



Impacto de incrustação no sistema MBR

Hanna Louise Luna Rodrigues de Sá¹, Paulo Sergio da Silva², Sara Jhulian Monteiro³, Letícia Lima Moreira⁴, Genilson Pereira Santana⁵, Cleideane Cunha Costa⁶, Erickson Oliveira dos Santos⁷, Jorge Átila Damasceno Maia⁸, Pedro Luis Sosa González⁹, Priscila Pauly Ribas¹⁰, Raimundo Kennedy Vieira¹¹

Resumo

Ao longo da história, o homem encontra uma dificuldade e a estuda para encontrar a melhor solução, com isso em vista, o estudo de biorreatores de membrana (MBRs) têm sido objeto de atenção minuciosa em virtude do crescimento da demanda de água pela possibilidade de escassez deste recurso. Mas até agora, a incrustação na membrana e o alto custo das membranas são principais obstáculos para um emprego amplo de MBRs em aplicações municipais e industriais de tratamentos de águas residuais. Nos últimos anos, foram feitas várias pesquisas científicas para a compreensão das incrustações MBR em detalhes e para desenvolver membranas de alto fluxo ou de baixo custo. Nos últimos anos, foram várias feitas pesquisas científicas para a compreensão das incrustações MBR em detalhes e para desenvolver membranas de alto fluxo ou de baixo custo. Este artigo de revisão acadêmica procura estudar o impacto das incrustações numa unidade de Tratamento de Efluentes que possui uma unidade de MBR. Para atingir este objetivo, este trabalho realizado uma revisão do estado da arte do impacto das incrustações em sistemas MBR, enfatizando sua origem, os tipos de membranas e uma operação dos sistemas MBR. Verifica-se que há a necessidade de se conhecer o processo que se irá trabalhar, definir um bom programa de manutenção para que o sistema MBR performe adequadamente e permaneça operando o maior tempo possível.

Palavras-chave: Biorreator, Membrana, Incrustações, Bactérias.

Impact of fouling on the MBR system. Throughout history, man finds a difficulty and studies it to find the best solution the study of membrane bioreactors (MBRs) has been the subject of meticulous attention due to the growing demand for water due to the possibility of shortage of this resource. But so far, membrane fouling,

¹ Bolsista P&D, Manaus, AM, Brazil hannalouiseluna@hotmail.com

² Bolsista P&D, Manaus, AM, Brazil, p.silvaa1409@gmail.com

³ Bolsista P&D, Manaus, AM, Brazil, sarajhulian@gmail.com

⁴ Bolsista P&D, Manaus, AM, Brazil lmoreira07@gmail.com

⁵ Prof. Titular, ICE, DQ/UFAM, Manaus, AM, Brazil, gsantana2005@gmail.com

⁶ Samsung Brasil, Distrito Industrial, Manaus, Brazil cleide.c@samsung.com

⁷ Samsung Brasil, Distrito Industrial, Manaus, Brazil erickson.o@samsung.com

⁸ . Samsung Brasil, Distrito Industrial, Manaus, Brazil jorge.atila@samsung.com

⁹ Samsung Brasil, Distrito Industrial, Manaus, Brazil pedro.sosa@samsung.com

¹⁰ Samsung Brasil, Distrito Industrial, Manaus, Brazil priscila.p@samsung.com

¹¹ FT/UFAM, Manaus, AM, Brazil, correspondence kennedy71@gmail.com



and the high cost of membranes are major obstacles to the widespread use of MBRs in municipal and industrial wastewater treatment applications. In recent years, several scientific research have been carried out to understand MBR inlays in detail and to develop high-flow or low-cost membranes. In recent years, scientific research has been carried out to understand MBR inlays in detail and to develop high-flow or low-cost membranes. This academic review article seeks to study the impact of fouling on an Wastewater Treatment Plant (WWTP) that has an MBR unit. To achieve this objective, this work carried out a review of the state of the art of the impact of fouling on MBR systems, emphasizing its origin, the types of membranes and an operation of MBR systems. It appears that there is a need to know the process that will work, define a good maintenance program so that the MBR system performs properly and remains in operation as long as possible.

Keywords: Bioreactor, Membrane, Fouling, Bacteria.

1. Introdução

Ao longo do final do século passado e início deste século, vários trabalhos acadêmicos (DU et al., 2020; GHERNAOUT et al., 2020 e TENG et al., 2020) foram sendo publicados sobre a pesquisa na área de MBR, (do inglês, Membrane Bioreactor) em virtude disso o número destes artigos acadêmicos teve um crescimento exponencial da ordem de 20% em comparação com a utilização desta tecnologia comercialmente (Santos et al., 2011).

O crescimento na demanda desta tecnologia se deu através do agravamento da escassez dos recursos hídricos ao longo dos anos em todo mundo, isso impactou na corrida pelo desenvolvimento e crescente aperfeiçoamento de novas tecnologias e novos equipamentos para o tratamento de água e esgoto.

Apesar de já ser utilizada há décadas, a tecnologia de MBR recentemente começou a ser amplamente aplicada em sistemas de tratamento de águas residuais, ou seja, para tratamento de esgotos, começando a competir de igual para igual com o tratamento convencional que utilizava o lodo ativado na unidade de processamento. (LE-CLECH, 2006)

Para que a tecnologia MBR possa empregada largamente na planta de processo de tratamento de esgoto na indústria, ela deverá apresentar diversas vantagens que a

torne competitiva. Felizmente, ela apresenta diversos benefícios, dentre eles pode-se citar: aumento na eficiência comprovada através da qualidade do efluente, simplicidade na operação da unidade, durabilidade e baixos custo operacionais para a substituição das membranas utilizadas e menor gasto de energia elétrica para a operação. (Meng et al., 2017). Entretanto, a formação de incrustações na membrana pode ser considerado uma desvantagem desta tecnologia (IORHEMEN, HAMZA e TAY, 2017.), pois pode provocar interferências internas e externas (KAMPOURIS et al., 2018) no equipamento, como redução no fluxo (BLANDIN et al., 2018).

Para estudar o comportamento das incrustações em um sistema MBR, há necessidade de abordar três aspectos no sistema: analisar primeiro como as incrustações se formam, especificar o tipo de membrana do equipamento de MBR em que estas incrustações irão se depositar e; especificar a forma como este equipamento irá ser operado na planta de processo. Desta forma pode-se atingir o objeto deste artigo que é estudar o impacto das incrustações em sistemas MBR.



2. Metodologia

Para melhor entendimento sobre os efeitos e impactos das incrustações em uma unidade MBR foi realizada uma revisão bibliográfica que teve os seguintes critérios para a seleção dos artigos, bases de dados: Web of Science, SciELO e Google Scholar. Em relação ao período em que os artigos foram publicados definiu-se entre 2015 e 2020, o idioma escolhido foi o era o inglês devido a sua abrangência. Com respeito as palavras-chave, optou-se pela busca por termos livres, sem o uso de vocabulário (descritores). Os critérios de inclusão e exclusão foram baseados no nível de informações direcionadas ao assunto. Outras citações fora da linha do tempo foram utilizadas com base em sua importância para apoiar os conceitos.

Assim sendo, este artigo é estruturado da seguinte forma: Na seção 1 faz-se a Introdução ao trabalho. As próximas quatro seções abordam as principais características das abordagens estudadas, iniciando-se pelo Tipos de Incrustações na seção 3, Biorreatores de membrana na seção 4, a Metodologia para a Operação do Equipamento de MBR é discutida na seção 5, Operações para Manutenção das Membranas na seção 6, enquanto a última seção apresenta os comentários finais sobre o tema estudado.

3.0 Incrustações

Segundo (MENG et al., 2017, incrustações são depósitos de materiais insolúveis sobre as membranas que ocorrem em razão da má qualidade do efluente e/ou quando há um tratamento deficiente em outros pontos da planta de tratamento. Estas deposições ocorrem com frequência nas membranas, pois estes

materiais insolúveis apresentam tamanhos maiores que a porosidade da membrana, isto com o tempo diminui o fluxo de filtração da membrana. Para que não ocorra a deposição destas incrustações deve-se conhecer sua composição molecular para que haja um estudo para minimizá-las no processo.

Avanços em estudos sobre incrustações como bactérias, leveduras, proteínas e colóides têm despertado grande interesse na literatura acadêmica. Grande parte destes estudos tem se concentrado no efeito da carga (variação de pH ou concentração de sal), concentração do fluxo e/ou fluxo cruzado, hidrofobicidade da membrana, tamanho dos poros da membrana e fluxo (pressão constante ou fluxo constante). Embora algumas tendências gerais sejam simples como os colóides se comportaram como macromoléculas (proteínas), a natureza lábil das proteínas e a gama de polidispersidade das macromoléculas adicionam uma complexidade particular aos mecanismos de incrustação. Além disso, a interação entre os diferentes tipos de incrustações como colóides suspensos, sais inorgânicos ou espécies mistas tem o potencial de mudar a natureza da camada incrustante. Podendo assim ocorrer diversos tipos de incrustações ao mesmo tempo ou apenas uma, dependendo do efluente filtrado (LECLECH, 2006).

3.1 Tipos de Incrustações:

A vantagem da tecnologia MBR em relação às ETE's convencionais se dá por conta da maior qualidade do efluente tratado, concentrando mais biomassa e sendo um sistema mais compacto (JUDD, 2010).



No entanto, o uso de MBR's apresentam a problemática de incrustações na membrana (MENG et al., 2017), devido à deposição do material biológico presente no efluente. A problemática das incrustações pode causar problemas no fluxo, levando a frequente troca de membrana e fazendo com que o custo das MBR's seja elevado (Chang e Lee, 2012). Devido a isto, haverá queda da produtividade em decorrência da redução de produto filtrado (Kim et. al., 2009). Além disso, o custo da demanda de energia para aeração aumenta e há redução da vida útil das membranas.

Alguns estudos para minimizar os efeitos das incrustações têm sido feitos no intuito de otimizar o processo, previstos por MENG et Al., (2017) e JUDD et Al., (2018). Esses estudos envolvem a utilização de processos de: aeração; floculantes; limpezas químicas e aplicação de nanotecnologia. Os resultados destes estudos demonstram como ocorre a tendência de diminuir o custo de energia utilizado no funcionamento das MBR's, e agilizam o processo de limpeza da membrana, aumentando sua vida útil. Para tornar mais eficiente a aplicação de quaisquer dos processos listados anteriormente, é necessária a realização de uma metodologia para a utilização do equipamento.

Para Cadore (2015) as condições operacionais têm grande influência sobre as incrustações e entre os fatores: a velocidade tangencial do fluxo de ar, a intensidade de aeração e a configuração do sistema de aeração e as frequências da limpeza da membrana.

A incrustação severa ocorre numa membrana quando a incrusta-

ção é tão grande que resulta na redução do fluxo de permeado. Outra consequência seria o aumento da pressão transmembrana, TMP (do inglês, *Transmembrane Pressure*), isso ocorre dependendo do modo de operação do equipamento na planta de processo. Assim sendo, uma incrustação na membrana pode ocorrer se houver a deposição e/ou acumulação indesejáveis de microrganismos, coloides, solutos e detritos celulares dentro e/ou sobre as membranas. (MENG, F. et al, 2009)

De acordo com Iorhemen; Hamza; Tay (2016) as incrustações podem ser divididas em três tipos: bioincrustação, incrustação orgânica e incrustação inorgânica, mas também podem ocorrer de forma simultânea.

3.2 Bioincrustação

A bioincrustação é formada por bactérias e flocos biológicos (SUN et Al., 2011). Uma vez que essas bactérias encontram nas membranas as condições necessárias para adesão, desenvolvimento e multiplicação, há a formação de um biofilme e estabilização de matéria-orgânica.

Devido ao acesso limitado de substratos presentes nestes biofilmes, várias espécies de bactérias precisam competir pelo substrato e/ou nutriente disponível (YUAN e MENG 2020) ou cooperar entre si por alimentações cruzadas (SEONKI, 2016). Dessa forma, é formado um biofilme complexo.

A bioincrustação é um grande problema porque a maioria das bactérias e flocos microbianos em MBRs são muito maiores do que o tamanho do poro da membrana, provocando o entupimento dos poros da membrana ou diminuindo sua eficiência de fluxo. MENG et Al (2017)



Apesar das incrustações orgânicas serem as mais comuns e mais difíceis de serem removidas, o estudo detalhado sobre os mecanismos das interferências internas do sistema MBR, aliado ao comportamento da incrustação, tanto orgânica quanto inorgânica e bioincrustações, determinaria a melhor abordagem para a melhoria e eficiência do equipamento.

3.2.1. Incrustação Orgânica

Esta incrustação é formada por biopolímeros, polissacarídeos e proteínas. Elas são encontradas como rejeitos metabólicos das células, chamados de Substância Polimérica Extracelular, EPS (do inglês, Extracellular Polymeric Substances) (LUO et al., 2014).

Além dos EPS, ela também possui um produto de sólidos orgânicos aglomerados de biopolímeros chamados de BPC, (do inglês biopolymeric clusters) (SUN, WANG e LI; 2011). Estes biopolímeros são compostos por sais, argilas, metais e compostos inorgânicos (cátions e ânions) que se depositam na membrana (IORHEMEN, HAMZA e TAY, 2016). Para Iorhemen, Hamza e Tay (2016) o maior problema apresentando para a membrana neste caso é a cristalização de íons, visto que eles são precipitados com a mudança no pH do meio e oxidação dos íons gerada pela hidrólise. Dessa forma, quando a cristalização ocorre, faz-se necessário a limpeza química da membrana.

Já na formação de biopolímeros na membrana, eles resultam na junção de produtos microbianos solúveis (SMP) e agrupamento de EPS (MINES, 2012; SUN, WANG e LI, 2011), sendo estas as incrustações orgânicas mais comuns e mais difíceis de serem removidas.

3.2.2 Incrustação Inorgânica

Esta incrustação sobre a membrana se dá através de substâncias inorgânicas que se depositam na superfície da membrana ou nos poros. Essas substâncias podem ser sais, argilas e metais, entre outros (IORHEMEN, HAMZA, TAY, 2016 & DU, 2020). Exemplo de cátions e ânions que se precipitam são: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , CO_3^{2-} , OH^- . Esses íons são precipitados devido a hidrólise que leva a mudança de pH e oxidação (PENDASHTEH et al., 2011). Um dos maiores problemas nesse tipo de incrustação é a cristalização desses compostos em sulfatos, fosfatos entre outros, sendo necessária a limpeza química da membrana para a remoção destes compostos na maioria das vezes para prorrogar a vida útil da membrana no processo.

Segundo MENG et al (2017), os polissacarídeos possuem uma dimensão maior e uma maior capacidade de gelificação. Na presença de alguns cátions multivalentes, podem formar uma espécie de gel impermeável na membrana. Esse gel permite tanto a agregação física de bactérias por ligações cruzadas como promove um excelente substrato de alimentação. De acordo com MENG et al (2017), eles podem ser destruídos com a limpeza química com soluções alcalinas.

Apesar das incrustações orgânicas serem as mais comuns e mais difíceis de serem removidas, o estudo detalhado sobre os mecanismos das interferências internas do sistema MBR, aliado ao comportamento da incrustação, tanto orgânica quanto inorgânica e bioincrustações, determinaria a melhor abordagem para a melhoria e eficiência do equipamento.



4. Biorreatores de membrana

Pela definição feita por Lorhemen, Hamza e Tay (2016), os biorreatores de membrana são equipamentos para processos híbridos que combinam o tratamento biológico feito pelas estações de tratamento de esgoto (ETE's) tradicionais, como lodo ativado por exemplo, utilizando a filtração por membrana para realizar a separação sólido-líquido

Os MBRs são classificados segundo sua utilização no processo do tratamento de efluente. Santos et al. (2011) comenta que após utilização das membranas no sistema MBR, observa-se os mais diferentes tipos de morfologia de estruturas na sua composição em função dos parâmetros operacionais. O mesmo autor afirma que as membranas são geralmente classificadas em categorias, geralmente em: fibras densas e porosas. Em função do tipo de tratamento pode-se escolher o tipo de fibra que se irá utilizar.

Farias (2017) considerou a classificação das membranas em biológicas e sintéticas. O autor descreveu que as biológicas são produzidas e/ou podem ser encontradas na natureza, sendo orgânica ou inorgânica e são de extrema importância na manutenção da integridade física das células. As sintéticas, por sua vez, podem ser de materiais inorgânicos e podem apresentar uma maior duração, estabilidade térmica e melhor eficiência na limpeza do que as de materiais orgânicos. Ferreira et al. (2021) diz que dentre estas duas membranas, inorgânicas e orgânicas, as membranas mais utilizadas no tratamento de esgoto são as fabricadas com material poliméricos orgânicos, devido ao seu baixo custo, apesar das membranas de inorgânicas

apresentarem propriedades como resistência térmica e química.

4.1. Características das membranas

Quando se acopla membranas utiliza ao tratamento biológico para realizar o processo de separação física, tem-se o sistema MBR, que, de acordo com Urbain et al. (1998), melhoraram o tratamento de efluentes, por meio de tecnologias avançadas. Este sistema torna mais eficiente a qualidade da água tratada. Deste modo pode-se dizer, que o uso de membranas separa e aumenta a concentração dos microrganismos, resultando em um processo otimizado e compacto (GHIGGI, 2011).

De acordo com Reis et al. (2017) a unidade MBR mais eficiente a ser utilizado no sistema de tratamento de esgoto é definido pelas características das membranas, estas características são fundamentais para definir o sucesso da estação. Arruda (2018), fala que algumas características das membranas devem ser consideradas como: espessura, porosidade, seletividade e permeabilidade.

Geralmente, a espessura da superfície regula as propriedades de permeabilidade seletiva de uma membrana, indicando que as suas propriedades (hidrofílicas ou hidrofóbicas, potencial zeta, rugosidade, porosidade, tamanho e distribuição do poro etc.) são cruciais para o tempo de vida da membrana devido ao fato de que o processo de separação e a interação entre o soluto e as macromoléculas dos materiais de membrana ocorrem na superfície da mesma (KOCHKODAN e HILAL, 2015).

A porosidade, por sua vez, é a relação estabelecida entre a parte

sólida e os poros da membrana, podendo ser considerada a quantidade de vazios na estrutura desta. A porosidade, ainda, pode ser determinada relacionando o número de poros com a superfície da membrana, sendo, neste caso, expressa em poros/m² (BASSETTI, 2002.).

Por outro lado, a seletividade de uma membrana depende da distribuição do tamanho dos poros, enquanto a permeabilidade é representada pela quantificação de material que permeia por ela (Figura 1). O grau de seletividade depende da membrana e dos tamanhos dos poros (DELCOLLE, 2010). A membrana mais grosseira, associada à microfiltração (MF), pode rejeitar alguns sólidos finos. A membrana mais seletiva, associada à osmose reversa (OR), pode rejeitar íons carregados individualmente (TRINDADE, 2010), como sódio (Na) e cloreto (Cl). Ainda, outra importante característica da membrana é a resistência do fluxo permeado, segundo Farias (2017), isso se correlaciona a espessura da subcamada. Portanto, quanto maior for a espessura da camada da membrana, sua resistência ao fluxo aumenta e conseqüentemente haverá a diminuição da taxa de permeado.

Segundo Chang e Lee (2012), a tecnologia de MBR é caracterizada pela diminuição da permeabilidade da membrana durante o ciclo de filtração. Por isso, é exigido um desempenho físico, limpeza química, redução no fluxo operacional, e um aumento na área da membrana. Esses fatores, no entanto, aumentam o custo de operação, tornando o uso da tecnologia de MBRs desvantajoso. Daí a necessidade de estudos no sentido de minimizar as incrustações na membra.

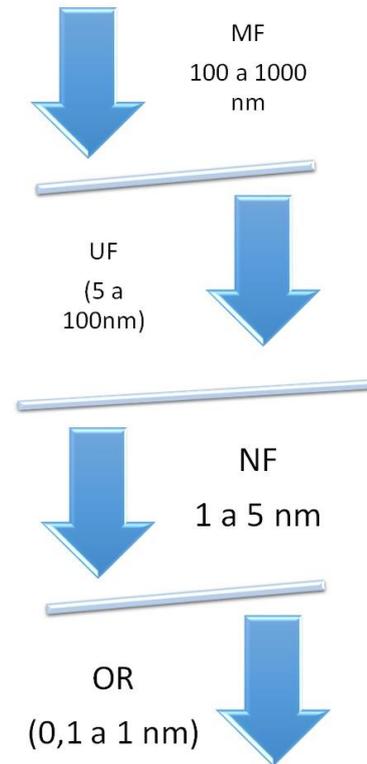


Figura 1. Distribuição dos tamanhos dos poros da Membrana

4.2. Classificação das Membranas

Os materiais da membrana podem variar dependendo da composição química e do processo ao qual se destina seu uso. No entanto, na fabricação das membranas, elas devem obter algumas propriedades para que seja melhores utilizadas visando alcançar um material ideal que tenha alta resistência mecânica, mantém alto fluxo e seja seletivo para o componente de permeado desejado. O tamanho do poro da membrana bem como o material que será retido determinam a escolha da membrana. Temos quatro tipos de membranas de filtração utilizadas como pode ser observada na Tabela 1 (CADORE e STEFANELLO, 2020).



A classificação das membranas pode ser vista de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1– Classificação pelo Tamanho do Poro

Membrana	Porosidade	Material Retido
Microfiltração (MF)	0,1 – 0,2 μm	Protozoários, bactérias, vírus (maioria), partículas
Ultrafiltração (UF)	1000 - 100.000 D	Material removido na MF, coloides e a totalidade dos vírus
Nanofiltração (NF)	200 - 1000 D (1)	Íons divalentes e trivalentes, moléculas orgânicas com tamanho maior que a porosidade média da membrana
Osmose Reversa (OR)	< 200 D	Íons e praticamente toda a matéria orgânica

Fonte: Adaptada de JUDD (2010) 1D = 74.6 pm = Correspondente ao peso molecular de Hidrogênio.

Desse modo, ressalta-se que as membranas filtrantes podem ser classificadas em função da sua seletividade, sendo que o grau de seletividade depende do tamanho do seu poro. A membrana mais grosseira, associada à microfiltração, pode rejeitar materiais particulados; enquanto a membrana mais seletiva, associada à osmose reversa, pode reter íons monovalentes, como o sódio (Na^+) e o cloreto (Cl^-) (JUDD, 2010).

4.3. Tipos de Membrana

Normalmente, utiliza-se dois tipos principais de materiais para a produção de membranas poliméricas e cerâmicas (SHEIKH et al., 2019.). As membranas metálicas possuem aplicações bastante específicas e não são utilizadas para tratamento de efluentes sanitários (JUDD, 2010).

4.3.1. Membrana Polimérica

Existem diferentes tipos de materiais poliméricos utilizados para a fabricação de membranas, que são formados por uma camada externa

fina, fornecendo a permeabilidade necessária para o permeado (TRINIDADE, 2010)

Esta camada externa fina é construída sobre uma camada mais aberta e espessa, isto proporciona resistência e estabilidade mecânica para a camada superficial da membrana (JUDD, 2010).

Durante o processo de polimerização a membrana forma uma fina película fina película filtrante, que fica situada sobre uma estrutura mais grossa, isto gera um gradiente de porosidade interno nas membranas (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001). Este tipo de membrana é conhecido como membrana assimétrica ou anisotrópicas de segunda geração (BASSETTI, 2002). Como a espessura da película filtrante diminui com a resistência à filtração, essas membranas são conhecidas por atingirem as características físicas necessárias para sua aplicação, além de terem razoável resistência química. O emprego mais comum das membranas poliméricas é associado ao tratamento de efluentes sanitários (TRINIDADE, 2010).

4.3.2. Membrana Cerâmica

As membranas cerâmicas têm muitas vantagens conhecidas, tais como: elevada estabilidade térmica e química; resistência à pressão; vida longa; e, propriedades catalíticas da sua natureza intrínseca (SILVA et al. 2016). A sua aplicação deve ser preferencialmente em situações em que as membranas poliméricas não funcionariam de forma adequada (KIMURA e UCHIDA, 2019).

Entretanto, o alto custo de fabricação restringe o uso deste tipo de membrana a nichos de mercado que envolvem tratamento de soluções agressivas, como soluções oxidantes ou pH muito baixo/muito alto, de altas temperaturas ou de alto valor agregado (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001). Oun et al. (2017) descrevem que as membranas cerâmicas (inorgânicas) são utilizadas em processos de microfiltração e ultrafiltração, os quais devem ser resistentes a solventes e a altas temperaturas, evitando, assim, danos às membranas.

4.4. Processo de Separação Por Membrana

Uma membrana pode ser definida como um filme fino, sólido, que separa duas soluções e que atua como barreira seletiva para o transporte de componentes dessas soluções, quando aplicado algum tipo de força externa, que pode ser pressão, sucção ou potencial elétrico (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

O princípio do Processo de Separação por Membranas, consiste em forçar a passagem da solução e/ou mistura através de uma membrana semipermeável. A corrente que atravessa a membrana é chamada de permeado, enquanto o

que fica retido é o concentrado (SILVA et al., 2016).

Os processos de separação por membrana, geralmente, estão limitados à aplicação de força motriz por diferença de pressão hidrostática ou troca iônica. As tecnologias de membranas aplicadas ao tratamento de efluentes sanitários são desenvolvidas, predominantemente, por diferença de pressão (JUDD, 2010). A pressão necessária para a filtração de efluentes pode ser obtida através de bombas, bomba peristáltica ou bomba à vácuo por exemplo (DAI et al., 2015).

Segundo Judd, (2010), nos sistemas de separação por membranas, basicamente duas configurações de escoamento são utilizadas: frontal (*dead-end*, em inglês) e filtração tangencial (*cross-flow*, em inglês). Quando não há a formação de uma corrente de concentrado, a filtração é chamada de *dead-end*; caso o concentrado flua continuamente sobre o módulo, a operação é chamada de *cross-flow*. Já Baldasso, Barros e Tessaro (2011) explicam que, na filtração *dead-end*, a solução de alimentação escoia perpendicularmente à superfície da membrana, promovendo a formação de uma torta, devido ao acúmulo das partículas retidas. No modo tangencial, a alimentação escoia tangencialmente à superfície da membrana, gerando o acúmulo de parte das partículas retidas.

Nesse sentido, Maestri (2007) comenta que, na filtração frontal, em que o fluxo do fluido é forçado através de toda a parede da membrana sob alta pressão, existe uma concentração elevada de partículas na região próxima à membrana, que tende a aumentar em função do

tempo. Devido esta barreira formada, poderá haver uma queda no fluxo do permeado pelo aumento da resistência à filtração.

4.5. Módulos de Membranas

Segundo Judd (2010), existem seis tipos principais de configuração dos módulos de membranas: placas planas; fibra oca; tubular; capilar; filtros de cartucho e membranas espirais. Segundo (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001), os principais tipos de módulos existentes são: os módulos com placas que são constituídos de camadas alternadas de membranas planas, separadas por placas de suporte poroso e possuem densidade volumétrica relativamente baixa. Os módulos tubulares que são constituídos de tubos de material polimérico ou cerâmico, inseridos em cilindros de suporte. Os módulos espirais que consistem em um pacote de membranas e espaçadores enrolados em volta

de um tubo coletor de permeado central; são muito utilizados em aplicações que demandam altas pressões, os módulos com fibras ocas que são cartuchos que contêm centenas de fibras, sendo uma das configurações com maior área superficial por unidade de volume e os módulos com discos rotatórios. Nos módulos com discos rotatórios, as membranas são fixadas em placas redondas, montadas sobre um eixo giratório, cujo movimento minimiza os efeitos da colmatação, gerando, porém, um alto consumo de energia ao sistema.

Destas, apenas somente as três configurações de módulos com placas planas, fibra oca e tubular são aplicadas a biorreatores de membranas, em virtude de serem as que condicionam melhor turbulência da solução a ser filtrada, como são ilustradas na Figura 2.



Figura 2 - Módulos de filtros de membranas (a) Chapa de armação/ placa plana (FS), (b) Fibra oca (HF) e (c) Multi tubular (MT) (JUDD, 2010)

Alvarino et al. (2016) e Liu (2017) relatam que a membrana se configura pela sua geometria, ou seja, a maneira como é montada e orientada em relação ao fluxo de água. Esse aspecto é importante para determinar o desempenho do equipamento. De maneira ideal, a

membrana deve ser configurada para ter:

- Uma elevada relação área da membrana para módulo de volume aparente;
- Muita turbulência para promover a transferência de massa no lado da alimentação;



- Baixo gasto energético por unidade de volume de água do produto;
- Um baixo custo por unidade de área de membrana;
- Um projeto que facilite a limpeza;
- Um projeto que permita modularização.

Segundo Schneider e Tsutiya (2001), os módulos de membranas são projetados com o objetivo de limitar o acúmulo de material retido pela membrana através da otimização da circulação do fluido a ser tratado, além de maximizar a superfície da membrana e evitar a contaminação do permeado.

Sobre o assunto, Judd (2010) observa que as membranas devem ser configuradas para obter uma alta área de filtração por unidade modular e muita turbulência para promoção da transferência de massa no lado da alimentação, sendo assim um equipamento modular que facilite a limpeza.

A configuração da membrana refere-se à geometria da membrana e sua posição no espaço instalado em relação ao fluxo do fluido de alimentação e do permeado. Como a maioria das instalações industriais de membrana tem design modular, a configuração da membrana também determina a maneira como a membrana é embalada dentro dos módulos. Houve muito desenvolvimento na década de 1990, quando os equipamentos comerciais foram testados. As configurações de MBR usadas nas indústrias se enquadram em duas categorias gerais: MBR submerso e MBR de fluxo lateral. As membranas, atualmente utilizadas para o tratamento de efluentes, possuem duas geometrias básicas, po-

dem ser planas ou cilíndricas. A diferença básica entre as duas configurações é a utilização no módulo de membrana e sua posição ser horizontal, vertical ou uma superfície cilíndrica em 3D dependendo da configuração do equipamento. (JUDD, 2010).

Segundo Schneider e Tsutiya (2001) os existentes são:

- Módulos com placas - são constituídos de camadas alternadas de membranas planas, separadas por placas de suporte poroso e possuem densidade volumétrica relativamente baixa.
- Módulos tubulares - são constituídos de tubos de material polimérico ou cerâmico, inseridos em cilindros de suporte
- Módulos espirais - consistem em um pacote de membranas e espaçadores enrolados em volta de um tubo coletor de permeado central; são muito utilizados em aplicações que demandam altas pressões.
- Módulos com fibras ocas - são cartuchos que contêm centenas de fibras, sendo uma das configurações com maior área superficial por unidade de volume
- Módulos com discos rotatórios - nos módulos com discos rotatórios, as membranas são fixadas em placas redondas, montadas sobre um eixo giratório, cujo movimento minimiza os efeitos da colmatação, gerando, porém, um alto consumo de energia ao sistema.

5. Parâmetros operacionais do sistema de MBR

5.1. Pressão transmembrana

A pressão transmembrana está relacionada de forma direta com o fluxo permeado. Este fluxo pode ser

afetado por incrustação severa da membrana, que aumenta os fluxos do permeado ao ponto de eles ultrapassarem o fluxo crítico (FARIAS, 2017).

Outra razão para esta mudança no fluxo do permeado é quando alterações repentinas na estrutura do biofilme ou da camada do biofilme. Devido à limitação da transferência de oxigênio, as bactérias nos biofilmes internos tendem a morrer e liberar mais substâncias poliméricas extracelulares. Outro fator importante é que este aumento na pressão transmembrana também pode estar relacionada com as condições de operação do equipamento. (MENG, F. et al, 2009).

5.2. Fluxo Crítico

Outro conceito importante é o fluxo crítico. O fluxo crítico é definido como sendo o maior fluxo permeado em que não se observa uma alteração do fluxo com o tempo (ESPINASSE, BACCHIN e AIMAR, 2002). Um fluxo é o volume de material que passa através de unidade de superfície da membrana por unidade de tempo, conforme a Equação 1.

Muitas vezes, ele é chamado de velocidade de permeabilidade da membrana. O fluxo está diretamente relacionado com a força motriz, que é a resistência total oferecida pela membrana a região interfacial adjacente a ela (JUDD, 2010).

$$J = Q A \quad (1)$$

Em que:

J é o fluxo através da membrana, em $m^3/m^2.s$ ou $L/m^2.h$;

A é a área de contato da membrana, em m^2 ;

Q é a vazão de permeado através da membrana, em L/h.

Stefanello Cadore (2020) afirma que o fluxo crítico não depende apenas das características da membrana, mais também da concentração de partículas na solução e das condições hidrodinâmicas tem influência no fluxo de ar. Exemplo de fluxo crítico e pressão transmembrana (PTM) para diferentes tempos são apresentados na Figura 3.

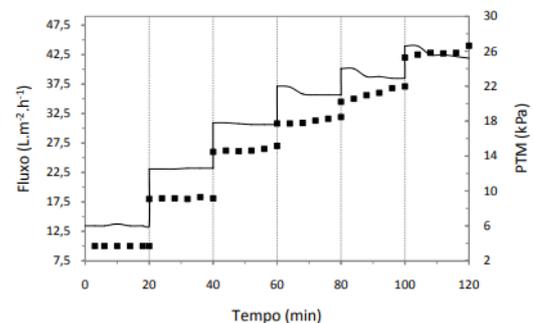


Figura 3 - Comportamento do fluxo crítico e a pressão e pressão transmembrana (PTM) para diferentes tempos. (Fonte: Han et al, 2005).

Quando a membrana entra em operação, é importante que o equipamento opere abaixo do fluxo crítico, então a incrustação da membrana pode então ser desprezada e, assim, a limpeza da membrana não é necessária. Então, é importante escolher um fluxo permanente inicial adequado ou TMP_{ideal} para que o equipamento opere constante com relação ao tempo para que não haja estresse desnecessário na membrana de trabalho.

Cadore (2020).

4.4. Velocidade Tangencial e Intensidade de Aeração

A turbulência ocasionada pelo processo de aeração produz uma velocidade tangencial na membrana, procedendo em uma retirada da torta que se deposita. Assim,

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

De acordo com (METCALF, 2016) o processo físico de separação das incrustações e membrana dá-se por meio do método de retrolavagem, também chamado de aeração. Este método consiste em combinar água e ar que passam por leitos filtrantes com monocamada não estratificada. A duração da lavagem varia de acordo com a necessidade de limpeza, quão suja está a membrana e do projeto do leito filtrante.

Segundo Judd (2010), o processo de aeração é necessário para reduzir a adsorção coloidal na membrana. Para que isto ocorra, durante o processo é desejável que o leito filtrante seja agitado a ponto de criar um padrão circular de agitação, para então arrastar os coloides para o fundo do filtro. Ao fim desta etapa, é realizada um novo ciclo de retrolavagem, porém somente com água, com baixa taxa de aplicação, para remover bolhas de ar presas ao leito. A Figura 4 exemplifica o processo de maneira esquematizada.

As condições de fluxo de aeração devem estar descritas nas operações de controle, pois são determinadas pela taxa de fluxo de ar, modo de operação e propriedades do sistema. Para ser traçada uma estratégia de aeração, deve ser realizada uma estratégia preliminar, levando em consideração a temperatura do

efluente, a condutividade e a concentração de sólidos suspensos. (MENG et al., 2017).

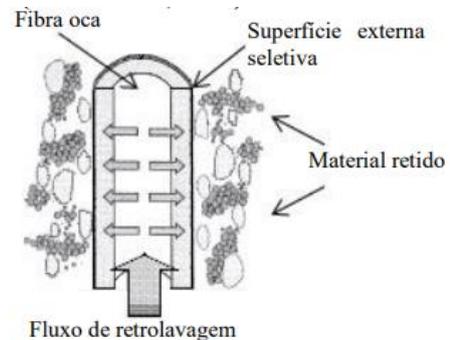


Figura 4- Representação do processo de Retrolavagem (Fonte: BELLI, 2015).

Farias (2017) discorre que um dos parâmetros de extrema importância para o biorreator é a velocidade tangencial, especialmente para os MBRs, onde ela é gerada pelo fluxo ascendente das bolhas de ar do sistema de aeração. Neste processo a convecção e a contra difusão das espécies determinam a intensidade de formação de incrustação. Pois, o aumento da velocidade provoca aumento o cisalhamento na superfície da membrana ajuda e até melhora o transporte da membrana para uma possível solução (OLIVEIRA, 2007).

A aeração é eficaz para a bioincrustação, pois a partir do formato de bolhas há uma mitigação, este formato é influenciado pela velocidade e profundidade do líquido aplicado (DINIZ, 2011)

As bolhas geradas pela aeração são percorridas por Kipper (2009) como uma maneira para manter a biomassa em suspensão e manter o oxigênio para a degradação do substrato, onde tem função limitante para a formação de depósitos na superfície das membranas. Morais (2018) fala que, MBRs com módulos



de membranas submersas tem por finalidade configurar as bolhas que entram em contato com a superfície da membrana, ocasionando tensões de cisalhamento, as quais vem a remover parcialmente ou mesmo totalmente as incrustações.

As forças atuantes nas bolhas de ar são a gravidade, força de cisalhamento, forças viscosas e força de elevação. A velocidade da bolha de ar determina quanto tempo durará a operação, então, as características das bolhas são parâmetros importantes (TRINDADE, 2010). O movimento de ar na fase líquida é classificado como regime de Stokes.

A dinâmica das bolhas em relação à aeração segue o seguinte padrão das equações de Navier Stokes, são equações diferenciais que descrevem o escoamento de fluidos (JUDD, 2010):

$$\tau = \frac{\tau_z A_b N_b}{A_{zi} + 1 - A_{zi}} \quad (2)$$

Em que: τ é a tensão de cisalhamento, A_b é a área de contato da bolha de ar com a torta, N_b é o número total de bolhas na posição z e A_{zi} é a área limpa na posição z .

O tamanho das bolhas formadas na aeração é variável de acordo com o tipo de limpeza a ser feita e a quantidade de difusão de oxigênio desejada. Segundo Nazari e Shams (2016) as diferentes formas de bolha podem ser divididas, de acordo com a transferência de oxigênio em: tipo de difusor, velocidade e custo dos difusores

- Bolhas Grossas: Distribuem oxigênio de forma mais homogênea, porém, há um gasto maior de difusores. Previnem maiores incrustações e são eficientes no controle de incrustação irreversível.

- Bolhas Pequenas: Mesmo comportamento, mas um efeito de cisalhamento mais homogêneo.

- Em jato: Pouca transferência de oxigênio.

Para Cadore (2015) as bolhas devem ter o menor tamanho possível quando se leva em consideração o efeito de transferência de oxigênio, porém, bolhas com menores tamanhos também sofrem pequeno empuxo o que vem a gerar menor velocidade tangencial, menor turbulência e menor remoção das partículas. Bolhas grandes tem sua importância, pois mantem a biomassa suspensa o que não ocorre com bolhas pequenas que dependendo do tamanho podem gerar a flotação da massa (KIPPER, 2009).

Araújo, Dall'aglio Sobrinho e Gebara, (2010) comentam que a transferência de oxigênio ocorre de modo complexo com relação a intensidade de aeração, pois o aumento na vazão de ar produz um aumento no diâmetro das bolhas devido á coalescência, isso reduz significativamente a área superficial da bolha. Por outro lado, a turbulência crescente diminui a espessura da camada limite gerando um aumento do coeficiente de transferência e da taxa de transferência de oxigênio. O oxigênio transferido é necessário para garantir altas taxas de transferência de massa, ou seja, sua eficiência depende do difusor utilizado e do projeto de aeração, bem como a mistura (efluente) no equipamento.

Um método empregado para a otimização do uso da membrana é a configuração do módulo da membrana, que de acordo com Miyoshi (2015) é realizado ao posicionar a membrana verticalmente de forma que as bolhas incidam axialmente no

fluxo de bolhas. De acordo com Judd (2010), esta relação é expressa matematicamente pela seguinte fórmula:

$$\frac{\gamma = kU_L}{\delta} \quad (3)$$

Em que: U_L corresponde ao líquido da velocidade tangencial CFV (do inglês, *crossflow velocity*) em (m/s), δ é a separação (m), k é uma constante dependente da geometria da membrana.

6. Operações para Manutenção das Membranas

Neste item são apresentados os itens necessários para uma boa manutenção de modo a manter o bom funcionamento das membranas. As técnicas de limpeza são as únicas que têm a função de recuperar o fluxo permeado perdido devido à presença de incrustações na membrana (KIPPER, 2009). Tais procedimentos irão impactar na qualidade do tratamento. Os procedimentos sugeridos são apresentados a seguir.

6.1. Limpeza física e química

Para Saleh e Gupta (2016), tanto o fluxo quanto a força motriz (diferença de pressão através do meio) estão diretamente relacionados ao processo de operação, sendo assim, a escolha destes parâmetros depende do objetivo do projeto. Com relação à água que será injetada no equipamento, ela depende da pressão de trabalho, então fixa-se um valor para o fluxo determinando o valor apropriado para o TMP.

Lovatel (2014) fala que nas MBRs a reversão do fluxo é geralmente alcançada na limpeza física, ou através do relaxamento da membrana quando cessa a permeação, mas também pode ocorrer quando

se examina a membrana para a retirada das bolhas de ar. Estas duas técnicas são combinadas e podem aprimorar a retrolavagem, junto com a passagem do ar.

A limpeza física remove os sólidos brutos presos à membrana, geralmente denominados de incrustação "reversível" ou "temporária". Por outro lado, a limpeza química remove material pegajoso, chamado de incrustação "irreversível" ou "permanente". Para Saleh e Gupta (2016), a limpeza física se destaca em relação à limpeza química, por gerar menos custos na sua realização e ter um processo mais rápido. Além de não exigir produtos químicos e ser menos agressivo à membrana.

A limpeza física remove os sólidos brutos presos à membrana, geralmente denominados de incrustação "reversível" ou "temporária". Por outro lado, a limpeza química remove material pegajoso, chamado de incrustação "irreversível" ou "permanente".

De acordo com (METCALF, 2016) ao atingir um valor abaixo do determinado em parâmetros pré-estabelecidos para avaliar o funcionamento das membranas, estas devem passar por um processo de limpeza química e/ou física, a este processo se dá o nome de retro lavagem.

De acordo com Farias (2017) os processos de retrolavagem podem ser divididos de três maneiras:

- Tangencial: o ar é bombardeado na direção contrária à filtração, sendo o ar bombardeado pelo canal do concentrado;
- Frontal: o ar é bombardeado na direção contrária à filtração através da membrana;
- Com ar comprimido: o ar é bombardeado com alta pressão através do canal do permeado.

Judd (2010) afirma que o processo de retrolavagem é necessário para reduzir a adsorção coloidal na membrana, para que isto ocorra, durante o processo é desejável que o leito filtrante seja agitado a ponto de criar um padrão circular de agitação para então arrastar os coloides para o fundo do filtro. Ao fim desta etapa é realizada um novo ciclo de retro lavagem, porém somente com água,

com baixa taxa de aplicação, para remover bolhas de ar presas ao leito. Para este mesmo autor a retro lavagem é o meio de limpeza da MBR mais econômico e mais rápido que a limpeza química, pois não dura mais de dois minutos e não demanda produtos químicos, portanto não produz resíduos químicos e tendem a degradar menos a membrana filtrante (Figura 5).

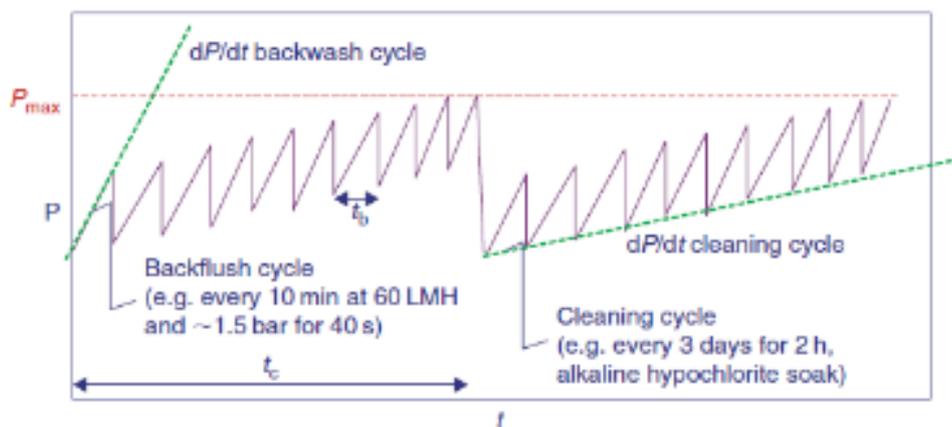


Figura 5 – Gráfico da pressão transitória para operação de fluxo contínuo de um filtro *dead-end* (JUDD, 2010).

A Figura 5 mostra como o fluxo determina a taxa de declínio da permeabilidade, ou aumento de pressão, representados por dP/dt (variação de pressão com o tempo), que conseqüentemente determina o período de limpeza física, ou seja, o tempo do ciclo da retrolavagem.

Se a retrolavagem for executada, este período é denominado t_b (tempos entre as retrolavagens), considerando que não há alterações em outras condições da operação, aumenta o fluxo e diminui o t_b . Apesar de um bom programa de retrolavagem, na prática, ela não leva o sistema às condições originais da membrana. Há um número finito de ciclos de retrolavagem que podem ser executados antes que o limiar da pressão (P_{max}) seja atingido, além deste ponto a operação não será efetiva.

Neste caso, então é recomendada uma limpeza química das membranas para retomar a pressão mais próxima do valor de base. Isto porque, a retro lavagem é menos efetiva que a limpeza química, pois ela apenas remove os sólidos mais grosseiros que estão aderidos à superfície da membrana (BEZERRA, 2011).

7. Considerações finais

Considerando os elementos abordados até aqui, pode-se afirmar que a possibilidade da reversibilidade da incrustação da membrana com limpezas físicas e químicas tem despertado cada vez mais a atenção dos pesquisadores, pois estas incrustações tendem a diminuir a vida útil da membrana em operação de longo prazo.



Com relação a composição de incrustação, a incrustação em MBRs pode ser classificada em três categorias principais: incrustação biológica, incrustação orgânica e incrustação inorgânica. Atualmente, a incrustação da membrana na área de tratamento de efluentes ainda é um desafio para a operacionalidade do sistema. Com o estudo deste artigo e a experiência do estudo da MBR na planta do sistema, um estudo posterior sobre as incrustações de membrana deve incluir: a identificação e a quantidade das incrustações da planta do sistema, o estudo da utilização de materiais alternativos para remover as incrustações identificadas e estudar um novo material para a construção de uma membrana biodegradável que irá minimizar o impacto ambiental do efluente da Estação de Tratamento.

7. Agradecimentos

Estudo realizado com recursos previstos na Lei N°. 8.387 e de acordo com o Art. 39 do Decreto N°. 10.521/2021, em parceria UFAM/Samsung.

Divulgação

Este artigo é inédito e não está sendo considerado para qualquer outra publicação. O(s) autor(es) e revisores não relataram qualquer conflito de interesse durante a sua avaliação. Logo, a revista *Scientia Amazonia* detém os direitos autorais, tem a aprovação e a permissão dos autores para divulgação, deste artigo, por meio eletrônico.

Referências Bibliográficas

ARRUDA, Y. A. (2018). MEMBRANAS NA CAPTURA E SEPARAÇÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO. Uberlândia: TCC (Curso de Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia.

ALVARINO, T. et al. A UASB reactor coupled to a hybrid aerobic MBR as innovative plant configuration to enhance the removal of organic micropollutants. **Chemosphere**, v. 144, p. 452-458, 2016.

ARAÚJO, Leandro Santos de; DALL'AGLIO SOBRINHO, Milton; GEBARA, Dib. Transferência de oxigênio em reatores de leito fluidizado com circulação em tubos concêntricos em meios bifásico e trifásico com variação da relação entre diâmetros. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 15, n. 3, p. 267-274, 2010.

BALDASSO, C.; BARROS, T. C.; TESSARO, I. C. Concentration and purification of whey proteins by ultrafiltration. **Desalination**, v. 278, n. 1-3, p. 381-386, 2011.

BASSETTI, Fatima de Jesus et al. Preparação, caracterização e aplicação de membranas poliméricas microporosas assimétricas. 2002.

BELLI, T. J. (2015). Biorreator à membrana em batelada sequencial para a remoção de nutrientes de esgoto sanitário: desempenho do tratamento, colmatação das membranas e estratégias de otimização. Florianópolis: Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina.

BEZERRA, Luiz Fernando; MATSUMOTO, Tsunao. Avaliação da remoção de matéria orgânica carbonácea e nitrogenada de águas residuárias em biorreator de membranas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 16, n. 3, p. 253-260, 2011.

BLANDIN, Gaetan et al. Retrofitting membrane bioreactor (MBR) into osmotic membrane bioreactor (OMBR): A pilot scale study. **Chemical Engineering Journal**, v. 339, p. 268-277, 2018.

CADORE, Ígor Renz. Efeito das condições hidrodinâmicas no desempenho de um Biorreator com Membranas Submersas em pressão constante. 2015.

CHANG, I. S., and LEE, C. H. "Membrane bioreactor: TMP rise and characterization of bio-cake structure using CLSM-image analysis, **J. Membr. Sci.** 419 (2012) 33-41.

DAI, Wenchen et al. Toward energy-neutral wastewater treatment: a membrane combined process of anaerobic digestion and nitrification-anammox for biogas recovery and



- nitrogen removal. **Chemical Engineering Journal**, v. 279, p. 725-734, 2015.
- DELCOLLE, Roberta. Projeto e manufatura de membranas cerâmicas via prensagem isostática para separação de emulsões óleo vegetal/água por microfiltração tangencial. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- DINIZ, Larissa Marques. Biorreatores de membrana (BRM): um levantamento bibliográfico enfocando a aeração do sistema. 2011.
- DU, Xianjun et al. A review on the mechanism, impacts and control methods of membrane fouling in MBR system. **Membranes**, v. 10, n. 2, p. 24, 2020.
- ESPINASSE, Benjamin; BACCHIN, Patrice; AIMAR, Pierre. On an experimental method to measure critical flux in ultrafiltration. **Desalination**, v. 146, n. 1-3, p. 91-96, 2002.
- FARIAS, A. P. (2017). Biorreator de membranas de ultrafiltração aplicado ao tratamento de efluente industrial: avaliação da eficiência de tratamento e potencial de reuso da água. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba.
- FERREIRA, Eduardo da Silva Barbosa et al. Membranas de fibra oca de diversos materiais e suas aplicações. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 1, p. e55910111206-e55910111206, 2021.
- Han, S. S., Bae, T. H., Jang, G. G., & Tak, T. M. Influence of sludge retention time on membrane fouling and bioactivities in membrane bioreactor system. **Process Biochemistry**, 40, 2393 e 2400. 2005.
- GHERNAOUT, Djamel et al. New Configurations and Techniques for Controlling Membrane Bioreactor (MBR) Fouling. **Open Access Library Journal**, v. 7, n. 07, p. 1, 2020.
- GHIGGI, Fernanda Formoso. Tratamento de águas para consumo doméstico com membranas de ultrafiltração. 2011.
- IORHEMEN, Oliver Terna; HAMZA, Rania Ahmed; TAY, Joo Hwa. Membrane bioreactor (MBR) technology for wastewater treatment and reclamation: membrane fouling. **Membranes**, v. 6, n. 2, p. 33, 2016.
- JUDD, Simon. **The MBR book: principles and applications of membrane bioreactors for water and wastewater treatment**. Elsevier, 2010.
- KAMPOURIS, Ioannis D. et al. Evaluation of a novel quorum quenching strain for MBR biofouling mitigation. **Water research**, v. 143, p. 56-65, 2018.
- KIM et. al., **Fouling models for low-pressure membrane systems**, Separation and Purification Technology, Volume 68, Issue 3, Pages 293-304, 2009.
- KIMURA, Katsuki; UCHIDA, Hiroki. Intensive membrane cleaning for MBRs equipped with flat-sheet ceramic membranes: Controlling negative effects of chemical reagents used for membrane cleaning. **Water research**, v. 150, p. 21-28, 2019.
- KIPPER, M.S. Biorreatores com membranas: uma alternativa para o tratamento de efluentes. 2009. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/18994>.
- LE-CLECH, P.; CHEN, V.; FANE, T.A.G. **Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment**. J. Membr. Sci. 2006, 284, 17-53, 2006.
- LIU, X. **Numerical simulation of bubble induced shear in membrane bioreactors: effects of mixed liquor rheology and membrane configuration**. Water research, v. 75, p. 131-145, 2015.
- LUO, Jinxue et al. The correlation between biofilm biopolymer composition and membrane fouling in submerged membrane bioreactors. **Biofouling**, v. 30, n. 9, p. 1093-1110, 2014.
- LOVATEL, A. A. Geração de EPS no tratamento de água residuária de refinaria de petróleo em MBR e sua influência em micro e ultrafiltração. 2014.
- MAESTRI, Rodrigo Silva et al. Biorreator à membrana como alternativa para o tratamento de esgotos sanitários e reuso da água. 2007.
- METCALF, L. E. Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos (5. ed. ed.). (I. Tradução do Espanhol, & J. C. MIERZWA, Trans.) Porto Alegre: AMGH. 2016.



MENG, F. et al, Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): Membrane fouling and membrane material, **Water Research** 43, 1489–1512, 2009.

MENG, F. et al. Fouling in membrane bioreactors: An updated review. **Water Research**, v. 114, p. 151–180, 2017.

MINES, Paul. **Soluble Microbial Product Characterization of Biofilm Formation in Bench-Scale**. 2012. Tese de Doutorado.

MIYOSHI, T. Y. Effect of intensive aeration and membrane flux on membrane fouling in submerged membrane biorreactor: reducing specific air demand per permeate (SADp). *Separation and Purification Technology*, 1-9. 2015.

MORAIS, Carlos Eduardo Pereira de et al. Biorreator de membranas aplicado ao tratamento de efluentes de uma indústria de processamento de frutas. 2018.

OLIVEIRA, DR de. Pré-tratamento do processo de osmose inversa utilizando microfiltração e investigação de técnicas de limpeza e recuperação de membranas. **COPPE/UFRJ, M. Sc., Engenharia Química. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE**. p, v. 127, 2007.

OUN, Abdallah et al. Tubular ultrafiltration ceramic membrane based on titania nanoparticles immobilized on macroporous clay-alumina support: elaboration, characterization and application to dye removal. **Separation and Purification Technology**, v. 188, p. 126-133, 2017.

NAZARI, N.; SHAMS, P. CFD., Modeling of fouling by biological materials in tubular membrane in submerged membrane bioreactor with ansys fluent software. **Applied Research Journal**, v. 2, n. December, p. 459–466, 2016.

PENDASHTEH, Ali Reza et al. Membrane foulants characterization in a membrane bioreactor (MBR) treating hypersaline oily wastewater. **Chemical Engineering Journal**, v. 168, n. 1, p. 140-150, 2011.

REIS, et al. Impact of sludge retention time on MBR fouling: role of extracellular polymeric substances determined through membrane autopsy. *Biofouling* 33 (7), pg.556-566, 2017

SALEH, T. A; GUPTA, V. K. **Nanomaterial and polymer membranes: synthesis, characterization, and applications**. Elsevier, 2016.

SANTOS et al, Membrane bioreactors: Two decades of research and implementation. **Desalination**, v. 273, p. 148–154, 2011.

SCHNEIDER, R.P., TSUTIYA, M.T., Membranas filtrantes para o tratamento de água, e Esgoto e a Água de reúso, ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – Capítulo Nacional da AIDIS, São Paulo, 234 p. 2001.

SHEIKH, Mahdi et al. Application of ZnO nanostructures in ceramic and polymeric membranes for water and wastewater technologies: a review. **Chemical Engineering Journal**, p. 123475, 2019.

SILVA, Akleino Silvestre da et al. Modelagem e simulação da dessalinização de águas salobras usando um separador ciclônico térmico munido de bicos aspersores. 2016.

STEFANELLO CADORE, Jéssica et al. Bibliometric approach to the perspectives and challenges of membrane separation processes to remove emerging contaminants from water. **Water Science and Technology**, v. 82, n. 9, p. 1721-1741, 2020.

SUN, Fei-yun; WANG, Xiao-mao; LI, Xiaoyan. Effect of biopolymer clusters on the fouling property of sludge from a membrane bioreactor (MBR) and its control by ozonation. **Process Biochemistry**, v. 46, n. 1, p. 162-167, 2011.

SUN, Cheng et al. Characterization of membrane biofouling at different operating conditions (flux) in drinking water treatment using confocal laser scanning microscopy (CLSM) and image analysis. **Journal of membrane science**, v. 382, n. 1-2, p. 194-201, 2011.

TENG, Jiaheng et al. Effects of molecular weight distribution of soluble microbial products (SMPs) on membrane fouling in a membrane bioreactor (MBR): Novel mechanistic insights. **Chemosphere**, v. 248, p. 126013, 2020.

TRINDADE, Rafael Scheer. Caracterização de membranas poliméricas aplicadas ao processo de microfiltração. 2010.



URBAIN et al, Effectiveness of the membrane bioreactor in the biodegradation of high molecular weight compounds, **Water Research** 32 (1998) 1553–1563

YUAN, Shasha; MENG, Fangang. Ecological insights into the underlying evolutionary patterns of biofilm formation from biological wastewater treatment systems: Red or Black Queen Hypothesis?. **Biotechnology and bioengineering**, v. 117, n. 5, p. 1270-1280, 2020.