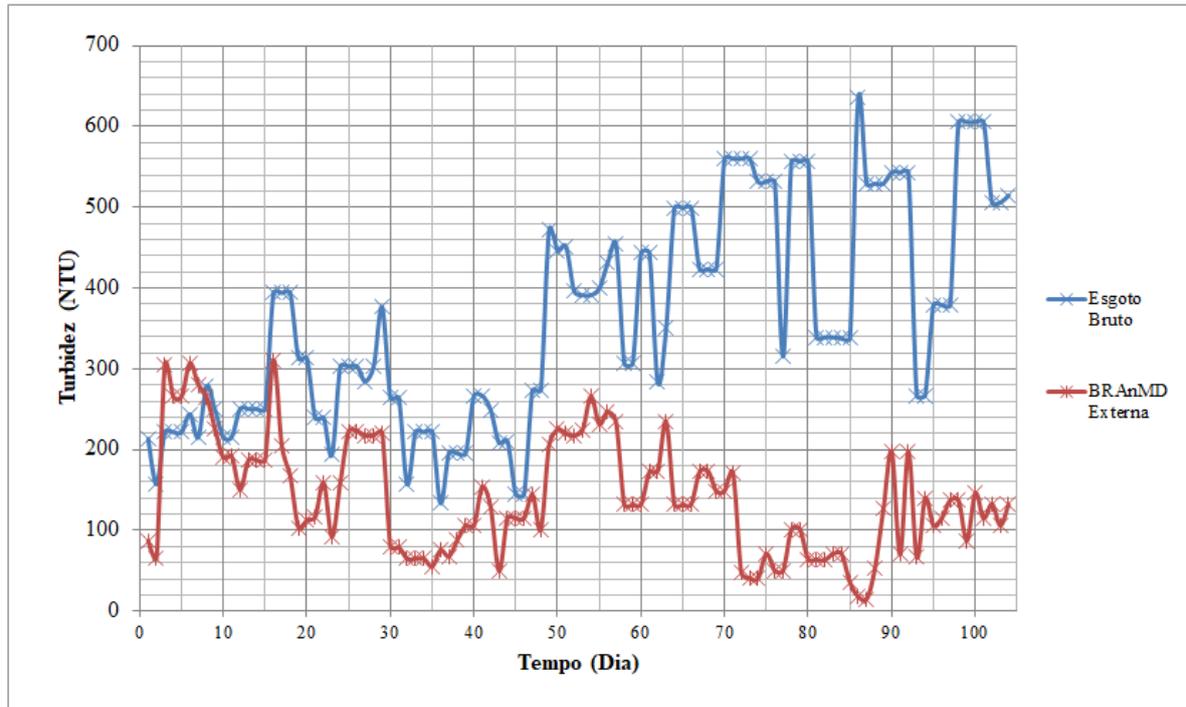


Figura 9- Comportamento de Turbidez em BRAnMD de Módulo Externo

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 madura 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.

Tamanho de partícula

O parâmetro destacado auxilia no conhecimento da tendência de formação da MD e na comparação da capacidade de filtração da membrana dinâmica em relação às membranas convencionais. Figura 10 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. A Figura 10 mostra o comportamento do tamanho das partículas na primeira semana de operação.

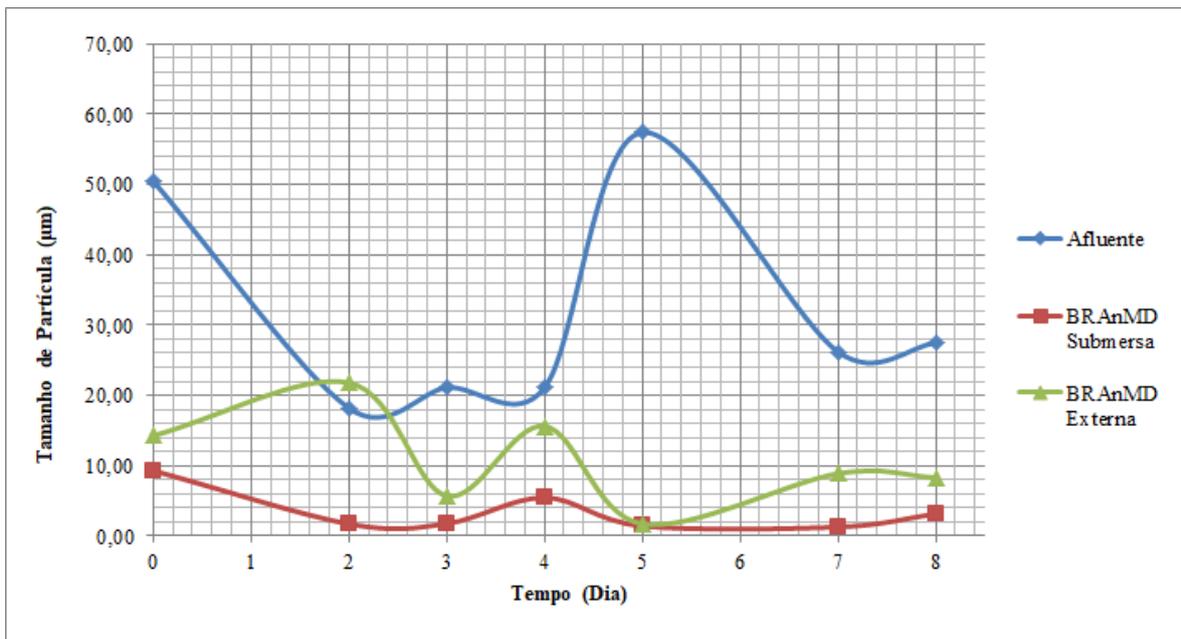


Figura 10 – Tamanhos de Partícula na primeira semana de Operação.

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 Figura 11.

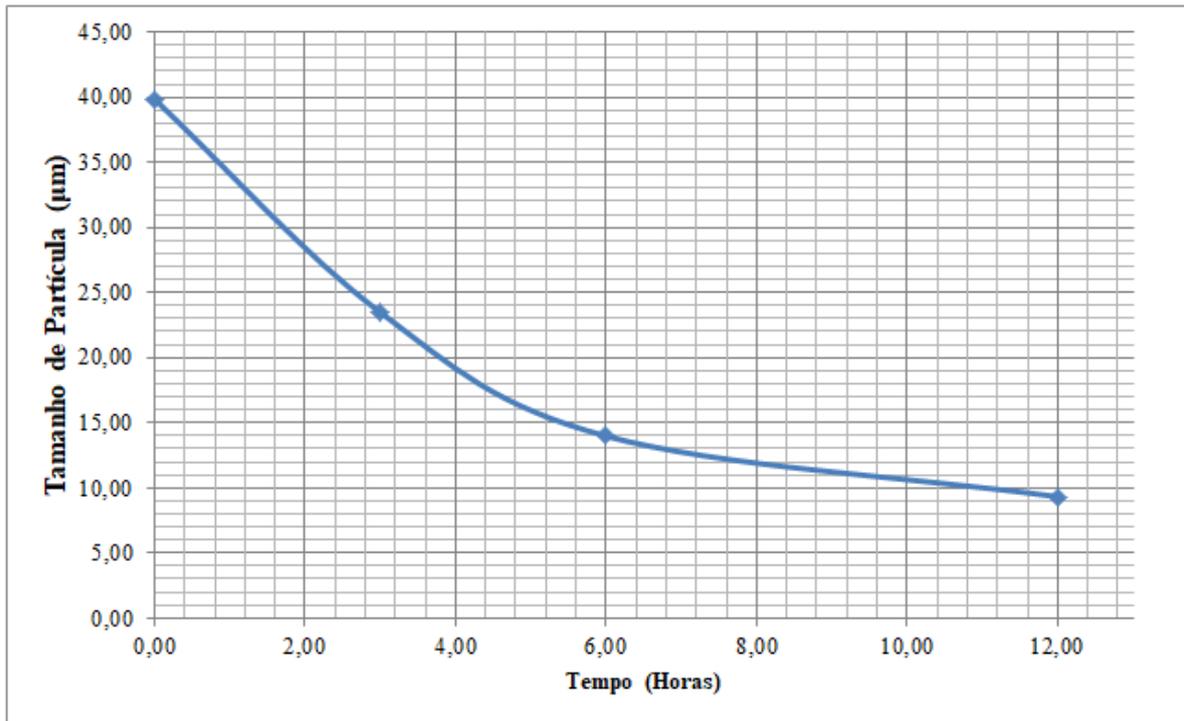


Figura 11 - Comportamento do tamanho de partícula nas primeiras horas de operação em BRAnMD Submersa.

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 Figura 12 a seguir é possível focar nos comportamentos do tamanho da partícula em totalidade da operação.

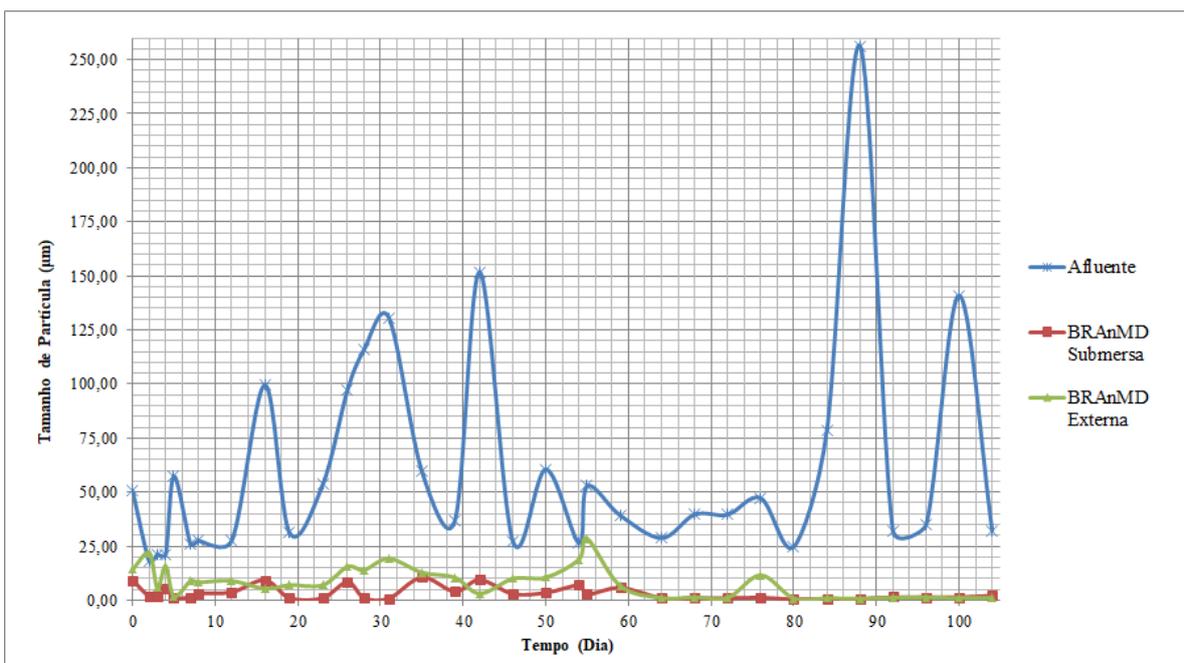


Figura 12 - Variações do tamanho de partícula durante toda operação.

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 a figura 12, com relação ao BRAnMD Externo, pode-se notar que o tamanho da partícula se mostrou abaixo ou próximo a valores de 10 µm o 15º e o 22º 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 76º 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 a estruturação, capacidade de filtração e remoção de material orgânico presente em águas residuárias.

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 Figuras 13 e 14, respectivamente.

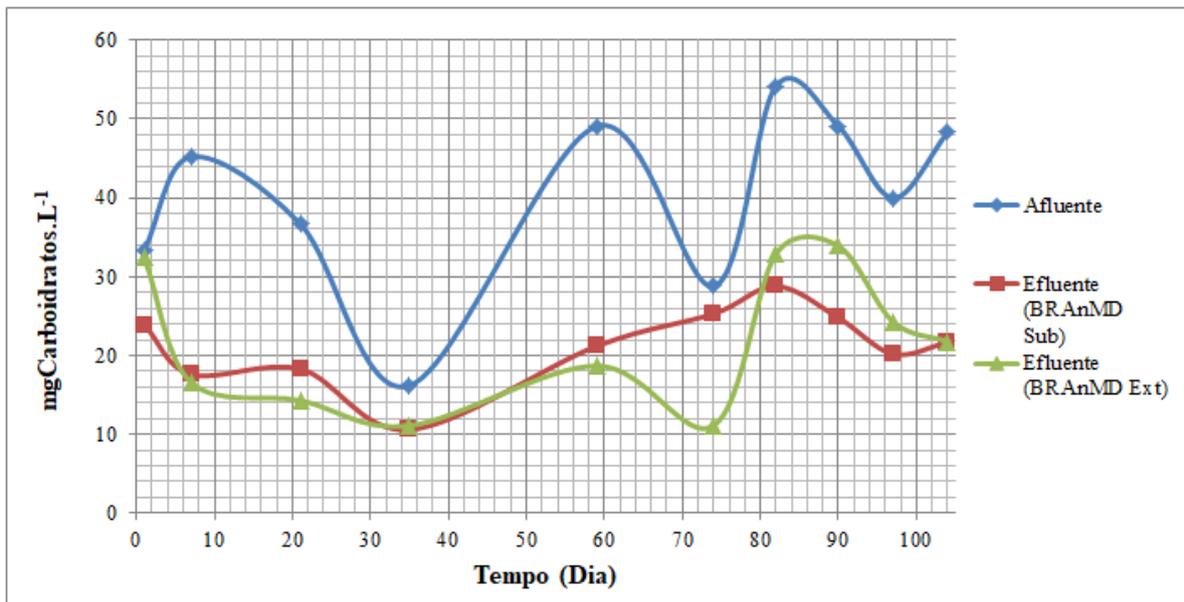


Figura 13 - Concentrações de Carboidratos em tratamento por BRAnMD's

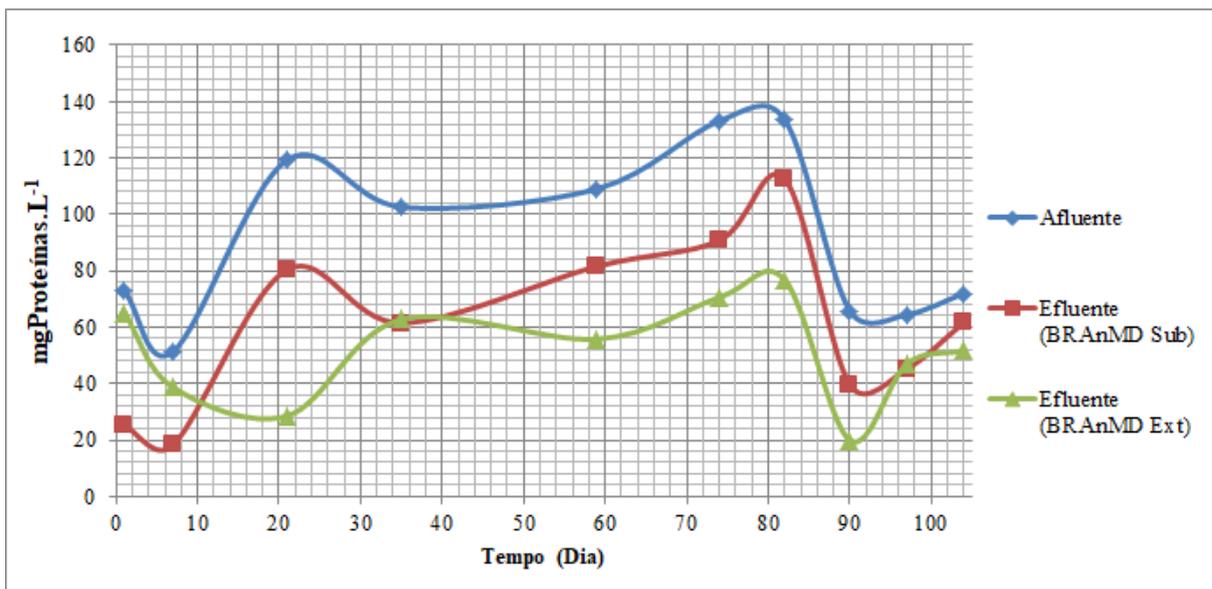


Figura 14 - Concentrações de Proteínas em tratamento por BRAnMD's

Nas figuras 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.

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. A Figura 15 mostra o comportamento de pH do afluente e permeados no decorrer do monitoramento.

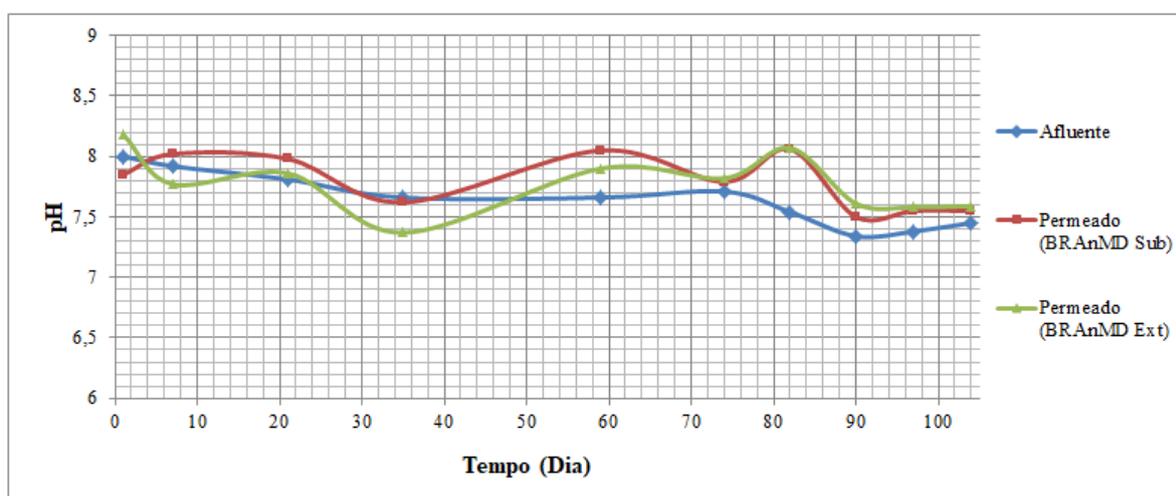


Figura 15- Comportamento do parâmetro pH.

Em relação ao parâmetro apresentado no Figura 15, 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. As figuras 16 e 17 expressam as variações de Alcalinidade e Ácidos Graxos Voláteis, respectivamente.

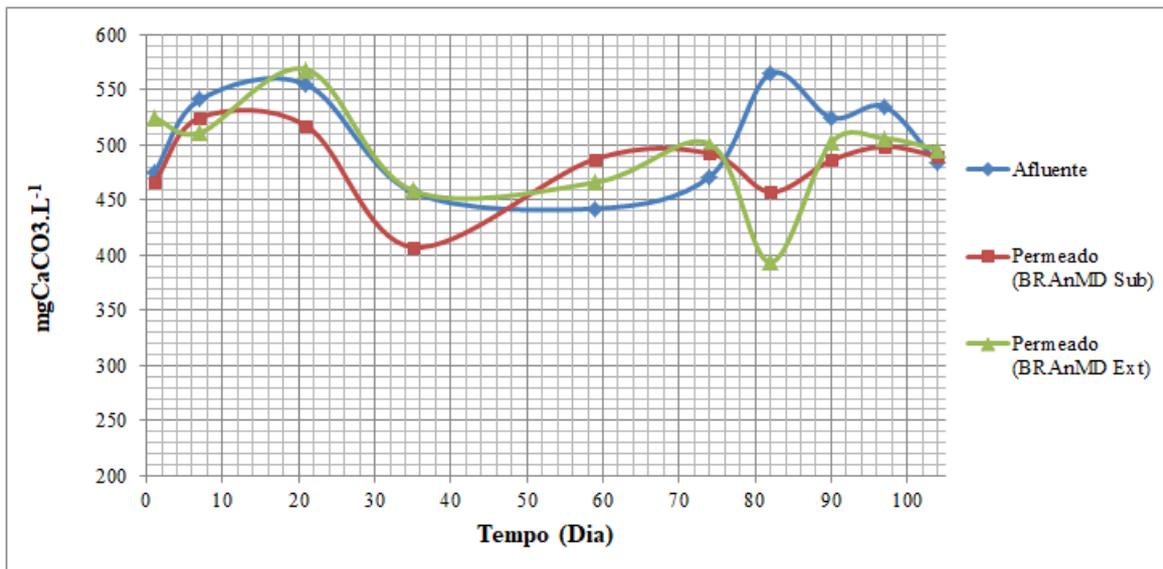


Figura 16 - Variação da Alcalinidade ao longo da pesquisa.

A alcalinidade média da água resíduária doméstica concentrada se apresentou por volta de $505,12 \pm 43,93$ mgCaCO₃.L⁻¹ e os permeados de BRAnMD de configuração de membrana Submersa e Externa apresentaram valores de $482,87 \pm 33,34$ e $493 \pm 46,16$ mgCaCO₃.L⁻¹, respectivamente. A partir disso, denota-se uma ligeira diminuição dos valores do parâmetro. Para se considerar um biorreator anaeróbico 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.

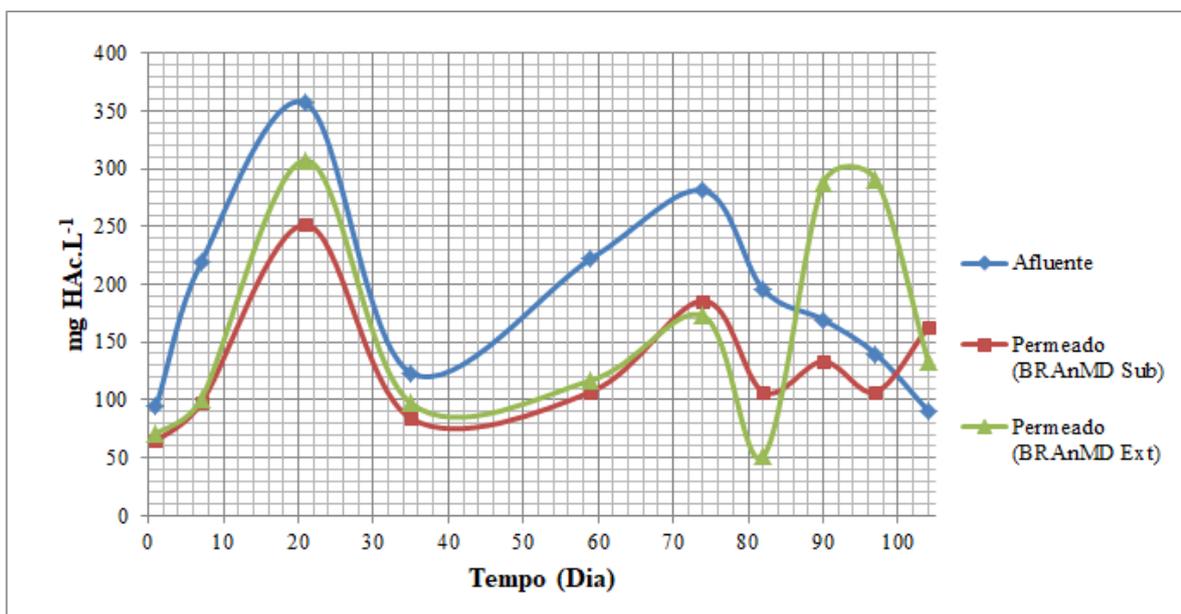


Figura 17 - Comportamento de AGV ao longo da pesquisa.

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 $162,88 \pm 97,19$ mg HAc.L⁻¹. Ao fim do processo, é possível observar uma produção de AGV.

Eficiência de remoção da matéria orgânica

As Figuras 18 e 19 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 denominador de água residuária doméstica concentrada por Santos (2019a).

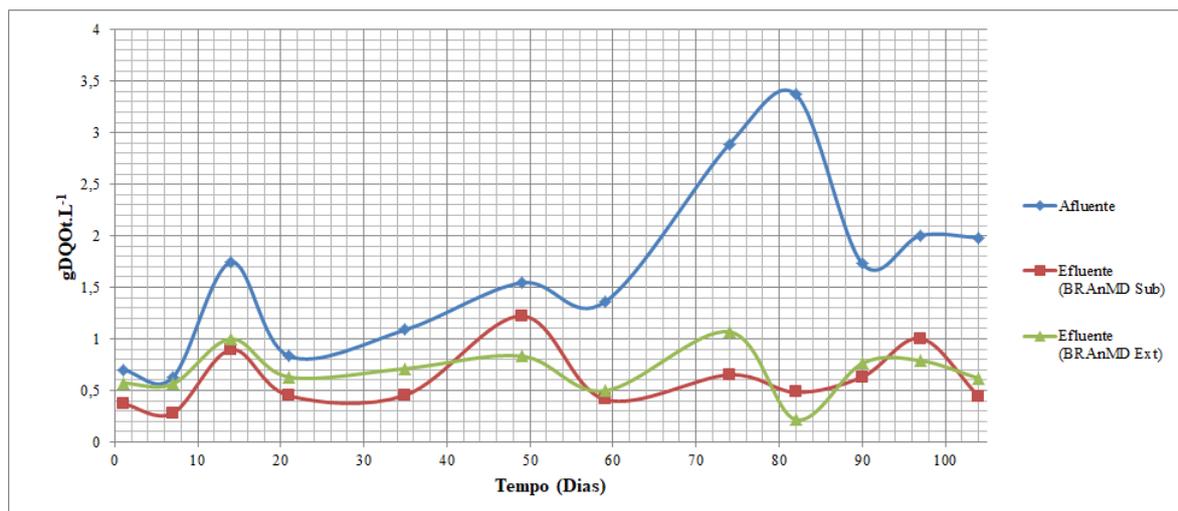


Figura 18 – Evolução temporal de DQO_t no processo de filtração por Membrana Dinâmica.

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 Figura 19 e nos parágrafos subsequentes.

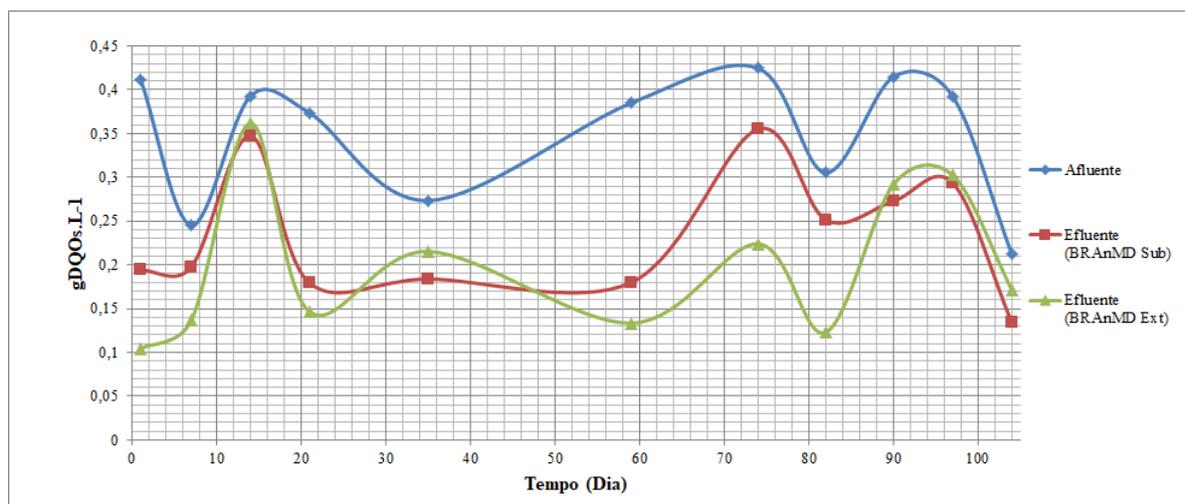


Figura 19 – Evolução temporal DQO_s no processo de filtração por membrana dinâmica.

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 apresenta 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.

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

As figuras 20 e 21 exibem o comportamento das concentrações dos sólidos totais e sólidos totais voláteis, respectivamente.

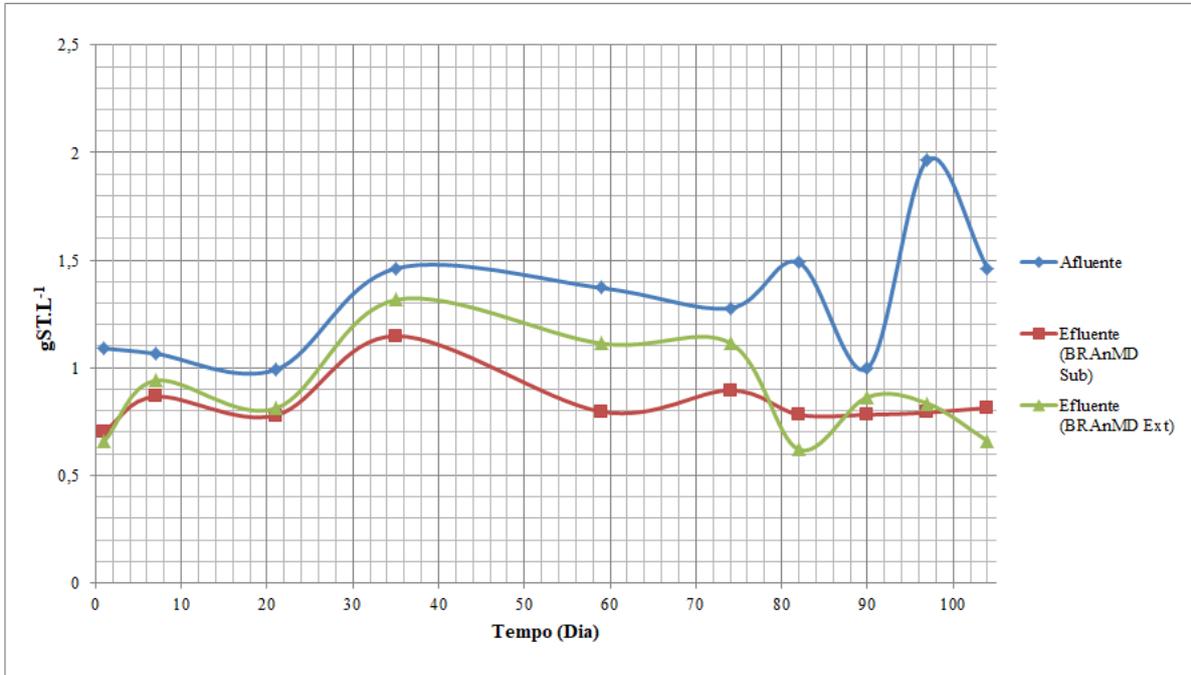


Figura 20 – Comportamento de Sólidos Totais em BRAnMD

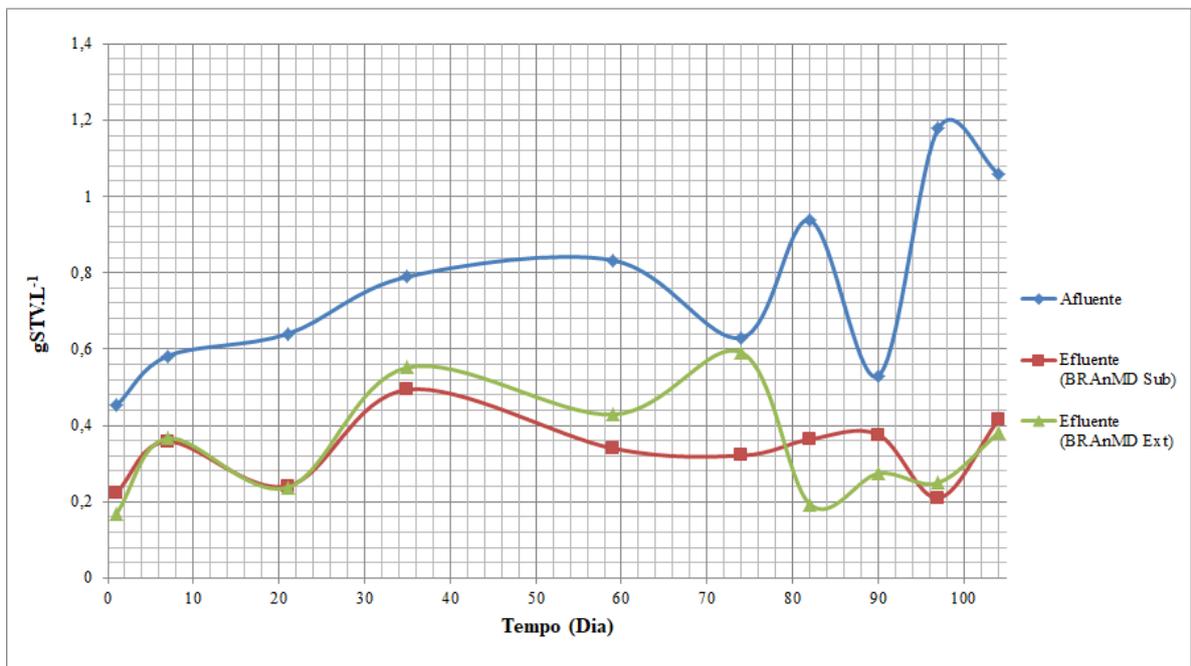


Figura 21 – Comportamento de concentrações de Sólidos Totais Voláteis em BRAnMD

Foi possível observar uma média de concentração do afluente de $1,3 \pm 0,30 \text{ gST.L}^{-1}$ e de $0,84 \pm 0,10 \text{ gST.L}^{-1}$ em BRAnMD Submersa (remoção média de 36,74%) e $0,89 \pm 0,19 \text{ gST.L}^{-1}$ para BRAnMD Externa (remoção média de 31,27%). Quanto à fração volátil observada foi de $0,76 \pm 0,24 \text{ gSTV.L}^{-1}$ para a água residuária doméstica concentrada e valores médios de $0,33 \pm 0,09 \text{ gSTV.L}^{-1}$ e $0,34 \pm 0,15 \text{ gSTV.L}^{-1}$ 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, as Figuras 22 e 23 mostram seu comportamento durante a operação.

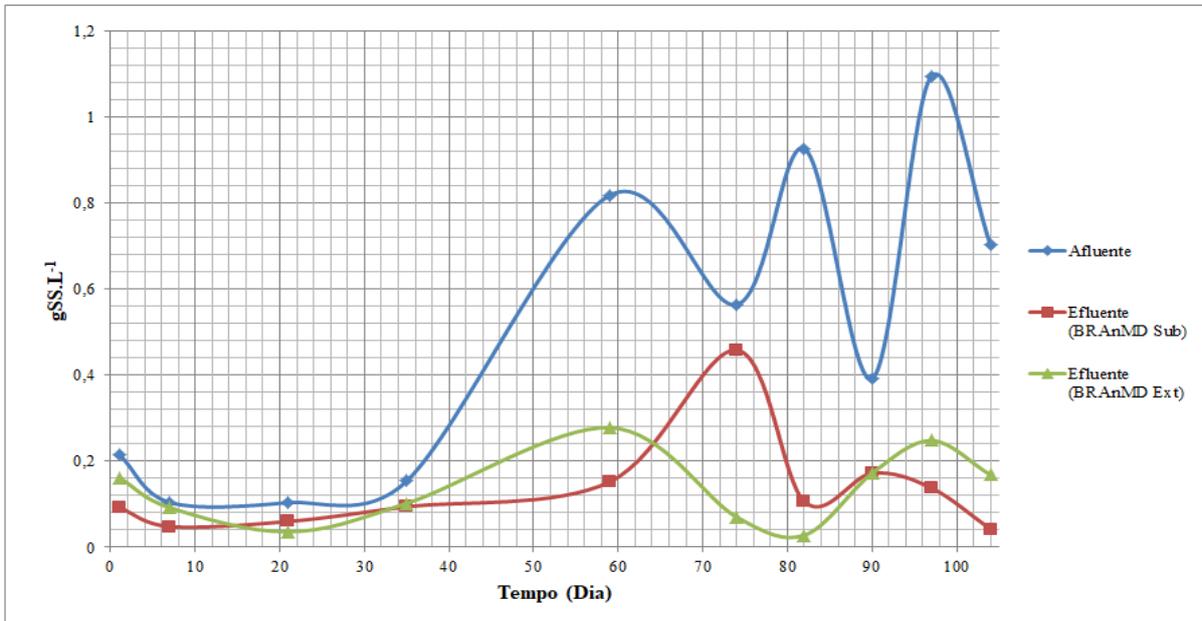


Figura 22 – Comportamento de concentrações de Sólidos Suspensos.

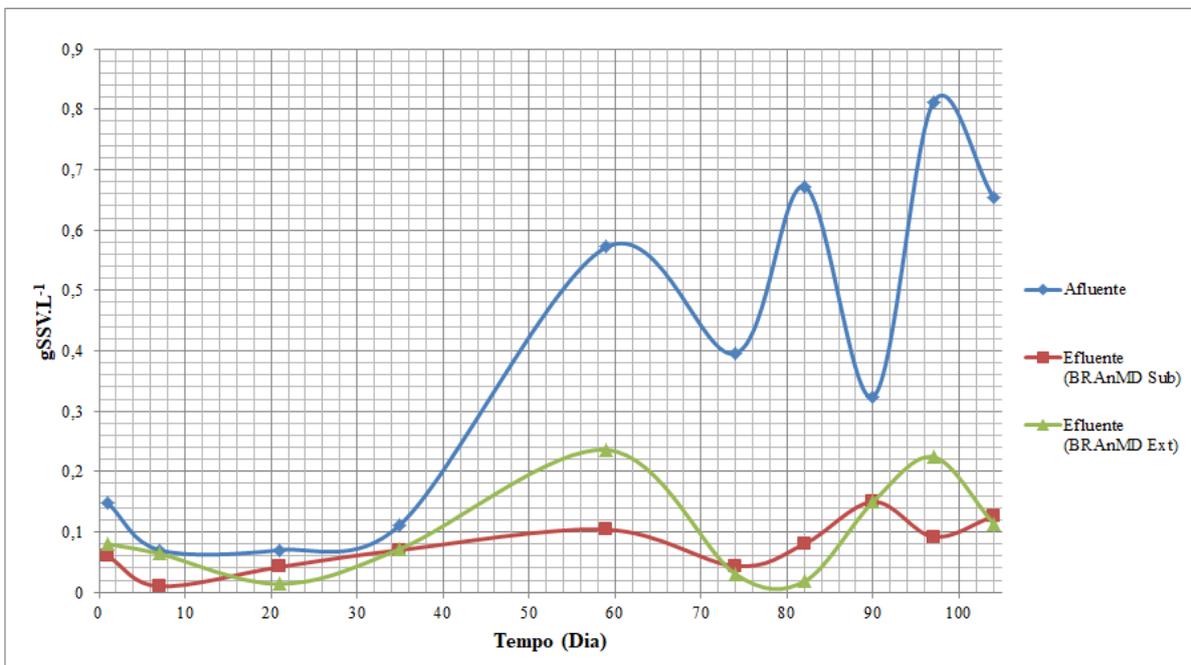


Figura 23 – Comportamento de concentrações de Sólidos Suspensos Voláteis.

Para as frações de sólidos suspensos do afluente, foi possível analisar uma média equivalente a $0,51 \pm 0,36$ gSS.L⁻¹ e, para sólidos suspenso voláteis, $0,38 \pm 0,28$ gSSV.L⁻¹. Quanto aos permeados, é possível a constatação de valores de $0,14 \pm 1,2$ e $0,13 \pm 0,08$ 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 $0,10 \pm 0,08$ 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 $0,38 \pm 0,27$ 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, a Figura 24 mostra o comportamento da Cor real das amostras durante o processo de filtração.

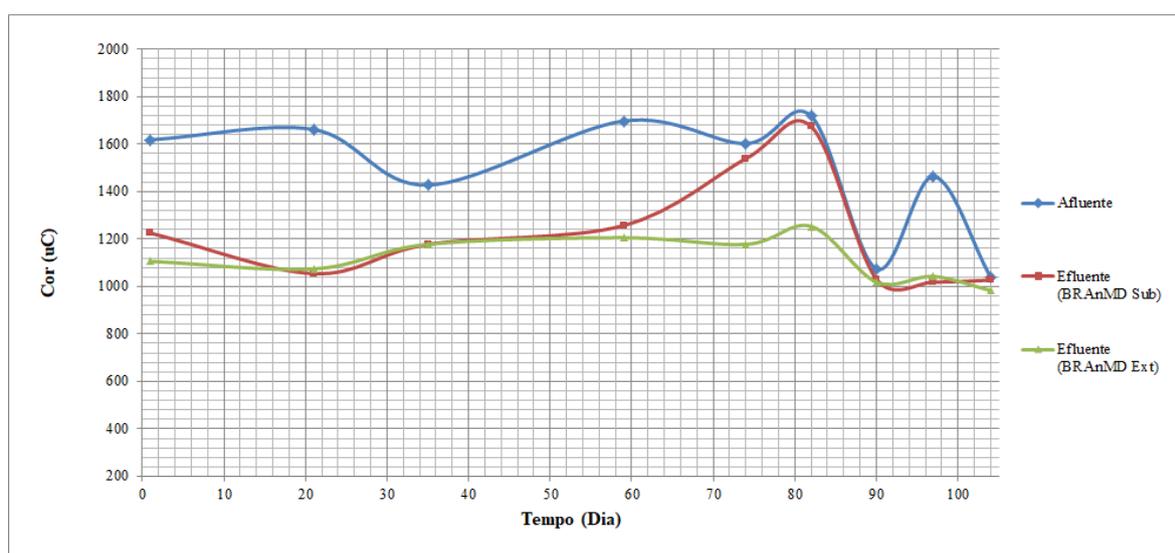


Figura 25 – Comportamento da Cor real.

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). 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.

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 3 – 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)

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 reuso 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.

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 de 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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

BAILENGER, 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.

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.

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.

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>

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.

METCALF; EDDY. Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. 5ª 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>

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>.

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.

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>

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)

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>

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>

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.