

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia



**Construção e Operação de Biorreator com
Membrana (MBR) em Escala de Bancada para Fins
Didáticos**

Arthur Travalloni Louvise

Projeto de Final de Curso

Orientadora

Juacyara Carbonelli Campos, D. Sc.

Maio de 2014

CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO DE BIORREATOR COM MEMBRANA (MBR) EM ESCALA DE BANCADA PARA FINS DIDÁTICOS

Arthur Travalloni Louvise

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários para conclusão do curso de Engenharia Química.

Aprovado por:

Ana Maria Rocco

Isabelli do Nascimento Dias

Letícia Sobral Maia

Orientado por:

Juacyara Carbonelli Campos, D. Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Maio de 2014

Louvisse, Arthur Travalloni.

Construção e Operação de Biorreator com Membrana (MBR) em Escala de Bancada para Fins Didáticos.

Arthur Travalloni Louvisse.

Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2014.

(Projeto Final de Curso) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2014.

Orientadora: Juacyara Carbonelli Campos, D. Sc.

1. Biorreator. 2. Membrana. 3. Incrustação. 4. Projeto Final de Curso (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Juacyara Carbonelli Campos, D. Sc.

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para conclusão do curso de Engenharia Química.

CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO DE BIORREATOR COM MEMBRANA (MBR) EM ESCALA DE BANCADA PARA FINS DIDÁTICOS

Arthur Travalloni Louvise

Maio, 2014

Orientadora: Prof. Juacyara Carbonelli Campos, D. Sc.

A tecnologia de biorreatores com membrana (MBRs) tem se mostrado muito promissora nos processos de tratamento de efluentes e vem sendo amplamente estudada em países desenvolvidos. Este sistema surgiu da união do processo de lodo ativado com os processos de separação por membrana (PMS), geralmente micro ou ultrafiltração.

Este trabalho tem objetivo de demonstrar a viabilidade de unidades de MBR de bancada para estudo de parâmetros de processo e avaliação de desempenho de sistemas de MBR e dessa forma auxiliar na definição de projetos. Sistemas de bancada como este se mostram adequados como ferramenta para compreensão e avaliação de processos de MBR a fim de melhorar seu desempenho.

O sistema montado foi composto de elementos simples e de baixíssimo custo. O projeto envolveu a montagem de sistema de módulo com membrana submersa com aeração. Os módulos foram montados com membranas de fibra oca fabricadas do material de PVDF (poli fluoreto de vinilideno) fornecidos pela Siemens.

Foram conduzidos testes para avaliação do comportamento da unidade de bancada na presença de condições propícias à formação de "fouling" utilizando soluções sintéticas a base de bentonita e proteínas e ácido húmico para provocar incrustações/deposição nas membranas.

O declínio do fluxo de permeado em função do tempo registrado foi comparável ao descritos na literatura, alcançando fluxo de permeado final aproximado de $10 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$.

Foi verificada também a eficiência no processo de remoção de "fouling" usando solução de hipoclorito de sódio 0,5% com recuperação da permeabilidade inicial da membrana.

A partir dos testes realizados foi elaborada uma aula prática de MBR para estudo de características e parâmetros de operação do sistema.

Índice

Capítulo 1. Introdução	1
Capítulo 2. Objetivos	2
Capítulo 3. Revisão Bibliográfica	3
3.1. MBR - Biorreatores com Membranas - Fundamentos	3
3.2. Tecnologia de MBRx Tecnologia de Lodos Ativados	5
3.3. Aplicações de MBR	6
3.4. Parâmetros operacionais básicos para o projeto MBR	9
3.4.1. Tempo de retenção hidráulica (TRH)	9
3.4.2. Tempo de retenção de lodo (TRL)	9
3.4.3. Sólidos Suspensos no Tanque de Aeração (SSTA)	9
3.4.4. Sólidos Suspensos Voláteis do Tanque de Aeração (SSVTA)	10
3.4.5. Fluxo de Permeado (J)	10
3.4.6. Pressão Transmembrana ("Transmembrane Pressure-TMP")	10
3.4.7. Permeabilidade Hidráulica (K)	11
3.4.8. Resistência (R)	12
3.5. Desempenho do sistema de MBR	13
3.5.1. Desempenho em Relação à Remoção de Contaminantes	13
3.5.2. Desempenho Hidráulico das Membranas	15
3.6. Custos de Operação e Instalação do MBR	18
3.6.1. Tempo de Vida Útil da Planta e dos Equipamentos	18
3.6.2. Demanda Energética do MBR	18
Capítulo 4. Desenvolvimento do Projeto de MBR em Bancada	20
4.1. Preparo do Módulo da Membrana	20
4.2. Etapas de montagem do módulo de membrana	21
4.3. Descrição do projeto de MBR de escala de bancada	27
4.4. Passo a Passo para a Construção do sistema de MBR	29
Capítulo 5. Testes realizados com o MBR construído	34
5.1. Procedimentos preliminares para uso da membrana (molhamento e armazenamento)	34
5.1.1. Procedimento de Molhamento	34

5.1.2.Procedimento p/ armazenamento da membrana.....	35
5.2.Teste de Permeabilidade com Água Limpa.....	36
5.3. Avaliação de "Fouling"	40
Capítulo 6. Conclusões.....	43
Capítulo 7. Sugestões	44
Referências	45
APÊNDICE.....	48

Índice de Figuras

Figura 1: Configurações de MBR: a) módulo externo , b) módulo submerso	3
Figura 2: Comparação de layouts entre CASP e MBR	5
Figura 3: Sistema MBR da KUBOTA.....	6
Figura 4: Sistema MBR da ZENON.....	7
Figura 5 : Esquema de relação de pressões na operação de membrana.....	10
Figura 6: Esquema representando a camada de "fouling" em um processo de filtração.....	15
Figura 7: Amostra de Membranas de fibra oca.....	20
Figura 8: Alinhamento membranas de fibra oca com fita adesiva.....	21
Figura 9: Aspecto final das Fibras de membrana alinhadas e agrupadas.....	21
Figura 10: Corte do tubo nas quais as membrana serão alocadas.....	22
Figura 11: Fibras no interior do tubo.....	22
Figura 12: Corte nas extremidades das fibras.....	23
Figura 13: Inserção da cola de vedação com seringa.....	23
Figura 14: Selagem do tubo e secagem.....	24
Figura 15: Corte da extremidade do tubo.....	24
Figura 16: Análise visual das extremidades do módulo.....	25
Figura 17: Extremidades do módulo de coleta de permeado e selada.....	25
Figura 18: Aspecto módulos de fibra oca prontos para uso.....	26
Figura 19: Desenho esquemático da unidade bancada MBR construída.....	27
Figura 20: Tanque de alimentação(T1).....	29
Figura 21: Tanque de alimentação(T1) com conexão e válvulas.....	29
Figura 22: Posicionamento do tanque alimentação(T1) e tanque reator(T2).....	30
Figura 23: Conexão válvula de cisterna para controle nível do T2.....	30
Figura 24: Desenho esquemático do posicionamento da válvula de controle de nível em T2.....	31
Figura 25: Desenho e foto posicionamento bomba de ar.....	31
Figura 26: Posicionamento do Modulo de Membrana no interior do T2(tanque reator).....	32
Figura 27: Posicionamento do T3(tanque permeado) em relação ao T2(reator).....	33

Figura 28:Fixação tubo coletor de permeado com garra.....	33
Figura 29: Processo de molhamento das membranas por sifão.....	34
Figura 30:(a) Transmissor de dados de pressão; (b) Dispositivo de aquisição dos dados.....	36
Figura 31:Gráfico de decaimento fluxo em função do tempo.....	41

Índice de Tabelas

Tabela 1: Densidades de empacotamento das diferentes configurações.....	4
Tabela 2: Rendimentos de MBR para águas residuais industriais.....	8
Tabela 3: Resultado da remoção de patógenos através dos indicadores TC, <i>E. Coli</i> , FRNAPH, SRC(s).....	14
Tabela 4: Performance de remoção de sistemas de MBR adaptado do "The MBR Book".....	14
Tabela 5: Análise do uso de energia por plantas de MBR.....	19
Tabela 6: Descrição e Custo dos Materiais Utilizados.....	28
Tabela 7: Características das membranas preparadas.....	38
Tabela 8: Teste de permeabilidade com água limpa da Membrana 1(M1)(duplicata 1).....	39
Tabela 9: Teste de permeabilidade com água limpa da Membrana 1(M1)(duplicata 2).....	39
Tabela 10: Teste de permeabilidade com água limpa da Membrana 2(M2)(duplicata 1).....	39
Tabela 11: Teste de permeabilidade com água limpa da Membrana 2(M2)(duplicata 2).....	39
Tabela 12: Médias dos resultados do Teste de permeabilidade com água limpa para M1 e M2.....	40
Tabela 13: Parâmetros de fluxo e resistência da membrana nova x membrana após limpeza.....	42

1. Introdução

A tecnologia de Biorreator com Membrana (MBR) é um processo híbrido que combina processo biológico e separação física por membrana. O MBR realiza simultaneamente duas funções, tratamento biológico no biorreator e separação física pela membrana fornecendo efluente limpo e filtrado. A membrana funciona como um filtro, rejeitando materiais sólidos e essa filtração é combinada com um biorreator do lodo ativado [1].

As membranas utilizadas usualmente em MBR tem porosidade entre 0,1-0,01 micra, retendo os microrganismos e biomassa, evitando o uso de clarificadores ou decantadores normalmente requeridos nos processos convencionais de lodo ativado [1].

As significativas vantagens associadas a esse processo de tratamento têm levado ao aumento do uso desta tecnologia, de tal maneira que países desenvolvidos vêm projetando sistemas de MBR em substituição dos sistemas convencionais de tratamento de água em grande escala [1].

Apesar da tecnologia do MBR ser considerada bastante avançada e complexa para ser reproduzida utilizando-se materiais alternativos muito mais baratos, foi possível construir um reator de bancada simplificado e de baixíssimo custo de forma a reproduzir o processo realizado nas grandes plantas.

O presente trabalho pretende demonstrar viabilidade de sistemas de MBR para uso didático em pequena escala. Através da ênfase no baixo custo e na utilização de componentes facilmente encontrados, foi construída uma unidade em escala de bancada que poderia ser utilizada por qualquer pesquisador interessado nessa tecnologia para fins didáticos ou de pesquisa. Todas as partes necessárias para construir esse sistema podem ser adquiridas facilmente no mercado.

Unidades de pequena escala, como as construídas nesse estudo, também poderiam ser empregadas como base de sistemas descentralizados de tratamento de esgoto em pequenas comunidades sem infra estrutura para solucionar problemas relacionados com saneamento básico[2] [3].

Este trabalho está estruturado em 7 capítulos. Além da introdução e objetivos dos capítulos 1 e 2, no capítulo 3, na revisão bibliográfica, são apresentados conceitos teóricos acerca processo de MBR. No capítulo 4, encontra-se a descrição das etapas de montagem dos módulos de membrana, o projeto conceitual e etapas de construção da unidade de MBR de bancada. No capítulo 5, são descritos experimentos realizados com o MBR de bancada e os resultados obtidos e, finalmente, nos capítulos 6 e 7 estão as conclusões e sugestões. Em anexo segue uma aula prática de MBR, elaborada a partir dos experimentos descritos no capítulo 5.

2.Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi demonstrar a viabilidade de um sistema piloto de bancada, de baixo custo, capaz de reproduzir as condições operacionais do processo de MBR em escala real, visando tratamento de águas residuais, para fins de estudo acadêmicos da tecnologia.

Objetivos Específicos:

1. Descrever passo a passo a construção de unidade de MBR de bancada.
2. Avaliar o desempenho hidráulico do sistema.
3. Avaliar a eficiência de remoção de incrustação empregando solução de hipoclorito.
4. Avaliar a qualidade e a confiabilidade dos módulos de membrana produzidos
5. Levantar os parâmetros de operação de modulo de membranas.
6. Elaborar aula prática de MBR com o sistema de bancada desenvolvido.

3.Revisão Bibliográfica

3.1. MBR - Biorreatores com Membranas - Fundamentos

O biorreator com membrana (MBR) consiste em um reator com biomassa em suspensão e uma unidade com membranas para a separação de sólidos, promovendo, assim, a biodegradação dos poluentes e a separação de sólidos de forma simultânea [4]. O processo de MBR garante uma alta qualidade de água tratada para descarte e até reúso e apresenta vantagens em relação ao processo de lodos ativados, por eliminar problemas operacionais relacionados a má decantação [4].

No MBR, os módulos de microfiltração ou ultrafiltração funcionam como barreira, retendo a biomassa no interior do reator, possibilitando redução do volume de reator, bem como eliminando necessidade de sedimentador secundário como etapa de tratamento. O uso dessa tecnologia torna possível as estações de tratamento compactas, pois o reator é operado com altas concentrações microbianas e conseqüentemente o volume necessário para tanque de aeração pode ser diminuído. Essa tecnologia é mais difundida para sistemas aeróbicos de tratamento [4].

Os sistemas de MBR apresentam dois tipos de configuração: com módulo de membrana submerso ou com módulo de membrana externo, conforme ilustra a Figura 1 [5].

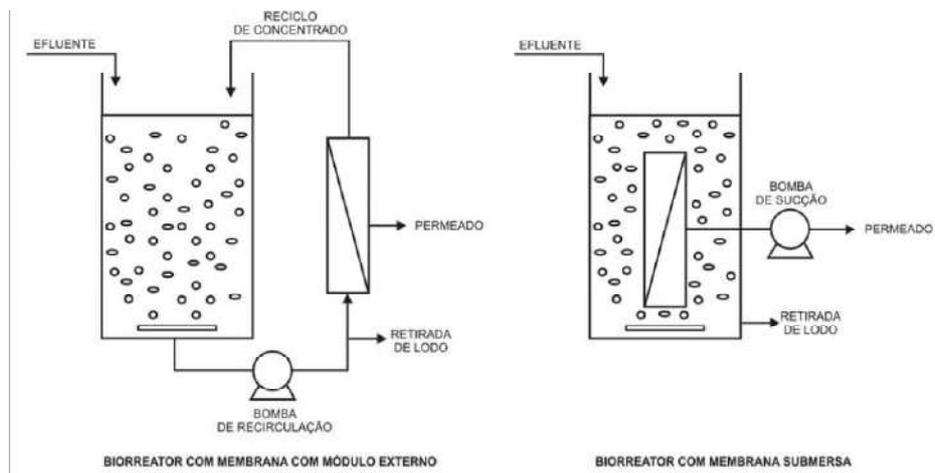


Figura 1 : Configurações de MBR: a) módulo externo , b) módulo submerso [5]

Na configuração de módulo externo, as membranas são instaladas fora do tanque aerado. O conteúdo do reator é bombeado para os módulos de membrana, normalmente tubulares, e escoam paralelamente à superfície da membrana, enquanto permeado é transportado (recuperado) transversalmente. A velocidade de circulação promove a turbulência próxima à membrana, para prevenir deposição e garantir elevado fluxo permeado. O permeado é recuperado por diferença de pressão positiva gerada pela vazão de circulação. Esse aspecto implica em alta perda de carga e, com isso, alto consumo

energético, que pode ser até 10 vezes maior do que o dos processos convencionais de lodos ativados [4].

No tipo submerso, o módulo ou feixe de membranas é imerso no tanque aerado e o permeado normalmente é succionado através das paredes da membrana. Em geral, os sistemas com membranas submersas utilizam membranas tipo fibra oca ou placa plana, sem carcaça envoltória, de forma que o conteúdo do biorreator está em contato com a superfície externa das membranas. Para manter fluxo estável, e limpar a superfície da membrana, ar comprimido é introduzido através do sistema de distribuição na base do módulo. O fluxo de permeação é obtido, usualmente, por sucção, alternada com retrolavagem [4] que consiste injeção de água limpa em sentido contrário ao do fluxo de filtração.

Os materiais de fabricação das membranas usualmente utilizados são: acetato de celulose, polisulfona, polietersulfona, poliacrilonitrila, polieterimida, policarbonato [6].

As membranas utilizadas atualmente em processos de separação podem apresentar os seguintes tipos de módulos: plana, espiral (spiral-wound), placa/quadro, tubular (com diâmetro >10mm), capilar (com diâmetros entre 0,5 – 10 mm) e fibra-oca (diâmetros <0,5 mm). Dentre esses tipos, a fibra-oca utilizada nesse estudo apresenta maior densidade de empacotamento (m^2/m^3) [6] conforme indica a Tabela 1.

Tabela 1: Densidades de empacotamento das diferentes configurações [6].

Tipo de Módulo	Tubular	Placa/quadro	Espiral	Capilar	Fibra-oca
Empacotamento(m^2/m^3)	30	500	900	1.000	10.000

3.2 Tecnologia de MBR x Tecnologia de Lodos Ativados

Algumas das vantagens mais significativas dos MBRs quando comparados os reatores de lodos ativados tradicionais (LA) são:

- Os clarificadores secundários, presentes no sistema de lodos ativados são substituídos por módulos de membrana mais compactos e, por conta disso, o "footprint" geral do sistema é bastante reduzido [7].
- O efluente produzido pela filtração por membrana possui qualidade muito superior ao efluente gerado pelo tratamento com lodos ativados tradicionais. O processo de MBR permite uma retenção física completa dos flocos bacterianos e da maioria dos sólidos suspensos, portanto, o mesmo pode oferecer uma excelente capacidade de desinfecção da água [7].
- A retenção total do lodo ativado no biorreator permite uma operação com elevadas concentrações de sólidos suspensos no reator biológico e um elevado tempo de retenção de lodo (TRL). Por consequência, maiores volumes podem ser tratados pelos sistemas MBR. Um maior TRL permite o desenvolvimento de microrganismos de crescimento lento que são responsáveis pela degradação de alguns compostos orgânicos específicos (especialmente compostos nitrogenados). Com uma maior concentração de biomassa também é possível reduzir o tamanho do biorreator utilizado no tratamento do efluente [1].

As principais desvantagens da tecnologia de MBR quando compara a lodo ativado tradicional, é o maior custo para sua construção em larga escala e para sua manutenção. A planta de MBR necessita de operadores qualificados para operação adequada da mesma [8]. No entanto, a universalização do uso desse sistema (MBR) tem levado à redução nos custos de produção das membranas, o aprimoramento nos projetos e otimização da operação das plantas de MBR [1]. A Figura 2 ilustra comparativamente esquemas de LA e MBR.

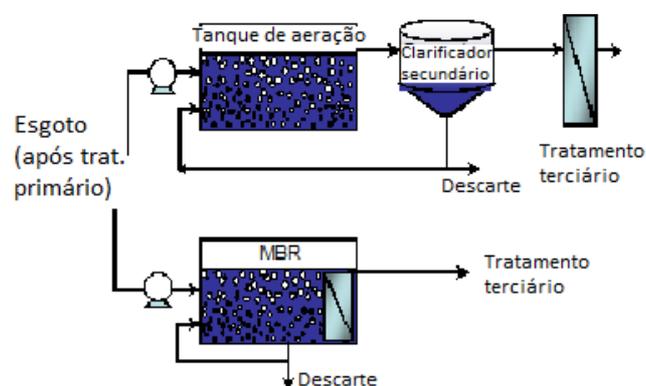


Figura 2: Comparação de layouts entre LA e MBR [9].

3.3 Aplicações de MBR

A tecnologia de MBR é utilizada para o tratamento de diversos tipos de efluentes, tais como esgotos domésticos, efluentes de cervejaria, de laticínios, da indústria farmacêutica e de chorume. Muitas vezes, o MBR pode gerar efluente tratado que atende padrões de qualidade para descarte e exigências para reuso [10].

Historicamente a tecnologia de MBR tinha aplicação em tratamentos descentralizados de pequena escala, tais como hotéis e pequenos prédios em locais remotos, estações de esqui ou a bordo de navios [10]. Conforme a tecnologia se tornou mais popular, o tamanho e a quantidade de plantas MBR aumentaram rapidamente no final dos anos noventa [10].

Os principais fabricantes de sistemas de MBR no mercado são: Kubota (configuração de placa plana) Zenon, Mitsubishi and US Filter (configuração de fibra oca). As Figuras 3 e 4 são ilustrações de sistemas submersos da KUBOTA e Zenon, respectivamente. Em termos de configurações, as principais aplicações utilizam membrana de fibra oca e placa plana [10].

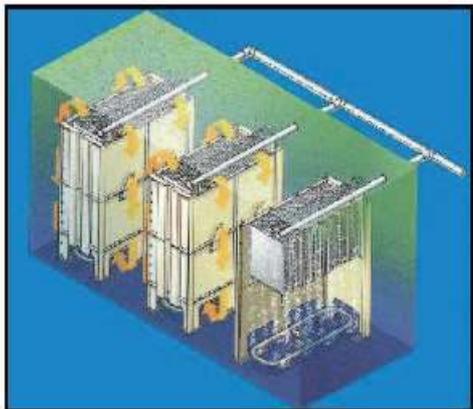
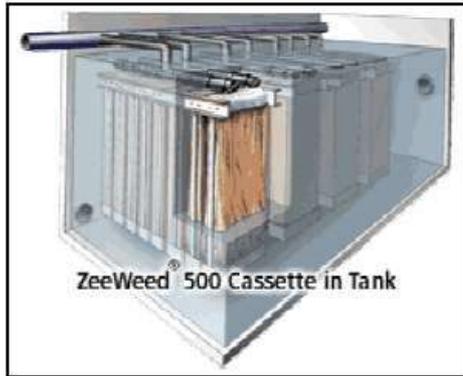


Ilustração do MBR da Kubota (KUBOTA, 2002). - Módulo de membranas da Kubota (CENTROPROJEKT DO BRASIL,

Figura 3: Sistema MBR KUBOTA [11].



– Ilustração do MBR da Zenon (ZENON ENVIRONMENTAL INC., 2004)



– Módulo e "Cassette" ZeeWeed® 500 (ZENON ENVIRONMENTAL INC., 2004).

Figura 4: Sistema MBR Zenon [11].

As primeiras plantas de MBR comerciais apareceram na América do Norte no final dos anos 70 e se estenderam para o Japão no princípio dos anos 80. A introdução dos Biorreatores de Membrana na Europa só ocorreu em meados década de 90. Atualmente existem mais de 500 MBR industriais operando em diferentes partes do mundo e inúmeras instalações em projeto ou construção [12].

Sistemas de MBR estão muito difundidos no Japão e América do Norte e em menor escala na Europa [12]. Em sua maioria os processos MBR são aeróbicos e de membrana submersa dentro do biorreator. A maior planta de MBR na Europa se encontra em Dusseldorf tratando, desde finais de 2004, 80.000 m³ diários de águas domésticas utilizando membranas da Zenon [12].

Nos Estados Unidos, em Washington, está em construção um MBR com membranas ZenoGem para tratar 150.000m³/dia. Na Espanha existem várias instalações industriais e domésticas, sendo que a maioria utiliza membranas Zenon ou Kubota. Na estação e tratamento de Garraf (Barcelona) são tratados efluentes mediante MBR de configuração externa. O primeiro MBR de configuração interna construído na Espanha foi no ano de 2000 pela empresa CEPICMA, utilizando o sistema ZenoGem [12].

Outro exemplo, é a primeira usina de MBR para tratamento de esgoto doméstico instalada no Reino Unido em 1998, que possui uma capacidade de 1,9 megalitros por dia (MLD) , em Porlock e a que está sendo projetada para tratar até 100 MLD na região do Lago Taihu , na China [1].

No Brasil, a tecnologia de MBR tem sido adotada em projetos da Sabesp(Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo) e Sanasa(Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento de Campinas) que já contrataram a construção de estações de tratamento de efluentes com MBRs. A Sabesp adotará o sistema no Aquapolo Ambiental, empreendimento em parceria com a Foz do Brasil e dedicado à produção de água de reúso para o Polo Petroquímico do ABC Paulista. Porém, sem dúvida, a grande impulsionadora da tecnologia foi a Petrobras, que em recentes investimentos em refinarias modernizou suas estações de tratamento de águas e efluentes, instalando grandes unidades de MBR e várias outras tecnologias. Já existem instalações em operação na REVAP, de São José dos Campos – SP, REPAR, em São José dos Pinhais e no CENPES no Rio de Janeiro. As duas primeiras utilizam as

membranas de fibra oca da GE Water e a terceira, da KUBOTA. Haverá ainda outras instalações na Refinaria Abreu e Lima(RNEST) e no Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro(COMPERJ).

Como mencionado anteriormente, alguns dos principais fatores que motivaram a utilização da tecnologia MBR, estão relacionados com a escassez de água corrente e regulamentações mais severas. Por causa de sua alta qualidade, o efluente de MBR não só pode ser diretamente descartado no meio ambiente, mas poderia ser reutilizado para aplicações não potáveis (como irrigação, aplicações industriais, recarga de aquífero). Uma tendência atual, para viabilizar esse reuso, é a combinação de MBR com processos avançados de tratamento tipo, carvão ativado, ozonização ou osmose reversa, para gerar efluente de alta qualidade [1].

Também foi relatado um número significativo de instalações de MBR para a remediação de efluentes industriais, que são refratários aos tratamentos convencionais. Indústrias de alimentos, farmacêutica, papel e celulose, aterros sanitários, têxtil e de carnes são alguns dos exemplos de que MBR tem sido aplicado com sucesso para tratar efluentes de alta resistência[13]. Estima-se que 500 plantas de MBR tratando cada uma mais de 20 m³/d de efluente industrial foram comissionadas na Europa até 2008[14].

Na Tabela 2, estão indicados como referência alguns rendimentos que foram alcançados em planta de MBR que tratam águas residuais industriais [12].

Tabela 2: Rendimentos de MBR para águas residuais industriais [12].

Indústria	Aeróbico (A) ou Anaeróbico(ANA)	Afluente (mg/L)			Efluente (mg/L)		
		DQO	DBO	SS	DQO	DBO	SS
Láctea	A	4.200	2.600	650	40	<5	4,2
Têxtil	A	1.000			90		
Sucos	A	2.250			24		
Azeites	A	4.300 - 6.900	919 - 1.360	253 - 889	180 - 669	3 - 34	1 - 11
Laticínios	ANA	58.000	34.000	5.200	700	300	<10
Ácido Lático	ANA	1.800			60		

3.4 Parâmetros operacionais básicos para o projeto MBR

São descritos, a seguir, alguns parâmetros, considerados importantes, no processo de MBR, relacionados à operação do processo de membrana.

3.4.1. Tempo de retenção hidráulica (TRH)

O TRH é definido como o tempo de residência do líquido dentro de um reator e é calculado dividindo o volume do reator (V_t), pela vazão de líquido produzido pelo reator (Q_l) [1], conforme a Equação 1.

$$TRH(h) = \frac{V_t(L)}{Q_l(\frac{L}{h})} \quad (1)$$

3.4.2. Tempo de retenção de lodo (TRL)

O TRL é definido como o tempo médio que os microrganismos passam dentro do MBR. Seu cálculo é feito dividindo o volume total do reator (V_t) pelo volume de microrganismos que deixam o reator por dia (Q_s). O TRL é utilizado para avaliar a média de tempo que a biomassa permanece no sistema [1].

$$TRL(d) = \frac{V_t(L)}{Q_s(L/d)} \quad (2)$$

3.4.3. Sólidos Suspensos no Tanque de Aeração (SSTA)

O licor misturado (sólidos suspensos presentes no tanque de aeração) é a combinação da água de rejeito e biomassa, sendo possível calcular a massa dos sólidos suspensos no mesmo. O SSTA é definido como a massa do resíduo retido num filtro que passa por uma secagem em estufa até que sua massa permaneça constante na temperatura 103°C a 105°C [15].

3.4.4. Sólidos Suspensos Voláteis do Tanque de Aeração (SSVTA)

SSVTA é geralmente definido como a suspensão microbiológica no tanque aerado de uma estação de tratamento biológico. O termo SSVTA é geralmente designado ao teor de sólidos voláteis suspensos obtidos a partir de amostras analisadas dos Sólidos Suspensos Totais. O SSVTA é a massa do resíduo retida em filtro que atingiu uma massa constante a 550°C. Essa análise serve como controle para estações de tratamento que usam o processo biológico com biomassa em suspensão [15].

3.4.5. Fluxo de Permeado (J)

O Fluxo de Permeado (J) é a vazão de permeado (Q_l) passando por determinada unidade de área da membrana (A). Isso significa que, em unidades do sistema SI temos $m^3/(m^2s)$, na prática a unidade mais usada é LMH ou L/m^2h [9].

$$J\left(\frac{L}{m^2h}\right) = \frac{Q_l\left(\frac{L}{h}\right)}{A(m^2)} \quad (3)$$

3.4.6. Pressão Transmembrana ("Transmembrane Pressure-TMP")

Em processos de separação cuja força motriz é a pressão, a diferença de pressão existente entre a alimentação do sistema e o permeado, denominada Pressão Transmembrana (TMP). Como a pressão pode variar no interior do módulo de membrana, uma diferença de pressão média é utilizada para que esse cálculo seja feito, como mostra a Figura 5 [16].

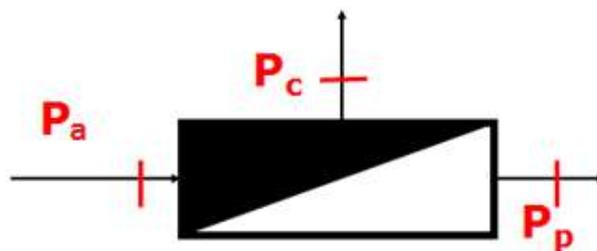


Figura 5: Esquema de relação de pressões na operação de membranas [16].

$$TMP (kPa) = \frac{(Pa(kPa)+Pc(kPa))}{2} - Pp(kPa) \quad (4)$$

Onde:

- Pa = Pressão da alimentação
- Pp = Pressão do permeado
- Pc = Pressão do concentrado

Para sistemas de MBR submersos, é possível estimar a TMP usando apenas pressão hidráulica para executar a filtração, nesse caso utiliza-se o seguinte cálculo:

$$TMP(kPa) = 10^{-3} \cdot \rho \left(\frac{kg}{m^3} \right) g \left(\frac{m}{s^2} \right) h(m) \quad (5)$$

Onde:

- ρ = Densidade da água (1000 kg/m³)
- g = Gravidade (9,81 m/s²)
- h = Diferença de altura (m) entre a superfície da água sob a qual o módulo de membrana está e o fim do tubo de permeado.

Por exemplo, se a diferença de altura existente no sistema for de 1m a TMP esperada é de 9,8 kPa ou 0,1 bar.

3.4.7. Permeabilidade Hidráulica (K)

A permeabilidade é definida como o Fluxo (J) dividido pela Pressão Transmembrana (TMP). O resultado é a vazão de água que passa por uma determinada área superficial para uma determinada diferença de pressão[16].

$$K (L/(m^2 h kPa)) = \frac{J(L/m^2h)}{TMP(kPa)} \quad (6)$$

3.4.8. Resistência (R)

A Resistência Hidráulica (R_m) é uma relação entre TMP, Fluxo(J) e Viscosidade(μ), calculada usando água limpa[16]. Utilizando a lei de Darcy para o cálculo da Resistência da membrana, temos:

$$R_m \left(\frac{1}{m} \right) = \frac{TMP(kPa)}{\mu(kPa.s)J\left(\frac{m^3}{m^2.s}\right)} \quad (7)$$

Onde:

- $\mu = \mu(\text{água}) = 0,001 \text{ (Pa.s)} = 10^{-6} \text{ (kPa.s)}$
- $J\left(\frac{m^3}{m^2.s}\right) = \frac{1}{3.6 \cdot 10^6} * J\left(\frac{L}{m^2.h}\right)$

Encontramos o valor de R_m para água limpa pela Equação 8:

$$R_m \left(\frac{1}{m} \right) = 3.6 * 10^{12} * \frac{TMP(kPa)}{J\left(\frac{L}{m^2.h}\right)} \quad (8)$$

Ao longo da operação é esperado ocorrer um aumento da resistência devido à formação de "fouling" [1] (fenômeno de acúmulo de sólidos na membrana, descrito em detalhes no item 3.5.2.).

Nesse caso, a resistência total de filtração é denominada R_t , expressa na Equação 9:

$$J = \frac{TMP}{\mu R_t} = \frac{TMP}{\mu (R_m + R_f)} \quad (9)$$

Onde R_m é a resistência da membrana à água limpa e R_f é a resistência referente à incrustação da membrana. Dessa forma, conhecendo a resistência hidráulica à água limpa e a resistência total, pode-se calcular a resistência referente ao "fouling"[16].

3.5. Desempenho do sistema de MBR

O desempenho do sistema de MBR é avaliado através da comparação da qualidade da água de alimentação em relação à qualidade do permeado. Para a avaliação completa do sistema deve-se monitorar diversos parâmetros tais como, DQO (Demanda Química de Oxigênio), DBO (Demanda Biológica de Oxigênio), Nitrogênio, Patógenos, além da performance hidráulica. As principais causas de perda na performance em MBRs são incrustação e entupimento [1].

3.5.1 Desempenho em Relação à Remoção de Contaminantes

Devido à elevada concentração de biomassa ativa presente em MBRs quando comparados aos processos convencionais de lodo ativado (PLA), uma degradação biológica mais intensa pode ser obtida nesse tipo de processo envolvendo membrana [17].

Um fator crítico para o tratamento de esgoto é a desnitrificação, que consiste na redução de nitrato em nitrogênio em ausência de oxigênio, ou seja, em processo anóxico. Num MBR, esse processo é conduzido numa zona anóxica separada ou pelo uso de aeração intermitente [18].

Outra opção para a desnitrificação apropriada é a aplicação da pré-desnitrificação que consiste na realização da desnitrificação em um tanque de desnitrificação anóxica antes da seção aeróbica de nitrificação [18]. Em trabalhos anteriores já foi reportado que essa configuração aumenta as taxas de desnitrificação, permite uma redução do volume do reator e também pode reduzir a demanda de aeração no subsequente tanque aerado devido à pré-degradação de uma considerável fração da matéria orgânica [18].

A nitrificação total é a oxidação de amônia para nitrito e depois para nitrato. A nitrificação em MBRs é favorecida pela retenção completa da biomassa no reator, o que contribui para o desenvolvimento de bactérias nitrificantes de crescimento lento, resultando na nitrificação total [19].

Em MBRs, o fósforo pode ser removido pela incorporação de coagulação química (geralmente através do uso de alumínio) e/ou por uma zona aeróbica inicial para remoção biológica. A literatura reporta que, sob condições controladas, é possível obter concentrações de fosfato inferiores a 0,1 mg/L no efluente do MBR [1].

De acordo com estudos anteriores [20], constatou-se que o desempenho de remoção de vírus no MBR está na faixa de 2,8 – 5,8 LRV¹ (Log Reduction Value), a remoção de bactérias se encontra na faixa de 5 - 7.1 LRV e a remoção de patógenos na faixa de 0.5 - 1.5 LRV. No mesmo estudo, também foi reportado que o TRH e o TRL possuem uma relação direta com a remoção de patógenos, sendo, assim, parâmetros muito importantes num processo de MBR [20].

A Tabela 3 apresenta os resultados reportados na literatura para a remoção de diferentes patógenos para diversos sistemas de MBR:

Tabela 3: Resultado da remoção de patógenos através dos indicadores TC, *E.Coli*, FRNAPH, SRC(s) [1]

Indicadores	LRV	Referências
CT	2,5 – 6,7	[21], [22],[23],[24]
<i>E.Coli</i>	2,1 – 6,8	[21],[23],[24]
FRNAPH	1,9 – 6,0	[21], [22],[24], [25],[26]
SRC(s)	1,0 – 4,5	[27], [26], [21], [25]

Onde:

- CT - Coliformes totais
- *E.Coli* - *Escherichia coli*
- FRNAPH - F+RNA Colífago - "FRNA colíphage"
- SRC (s) - Redutores de Sulfato Clostridium (esporos) - "Sulphatereducing clostridium (spores)"

A partir do estudo de alguns casos apresentados no "The MBR Book", é possível saber a faixa de concentração de alguns componentes no permeado de algumas plantas de MBR em operação em diversos locais pelo mundo [1].

A Tabela 4 apresenta diversos resultados de casos apontados no "The MBR Book" onde estão resumidos os principais parâmetros que possibilitam a análise do desempenho de sistemas de MBR instalados no mundo [1].

Tabela 4: Performance de remoção de sistemas de MBR adaptado do "The MBR Book" [1]

Planta	DQO (mg/L)	DBO (mg/L)	NT (mg/L)	FT (mg/L)	SST (mg/L)
Traverse City (USA)	-	0	-	0.05 - 0.4	0
Basic American Foods (USA)	< 15	-	< 5	-	-
Hamamatsu City (Japão)	20	< 2	< 10	0.2	-
Machida Food Factory (Japão)	< 30	< 5	-	-	-
Shen Ding He (China)	-	< 6	< 15	< 0.3	-
Dalsung (Korea)	9.1	0.7	6.8	0.97	0.4
Sobelgra (Bélgica)	100-200	2 - 5.	1 - 2.	< 1	0

Onde: SST - Sólidos em suspensão totais, FT - fósforo total, NT - nitrogênio total

¹ LRV (Log Reduction Value) é uma forma de expressar a eficiência de filtração de microrganismos, a fórmula do LRV é: Log de (# número de microrganismos na entrada/número de microrganismos na saída).

3.5.2 Desempenho Hidráulico das Membranas

Nessa seção são discutidas causas e soluções para o "fouling", o principal fator de deterioração do desempenho hidráulico dos sistemas de MBR [1]. Tal fenômeno sempre ocorre quando a filtração ocorre e há um aumento de concentração de partículas na interface membrana/solução. Como consequência, há aumento da pressão osmótica da solução na região próxima a superfície da membrana, reduzindo a força motriz e o fluxo de permeado, favorecendo a incrustação por deposição e "fouling" [28]. Esse fenômeno é denominado polarização por concentração e pode ser minimizado através da prática dos procedimentos descritos nessa seção.

3.5.2.1 "Fouling" -Incrustação

A figura 6 ilustra formação da camada de "fouling".

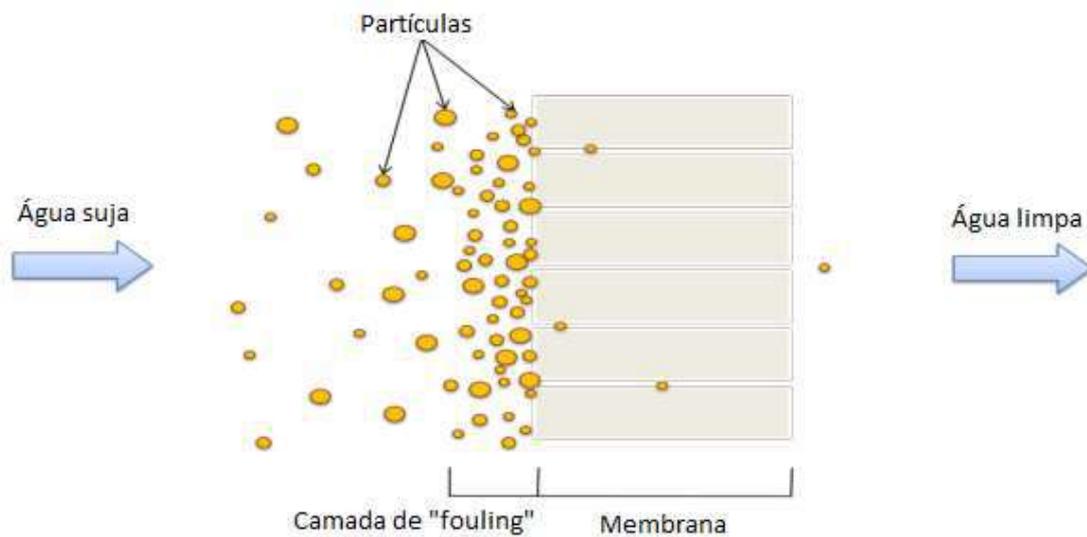


Figura 6: Esquema representando a camada de "fouling" em um processo de filtração [29].

A ocorrência de "fouling" é principal fator responsável pela queda da eficiência de processos de MBR. É caracterizado pelo acúmulo de sólidos na superfície da membrana causando diminuição da permeabilidade e do fluxo de permeado [28].

O "fouling" pode ocorrer de diversas maneiras, entre elas: bloqueio de poros por partículas maiores do que os poros, adsorção de partículas na superfície da membrana, adesão de microrganismos na superfície (biofouling) e precipitação de sais na membrana [30].

O controle do "fouling" envolve, entre outras medidas, a realização de limpezas periódicas com produtos químicos [30] de forma a recuperar produção de água tratada pela membrana.

Porém, cabe ressaltar que prática frequente de limpezas químicas na membrana pode ser prejudicial ao meio ambiente devido à formação de produtos secundários como compostos orgânicos halogenados absorvíveis (HOA). Limpezas químicas ineficientes são nocivas à membrana e podem reduzir o tempo de vida útil da mesma, o que leva a maiores custos de operação [31].

O "fouling" promove um aumento substancial nos custos de operação devido à elevação da demanda de energia, diminui a produtividade da planta e a produção de permeado [31].

O "fouling" é um processo inevitável, mas pode ser controlado se os procedimentos e mecanismos adequados para amenizá-lo ao máximo forem determinados e controlados para cada processo específico em estudo, alguns exemplos são: retrolavagem, aeração adequada, pré-decantação do efluente [31].

A configuração de membrana de fibra oca (que foi usada nesse experimento) opera com o fluxo de água passando de fora para dentro da membrana. Essa configuração possui alguns importantes benefícios para a operação e limpeza do efluente. Esse tipo de membrana pode ser submetida à retrolavagem ("backflushable") e pode ser produzida em uma grande variedade de materiais, sendo aplicável em microfiltração, ultrafiltração e osmose inversa. Apesar dessas vantagens, a grande desvantagem dessa configuração é a baixa produção de turbulência, condição importante para prevenção de "fouling" [1].

A literatura aponta como principais fatores que afetam o "fouling": a qualidade da água a ser tratada, características do lodo, condições de operação, hidrodinâmica do processo, dimensionamento e aeração do módulo de membrana, além das características da própria membrana [31].

Sabe-se que algumas características da membrana como tamanho dos poros, porosidade e rugosidade podem ter impacto direto sobre a formação de "fouling". Outros parâmetros relacionados ao "fouling" também são: concentração de sólidos no meio, TRH e temperatura [32].

Existem diferentes tipos de "fouling". Alguns exemplos são o Coloidal, Orgânico e de Precipitação. O "fouling" coloidal ocorre através do acúmulo de colóides sobre a superfície da membrana ou no interior dos poros da mesma. O "fouling" orgânico ocorre quando substâncias orgânicas dissolvidas ou não no efluente, proveniente da alimentação do tanque se fixam na superfície da membrana. O "fouling" de precipitação ocorre quando óxidos, sais sólidos ou hidróxidos presentes no efluente cristalizam e se depositam sobre a membrana [1].

3.5.2.2 Estratégias "Anti-Fouling" e Limpeza das Membranas

Algumas estratégias são utilizadas com o intuito de atenuar o "fouling", alguns exemplos são: o uso de aditivos, granulação do lodo, pré-decantação da biomassa da suspensão, modificação da superfície da membrana, pulso reverso de permeado, borbulhamento e otimização das características geométricas do MBR. Essas estratégias contribuem para um melhor controle sobre o "fouling" e maior eficiência no processo levando, também, à minimização de gastos energéticos e de manutenção [31].

Também é possível a prática de uma lavagem com ar para o controle do "fouling". A aeração também resulta no movimento das fibras, no caso das fibras ocas, o que limita o depósito de materiais na superfície da mesma. Também é possível otimizar a taxa de aeração para determinado design de MBR com suas condições de operação específicas através do estudo da vazão de água exata na qual limitações significantes geradas pelo "fouling" não são mais observadas [33].

A prática de limpeza física das membranas por relaxamento ou retrolavagem pode ser adotada regularmente porém, a eficiência desses procedimentos diminui conforme o tempo de filtração. Quando o "fouling" irreversível ocorre na superfície da membrana, é possível a aplicação de limpezas químicas de diversas intensidades, essas limpezas podem ser feitas semanalmente ou até anualmente [34]. O principal agente químico utilizado na maior parte das plantas de MBR é o hipoclorito de sódio (NaOCl) à concentração de 0,3%, esse agente químico promove a remoção de diversos compostos orgânicos. Ácido cítrico geralmente é usado no caso de "fouling" inorgânico [1].

Apesar da degradação da performance hidráulica do MBR devido ao "fouling", aplicações recentes dessa tecnologia por todo o mundo tem provado que a mesma é economicamente viável e possui alto grau de sustentabilidade, quando medidas "anti-fouling" são devidamente aplicadas [1].

3.6 Custos de Operação e Instalação do MBR

3.6.1. Tempo de Vida Útil da Planta e dos Equipamentos

O tempo de vida útil de uma membrana pode ser otimizado com uso de condições de operação sob um regime sustentável, abaixo do fluxo crítico, que é o fluxo abaixo do qual não se observa declínio no fluxo de operação e acima do qual o "fouling" é observado [35], e pela prática de estratégias de limpeza adequadas [1].

Para a avaliação da viabilidade técnico-econômica de projetos de MBRs, o tempo de vida útil da membrana é um parâmetro muito importante a ser estudado.

O tempo de vida de uma membrana pode ser considerado o momento em que essa membrana não consegue mais operar no fluxo para o qual foi projetada ou o momento em que a limpeza química não é mais capaz de recuperar a permeabilidade da membrana [36]. Em um estudo feito para averiguar o tempo de vida útil das membranas, no tratamento de esgoto com MBR, se o primeiro conceito for levado em conta, o tempo de vida útil é de 4,5 anos e se o segundo conceito for levado em conta, os tempos de vida da membrana estaria na faixa de 8 anos a 8°C e 10 anos a 18°C [36]. Nesse mesmo estudo, analisando os MBRs de fabricação da Zenon nos Estados Unidos, afirma-se que o tempo de vida esperado para suas membranas é de 10 anos.

3.6.2. Demanda Energética do MBR

Os custos de operação de uma planta estão principalmente relacionados à demanda de energia para aeração, bombeamento e mistura, custos para o manuseio do lodo e limpezas químicas [1].

De acordo com valores presentes na literatura, a demanda de energia para aeração de uma planta de MBR regular é aproximadamente de 0,025 kWh/m³[1]. A demanda de energia para o bombeamento do lodo para uma planta desse tipo estaria em torno de 0,016 kWh/m³ [1].

A Tabela 5 fornece os dados da demanda total de energia para plantas de MBR em operação pelo mundo que usam fibra oca submersa.

Tabela 5: Análise do uso de energia por plantas de MBR[1].

Planta	Demanda Energética (kWh/m ³)	Notas
Nordkanal (Alemanha)	0,4 – 1,7	Depende da vazão, o custo total da planta foi de 25 milhões de euros, tratando 48 MLD* de esgoto doméstico, é a maior da Europa.
UluPandan (Cingapura)	0,4	Utilizada como uma planta de demonstração para estudo de reuso de água, tratando 23 MLD*, o efluente é 90% de origem doméstica e 10% industrial.
WenYuHe (China)	0,274	Quase 90% da energia é usada para aeração, utilizada na limpeza do rio Wenyu, tratando 100 MLD no verão e 25 MLD* no inverno.
ShenDingHe (China)	0,48	83% da demanda energética é para aeração, era a maior do mundo quando foi construída (em 2009), tratando 110 MLD*.

*MLD : Milhões de Litros Dia

4. Desenvolvimento do Projeto de MBR em Bancada

O projeto foi desenvolvido na Escola de Engenharia Civil e Ambiental e no Water Research Center (WRC) como parte das atividades conduzidas durante intercâmbio realizado na Universidade de New South Wales em Sidney, Austrália, pelo Programa Ciência sem Fronteiras, no período de março a dezembro de 2013.

4.1. Preparo do Módulo da Membrana

Nessa sessão, foi feita uma breve descrição das membranas utilizadas no projeto, seguida de uma detalhada descrição do passo a passo para a construção dos módulos de membranas.

Para utilizar membrana em sistemas industriais, estas devem ser acomodados em módulos.

Neste trabalho, foram montados módulos de fibra oca. Estes módulos tem larga aplicação em sistema de microfiltração, pois possuem elevada área de membrana por volume de módulo ($10000 \text{ m}^2/\text{m}^3$), permitindo sistemas mais compactos [6].

A construção do módulo utilizou membranas de ultrafiltração de fibra-oca ("hollow fibre") $0,04 \mu\text{m}$ da Siemens feitas de PVDF (poli fluoreto de vinilideno). Na construção desse tipo de módulo pode-se variar o tamanho e o numero de fibras de acordo com o dimensionamento do projeto. Primeiramente foi realizado um cálculo para saber precisamente a área de membrana em m^2 necessária para realizar o processo, com essa informação foi possível determinar o comprimento e o número de fibras necessários na construção do modulo.

Membranas de fibra oca são facilmente danificadas, então, foi necessário extremo cuidado durante o processo de "potting" (envazamento) das membranas. Primeiramente foi assegurado que as mesmas não estavam danificadas, através de uma detalhada analise visual das fibras. As fibras a serem utilizadas foram cortadas com alguns centímetros de folga para assegurar que teriam um comprimento adequado para o módulo. A Figura 7 ilustra as fibras que foram utilizadas no projeto.



Figura 7: Amostra de Membranas de fibra oca

No processo de colagem das fibras foi utilizado cola epoxy (Araldite). O "potting" das membranas foi realizado seguindo protocolo descrito a seguir, ilustrado pelas Figuras 8 a 18. As Figuras mostradas são de um módulo de 20 fibras com o comprimento útil de 20 cm.

4.2. Etapas de montagem do módulo de membrana

Nesse capítulo são descritas em detalhes as etapas de construção do módulo de membrana de fibra oca no laboratório.

1. Foram cortados 20 pedaços de fibra oca com 35 cm de comprimento
2. Essas fibras foram devidamente alinhadas utilizando fita adesiva conforme Figura 8.

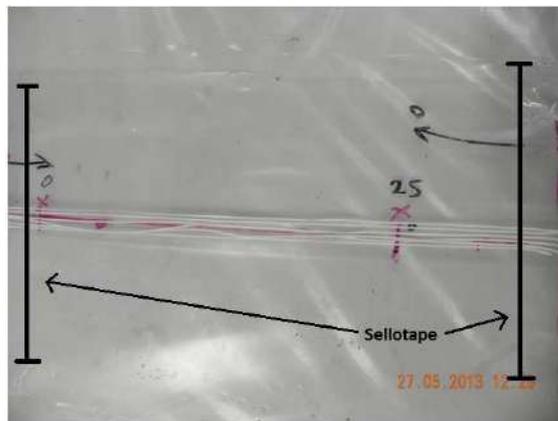


Figura 8: Alinhamento membranas de fibra oca com fita adesiva

3. As fibras alinhadas foram agrupadas com a fita adesiva como mostra a Figura 9.



Figura 9: Aspecto final das Fibras de membrana alinhadas e agrupadas.

4. Dois pedaços de um tubo rígido com $\frac{1}{2}$ " de diâmetro e 5cm de comprimento foram cortados para receber as fibras conforme mostra Figura 10.



Figura 10: Corte do tubo no qual as membrana serão alocadas.

5. As fibras foram colocadas dentro dos tubos de forma que havia 20cm de fibra oca entre os tubos (Figura 11).



Figura 11: Fibras no interior do tubo.

6. Uma das extremidades das fibras foi cortada a fim de remover a fita adesiva (Figura 12).



Figura 12: Corte nas extremidades das fibras

7. Usando uma seringa, a resina epóxi já misturada foi inserida no tubo (Figura 13).



Figura 13: Inserção da cola de vedação com seringa.

- Um tubo preenchido com resina foi então selado com fita adesiva e foi colocado numa garra para que a resina secasse (Figura 14).



Figura 14: Selagem do tubo e secagem

- As 3 etapas anteriores foram repetidos na outra extremidade do módulo.
- O módulo ficou secando conforme indicado na embalagem da resina epóxi que foi utilizada (Araldite 24h).
- Com um cortador de tubos, 1 cm de cada extremidade do módulo foi retirada. Nessa etapa foi necessário garantir que o corte estava sendo feito numa região propriamente colada para que não houvesse uma passagem para o efluente sem que o mesmo fosse filtrado pelas membranas (Figura 15).



Figura 15: Corte da extremidade do tubo.

12. Uma detalhada análise das extremidades do módulo foi realizada, foi checado se não existiam falhas ou bolhas na resina epóxi e se os buracos de entrada das fibras estavam devidamente abertos. A melhor extremidade foi escolhida para ficar aberta e receber o efluente. A outra extremidade foi selada, conforme ilustrado na Figura 16.



Figura 16: Análise visual das extremidades do módulo

13. A pior extremidade de acordo com a avaliação descrita no passo anterior foi selada usando resina epóxi. Essa extremidade ficou na base do módulo, enquanto a outra extremidade ficou coletando o permeado no topo do mesmo (Figura 17).



Figura 17: Extremidades do módulo de coleta de permeado e selada

A Figura 18 ilustra os módulos completos.



Figura 18: Aspecto módulo de fibra oca pronto para uso

4.3. Descrição do projeto de MBR de escala de bancada

O fluxograma da Figura 19 ilustra em detalhes o projeto do sistema de MBR de bancada para tratamento de efluentes desenvolvido nesse projeto. Foi utilizada configuração de módulo com membrana submersa com aeração.

A unidade é constituída basicamente por: tanque de alimentação(T1), reator biológico(T2), módulo de membrana(MB), bomba para aeração(A1), tanque de permeado(T3) e tubos, interligações e válvulas. A Tabela 6 lista os componentes utilizados com respectivos preços em dólares.

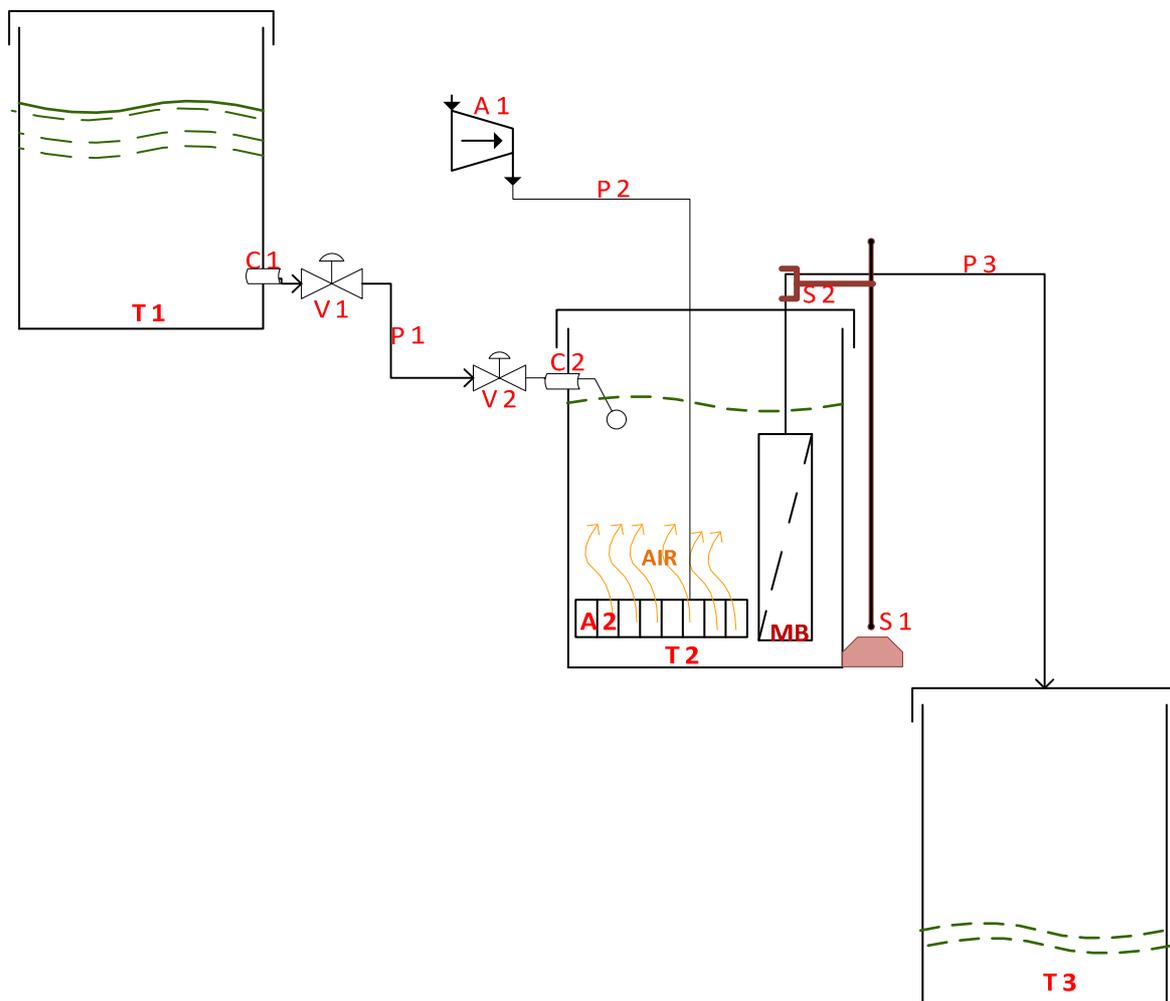


Figura 19: Desenho esquemático da unidade bancada MBR construída

Tabela 6: Descrição e Custo dos Materiais Utilizados em maio de 2013.

<i>Item</i>	<i>Descrição</i>	<i>Custo por unidade (AUD)</i>	<i>Custo Final (AUD)</i>	<i>Ref/Fornecedor</i>
<i>T1, T2, T3</i>	<i>Balde Plástico 20L</i>	<i>4,5</i>	<i>13,5</i>	<i>[37]</i>
<i>V2</i>	<i>Cisterna de Banheiro</i>	<i>27,95</i>	<i>27,95</i>	<i>[38]</i>
<i>A1</i>	<i>Bomba de ar para aquário</i>	<i>62,4</i>	<i>62,4</i>	<i>[39]</i>
<i>P2, P3</i>	<i>Tubo (1/4")</i>	<i>0,112</i>	<i>0,168</i>	<i>[40]</i>
<i>P1</i>	<i>Tubo (1/2")</i>	<i>1,19</i>	<i>3,57</i>	<i>[41]</i>
<i>A2</i>	<i>Difusor de Ar para Aquário</i>	<i>9,15</i>	<i>9,15</i>	<i>[39]</i>
<i>Mb</i>	<i>Módulos de Membrana (0,03677m² - área total)</i>			
<i>S1</i>	<i>Stand de Laboratório</i>	<i>35</i>	<i>35</i>	<i>[42]</i>
<i>S2</i>	<i>Garra</i>	<i>19</i>	<i>19</i>	<i>[42]</i>
<i>C1,C2</i>	<i>Bocal de Rosca (1/2")</i>	<i>0,35</i>	<i>0,7</i>	<i>[43]</i>
<i>V1</i>	<i>Válvula Esfera</i>	<i>10,4</i>	<i>10,4</i>	<i>[44]</i>
<i>Ht</i>	<i>Tubo Rígido</i>	<i>10,5</i>	<i>0,12</i>	<i>[45]</i>
<i>Ar</i>	<i>Araldite</i>	<i>39,62</i>	<i>9,905</i>	<i>[46]</i>
<i>Hc</i>	<i>Abraçadeira de Mangeira</i>	<i>1,55</i>	<i>3,1</i>	<i>[47]</i>
<i>Sp</i>	<i>Tubo de Silicone</i>	<i>7,95</i>	<i>1,59</i>	<i>[48]</i>
<i>M1</i>	<i>Fibras de Membrana</i>	<i>Doação</i>	<i>0</i>	
<i>C3</i>	<i>Conector T</i>	<i>8,5</i>	<i>8,5</i>	<i>[49]</i>
<i>Custo total (AUD)</i>			<i>205,053</i>	

4.4. Passo a Passo para a Construção do sistema de MBR

A unidade de bancada foi construída seguindo as seguintes etapas, ilustradas com as Figuras 20 a 28:

1. No tanque de alimentação foi feito um furo de $\frac{3}{4}$ " diâmetro para que fosse possível o encaixe da conexão que recebeu o tubo que leva o efluente para o reator do sistema. Uma furadeira foi utilizada para fazer esse furo (Figura 20).



Figura 20: Tanque de alimentação(T1)

2. Um tubo de $\frac{1}{2}$ " foi conectado ao tanque de alimentação (Tq1) através de um conector de anteparo. Uma válvula foi colocada logo após esse conector para auxiliar no controle de vazão (Figura 21).



Figura 21: Tanque de alimentação (T1) com conexão e válvulas

3. O T1 foi posicionado em plataforma pelo menos 30 cm acima do reator (T2) A conexão entre o tanque de alimentação e o reator deve ser mais curta possível para evitar uma possível obstrução (Figura22).



Figura 22: Posicionamento do tanque alimentação (T1) e tanque reator(T2)

4. O reator foi colocado dentro de uma grande bandeja, para conter qualquer vazamento ou transbordamento.
5. A extremidade do tubo de efluente que chega ao reator foi conectada a uma válvula de cisterna conforme ilustra Figura 23.



Figura 23: Conexão válvula de cisterna para controle nível do T2

6. A válvula de cisterna foi posicionada 5 - 10 cm abaixo do topo do tanque do reator de MBR. A válvula não deve ficar muito alta devido ao risco de transbordamento durante a operação do sistema. O posicionamento final da válvula é muito importante para o processo, pois irá determinar o nível da água no reator e, portanto, no volume útil do reator. Um desenho ilustrativo é mostrado na Figura 24.

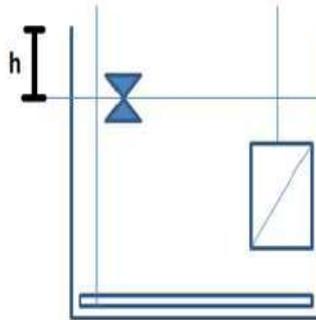


Figura 24: Desenho esquemático do posicionamento da válvula de controle de nível em T2

7. O difusor de ar foi posicionado no fundo do reator de forma que todo o tanque recebesse aeração adequada para evitar decantação de sólidos presentes no reator. A eficiência da aeração do sistema foi primeiro testada com água limpa; dessa maneira, a disposição das bolhas e a localização de zonas mortas pode ser facilmente observada.
8. O tubo de ar (com o diâmetro de $\frac{1}{4}$ "") foi conectado ao difusor de ar no interior do reator e na bomba de ar, no exterior do tanque. A bomba de ar foi posicionada em um local mais alto do que o nível do líquido presente no reator do MBR de forma a evitar que o líquido presente no reator possivelmente retornasse para a bomba de ar. Uma vazão de 20L/min de ar comprimido foi utilizada para o reator desse experimento que, no caso, possuía 20L. Um medidor de vazão de ar foi utilizado para avaliar em que taxa o ar estava sendo inserido no reator (Figura 25).

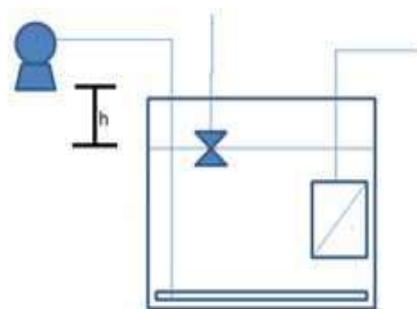


Figura 25: Desenho e foto posicionamento bomba de ar

9. O módulo de membrana foi colocado no interior do reator, ocupando $\frac{2}{3}$ do nível do líquido e foi posicionado corretamente através da utilização de uma garra e fixado sobre o difusor de ar com fita adesiva. O módulo com a membrana foi posicionado na região mais aerada do reator, para assegurar que mistura e turbulência adequadas ocorram no reator, como mostra a Figura 26.

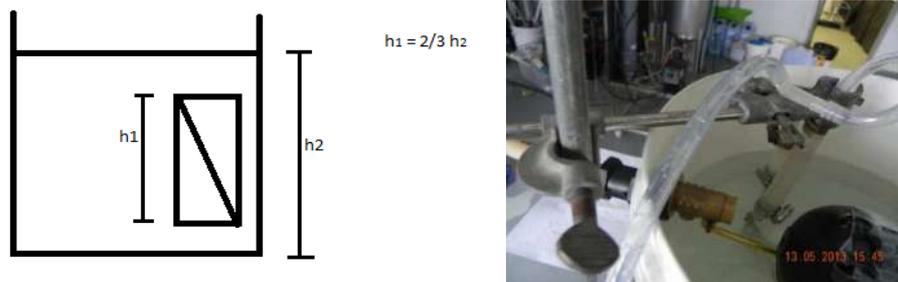


Figura 26: Posicionamento do Módulo de Membrana no interior do T2 (tanque reator)

10. O módulo foi então conectado a um tubo de $\frac{1}{4}$ " de diâmetro a função era levar o permeado que vinha do módulo para o tanque de permeado.
11. O tanque de permeado foi colocado 1m abaixo do reator, que ficou em cima de uma bancada alta enquanto o tanque de permeado permaneceu no chão. Essa diferença de altura proporcionou uma boa diferença de pressão e, assim, uma boa geração de permeado (Figura 27).



Figura 27: Posicionamento do T3 (tanque permeado) em relação ao T2 (reator)

12. Uma garra foi utilizada para segurar o tubo de permeado numa posição adequada no tanque de permeado para que o mesmo seja devidamente alimentado (Figura 28).



Figura 28: Fixação tubo coletor de permeado com garra

5. Testes realizados com o MBR construído

5.1. Procedimentos preliminares para uso da membrana (molhamento e armazenamento)

5.1.1. Procedimento de Molhamento

Antes da montagem das membranas no módulo, estas devem passar por processo de molhamento com água, ilustrado na Figura 29, de forma a conferir a molhabilidade pela água necessárias para garantir maior fluxo e eficiência processo de filtração no início de operação.

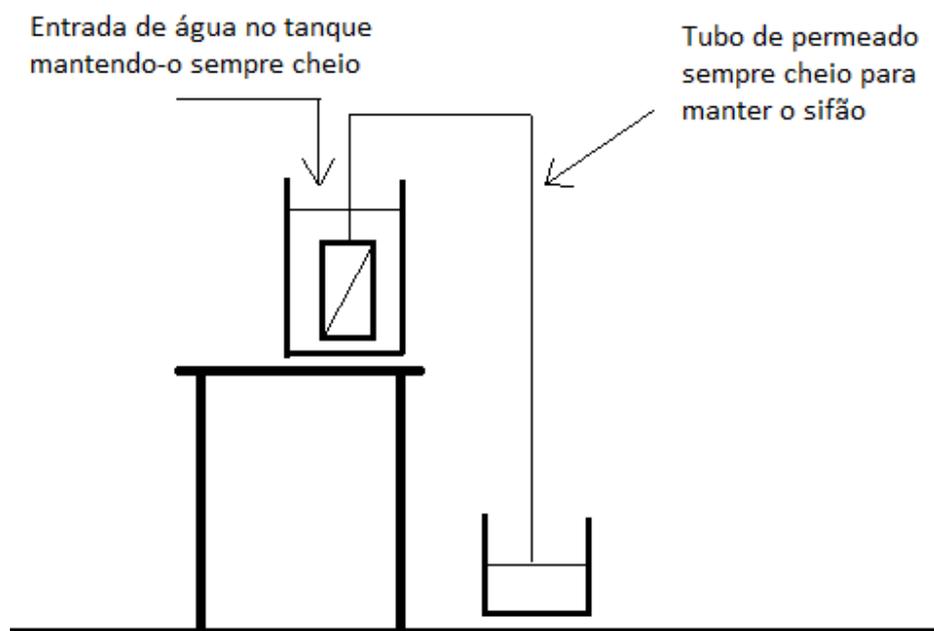


Figura 29: Processo de molhamento da membranas por sifão

O método do molhamento pode variar dependendo das recomendações do fabricante da membrana. Nesse experimento foi seguido o procedimento descrito a seguir, ilustrado na Figura 29:

1. O módulo foi colocado no interior de um recipiente cilíndrico comprido contendo etanol/água (20%/80%), com o tubo de coleta de permeado conectado ao módulo. O módulo foi deixado imerso nessa solução por um período de 12 horas.

2. No dia seguinte, a filtração foi iniciada sugando a solução através do tubo de coleta de permeado. Esse procedimento pode ser feito com o auxílio de uma bomba peristáltica, caso esse tipo de aparelho não esteja disponível a água pode ser pipetada com a boca ou então desconectando o tubo de coleta de permeado, preenchendo-o com água e reconectando-o ao módulo, o que permite que o efeito de sifão comece a atuar e o permeado possa ser coletado.
3. 500-1000 mL da solução de etanol/água foram coletados de maneira a assegurar um molhamento completo da membrana antes da mesma ser rinsada.

A rinsagem foi conduzida primeiramente deixando o módulo sob água corrente da torneira e depois repetindo o procedimento de filtração descrito acima com água limpa de forma a coletar 2-3L de água.

5.1.2.Procedimento p/ armazenamento da membrana

A membrana molhada foi armazenada em recipientes plásticos selados para alimentos (Zip Bags) contendo 20-50mL de água Mili-Q e colocada na geladeira.

A membrana apropriadamente molhada possui menor resistência ao fluxo de permeado quando comparada a uma membrana não molhada ou parcialmente molhada.

Este comportamento está relacionado à característica hidrofílica pela imersão da membrana em água. Materiais hidrofílicos apresentam menor ângulo de contato á água, favorecendo penetração nos poros da membrana e conseqüentemente maior fluxo de permeado.

5.2. Teste de Permeabilidade com Água Limpa

O ensaio de permeabilidade com água limpa ("Clean Water Test") permite determinar características hidráulicas da membrana, tais como permeabilidade hidráulica (K) e de resistência (Rm).

Este teste foi conduzido mantendo o fluxo de operação constante e registrando a pressão de operação. Neste teste foi utilizada bomba peristáltica para sucção do permeado e transdutores de pressão, conforme descrito a seguir.

Os equipamentos usados para esse teste estão descritos abaixo:

1) Proveta de 1000 litros

Cada módulo de membrana foi imerso em água limpa em uma proveta de 1000L. A saída do módulo foi conectada à bomba para sucção de permeado a vazões controladas.

2) Transdutor de pressão

Os dados de pressão foram adquiridos pelo transdutor de pressão conectado à linha de efluente. Esse equipamento foi conectado a um transmissor, da marca LABCOM que possui uma faixa de medida de -1 a 1,5 bar e pode gerar um sinal de saída entre 0 e 20mA. A saída foi conectada a um dispositivo que registra esses dados da marca National Instruments, modelo USB-6009. Basicamente, esse dispositivo gera um sinal digital a partir de sinal analógico que pode ser reconhecido e processado pelo computador através de um software específico (LabView). Os dispositivos descritos estão ilustrados na Figura 30.

O uso desse equipamento permite um acesso preciso ao estado das membranas, a qualidade do "potting", a confiabilidade e eficiência da filtração e a taxa de "fouling".

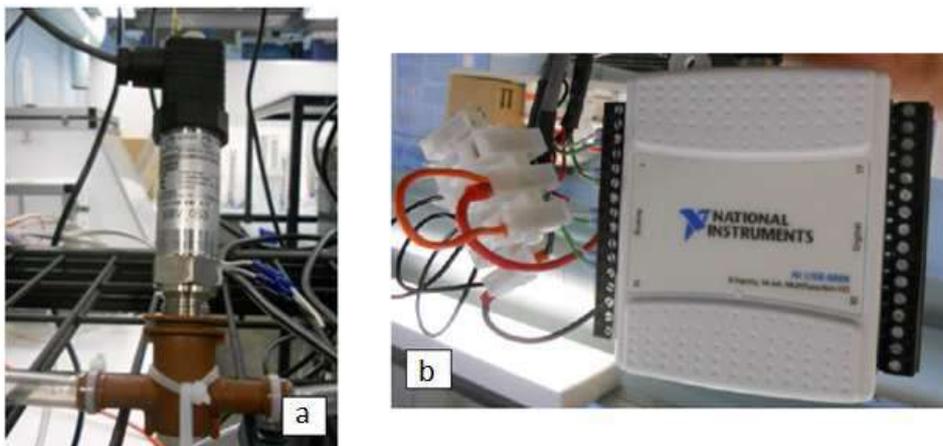


Figura 30: (a) Transmissor de dados de pressão; (b) Dispositivo de aquisição dos dados

3) Bomba peristáltica

Uma bomba peristáltica da marca Masterflex foi utilizada. Essa bomba aplica compressão nos tubos de maneira a induzir o fluxo de fluido através dos mesmos. A bomba permite o controle da vazão da água nos testes, na faixa de 0,001 mL/min a 3400 mL/min.

Essa bomba foi conectada a um controlador ou interruptor, o que permite a mudança de velocidade de circulação ou liga/desliga da bomba.

Descrição do teste

O teste foi realizado conforme os passos descritos abaixo:

1. O conjunto composto por bomba e transdutor de pressão foi devidamente montado.
2. A bomba foi então ativada, iniciando a circulação de água no sistema, enquanto o comportamento da pressão no tubo era monitorado pelo transdutor de pressão e sua leitura era feita no programa de computador LabView.
3. Com a bomba desligada, o valor P_0 foi anotado, que corresponde à pressão hidrostática inicial.
4. A bomba foi então regulada em diferentes velocidades (30, 60, 120 e 180 rpm) para obtenção de diferentes fluxos.
5. Para cada condição de fluxo, o sistema permanecia funcionando até que a pressão se estabilizasse, dessa forma, foi possível obter um valor preciso de pressão (P_t).
6. Os valores obtidos foram anotados e os cálculos para achar os parâmetros desejados foram feitos de acordo com as equações abaixo:

$$K = \frac{J}{TMP} \quad (20)$$

$$Rm = 3.6 * 10^{12} * \frac{TMP}{J} \quad (21)$$

Onde:

- K = permeabilidade [L/m²h/kPa]
- Rm = resistência da membrana [1/m]
- J = Fluxo [L/m²h]
- $TMP = P_0 - P_t$ = Pressão Transmembrana [kPa], onde P_0 e P_t são monitorados usando o LabView

A partir do procedimento de operação descrito acima, a permeabilidade à água limpa foi determinada para 2 módulos de membrana, M1 e M2, cujas características são especificadas na Tabela 7.

Tabela 7: Características das membranas preparadas.

	Módulo1	Módulo2
Número de fibras	20	20
Diâmetro externo (m)	0,0013	0,0013
Comprimento (m)	0,22	0,23
Área do Módulo (m ²)	0,01796991	0,01878672

O ensaio foi conduzido em duplicata para cada membrana e os resultados obtidos são mostrados nas Tabelas 8 e 9 para a membrana M1 e Tabelas 10 e 11 para a membrana M2.

Tabela 8: Teste de permeabilidade com água limpa da Membrana 1(M1)(duplicata 1)

Velocidade da bomba (rpm)	Massa de água (g)	Tempo (s)	Vazão (L/h)	Fluxo (LMH)	Pressão de sucção (kPa)	TMP (kPa)	Permeabilidade (LMH/kPa)	Resistência (1/m)
0	0	0	0	0	-2,96	0		
30	10	79	0,456	25,36	-14,48	11,52	2,201	1,64E+12
60	10	40	0,9	50,08	-26,08	23,12	2,166	1,66E+12
120	20	40	1,8	100,17	-48,59	45,63	2,195	1,64E+12
180	30	41	2,634	146,59	-70,3	67,34	2,177	1,65E+12

Tabela 9: Teste de permeabilidade com água limpa da Membrana 1(M1)(duplicata 2)

Velocidade da bomba(rpm)	Massa de água (g)	Tempo (s)	Vazão (L/h)	Fluxo (LMH)	Pressão de sucção (kPa)	TMP (kPa)	Permeabilidade (LMH/kPa)	Resistencia (1/m)
0	0	0	0,000	0,000	-0,150	0,000		
30	10	75	0,480	26,711	-13,650	13,500	1,979	1,82E+12
60	10	39	0,923	51,368	-26,820	26,670	1,926	1,87E+12
120	20	41	1,756	97,724	-52,100	51,950	1,881	1,91E+12
180	30	44	2,455	136,592	-73,800	73,650	1,855	1,94E+12

Tabela 10: Teste de permeabilidade com água limpa da Membrana 2(M2)(duplicata 1)

Velocidade da bomba(rpm)	Massa de água (g)	Tempo (s)	Vazão (L/h)	Fluxo (LMH)	Pressão de sucção (kPa)	TMP (kPa)	Permeabilidade (LMH/kPa)	Resistencia (1/m)
0	0	0	0	0	-2,91	0		
30	10	79	0,456	24,256	-12,620	9,710	2,498	1,44E+12
60	10	40	0,900	47,906	-22,450	19,540	2,452	1,47E+12
120	20	40	1,800	95,812	-41,770	38,860	2,466	1,46E+12
180	30	41	2,634	140,213	-60,560	57,650	2,432	1,48E+12

Tabela 11: Teste de permeabilidade com água limpa da Membrana 2(M2)(duplicata 2)

Velocidade da bomba(rpm)	Massa de água (g)	Tempo (s)	Vazão (L/h)	Fluxo (LMH)	Pressão de sucção (kPa)	TMP (kPa)	Permeabilidade (LMH/kPa)	Resistencia (1/m)
0	0	0	0,000	0,000	-0,100	0,000		
30	10	78	0,462	24,567	-11,000	10,900	2,254	1,60E+12
60	10	39	0,923	49,135	-21,800	21,700	2,264	1,59E+12
120	20	40	1,800	95,812	-42,900	42,800	2,239	1,61E+12
180	30	43	2,512	133,692	-63,000	62,900	2,125	1,69E+12

Visto que os valores de Permeabilidade e Resistência encontrados nas Tabelas 8 a 11 estão bastante próximos, pode-se afirmar que os módulos de membranas foram montados adequadamente, não existem vazamentos ou falhas, de forma que a operação não possui grandes variações em termos de desempenho hidráulico.

Na Tabela 12 estão as médias dos resultados obtidos do teste de permeabilidade com água limpa das membranas M1 e M2.

Tabela 12: Médias dos resultados do Teste de permeabilidade com água limpa para M1 e M2.

Membrana	Permeabilidade (LMH/kPa)	Resistência (1/m)
M1	1,910	1,886E+12
M2	2,221	1,622E+12

Após a comparação da Permeabilidade e da Resistência obtidos no experimento com valores encontrados na literatura para membranas de PVDF de 0,04 μ m de tamanho de poro [1], é possível afirmar que os resultados encontrados são coerentes e que as membranas não estão danificadas. Ou seja, os módulos foram construídos com sucesso.

5.3. Avaliação de "Fouling"

A ocorrência de "fouling" é principal fator responsável pela eficiência de processo de MBR [1]. A fim de avaliar o desempenho da unidade de MBR de bancada, foram conduzidos testes para avaliação do comportamento da unidade de bancada na presença de condições propícias à formação de "fouling" utilizando soluções artificiais para provocar incrustações/deposição nas membranas.

A bentonita foi usada para simular flocos de lodo, enquanto os compostos de proteína e substâncias húmicas foram utilizados como fonte de compostos orgânicos. Essas substâncias (especificadas abaixo) foram obtidas da empresa Sigma Aldrich.

Proteínas - "Proteína de alta massa molar [BSA (Bovine Serum Albumine; 96% Purity)]" e "Proteína de baixa massa molar [L-Tryptophan (>98% Reagent Grade)]"

Ácido Húmico - "Standard III do fornecedor IHSS Suwannee River"

Neste teste foi registrado o declínio de fluxo utilizando solução incrustante sintética no interior do reator composta pela mistura de 5 g/L de bentonita, 100 mg/L de proteína e 20 mg/L de ácido húmico. E a composição usada na alimentação era de 100 mg/L de proteína e 20 mg/L de ácido húmico.

Nesse teste, o declínio do fluxo de permeado em função do tempo foi registrado durante quatro dias de operação da unidade usando esta solução incrustante, com uma diferença de altura entre o reator (T2) e tanque do permeado (T3) da 0,8 m, equivalente a TMP de 0,08 bar (8 kPa). As membranas utilizadas no teste foram M1 e M2 (montadas em paralelo), cujas características hidráulicas foram determinadas no teste de permeabilidade em água limpa.

Os resultados apresentados a seguir podem ser utilizados para avaliar e comparar o sistema de bancada com o comportamento típico de outras plantas que também utilizavam operação a pressão constante e sistema submerso em soluções hidrodinâmicas semelhantes.

O gráfico da Figura 31 ilustra o comportamento do fluxo em função do tempo e os valores de permeabilidade e resistência da membrana ao final da operação.

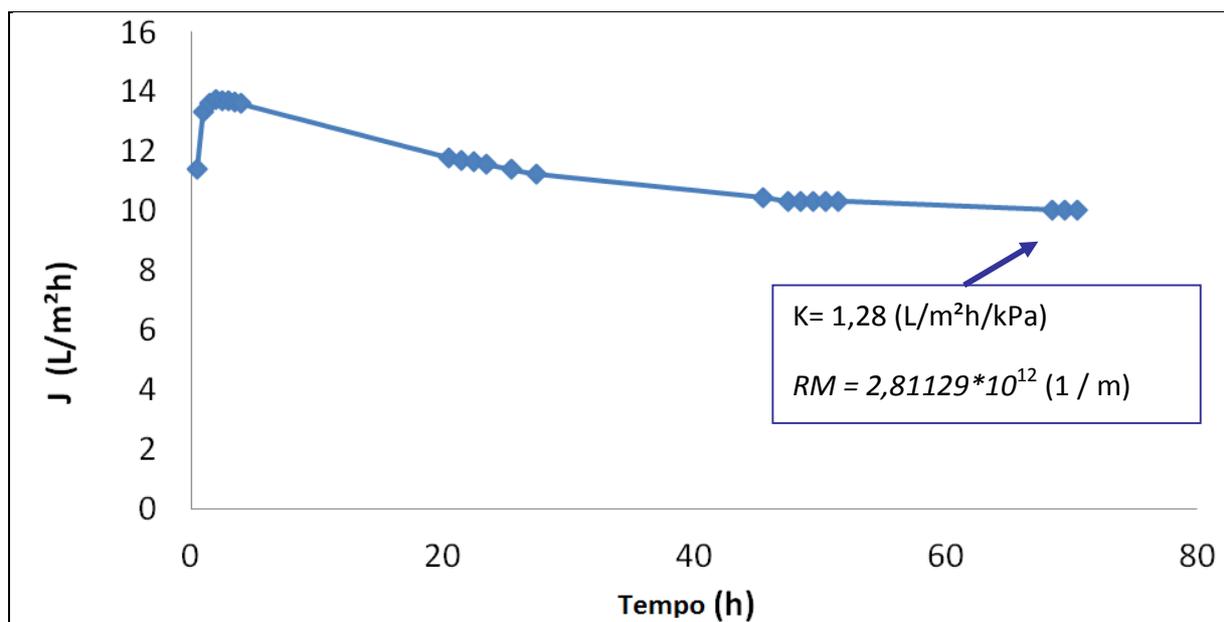


Figura 31: Gráfico de decaimento fluxo em função do tempo

Pode-se afirmar que o comportamento do fluxo obtido, ilustrado na Figura 31, foi o esperado. O fluxo começa elevado e, devido ao depósito de material incrustante na membrana, o mesmo vai diminuindo. Após certo intervalo de tempo, esse fluxo se estabiliza. O comportamento do fluxo em operação à pressão constante está semelhante ao que se encontra descrito no "The MBR Book"[1].

O acréscimo de fluxo observado inicialmente pode ser atribuído a presença de ar no interior do sifão no início da operação, causando temporária redução da pressão hidrostática do sistema.

A membrana submetida ao teste de "fouling" com solução incrustante apresentou uma permeabilidade final de 1,28 (L/m²h/kPa) e Resistência de $2,81129 \cdot 10^{12}$ (1 / m).

Depois de completar o teste de "fouling", as membranas foram submetidas a processo de limpeza sendo colocadas em uma solução de hipoclorito de sódio 0,5% durante uma noite (aproximadamente 12 h) para remoção da incrustação formada. Em seguida, as membranas foram extensivamente lavadas e, em seguida seu desempenho hidráulico foi medido novamente. Os resultados são mostrados na Tabela 13.

Tabela 13: Parâmetros de fluxo e Resistência da membrana nova x membrana após limpeza.

Fluxo com água limpa antes do teste (L/m ² h)	16,413
Fluxo com água limpa após limpeza (L/m ² h)	16,299
Resistência antes do teste (1/m)	1,720E+12
Resistência após limpeza (1/m)	1,732E+12

Os resultados da Tabela 13 mostraram que não houve redução significativa do fluxo e resistência da membrana após ser submetida a "fouling" e posterior limpeza com solução de 0,5% NaOCl, em relação aos valores obtidos na membrana com água limpa (antes do teste de "fouling"). Esse comportamento evidencia a eficiência no processo de limpeza empregado e a boa recuperação da membrana.

A partir dos testes realizados nos itens do Capítulo 5 foi elaborada uma aula prática sobre MBRs, suas características e parâmetros de operação. A aula segue no Apêndice 1.

6. Conclusões

O projeto demonstrou a viabilidade de unidade de MBR de bancada construídas a partir de elementos simples e de baixíssimo custo, mostrando ser um sistema altamente rentável e facilmente reprodutível .

O sistema mostrou-se adequado para determinação de parâmetros de operação possibilitando maior entendimento do comportamento da membrana e do sistema. Dessa forma, servindo para o seu propósito como ferramenta de ensino contribuindo para aumento conhecimento dessa tecnologia.

O processo de montagem dos módulos de membranas utilizado neste trabalho, foi eficiente e confiável resultando em sistemas sem vazamentos ou falhas, conforme mostra estabilidade no desempenho hidráulico medido.

Não foram observadas variações significativas dos parâmetros hidráulicos determinados com água limpa (Permeabilidade e Resistência), o que indica integridade da membrana (ausência de vazamentos ou problemas de colagem) e compactação adequada.

Os valores obtidos de Permeabilidade e da Resistência encontradas neste trabalho são coerentes com os valores presentes na literatura para membranas de PVDF de 0,04 μm de tamanho de poro, o que permite inferir que os módulos foram construídos com sucesso e que as membranas não sofreram dano.

O teste usando solução incrustante artificial para formação de "fouling" causou alterações do comportamento no fluxo de permeado conforme esperado, apresentando gradativa redução ao longo do tempo.

O processo de limpeza empregando hipoclorito (0,5% NaOCl) mostrou ser eficiente para remoção do material incrustante formado com utilização de solução sintética incrustante durante 4 dias de operação.

7. Sugestões

- Durante operação da unidade de bancada verificou-se a formação de bolhas no interior do tubo de permeado. Esse problema afeta o sifão, conseqüentemente reduzindo a TMP (pressão transmembrana), que é essencial para a eficiência do sistema. Portanto, é essencial que o tubo utilizado no experimento seja transparente (para que se possa visualizar as bolhas formadas), sendo recomendável adotar procedimento padrão de retirada das bolhas do tubo a cada 12 horas.
- Em estudos futuros incluir a execução de novos testes para a avaliação de outros parâmetros, tais como DQO, DBO, Sólidos suspensos e Sólidos suspensos voláteis no tanque de aeração, de forma a avaliar o desempenho completo do sistema nos aspectos biológicos, além dos hidrodinâmicos.
- No projeto, foi utilizada uma solução sintética, produzida no laboratório. Posteriormente, o MBR de bancada poderia ser utilizado no tratamento de esgoto doméstico, dessa forma, seu desempenho seria avaliado em circunstâncias mais similares à realidade.
- Em caso de tratamento de esgoto doméstico com o MBR de bancada, poderia ser realizada uma análise da remoção de patógenos.
- Outros testes seriam os de controle de indicadores como Nitrogênio Total e Fósforo Total.

8. Referências

1. Judd, S., *The MBR book: Principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment*. 2006: Elsevier.
2. Silva, M.K.d., *Biorreatores com Membranas: uma lternativa para o tratamento de efluentes*, UFRGS.
3. SkyJuice. 2013 [cited 2013 14/05/13]; Available from: www.skyjuice.com.au.
4. BRINDLE, K., STEPHENSON, T., *The Application of Membrane Biological Reactors for the Treatment of Wastewaters*. Biotechnology and Bioengineering, 1996. **49**: p. 601 – 610.
5. Sant'Anna Jr, G.L., *Tratamento Biológico de Efluentes: Fundamentos e Aplicações*. 2010 ed.
6. R., H.A.C.B.C.P.N. *Processos de separação por membranas*. 2006.
7. Hirani, Z.M., et al., *Peak flux performance and microbial removal by selected membrane bioreactor systems*. Water Research, 2010. **44**(8): p. 2431-2440.
8. Yang, W., N. Cicek, and J. Ilg, *State of art of membrane bioreactors: worldwide research and commercial applicatioon in North America*. Journal of membrane science, 2006.
9. Tchobanoglous G., B.F.L., Stensel H. D., *Wastewater Engineering: treatment and reuse*. 4th Edition ed, ed. McGraw-Hill. 2003.
10. Stephenson, T., et al., *Membrane Bioreators for waste water treatment*. IWA Pibleshing, 2000.
11. Viana, P.Z., *Biorreator com membrana aplicado ao tratamento de esgotos domésticos: Avaliação do desempenho de módulos de membranas com circulação externa*, 2004, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
12. M. Crespi, M.C.G., *Biorreatores de Membrana - Estado da Tecnologia. Aplicação ao tratamento e depuração de efluentes têxteis*, in *Revista Química Têxtil*.
13. Yang, W.C., N. and Ilg, J., *State of art of membrane biorreactors: Worldwide research and commercial applications in North America*. Journal of Membrane Science, 2006. **270**: p. 201-211.
14. Les jean, B.a.H., E. H., *Survey of the european MBR market: trends and perspectives*. Desalination, 2008. **231**(71-81).
15. Eaton, A.D., *Standard methods for the examination of water and wastewater*, ed. W.E. Federation. 2005, Washington, D. C.: American Water Works Association.
16. Cheryan, M., *Ultrafiltration and Microfiltration Handbook*. 1998: Technomic Publishing Company.
17. Bracklow, U., et al., *Influence of sludge loadings and types of substrates on nutrients removal in MBRs*. Desalination, 2010. **250**(2): p. 734-739.
18. Kraume, M. and A. Drews, *Membrane bioreactors in waste water treatment - Status and trends*. Chemical Engineering and Technology, 2010. **33**(8): p. 1251-1259.
19. Zhang, B., et al., *Floc size distribution and bacterial activities in membrane separation activated sludge processes for small-scale wastewater treatment/reclamation*. Water Science and Technology, 1997. **35**(6): p. 37-44.
20. Marrone, A., *Global Survey and Statistical Analysis of Pathogen Removal from Membrane Bio-Reactors*, in *Chemical Engineering 2012*, University of New South Wales.
21. Wen, Q., et al., *Fate of pathogenic microorganisms and indicators in secondary activated sludge wastewater treatment plants*. Journal of Environmental Management, 2009. **90**(3): p. 1442-1447.

22. Hirani, Z., DeCarolis, JF, Lehman, G, Adham, SS & Jacangelo, JG, *Occurrence and removal of microbial indicators from municipal wastewaters by nine different MBR systems*. Water Science and Technology, 2012. **66**(4): p. 865-871.
23. Zanetti, F., G. De Luca, and R. Sacchetti, *Performance of a full-scale membrane bioreactor system in treating municipal wastewater for reuse purposes*. Bioresource Technology, 2010. **101**(10): p. 3768-3771.
24. van den Akker, B., et al., *VALIDATION OF A FULL-SCALE MEMBRANE BIOREACTOR FOR WATER RECYCLING: CHARACTERISING PROCESS VARIABILITY*. paper presented to Proceeding of: Ozwater conference Sydney, Australia, 2012.
25. Ottoson, J., et al., *Removal of viruses, parasitic protozoa and microbial indicators in conventional and membrane processes in a wastewater pilot plant*. Water Research, 2006. **40**(7): p. 1449-1457.
26. Marti, E., et al., *Removal of microbial indicators from municipal wastewater by a membrane bioreactor (MBR)*. Bioresource Technology, 2011. **102**(8): p. 5004-5009.
27. Lucena, F., Duran, AE, Morón, A, Calderón, E, Campos, C, Gantzer, C, Skraber, S & Jofre, J, *Reduction of bacterial indicators and bacteriophages infecting faecal bacteria in primary and secondary wastewater treatments*. Journal of Applied Microbiology, 2004. **97**(5): p. 1069-1076.
28. Baker, R.W., *Membrane Technology and applications*. 2 edition ed. 2004.
29. *Nanoparticle Filtration*. [cited 2014 20/01/14]; Available from: <http://www.utwente.nl/tnw/mtg/people/phd/Trzaskus/Info/Trzaskus%20research%20long/>.
30. M., M., *Basic Principles of membranes technology*. 2 edition ed. 1996.
31. Drews, A., *Membrane fouling in membrane bioreactors—Characterisation, contradictions, cause and cures*. Journal of Membrane Science, 2010. **363**(1-2): p. 1-28.
32. Nam, N.H., *Decentralized Wastewater Treatment and Reclamation Using Membrane Bioreactor*, in *School of Environment, Resources and Development*2006, Asian Institute of Technology: Thailand.
33. Cui, Z.F., S. Chang, and A.G. Fane, *The use of gas bubbling to enhance membrane processes*. Journal of Membrane Science, 2003. **221**(1-2): p. 1-35.
34. Le-Clech, P., et al., *MBR focus: the operators' perspective*. Filtration & Separation, 2005. **42**(5): p. 20-23.
35. Field, R.W., et al., *Critical flux concept for microfiltration fouling*. Journal of Membrane Science, 1995. **100**(3): p. 259-272.
36. A, F., et al., *Elaborating the membrane life concept in a full scale hollow-fibers MBR*. Journal of Membrane Science, 2012. **421-422**: p. 349-354.
37. *Bunnings Warehouse*. [cited 2013 13/05]; Available from: http://www.bunnings.com.au/products_product_viscount-20l-heavy-duty-plastic-bucket_p4460449.aspx?search=buckets+20l&searchType=any&searchSubType=products.
38. *Grainger*. [cited 2013 15/05]; Available from: <http://www.grainger.com/Grainger/Float-Valve-6AMA1?Pid=search>.
39. *The Aquarium Shop Australia*. [cited 2013 13/05]; Available from: [http://www.theaquariumshop.com.au/shopexd.asp?id=2917&name=101Fish%20Flexible%20Aquarium%20Air%20Curtain%2075cm%20\(30%20inch\)](http://www.theaquariumshop.com.au/shopexd.asp?id=2917&name=101Fish%20Flexible%20Aquarium%20Air%20Curtain%2075cm%20(30%20inch)).
40. *Made in China* [cited 2013 13/05]; Available from: adevokocn.en.made-in-china.com/product/SBpEXPGKJfVx/China-1-4-Transparent-PVC-Clear-Hose-Pipe-Tube-6mm-9mm-.html.
41. *Marine Depot*. [cited 2013 13/05]; Available from: http://www.marinedepot.com/1_2_inch_Clear_Flexible_Vinyl_Tubing_Ft_Clear_Vinyl_Tubing-Plumbing_Parts-FT1313-FIFTTUVTCT-FT1313-vi.html.

42. *EzyLab.* [cited 2013 13/05]; Available from: <http://www.ezylab.com.au/clamps-and-stands/retort-clamp-plastic-coated.html>.
43. *U.S. Plastic Corp.* [cited 2013 13/05]; Available from: <http://www.usplastic.com/catalog/item.aspx?itemid=22928>.
44. *Boiler Supplies.* [cited 2013 13/05]; Available from: <http://www.boilersupplies.com/ballvalve/ballpricelist.html>.
45. *Automation Direct.* [cited 2013 15/05]; Available from: http://www.automationdirect.com/adc/Overview/Catalog/Pneumatic_Components/Flexible_Pneumatic_Tubing_-_a_Hoses/Straight_Nylon_Tubing/1-z-2_inch.
46. *Ebay - Araldite.* [cited 2013 13/05]; Available from: http://www.ebay.com.au/itm/SELLEYS-SELLEYS-200ML-SUPER-STRENGTH-ARALDITE-ARL200MSS-/400484609304?_trksid=p2047675.m1850&_trkparms=aid%3D222002%26algo%3DSIC.FIT%26ao%3D1%26asc%3D11%26meid%3D7618189094382386746%26pid%3D100011%26prg%3D1005%26rk%3D2%26sd%3D390524582204%26.
47. *ProFlo.* [cited 2013 13/05]; Available from: http://www.proflo.com/proflo/showRecordDetail.do?R=PROD_1352463&search=true.
48. *Craft Brewer.* [cited 2013 15/05]; Available from: <http://www.craftbrewer.com.au/shop/details.asp?PID=3255>.
49. *Drip Works.* [cited 2013 13/05]; Available from: <http://www.dripworks.com/product/14T-50>.

APÊNDICE

Aula Prática de MBR

1) Introdução

O biorreator com membrana (MBR) consiste em um reator com biomassa em suspensão e uma unidade com membranas para a separação de sólidos, promovendo, assim, a biodegradação dos poluentes e a separação de sólidos de forma simultânea [1].

Resumidamente, a função do biorreator é decompor a matéria orgânica enquanto a membrana separa fisicamente a fase sólida da líquida [1].

Os sistemas de MBR apresentam dois tipos de configurações: com módulo de membrana submerso ou com módulo de membrana externo, conforme ilustra a Figura 1 [2].

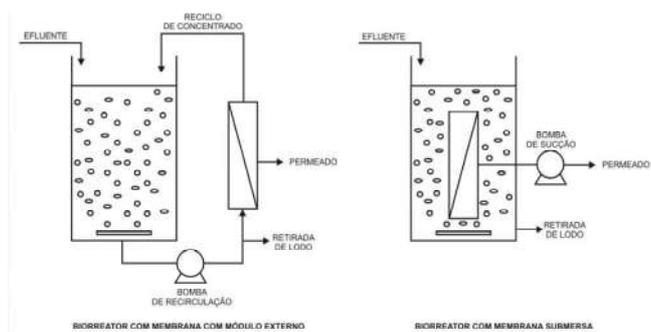


Figura 1 : Configurações de MBR: a) módulo externo , b) módulo submerso [2]

Na configuração de módulo externo, as membranas são instaladas fora do tanque aerado. O conteúdo do reator é bombeado para os módulos de membrana, normalmente tubulares, e escoam paralelamente à superfície da membrana, enquanto permeado é transportado (recuperado) transversalmente. A velocidade de circulação promove a turbulência próxima a membrana, para prevenir deposição e garantir elevado fluxo permeado. O permeado é recuperado por diferença de pressão positiva gerada pela vazão de circulação. Esse aspecto implica em alta perda de carga e, com isso, alto consumo energético, que pode ser até 10 vezes maior do que o dos processos convencionais de lodos ativados [1].

No tipo submerso, o módulo ou feixe de membranas é imerso no tanque aerado e o permeado normalmente é succionado através das paredes da membrana. Em geral, os sistemas com membranas submersas utilizam membranas tipo fibra oca ou placa plana, sem carcaça envoltória, de forma que o conteúdo do biorreator está em contato com a superfície externa das membranas. Para manter fluxo estável, e limpar a superfície da membrana, ar comprimido é introduzido através do sistema de distribuição na base do módulo. O fluxo de permeação é obtido, usualmente, por sucção, alternada com retrolavagem [1].

Nesta prática, utiliza-se uma unidade de MBR de bancada constituída por módulo de membrana submerso com aeração e utilizando efluente sintético (solução inconstante) para cálculo de parâmetros de operação do módulo de membrana. Não serão abordados aspectos biológicos desse processo.

2) Descrição da Unidade de Bancada de MBR

Os módulos foram montados com membranas de fibra oca de tamanho de poro 0,04 μm , mostradas na Figura 2, fabricadas do material de PVDF (poli fluoreto de vinilideno) fornecidos pela Siemens.



Figura 2. Membrana de fibra oca do modulo

A Figura 3 ilustra fluxograma da Unidade de Bancada basicamente constituída por: Tanque de alimentação (T1), reator biológico (T2), módulo de membrana (MB), bomba para aeração (A1), tanque de permeado (T3) e tubos, interligações e válvulas, indicados na tabela 1.

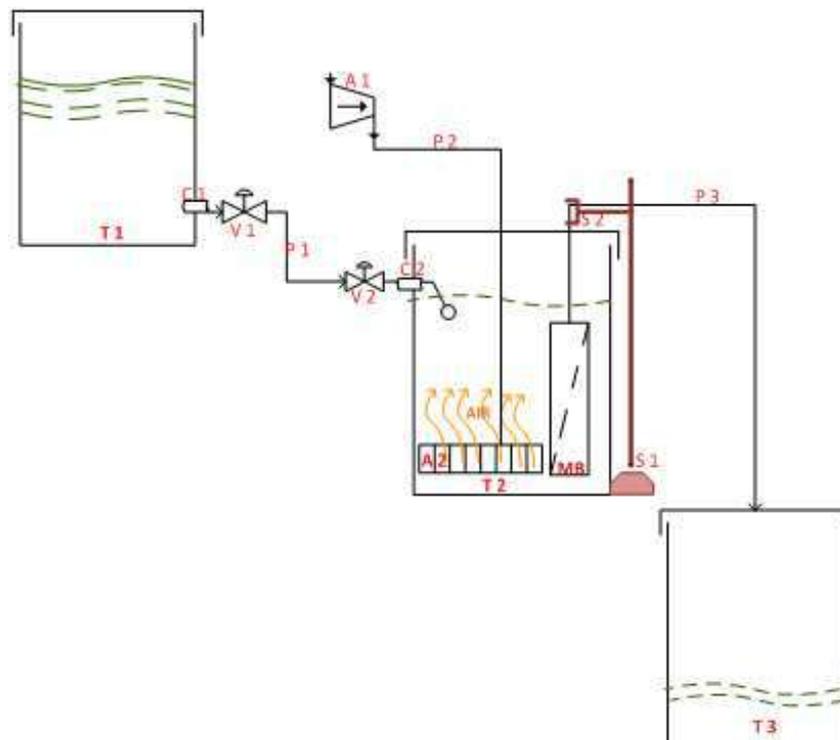


Figura 3. Fluxograma da Unidade de Bancada de MBR

Tabela 1. Materiais utilizados na montagem da unidade MBR de bancada

<i>Item</i>	<i>Descrição</i>	<i>Item</i>	<i>Descrição</i>
<i>T1, T2, T3</i>	<i>Balde Plástico 20L</i>	<i>C1,C2</i>	<i>Bocal de Rosca (1/2")</i>
<i>V2</i>	<i>Cisterna de Banheiro</i>	<i>V1</i>	<i>Válvula Esfera</i>
<i>A1</i>	<i>Bomba de ar para aquário</i>	<i>Ht</i>	<i>Tubo Rígido</i>
<i>P2, P3</i>	<i>Tubo (1/4")</i>	<i>C3</i>	<i>Conector T</i>
<i>P1</i>	<i>Tubo (1/2")</i>	<i>Hc</i>	<i>Abraçadeira de Mangueira</i>
<i>A2</i>	<i>Difusor de Ar para Aquário</i>	<i>Sp</i>	<i>Tubo de Silicone</i>
<i>Mb</i>	<i>Módulos de Membrana (0,03677m² - área total)</i>		
<i>S1</i>	<i>Stand de Laboratório</i>	<i>S2</i>	<i>Garra</i>

Materiais complementares para prática: Cronômetro, Balança, Fita métrica

3) Montagem da Unidade

1. Posicione o tanque de MBR sobre a mesa cheio de água limpa e coloque as membranas submersas no interior do mesmo.
2. Sobre a mesa posicione o tanque de alimentação (cheio durante a operação) e a bomba de ar de forma que ambos fiquem acima do nível do tanque de MBR.
3. Dentro do tanque de MBR posicione o difusor de ar de forma que o mesmo proporcione uma aeração uniforme em todo o tanque
4. Posicione o tanque de Permeado no chão de forma que haja uma diferença de altura de aproximadamente 1m entre o nível do tanque de MBR e o fim do tubo transparente.
5. Utilize garras para manter o módulo de membranas e o tubo transparente posicionados corretamente como ilustrado na Figura 3.

4) Descrição da prática e cálculo de parâmetros de operação da membrana

A prática será composta de 3 etapas: teste com água limpa, teste com efluente sintético (solução incrustante) e limpeza da membrana

4.1.) Teste com água limpa:

Objetivo: Determinar permeabilidade hidráulica da membrana e resistência com água limpa

Método do teste

1. Monte de acordo com item 3.1
2. Inicie a operação fazendo um sifão que leva a água do tanque de MBR até o tanque de permeado.
3. Marque com o cronômetro os tempos de 20min, 40min e 60min após o início da operação, medindo a massa de água no tanque de permeado com a balança.

Observações:

- É muito importante garantir que não há ar no tubo para que o sifão funcione com a maior coluna de água possível.
- Coloque outro recipiente para receber o permeado enquanto as medida na balança está sendo feita, a operação é contínua.
- Nunca deixe o tanque de alimentação esvaziar-se por completo, caso isso ocorra, o nível do tanque de MBR irá cair, comprometendo a operação.
- Completar a Tabela 2 com parâmetros indicados para cálculo do fluxo, permeabilidade a água limpa, e resistência conforme equações indicadas na Tabela 4.

Tabela 2. Cálculo da Permeabilidade Hidráulica e Resistência da membrana com água limpa

Massa de água (g)	Tempo (s)	Vazão (L/h)	Fluxo (LMH)	TMP (kPa)	Permeabilidade (LMH/kPa)	Resistencia (1/m)

A partir destes dados obtidos, comentar a condição de integridade do módulo de membrana.

4.2.) Teste com efluente sintético(avaliação de “fouling”)

Objetivo: Acompanhar declínio do fluxo em função do tempo e determinar permeabilidade e resistência da membrana utilizando efluente sintético descrito abaixo.

O efluente sintético a ser usado é uma solução de bentonita. Em caso de haver diferentes grupos realizando o experimento devem ser usadas as concentrações de 5 g/L, 10 g/L, 15 g/L e 20 g/L.

Método do teste

- 1) Monte o equipamento da mesma forma que no procedimento anterior, de acordo com item 3.1
- 2) Insira a solução incrustante com a concentração especificada no tanque de MBR e no tanque de alimentação e submerja o módulo de membranas.
- 1) Com o cronômetro marque os tempos de 30min, 1h, 2h, 4h,12h e 24h após o início da operação, medindo a massa de permeado em cada um desses tempos.
- 2) Preencher a Tabela 3 com esses dados e calcular os valores de permeabilidade e resistência usando equações da Tabela 4.
- 3) Com os dados obtidos no teste é possível construir um gráfico do Fluxo (L/h*m²) x Tempo (h).

Após a construção do gráfico discuta os resultados obtidos visto que o declínio do Fluxo é esperado. Calcule os valores de Permeabilidade e Resistência finais e iniciais. Discuta os resultados obtidos.

Tabela 3. Cálculo da Permeabilidade e Resistência da membrana com solução incrustante

Massa de água (g)	Tempo (s)	Vazão (L/h)	Fluxo (LMH)	TMP (kPa)	Permeabilidade (LMH/kPa)	Resistencia (1/m)

Tabela 4. Cálculo de parâmetros de controle de teste

PARÂMETROS	CÁLCULO
Fluxo de Permeado (J)	$J\left(\frac{L}{m^2 h}\right) = \frac{Q_i\left(\frac{L}{h}\right)}{A(m^2)}$
Pressão Transmembrana (Transmembrane Pressure -TMP) a partir da pressão hidráulica	$TMP(kPa) = 10^{-3} \cdot \rho\left(\frac{kg}{m^3}\right) g\left(\frac{m}{s^2}\right) h(m)$
Permeabilidade Hidráulica (K)	$K (L/(m^2 h kPa)) = \frac{J (L/m^2 h)}{TMP (kPa)}$
Resistência (R)	$Rm\left(\frac{1}{m}\right) = \frac{TMP(kPa)}{\mu(kPa \cdot s)J\left(\frac{m^3}{m^2 \cdot s}\right)}$

Onde:

- Q = Vazão
- ρ = Densidade da água (1000 kg/m³)
- g = Gravidade (9,81 m/s²)

- h = Diferença de altura (m) entre a superfície da água sob a qual o módulo de membrana está e o fim do tubo de permeado
- $\mu = \mu(\text{água}) = 0,001 \text{ (Pa.s)} = 10^{-6} \text{ (kPa.s)}$

4.3.) Avaliação da eficiência da limpeza das membranas

Método de teste

- 1) Após a operação com solução incrustante, faça a limpeza das membranas em solução NaOCl 0,5% por aproximadamente 12h.
- 2) Execute novamente a operação e os cálculos dos testes com água limpa do item 4.1.
- 3) Compare os resultados obtidos e discuta a eficiência da limpeza das membranas com base na comparação dos resultados obtidos antes e depois da operação com material incrustante e da limpeza. Utilize Tabela 5.

Tabela 5. Valores de Fluxo e Resistência da membrana nova x membrana após limpeza.

Fluxo com água limpa antes do teste (L/m ² h)	
Fluxo com água limpa após limpeza (L/m ² h)	
Resistência antes do teste (1/m)	
Resistência após limpeza (1/m)	

5) Referências

1. BRINDLE, K., STEPHENSON, T, *The Application of Membrane Biological Reactors for the Treatment of Wastewaters*. Biotechnology and Bioengineering, 1996. 49: p. 601 – 610.
2. Sant`Anna Jr, G.L., *Tratamento Biológico de Efluentes: Fundamentos e Aplicações*. 2010 ed.