

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**Efeito das condições hidrodinâmicas no
desempenho de um Biorreator com
Membranas Submersas em pressão
constante**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Ígor Renz Cadore

Porto Alegre

2015

AGRADECIMENTOS

À minha família, Lucas, Otacir e Rosani, por todos os ensinamentos prestados em minha vida e pelo apoio incondicional durante todo o período de realização deste trabalho.

Às minhas orientadoras, Isabel e Liliane, pelos conselhos e incentivos tanto no trabalho como na vida pessoal.

Aos meus colegas do LASEM, pelos momentos de discussão científica, assim como pelas ocasiões divertidas e nutritivas vivenciadas durante a rotina de trabalho.

Ao Maurício Kipper da Silva, por toda ajuda no início da operação do sistema.

Ao bolsista Itallo Nebenzahl, pelo auxílio nas análises de matéria orgânica.

Aos funcionários e servidores do DEQUI, assim como do setor de transporte da UFRGS.

Aos funcionários da ETE São João Navegantes do DMAE, por estarem sempre dispostos a ajudar nas ocasiões de coleta de lodo.

RESUMO

O processo de Biorreatores com Membranas (BRM) foi desenvolvido no final da década de 1960, consistindo em um sistema que associa o tratamento biológico de efluentes com o mecanismo de separação por membranas, e apresenta vantagens com relação ao tratamento convencional, tais como maior eficiência de tratamento e um menor espaço físico de instalação para a mesma capacidade de tratamento. O fenômeno de incrustação das membranas (em inglês, *fouling*) representa a principal limitação desse processo, de modo que uma das condições operacionais mais importantes na prevenção da incrustação em um sistema BRM Submerso (BRMS) é a vazão de aeração. Diante desta situação, o objetivo do trabalho consiste em avaliar os efeitos das condições hidrodinâmicas no desempenho do processo, tais como vazão de aeração, densidade de empacotamento do módulo de membranas e geometria dos aeradores. O sistema utilizado no trabalho consistiu em um BRMS automatizado, operando em pressão constante e de forma contínua, durante um período de 4 dias. Os módulos foram construídos com membranas poliméricas de microfiltração do tipo fibra oca, cujo material foi a poli(éter)-imida (PEI). Três diferentes vazões de aeração foram estudadas (2, 5 e 8 L.min⁻¹), mostrando, a partir dos resultados, que existe uma vazão de aeração limite benéfica ao sistema e que, acima deste valor, um melhor desempenho não pode ser atingido, inclusive, podendo prejudicá-lo. Para o sistema de estudo, a vazão de 5 L.min⁻¹ apresentou o melhor desempenho, seguido de 8 e 2 L.min⁻¹. O estudo da densidade de empacotamento do módulo mostrou que esta é uma variável que também exerce influência no desempenho do processo de BRMS. Módulos com dois diferentes diâmetros foram testados (2,54 cm e 1,91 cm); o melhor resultado foi observado no módulo de maior diâmetro. A menor densidade de empacotamento resulta em um maior espaçamento entre as fibras, provocando uma aeração mais homogênea no interior do feixe de membranas. As duas geometrias de aeração testadas (Modo 1 e Modo 2) apresentaram resultados semelhantes de fluxo permeado, indicando que o Modo 2 de aeração não melhorou o desempenho do processo como se esperava. A maior homogeneidade de aeração no interior de feixe, a partir de aeradores construídos com as próprias fibras, não foi atingida, mostrando que um novo projeto de aeradores deve ser estudado. Em todas as condições hidrodinâmicas testadas, a eficiência do tratamento foi verificada, uma vez que a remoção de matéria orgânica para COT e DQO foi de 96% e 93%, respectivamente. Propriedades do permeado, como condutividade elétrica, pH e turbidez foram mensuradas, apresentando variações menores que as medidas do efluente, revelando a capacidade que o sistema apresenta em suportar as variações na corrente de alimentação.

Palavras-chave: Biorreator com Membranas Submersas, aeração, densidade de empacotamento, pressão constante, microfiltração, fibra oca.

ABSTRACT

The Membrane Bioreactor (MBR) process was developed in the late 1960. The system consists in a combination of biological process and membrane separation mechanism, and the advantages with respect of conventional treatment are the higher treatment efficiency and a smaller area of installation for the same treatment capacity. The main limitation of this process is the membrane fouling, in a way that air flow rate represents an important operating condition to prevent the fouling formation in Submerged Membrane Bioreactors (SMBR). In this sense, the aim of this work is to evaluate the effects of hydrodynamic conditions on process performance, such as air flow rate, packing density of the membrane module and aeration geometry. The system used consists in a pilot-scale SMBR, which operates at constant pressure and continuous mode during a period of 4 days. The modules were built with hollow fiber polymeric microfiltration membrane and the material is poly(ether)imide (PEI). For the three different air flow rates studied (2, 5 and 8 L.min⁻¹), results showed there is a limit value for this parameter, in which above this value a better performance will not be obtained, even can be worse. The air flow rate of 5 L.min⁻¹ presented the best performance, followed by 8 and 2 L.min⁻¹. The module packing density study for two diameters (0.75 and 1 inch), the best result was observed in the larger diameter module, because lower packing density causes more space between fibres, increasing the aeration homogeneity inside de fibre bundle. Both aeration geometry tested showed similar permeate flows, indicating the different geometry used did not affect the performance process. The aerators constructed with the hollow fibers did not promote aeration homogeneity inside the bundle, and new aeration geometry must be projected. For all hydrodynamics conditions, the system treatment was efficient in removing organical matter, since the removal for TOC and COD was 96% and 93%, respectively. Permeate properties such as electrical conductivity, pH and turbidity measurements presented minor variations than effluent properties measurements, showing the system capacity to withstand with feed stream variations.

Key-words: Submerged Membrane Bioreactor (SMBR), aeration, packing density, constant pressure, microfiltration, hollow fiber.

SUMÁRIO

1 Introdução	14
2 Fundamentos Teóricos e Revisão Bibliográfica	17
2.1 Processos de Separação com Membranas	17
2.2 Processos de Biorreatores com Membranas	18
2.3 Comparação entre os processos de tratamento convencional de efluentes (TCE) e BRM	20
2.4 Tratamento biológico de efluentes.....	22
2.5 Filtração e Transporte através da Membrana	24
2.6 Incrustações em BRM	26
2.6.1 Influência das características da membrana.....	27
2.6.2 Influência das características da biomassa.....	29
2.6.3 Influência das condições operacionais.....	30
2.6.4 Modelagem de Hermia para mecanismos de incrustação.....	33
2.7 Influência das condições hidrodinâmicas.....	35
2.7.1 Homogeneidade de aeração.....	36
2.7.2 Efeitos globais da aeração.....	37
2.8 Considerações finais sobre a Revisão Bibliográfica.....	39
3 Materiais e Métodos	40
3.1 Sistema de Biorreator com Membranas.....	40
3.1.1 Membrana e módulos	44
3.1.2 Sistema de aeração.....	47
3.2 Solução de alimentação	49
3.3 Ensaio de permeação.....	49
3.3.1 Compactação da membrana.....	49
3.3.2 Fluxo Crítico	50
3.3.3 Operação com lodo ativado	50
3.4 Caracterização da Membrana.....	52
3.4.1 Morfologia.....	53

3.4.2	Hidrofilicidade	53
3.4.3	Permeância Hidráulica.....	53
3.5	Técnicas analíticas	54
3.5.1	Determinação da Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Carbono Orgânico Total (COT).....	54
3.5.2	Medidas de condutividade elétrica, pH e turbidez	54
3.5.3	Teor de sólidos	55
4	Resultados e Discussão	56
4.1	Pré-operação do sistema BRM.....	56
4.2	Caracterização da Membrana.....	58
4.2.1	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	58
4.2.2	Hidrofilicidade	60
4.2.3	Compactação	61
4.2.4	Permeância Hidráulica.....	62
4.3	Permeação com lodo ativado	63
4.3.1	Avaliação do fluxo crítico	64
4.3.2	Avaliação da vazão de aeração	66
4.3.3	Avaliação da densidade de empacotamento do módulo	74
4.3.4	Avaliação do modo de aeração.....	77
4.4	Eficiência do tratamento	84
5	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.....	88
6	Referências Bibliográficas	90
	Anexo A - Conexões Elétricas do Sistema BRM.....	96
	Anexo B - Dados experimentais.....	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Configuração BRM externo (Silva, 2009).	18
Figura 2.2: Biorreator com Membranas Submersas (Silva, 2009).	19
Figura 2.3: Fluxograma do processo de BRM (Silva, 2009).	20
Figura 2.4: Fluxograma do processo convencional de tratamento de efluentes (Silva, 2009).	21
Figura 2.5: Representação qualitativa da queda de desempenho dos processos de BRM em condições de pressão constante e fluxo constante.	22
Figura 2.6: Modos de filtração para processos de separação por membranas.....	24
Figura 2.7: Principais fatores que influenciam no fenômeno de incrustação das membranas em sistemas BRMS, com a lista das variáveis envolvidas para cada um. Adaptado do trabalho de Silva (2009).	27
Figura 2.8: Ilustração típica do fluxo permeado em função da pressão transmembrana para o solvente e para a solução, com destaque para o fluxo limite (Silva, 2009).....	31
Figura 2.9: Representação esquemática da heterogeneidade de aeração em um sistema BRMS. Adaptado de Nguyen Cong Duc <i>et al.</i> (2008).	36
Figura 2.10: Variação do fluxo crítico em função da velocidade superficial de gás. Adaptado de Howell <i>et al.</i> (2004).	38
Figura 3.1: Ilustração esquemática do sistema de biorreator com membranas. 1 – Tanque de armazenamento do efluente; 2 – Tanque de armazenamento do permeado; 6 – Biorreator; 7 – Tanque de coleta do permeado; 3, 4, 5 e 8 – Válvulas de controle do tipo solenoide; 9 – Bomba de retrolavagem; 10 – Bomba de esvaziamento do tanque 7. (Silva, 2009).	41
Figura 3.2: Fotografia do sistema BRMS.....	41
Figura 3.3: Célula de carga fixada ao tanque de coleta de permeado utilizada para medida de vazão do processo.	42
Figura 3.4: Interface gráfica do sistema BRM no modo de operação contínua (Silva, 2009).	43
Figura 3.5: Primeira etapa de colagem do módulo de membranas. A - Inserção das fibras; B - Colagem das fibras em um tampão de PVC de 1 in (2,54 cm).	45
Figura 3.6: A – Ilustração esquemática do envelope (Silva, 2009); B – Colagem das fibras no interior de um <i>niple</i> de PVC de 2.54 cm (1 in); C – Visão superior.	46
Figura 3.7: A – Fotografia do aerador utilizado no fundo do tanque; B – Detalhe da formação de bolhas.	47
Figura 3.8: Fotografia dos aeradores utilizados no interior do módulo de membranas.	48

Figura 3.9: A - Fluxograma do sistema de aeração; B - Aeração Modo 1 (válvula fechada); C - Aeração Modo 2 (válvula aberta).....	48
Figura 4.1: Valores de pressão absoluta do sistema ao longo do tempo para diferentes valores fixados.....	57
Figura 4.2: Fotomicrografia da superfície da membrana obtida por MEV (5 kV). Aumento de 1.000x.....	59
Figura 4.3: Fotomicrografias da seção transversal da membrana PEI utilizada obtidas por MEV (5 kV). A – Aumento de 130 x; B – Aumento de 350 x.	59
Figura 4.4: Fotografias das medidas de ângulo de contato. A, B e C - Membrana nova; D, E e F - Membrana usada.....	61
Figura 4.5: Resultados do fluxo permeado de água destilada versus tempo no experimento de compactação da membrana nova na pressão absoluta de 300 mbar.	61
Figura 4.6: Fluxo permeado em função da pressão transmembrana: permeância hidráulica de dois módulos diferentes. Módulo 1 – permeância hidráulica de 73 LMH/bar e R ² de 0,9883. Módulo 2 – permeância hidráulica de 58 LMH/bar e R ² de 0,9872.	63
Figura 4.7: Resultados da avaliação do fluxo crítico realizada nas seguintes condições hidrodinâmicas: vazão de aeração de 2 L.min ⁻¹ , módulo de 3/4 in e aeração Modo 1 e intervalo de tempo de 200 min.....	65
Figura 4.8: Fluxo permeado normalizado ao longo tempo para ensaios de permeação com lodo em diferentes vazões de aeração: 2, 5 e 8 L.min ⁻¹ ; pressão transmembrana de 600 mbar, temperatura de 20°C e o diâmetro do módulo utilizado é de ¾ in.	66
Figura 4.9: Fotografia do acúmulo de lodo na superfície da membrana, na parte inferior do módulo, na condição de 2 L.min ⁻¹ , pressão transmembrana de 600 mbar, temperatura de 27°C, diâmetro do módulo de ¾ in, concentração SSV do lodo de 8.000 mg.L ⁻¹	68
Figura 4.10: Fluxo permeado normalizado ao longo do tempo para ensaios de permeação com lodo em diferentes vazões de aeração: 2, 5 e 8 L.min ⁻¹ ; pressão transmembrana de 600 mbar, temperatura de 20°C e o diâmetro do módulo utilizado é de 1 in.....	71
Figura 4.11: Fluxo permeado normalizado utilizando módulo de 1,91 cm (3/4 in) e 2,54 cm (1 in), para o nível de aeração de 2 L.min ⁻¹ ; pressão transmembrana de 600 mbar, temperatura de 20°C.....	74
Figura 4.12: Fluxo permeado normalizado utilizando módulo de 1,91 cm (3/4 in) e 2,54 cm (1 in), para o nível de aeração de 5 L.min ⁻¹ ; pressão transmembrana de 600 mbar, temperatura de 20°C.....	75

Figura 4.13: Fluxo permeado normalizado utilizando módulo de 1,91 cm (3/4 in) e 2,54 cm (1 in), para o nível de aeração de 8 L.min ⁻¹ ; pressão transmembrana de 600 mbar, temperatura de 20°C.....	75
Figura 4.14: Disposição do modo 2 de aeração utilizado. A - Fibra dos aeradores; B - Bolhas formadas pelos aeradores.....	77
Figura 4.15: Fluxo normalizado para os dois modos distintos de aeração, na vazão de 2 L.min ⁻¹ , módulo de 3/4 in; pressão transmembrana de 600 mbar, temperatura de 20°C.	78
Figura 4.16: Fluxo normalizado para os dois modos distintos de aeração, na vazão de 5 L.min ⁻¹ , módulo de 3/4 in; pressão transmembrana de 600 mbar, temperatura de 20°C.	78
Figura 4.17: Fluxo normalizado para os dois modos distintos de aeração, na vazão de 8 L.min ⁻¹ , módulo de 3/4 in; pressão transmembrana de 600 mbar, temperatura de 20°C.	79
Figura 4.18: Fotografia da fibra de aeração solta ao longo do processo, na vazão de 5 L.min ⁻¹ , Modo 2 de aeração.	80
Figura 4.19: Fluxo permeado normalizado ao longo tempo, para o Modo 2 de aeração, para diferentes vazões de aeração. O diâmetro do módulo utilizado é de 3/4 in; pressão transmembrana de 600 mbar, temperatura de 20°C.	81
Figura 4.20: Fluxo normalizado para os dois modos distintos de aeração, na vazão de 2 L.min ⁻¹ , módulo de 1 in; pressão transmembrana de 600 mbar, temperatura de 20°C.	82
Figura 4.21: Fluxo normalizado para os dois modos distintos de aeração, na vazão de 5 L.min ⁻¹ , módulo de 1 in; pressão transmembrana de 600 mbar, temperatura de 20°C.	82
Figura 4.22: Fluxo normalizado para os dois modos distintos de aeração, na vazão de 8 L.min ⁻¹ , módulo de 1 in; pressão transmembrana de 600 mbar, temperatura de 20°C.	83
Figura A.6.1: Conexões elétricas dos equipamentos na voltagem de 24 V. Adaptado de Silva (2009).....	96
Figura A.6.2: Conexões elétricas dos equipamentos na voltagem de 220 V. Adaptado de Silva (2009).....	98
Figura A.6.3: Caixa de conexões elétricas dos equipamentos e acessórios. Adaptado de Silva (2009).....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Equacionamento e ilustração dos modelos de mecanismo de incrustação. Adaptado de Silva (2009).	34
Tabela 3.1: Características da membrana informadas pelo fabricante.	44
Tabela 3.2: Composição do efluente sintético (Silva, 2009).....	49
Tabela 3.3: Condições de operação dos ensaios com lodo ativado no sistema BRM. 52	
Tabela 4.1: Valores de massa medidos pela célula de carga e respectivo erro máximo para cada medida.	57
Tabela 4.2: Ângulo de contato médio para membrana nova e membrana usada.	60
Tabela 4.3: Valores de fluxo permeado e permeância hidráulica iniciais e finais para os diferentes níveis de aeração testados utilizando módulo de diâmetro 1,91 cm (3/4 in).	67
Tabela 4.4: SST e SSV iniciais e finais para os diferentes níveis de aeração testados com módulo de diâmetro 1,91 cm (3/4 in).	69
Tabela 4.5: Coeficientes de determinação (R^2) dos modelos de incrustação de Hermia para as diferentes vazões de aeração testadas para o módulo de 1,91 cm (3/4 in). ...	70
Tabela 4.6: Valores de fluxo permeado e permeância hidráulica iniciais e finais para os diferentes níveis de aeração testados utilizando módulo de diâmetro 2,54 cm (1 in). .	71
Tabela 4.7: SST e SSV iniciais e finais para os diferentes níveis de aeração testados com módulo de diâmetro 2,54 cm (1 in).	72
Tabela 4.8: : Coeficientes de determinação (R^2) dos modelos de incrustação de Hermia para as diferentes vazões de aeração testadas para o módulo de 2,54 cm (1 in).	73
Tabela 4.9: Fluxo permeado inicial e final para o módulo de $\frac{3}{4}$ in e 1 in, nas condições de aeração de 2, 5 e 8 L.min ⁻¹	76
Tabela 4.10: Fluxo inicial e final para os dois modos distintos de aeração testados, para os 3 níveis de aeração, utilizando módulo de 1,91 cm (3/4 in).	79
Tabela 4.11: Fluxo inicial e final para os dois modos distintos de aeração testados, para os 3 níveis de aeração, utilizando módulo de 2,54 cm (1 in).	83
Tabela 4.12: Dados de COT e DQO do efluente e do permeado utilizados para determinar a remoção de matéria orgânica do tratamento.	85
Tabela 4.13: Valores de condutividade elétrica, pH e turbidez para efluente e permeado.	86
Tabela B.1: Dados experimentais de mudança de set-point de pressão (Figura 4.1). Os valores de pressão estão representados em mbar.....	100

Tabela B.2: Dados experimentais de fluxo permeado para 1ª e 2ª compactação, para dois módulos distintos (Figura 4.5). Os valores de fluxo permeado estão representados em L/(m ² .h).....	101
Tabela B.3: Dados experimentais para determinação da permeância hidráulica dos módulos de membranas (Figura 4.6).....	101
Tabela B.4: Dados experimentais do teste de fluxo crítico (Figura 4.7). Os processos foram realizados na vazão de 2 L.min ⁻¹ , módulo de 1,91 cm (3/4 in) e Modo 1 de aeração (somente no fundo).....	102
Tabela B.5: Dados de fluxo permeado ao longo tempo para ensaios de permeação com lodo em diferentes vazões de aeração (Figura 4.8), utilizando módulo de 1,91 cm (3/4 in).....	103
Tabela B.6: Dados de fluxo permeado ao longo do tempo para ensaios de permeação com lodo em diferentes vazões de aeração (Figura 4.10), utilizando módulo de 2,54 cm (1 in).....	104
Tabela B.7: Dados de fluxo permeado utilizando módulos com dois diâmetros distintos (Figuras 4.11, 4.12 e 4.13). Na tabela, “t” representa o tempo (em horas) e o fluxo permeado está expresso em L/(m ² .h).....	105
Tabela B.8: Fluxo permeado para os dois modos distintos de aeração, nas vazões de aeração de 2, 5 e 8 L.min ⁻¹ , utilizando módulo de 3/4 in (Figuras 4.15, 4.16, 4.17). Na tabela, “t” representa o tempo (em horas) e o fluxo permeado está expresso em L/(m ² .h).....	106
Tabela B.9: Dados de fluxo permeado ao longo tempo, para o Modo 2 de aeração, em diferentes vazões de aeração, utilizando módulo de 1,91 cm (3/4 in) (Figura 4.19). Na tabela, “t” representa o tempo (em horas) e o fluxo permeado está expresso em L/(m ² .h).....	107
Tabela B.10: Fluxo permeado para os dois modos distintos de aeração, nas vazões de aeração de 2, 5 e 8 L.min ⁻¹ , utilizando módulo de 2,54 cm (1 in) (Figuras 4.20, 4.21, 4.22). Na tabela, “t” representa o tempo (em horas) e o fluxo permeado está expresso em L/(m ² .h).....	108

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	Área de membrana (m^2)
BRM	Biorreator com Membranas
BRMS	Biorreator com Membranas Submersas
CLP	Controlador Lógico Programável
COT	Carbono Orgânico Total ($mg.L^{-1}$)
DMAE	Departamento Municipal de Água e Esgoto
DQO	Demanda Química de Oxigênio ($mg.L^{-1}$)
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
F/M	Carga orgânica mássica ($kgDQO.kgSSV^{-1}.d^{-1}$)
J_0	Fluxo permeado inicial ($L.m^{-2}.h^{-1}$)
J_{20}	Fluxo permeado do processo na temperatura de 20 °C
J_l	Fluxo permeado líquido ($L.m^{-2}.h^{-1}$)
J_p	Fluxo permeado ($L.m^{-2}.h^{-1}$)
J_{ss}	Fluxo permeado no estado estacionário ($L.m^{-2}.h^{-1}$)
K_c	Constante do modelo de Hermia para bloqueio completo (m^{-1})
K_i	Constante do modelo de Hermia para bloqueio intermediário (m^{-1})
K_p	Constante do modelo de Hermia para bloqueio padrão ($m^{-1/2}.s^{-1/2}$)
K_t	Constante do modelo de Hermia para camada de torta ($s.m^{-2}$)
LMH	Unidade de medida de fluxo permeado ($L.m^{-2}.h^{-1}$)
L_p	Permeância hidráulica ($L.m^2.h^{-1}.bar^{-1}$)
MBR	Membrane Bioreactor
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MLSS	Mixed Liquor Suspended Solids
n	Constante do modelo de Hermia
PEI	Poli(éter)imida
PSM	Processos de Separação por Membranas
PTM	Pressão Transmembrana (bar ou mbar)
PVC	Policloreto de Vinila
Q	Taxa volumétrica de efluente ($m^3.s^{-1}$)

Q_P	Taxa volumétrica de permeado ($m^3.h^{-1}$)
Q_{PR}	Taxa volumétrica de processo ($m^3.s^{-1}$)
Q_{RL}	Taxa volumétrica de retrolavagem ($m^3.s^{-1}$)
R^2	Coefficiente de determinação para modelagem de Hermia
S_0	Concentração de substrato na alimentação ($kg.m^{-3}$)
SST	Sólidos suspensos totais ($mg.L^{-1}$)
SSV	Sólidos suspensos voláteis ($mg.L^{-1}$)
T	Temperatura ($^{\circ}C$)
t	Tempo de Filtração
TCE	Tratamento Convencional de Efluentes
TDH	Tempo de detenção hidráulica (horas)
TDS	Tempo de detenção de sólidos (dias)
t_{PR}	Intervalo de tempo de permeação (s)
t_{RL}	Intervalo de tempo de retrolavagem (s)
t_{RLX}	Intervalo de tempo de relaxação (s)
V	Volume do biorreator (m^3)
V_P	Volume de permeado (m^3)
W	Taxa volumétrica de lodo extraído do sistema ($m^3.dia^{-1}$)
x	Concentração de sólidos suspensos voláteis no meio reacional ($kg.m^{-3}$)
x_u	Concentração do lodo decantado do sistema ($kg.m^{-3}$)
ΔP	Pressão Transmembrana (bar ou mbar)

1 Introdução

A disponibilidade de recursos hídricos de boa qualidade na superfície terrestre vem sofrendo alterações preocupantes para a humanidade. Sendo a água utilizada amplamente em processos industriais e no setor agrícola, tais atividades estão modificando significativamente tanto a qualidade quanto a quantidade de água disponível para o ser humano.

A poluição das águas é causada principalmente pelo lançamento de efluentes industriais, agrícolas e esgotos domésticos, comprometendo as fontes hídricas superficiais e subterrâneas. De maneira a preservar as fontes naturais, o reúso de águas tem sido amplamente difundido; uma das alternativas é a integração das atividades de água, de forma que a água utilizada em um processo seja tratada, e posteriormente, reutilizada em outro processo que exija uma água de menor qualidade. Um processo que possibilita o tratamento de água para reúso é o processo denominado Biorreatores com Membranas (BRM), que associa o tratamento biológico utilizado nos processos de lodos ativados à tecnologia de separação por membranas.

O BRM foi desenvolvido comercialmente no final da década de 1960 e aplicado em larga escala somente no início da década de 1990. Esse sistema já vem sendo utilizado para tratamento de efluentes municipais e industriais em mais de 200 países (Icon, 2008), podendo citar como exemplos nações situadas na Ásia (China, Índia, Japão), Europa (Alemanha, Itália, Espanha), Estados Unidos, África do Sul e Austrália (Judd, 2011). A intensa atividade industrial e elevada densidade demográfica dessas regiões são fatores que contribuem para a difusão desse processo, uma vez que uma significativa vantagem do BRM em relação aos processos convencionais de tratamento consiste na economia de espaço, necessitando de uma menor área para a mesma capacidade de tratamento.

O Brasil apresenta elevado potencial hídrico, grande extensão territorial e, somado a esses fatores, a atividade industrial brasileira vem crescendo, necessitando cada vez mais de tratamentos adequados aos efluentes gerados, de forma a minimizar danos ambientais aos ecossistemas e às fontes de águas subterrâneas; além disso, o aumento da produtividade, muitas vezes sem a possibilidade de aumento do espaço físico, faz com que as empresas busquem alternativas mais adequadas para assegurar esta expansão, como por exemplo, os BRM, que já possuem algumas plantas instaladas no setor industrial, principalmente com aplicação ao reúso de águas de processo.

Além da questão ambiental, a economia brasileira pode tirar proveito da difusão deste processo. O valor global de mercado dos BRM vem crescendo a uma taxa média de 12% (Srinivasan, 2007). Aliado a isto, sabe-se que as membranas utilizadas nesses processos são fabricadas com materiais poliméricos e a cadeia petroquímica da indústria brasileira atua fortemente na produção dos mais diversos polímeros, podendo se estabelecer como fornecedora de matérias-primas ou produtos para os sistemas BRM.

A demanda por sistemas de tratamento de efluentes cresce a cada ano no Brasil, devido ao aumento populacional, fazendo com que cada vez mais se busquem alternativas viáveis para manter o abastecimento da população e o tratamento adequado aos resíduos líquidos gerados pela mesma. Neste contexto, destaca-se a região sudeste do Brasil, que possui uma alta densidade populacional, intensa atividade industrial e, vem passando por problemas sérios de abastecimento devido à ocorrência de secas prolongadas, exatamente nos períodos do ano onde se esperam as maiores taxas pluviométricas. Alguns sistemas BRM poderiam ser instalados nessa região de forma a prover um maior abastecimento de água a partir do reúso, porém existe pouco conhecimento sobre as limitações do processo aplicado a sistemas de tratamento de águas e esgotos municipais. Outro aspecto que deve ser salientado é a escassez de profissionais que dominam esta tecnologia.

A principal desvantagem do processo de BRM em relação ao tratamento convencional consiste na formação de incrustações na membrana (em inglês, *fouling*). A incrustação depende de diversos fatores que estão relacionados à membrana, à biomassa e às condições operacionais. Devido à natureza inevitável desse fenômeno, um grande desafio nos BRM é obter um melhor entendimento destes fatores, de maneira que se possa combiná-los para minimizar o nível de incrustação da membrana. Uma das condições operacionais mais importantes na prevenção da incrustação das membranas em um sistema BRM é a vazão de aeração, que tem como finalidade, além de oxigenar o meio para a manutenção da biomassa, provocar turbulência e auxiliar na limpeza da superfície das membranas.

Diante desta situação, este trabalho visa contribuir para desenvolvimento da tecnologia de BRM, tendo como objetivo geral a avaliação dos efeitos das condições hidrodinâmicas no desempenho deste processo. Os objetivos específicos consistem em estudar a influência da vazão de aeração no fluxo permeado do sistema, assim como outros aspectos relacionados à hidrodinâmica do processo, como modo de aeração (geometria dos aeradores) e densidade de empacotamento do módulo (relação área de membrana / volume do módulo).

O sistema em estudo consiste em um sistema semi-piloto de Biorreator com Membranas Submersas (BRMS) com operação contínua. Na primeira etapa do trabalho, testes foram realizados no sistema a fim de verificar algumas variáveis monitoradas do processo. Posteriormente, realizou-se a construção dos módulos de membranas, para então iniciarem-se os experimentos de permeação com lodo e o tratamento biológico utilizando um efluente de natureza sintética.

No Capítulo 2 do trabalho, são apresentados fundamentos teóricos sobre os processos de tratamento de efluentes e sobre os processos de Biorreatores com Membranas, quais fatores podem afetar seu desempenho, destacando aqueles relacionados às condições hidrodinâmicas do processo. O Capítulo 3 apresenta o sistema BRM em estudo, a membrana utilizada no trabalho, assim como a metodologia de construção dos módulos. Estão relacionados também os métodos analíticos utilizados, as operações de condicionamento e caracterização das membranas, e os procedimentos experimentais adotados para o trabalho. No Capítulo 4, são discutidos e apresentados os resultados obtidos com os testes iniciais no sistema BRM, os módulos de membrana construídos, testes de condicionamento e caracterização da membrana, fluxo permeado dos experimentos de permeação com lodo, assim como aspectos de eficiência do sistema de tratamento (remoção de matéria orgânica, condutividade elétrica, pH e turbidez). Finalmente, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões deste trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 Fundamentos Teóricos e Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentadas as informações necessárias para o entendimento do trabalho realizado. Os fundamentos teóricos e a revisão dos artigos publicados na literatura sobre os processos de tratamento de efluentes, de forma geral, e mais detalhadamente sobre os processos de Biorreatores com Membranas, são apresentados. Também estão inseridos alguns aspectos diretamente relacionados com este trabalho, tais como fatores que podem afetar o desempenho dos BRM, destacando aqueles relacionados às condições hidrodinâmicas do processo. No final, são apresentadas as considerações sobre a situação atual da pesquisa na área e evidenciada a importância e/ou necessidade do desenvolvimento do estudo proposto.

2.1 Processos de Separação com Membranas

Os processos de separação com membranas (PSM) vêm sendo estudados desde a década de 1950 (Judd, 2011), demonstrando que podem ser boas alternativas aos processos de separação mais comumente aplicados (destilação, extração, centrifugação), pois apresentam vantagens interessantes como consumo energético reduzido, alta seletividade e facilidade de escalonamento do processo.

Entre as décadas de 1960 e 1980, muitos estudos foram realizados no sentido de desenvolver novos métodos de síntese, com a utilização de diferentes materiais. Dessa forma, as membranas podem ser produzidas com materiais poliméricos, metálicos ou cerâmicos, e possuem aplicações em uma grande variedade de processos.

Uma das áreas em que se aplicam os processos de separação com membranas está na área de tratamento de efluentes, sendo que, dos diversos processos utilizados (microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração, osmose inversa, eletrodialise) cita-se o Biorreator com Membranas (BRM). As membranas utilizadas nesses sistemas são, na maioria, poliméricas e, em termos de geometria, aplicam-se tanto a plana (placa e quadro) como a radial (fibra oca ou tubular).

2.2 Processos de Biorreatores com Membranas

O termo BRM (ou MBR, do inglês, *Membrane Bioreactor*) aplica-se a todo processo de tratamento de água residual em que estejam combinados uma membrana permo-seletiva e um processo biológico (Judd, 2011).

O primeiro sistema BRM foi desenvolvido no final da década de 1960, combinando membranas de ultrafiltração com um processo convencional de lodo ativado, utilizado para tratamento de águas residuais de navios. Este sistema era baseado no modo de configuração externa (Figura 2.1) e operava em uma pressão excessiva (3,5 bar) e fluxos baixos (da ordem de $17 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$, ou LMH) considerando-se os sistemas atuais (Bemberis *et al.*, 1971). O processo não atraiu muito interesse na época devido ao alto custo das membranas, bem como ao baixo valor econômico do produto e potencial perda de desempenho devido às incrustações.

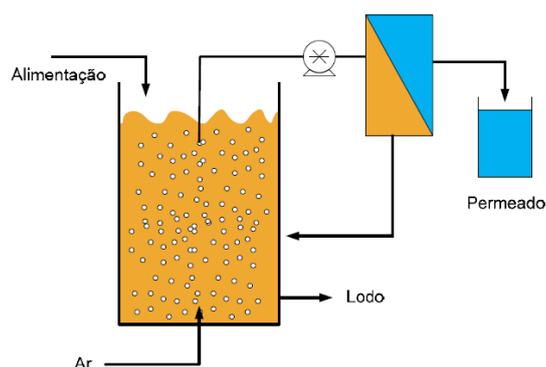


Figura 2.1: Configuração BRM externo (Silva, 2009).

Na configuração BRM externo, o biorreator e o módulo das membranas atuam separadamente, onde o conteúdo do reator é bombeado para os módulos e o processo opera em escoamento tangencial, ou seja, a suspensão esco paralelamente à superfície da membrana, enquanto o permeado é transportado transversalmente à mesma e o retido (ou concentrado) retorna ao biorreator.

A operação de um BRM externo é relativamente simples, uma vez que, como o módulo das membranas (normalmente multitubular) é separado do biorreator, a substituição do módulo pode facilmente ser realizada, assim como a limpeza química das membranas, sem afetar o processo biológico. Outra vantagem desse tipo de

sistema, observado no trabalho de Choi *et al.* (2005), é que o nível de incrustação da membrana decai linearmente com o aumento da velocidade de escoamento da suspensão.

Apesar da simplicidade de operação, os BRM de configuração externa apresentam desvantagens, uma vez que as altas velocidades de escoamento acarretam em elevada perda de carga e, assim, a manutenção da diferença de pressão necessária ao processo exige um elevado consumo energético. A alta velocidade tangencial no interior dos módulos também resulta em altas tensões de cisalhamento, podendo provocar danos aos microrganismos da suspensão.

No início da década de 1990, incentivos do governo japonês para o programa de reúso de água tornaram possível o desenvolvimento de um novo tipo de sistema. O ressurgimento do processo ocorreu a partir da ideia de Yamamoto *et al.* (1989) de utilizar as membranas submersas no biorreator, cujo processo denominou-se Biorreator com Membranas Submersas (BRMS), conforme pode ser visualizado pela Figura 2.2.

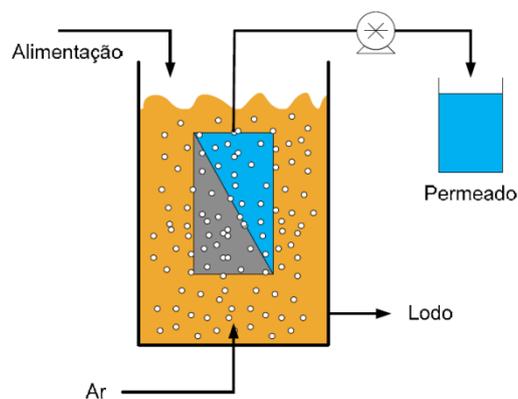


Figura 2.2: Biorreator com Membranas Submersas (Silva, 2009).

No sistema BRMS, a superfície externa das membranas está em contato com o conteúdo do biorreator e também com as bolhas do sistema de aeração, responsáveis pelo suprimento de oxigênio aos microrganismos, pela manutenção do lodo ativado em suspensão e pela limpeza da superfície das membranas.

A principal vantagem do BRMS em comparação ao sistema com módulo externo está no baixo consumo energético. A coleta de permeado é realizada a partir

de uma bomba de vácuo, e a energia necessária para esta é normalmente menor que a energia consumida no sistema de módulo externo, onde se faz necessário o uso de bombas centrífugas ou de deslocamento positivo (Silva, 2009).

Devido ao baixo consumo energético, o BRMS possui uma capacidade de tratamento menor que o BRM externo. O fluxo permeado é baixo (15 a 30 LMH) comparado aos fluxos do sistema de módulo externo (50 a 150 LMH), porém relativamente constante, assim como a taxa de aumento de pressão (Judd, 2011).

Outra configuração encontrada para os sistemas BRM, nos tempos mais atuais, consiste numa combinação entre a configuração externa e a configuração submersa (podendo ser classificada como submersa-externa), onde o módulo de membranas é instalado externamente ao tanque de tratamento biológico, em um tanque de menor capacidade, que mantém a dispersão das bolhas para continuar promovendo tanto a turbulência quanto à limpeza das membranas.

2.3 Comparação entre os processos de tratamento convencional de efluentes (TCE) e BRM

Surgindo como alternativa ao processo de tratamento convencional de efluentes (TCE), os BRM possuem vantagens e desvantagens com relação ao TCE. As Figuras 2.3 e 2.4 apresentam fluxogramas do processo de BRM e TCE, respectivamente.

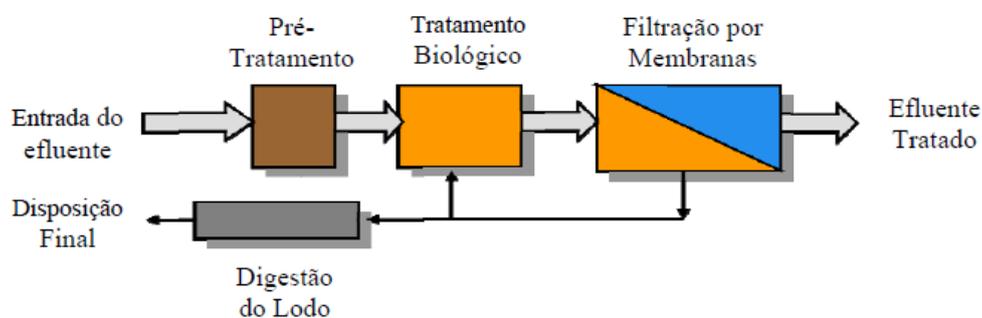


Figura 2.3: Fluxograma do processo de BRM (Silva, 2009).

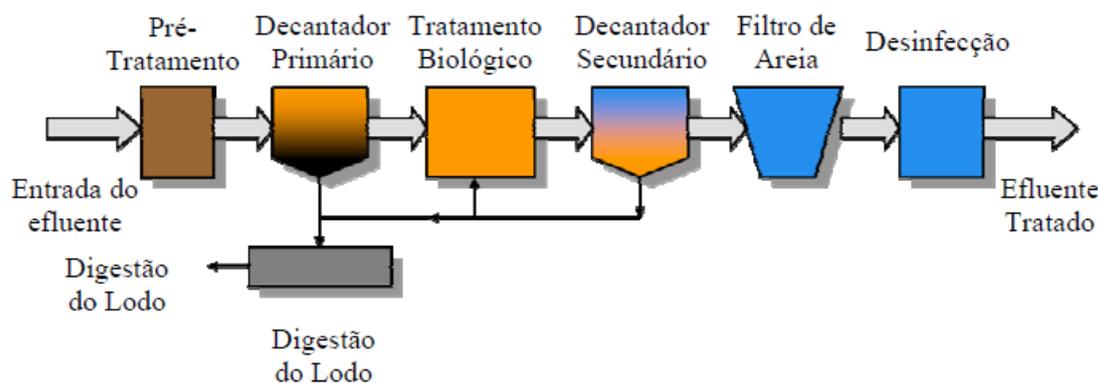


Figura 2.4: Fluxograma do processo convencional de tratamento de efluentes (Silva, 2009).

Pela observação dos fluxogramas apresentados nas Figuras 2.3 e 2.4, destaca-se como principal vantagem o menor número de etapas do processo de BRM para obter o efluente tratado e, conseqüentemente, uma redução de espaço físico para realizar o tratamento. Nos BRM, a separação não é realizada por sedimentação, mas pela filtração com membranas, as quais atuam como substitutas dos decantadores e do filtro de areia, presentes nos processos convencionais. A eliminação de um posterior processo de desinfecção pode ocorrer, pois a membrana utilizada no processo é capaz de reter quase totalmente a biomassa, devido à diferença de tamanho entre os poros e o material a ser retido.

Outras vantagens do BRM que podem citadas relacionam-se à capacidade de trabalhar com concentrações de lodo mais elevadas, da ordem de 3 a 6 vezes maior que nos processos convencionais, permitindo que ocorram maiores variações de carga orgânica na alimentação e que macromoléculas de lenta degradação tenham mais chance de serem degradadas (Silva, 2009), obtendo também uma maior remoção de matéria orgânica, uma menor geração de lodo no processo e, conseqüentemente, uma menor disposição final do mesmo.

Ainda que apresentando essas vantagens, os BRM possuem uma desvantagem considerável em relação ao tratamento convencional: uma taxa de consumo energético elevada devido à incrustação da membrana, conhecida pelo termo em inglês "*fouling*", acarretando em perda de capacidade de tratamento e necessidade de limpezas frequentes no módulo das membranas. A Figura 2.5 ilustra como ocorre a queda de desempenho nos processos com membranas: (a) para processos com pressão constante, ocorre uma queda de fluxo permeado; (b) para

processos com fluxo constante, necessita-se de uma taxa de aumento de pressão transmembrana (PTM).

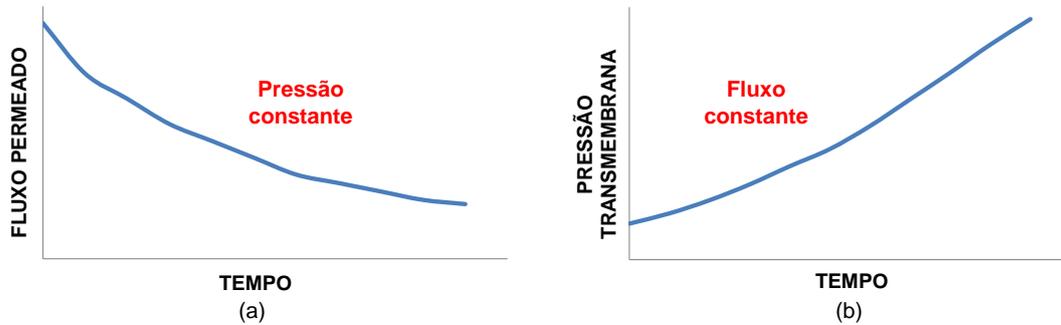


Figura 2.5: Representação qualitativa da queda de desempenho dos processos de BRM em condições de pressão constante e fluxo constante.

2.4 Tratamento biológico de efluentes

Os processos de tratamento de efluentes têm o objetivo de reduzir ou eliminar a quantidade de poluentes presentes numa corrente de processo. Esta tarefa pode ser realizada através de processos físicos, químicos e biológicos, de maneira individual ou combinada.

O tratamento biológico consiste na decomposição da matéria orgânica de um efluente através da utilização de microrganismos. Para o tratamento biológico aeróbio, os microrganismos degradam substâncias orgânicas mediante processos oxidativos, assimilando-as como alimento e energia. Os microrganismos compõem uma massa ativa denominada lodo ativado.

Esses processos de biodegradação, tanto nos tratamentos convencionais quanto nos BRM, são caracterizados por alguns parâmetros operacionais como: a carga orgânica mássica, o tempo de detenção de sólidos e o tempo de detenção hidráulica.

A carga orgânica mássica (também conhecida por relação alimento/microrganismo, F/M) consiste na taxa em que o substrato é alimentado no biorreator (F em $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) em relação à massa de microrganismos (M em kg), dada pela Equação 2.1:

$$\frac{F}{M} = \frac{Q \cdot S_0}{V \cdot x} \quad (2.1)$$

onde, Q é a vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), S_0 é a concentração de substrato na alimentação ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), V é o volume do biorreator (m^3) e x é a concentração de sólidos suspensos voláteis do meio reacional ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

O tempo de detenção de sólidos (TDS) é um parâmetro muito importante na operação de biorreatores, pois a partir dele que se controla a concentração de biomassa no meio reacional, podendo ser aumentado pela redução da massa de lodo decantado do sistema. O TDS, ou idade do lodo, corresponde ao tempo médio de detenção celular dentro do biorreator, expresso em dias, e mostrado na Equação 2.2:

$$TDS = \frac{V \cdot x}{W \cdot x_u} \quad (2.2)$$

onde, W é a vazão da corrente concentrada extraída do sistema ($\text{m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$) e x_u é a concentração do lodo decantado ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

Um valor elevado de TDS, até certo ponto, pode resultar em uma degradação mais eficiente. Se o TDS for reduzido para um valor menor do que o tempo médio de geração celular, a biomassa será totalmente arrastada do reator. Para os processos envolvendo BRM, não há arraste de biomassa, pois esta fica retida pela membrana, sendo desnecessária a etapa de decantação. Assim, a Equação 2.2 se reduz a Equação 2.3, uma vez que a concentração de sólidos no reator é igual à concentração da porção retirada:

$$TDS = \frac{V}{W} \quad (2.3)$$

O tempo de detenção hidráulica (TDH) é outro parâmetro fundamental para o projeto e a operação de biorreatores. O TDH é expresso em horas e definido pela Equação 2.4:

$$TDH = \frac{V}{Q_p} \quad (2.4)$$

onde, V é o volume do biorreator (m^3) e Q_p é a vazão de permeado do processo ($m^3.h^{-1}$).

Normalmente, o custo do tratamento diminui com menores valores de TDH. No entanto, deve-se tomar cuidado ao usar tempos de detenção hidráulica reduzidos, visto que a capacidade de processamento em períodos de elevada carga orgânica diminui. Além disso, a redução de TDH deve ser compensada por um aumento na concentração de biomassa, de forma a produzir uma biodegradação eficiente (Viero, 2006).

2.5 Filtração e Transporte através da Membrana

Os processos de separação por membranas podem operar em dois modos: operação convencional, quando a alimentação se dá perpendicularmente a posição da membrana (*dead-end filtration*); operação tangencial, quando a corrente de alimentação escoia paralelamente à superfície da membrana e o permeado é recolhido perpendicularmente à mesma (*crossflow filtration*). Esses dois modos podem ser observados na ilustração apresentada na Figura 2.6.

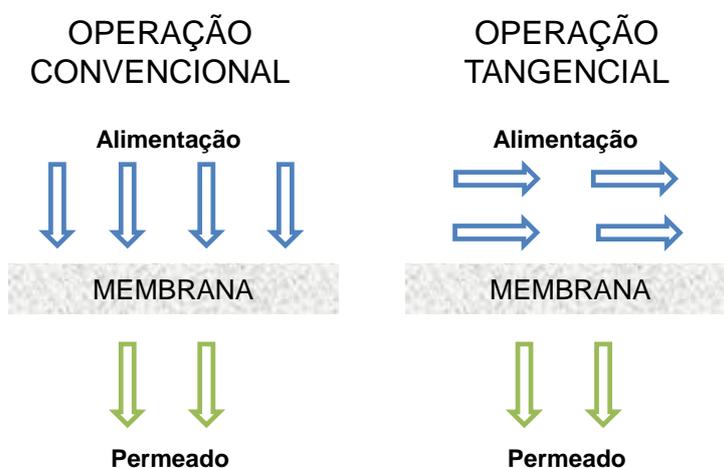


Figura 2.6: Modos de filtração para processos de separação por membranas.

Na operação de sistemas BRMS, a aeração promove uma condição mais próxima da operação tangencial do que da convencional. Dessa maneira, o permeado consiste na fração de líquido que percola a membrana, sendo equivalente ao efluente final e, a corrente que não permeia a membrana, permanece no tanque de processo.

A partir da vazão de permeado do processo (Q_p) e da área (A) da membrana utilizada pode-se definir o fluxo permeado (J_p), através da Equação 2.5:

$$J_p = \frac{Q_p}{A} \quad (2.5)$$

Nos processos de separação por membranas, inevitavelmente incrustações se formam na membrana, sendo necessários intervalos de relaxação ou retrolavagem para manter a estabilidade do fluxo permeado.

Os períodos de relaxação permitem que os sólidos depositados se soltem da superfície das fibras. Durante este período, somente a remoção do permeado é interrompida e a aeração permanece, de maneira a permitir a movimentação do conteúdo do reator e também para facilitar a remoção dos sólidos aderidos à superfície da membrana. Esses procedimentos afetam o fluxo líquido do sistema, sendo determinado pela Equação 2.6:

$$J_l = J_p \times \left(\frac{t_{PR}}{t_{PR} + t_{RLX}} \right) \quad (2.6)$$

onde, J_l é o fluxo líquido (LMH), t_{PR} é o intervalo de tempo de processo (s) e t_{RLX} é o intervalo de tempo de relaxação (s).

Para a retrolavagem, o permeado é injetado no sentido inverso ao da permeação, do interior para a superfície externa, visando à remoção de incrustações, e o fluxo líquido é dado pela Equação 2.7:

$$J_l = J_p \times \left(\frac{t_{PR} \cdot Q_{PR} - t_{RL} \cdot Q_{RL}}{(t_{PR} + t_{RL}) \cdot Q_{PR}} \right) \quad (2.7)$$

Na qual, Q_{PR} é a vazão de processo, t_{RL} é o tempo de retrolavagem e Q_{RL} é a vazão de retrolavagem. Outra opção é a utilização de ar comprimido, no lugar do permeado, para realização da retrolavagem (Viero, 2006).

A força motriz para o fluxo de permeado é a diferença de pressão entre os dois lados da membrana, denominada pressão transmembrana (P_{TM}). Para avaliar o desempenho de uma membrana, relaciona-se o fluxo permeado de um solvente puro com a pressão transmembrana, obtendo a permeância (L_P), conforme a Equação 2.8:

$$L_P = \frac{J_P}{P_{TM}} \quad (2.8)$$

A permeância é utilizada para avaliação do desempenho do sistema de membranas e, também para determinar a necessidade e a eficiência de limpeza, seja esta baseada em procedimentos químicos ou físicos.

2.6 Incrustações em BRM

A principal limitação dos BRM é a incrustação das membranas utilizadas no processo, uma vez que esse fenômeno resulta em redução do desempenho (caracterizada pelo aumento da pressão transmembrana ou redução do fluxo permeado com o tempo), maior consumo energético e necessidade de limpezas frequentes das membranas ou substituição destas (Liao *et al.*, 2004).

Vários fatores podem influenciar o fenômeno de incrustação, conforme apresentado na Figura 2.7. Pode-se pensar que esses fatores atuam de maneira independente, porém sabe-se que o fenômeno de incrustação das membranas é consequência da interação entre características da membrana, da biomassa e das condições operacionais. Estes elementos estão intimamente ligados, principalmente as características da biomassa e as condições operacionais, uma vez que alterando algumas dessas condições, por exemplo, o tempo de retenção de sólidos (TRS), alteram-se também algumas características da biomassa, como concentração e tamanho dos flocos, e estas levam a alterações na atividade microbiana de decomposição e reprodução. Alguns destes aspectos mostrados na Figura 2.6 serão discutidos na sequência.

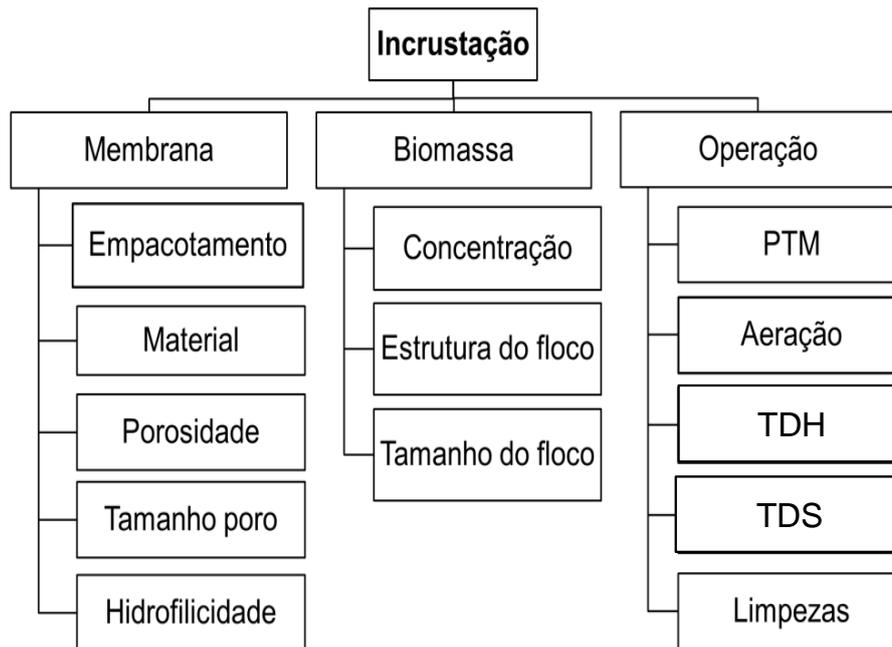


Figura 2.7: Principais fatores que influenciam no fenômeno de incrustação das membranas em sistemas BRMS, com a lista das variáveis envolvidas para cada um.

Adaptado do trabalho de Silva (2009).

2.6.1 Influência das características da membrana

As características da membrana que contribuem para a incrustação apresentam forte interação com as características da biomassa, principalmente com relação ao tamanho dos poros e ao caráter hidrofílico das membranas.

2.6.1.1 Tamanho e distribuição dos poros

Os efeitos do tamanho dos poros sobre a incrustação das membranas apresentam resultados distintos na literatura. A distribuição de tamanho das partículas da solução se relaciona com a distribuição de tamanhos de poros da membrana, tornando complexa a obtenção de uma consistência nos resultados.

No trabalho de Le-Clech *et al.* (2003), foram testadas membranas com diferentes tamanhos de poro nominal (0,01, 0,1 e 1 μm) e os resultados mostraram que nem sempre a membrana com maior ou menor poro pode ser melhor, existindo

uma faixa de tamanho benéfica ao desempenho (0,1 a 1 μm) , para determinada faixa de concentração da biomassa (4 a 8 g/L).

O tempo de operação também possui influência, conforme exemplificado no estudo de He *et al.* (2005), em que testando membranas com diferentes massas molares de corte (20, 30, 50 e 70 kDa), obteve, para experimentos de curta duração (110 minutos), o melhor desempenho na membrana de 70 kDa e, para experimentos de longa duração (110 dias), na membrana de 50 kDa. Os piores desempenhos ficaram com as membranas de 20 kDa e 70 kDa, para curta e longa duração, respectivamente. Esses autores concluíram que, nas mesmas condições de operação, as membranas com menores massas molares de corte rejeitaram uma quantidade maior de partículas dissolvidas, aumentando a resistência da camada de torta, e provocando uma redução inicial mais significativa no fluxo permeado. As membranas com maiores massas molares de corte apresentaram maior rugosidade superficial, com uma quantidade maior de lacunas a serem preenchidas pelas partículas do lodo ativado, e assim, permitindo a formação de uma camada de incrustação que provocou a maior queda de fluxo permeado para experimentos de longa duração.

2.6.1.2 Hidrofilicidade

A hidrofilicidade da membrana é outro aspecto que contribui para a incrustação e apresenta forte relação com as condições da biomassa. O esperado é que o nível de incrustação seja maior em membranas hidrofóbicas do que em membranas hidrofílicas, devido às características hidrofóbicas dos solutos (frações de substâncias poliméricas extracelulares) e células microbianas (Yu *et al.*, 2005). Em contrapartida, no estudo de Fang e Shi (2005), foram obtidos resultados contrários, com uma maior incrustação nas membranas hidrofílicas, devido à maior deposição de incrustantes de natureza hidrofílica e à maior porosidade que este tipo de membrana apresentava.

Os materiais utilizados na confecção de membranas para BRM são, na grande maioria, hidrofóbicos, sendo possível realizar modificações com aditivos a fim de fornecer características mais hidrofílicas a estes materiais (Puspitasari *et al.*, 2010). Porém, as modificações na hidrofilicidade podem causar modificações na morfologia da membrana, tornando difícil uma correlação entre incrustação e hidrofilicidade do material.

2.6.2 Influência das características da biomassa

2.6.2.1 Concentração e tamanho das partículas

A biomassa apresenta características importantes para o entendimento do fenômeno de incrustação. O lodo ativado pode ser fracionado em três categorias de partículas: sólidos suspensos, coloides e sólidos dissolvidos ou solutos. Sendo esta classificação baseada no tamanho das partículas, evidências sugerem que é o tamanho da partícula que exerce maior impacto, levando cada uma dessas frações a contribuições diferentes para o fenômeno de incrustação.

Na literatura, existe uma falta de consenso entre os estudos publicados. Para exemplificar, a contribuição do sobrenadante (coloides + solutos) para a incrustação no estudo de Bae e Tak (2005) foi de 17%, bem menor do que os 81% obtidos no estudo de Itonaga *et al.* (2004). Neste último, os autores concluíram que partículas solúveis e coloidais contribuíram para o mecanismo de bloqueio de poro, enquanto os sólidos suspensos para o mecanismo de camada de torta.

A concentração de sólidos suspensos do lodo ativado (na literatura é comumente conhecida como MLSS, *mixed liquor suspended solids*) particularmente, apresenta uma relação complexa com a tendência à incrustação, exercendo ora influência positiva ora influência negativa, dependendo da faixa de concentração utilizada. Um comportamento detalhado foi obtido por Rosenberger *et al.* (2005), em que, aumentando a concentração de MLSS até uma faixa de 6 g/L e acima de 15 g/L, houve uma redução na incrustação e, para valores na faixa de 8 a 12 g/L, não foi observado efeito significativo neste fenômeno.

Bin *et al.* (2004) observaram uma diminuição do fluxo permeado com o aumento de MLSS, porém a uma taxa de incrustação reduzida. Essa redução da taxa foi atribuída à rápida formação de camada de torta em altas concentrações, potencialmente protegendo a membrana de partículas solúveis e coloidais que poderiam se depositar no interior dos poros da membrana.

2.6.2.2 Viscosidade e temperatura

Outras características da biomassa que influenciam no processo de incrustação são a viscosidade do lodo ativado e a temperatura. A viscosidade está diretamente relacionada com a concentração de sólidos suspensos do lodo ativado e

pode impactar no fluxo, no tamanho das bolhas de ar e, ainda, no movimento lateral das fibras em BRMS (Wicaksana *et al.*, 2006).

A variação de temperatura tem impacto na viscosidade da solução e também, no fenômeno de incrustação, como observado por Miyoshi *et al.* (2009). Avaliando as variações sazonais com relação à incrustação, os referidos autores concluíram que esta pode ter um caráter mais reversível em baixas temperaturas, enquanto a fração irreversível da incrustação tende a ser maior em maiores temperaturas.

A temperatura pode ser utilizada para uma normalização do fluxo permeado, a partir da Equação 2.9 (Jiang *et al.*, 2005):

$$J = J_{20} \cdot 1,025^{(T-20)} \quad (2.9)$$

onde, J é o fluxo permeado do processo na temperatura T (°C), e J₂₀ é o fluxo permeado do processo a 20 °C.

2.6.3 Influência das condições operacionais

As condições operacionais de um sistema BRM exercem influência no fenômeno de incrustação, positiva ou negativamente, tornando-se relevante o conhecimento dos seus efeitos para minimização das incrustações.

2.6.3.1 Pressão transmembrana e fluxo crítico

A pressão transmembrana (PTM) é uma condição operacional importante em BRM, determinando o fluxo permeado do processo. De forma geral, um aumento no fluxo permeado é obtido com um aumento da PTM. Esse comportamento é sempre linear para água pura e, para soluções, existe um valor de PTM onde um fluxo limite é atingido (Figura 2.8).

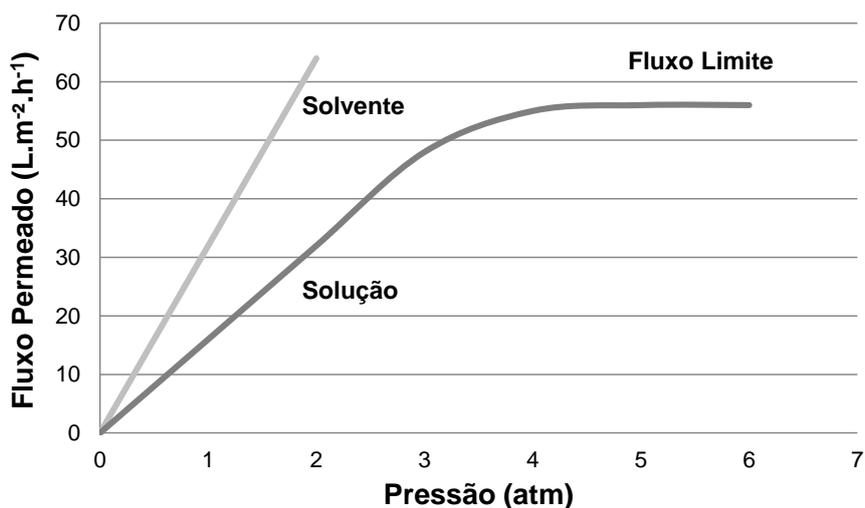


Figura 2.8: Ilustração típica do fluxo permeado em função da pressão transmembrana para o solvente e para a solução, com destaque para o fluxo limite (Silva, 2009).

O fluxo permeado em um processo de BRM está relacionado ao conceito de fluxo crítico. Este conceito foi originalmente apresentado por Field *et al.* (1995), estabelecendo que: “a hipótese de fluxo crítico para processos de microfiltração ou ultrafiltração consiste em um fluxo permeado abaixo do qual um declínio de fluxo com o tempo não ocorre, e acima deste, o fenômeno de incrustação é observado”. Duas formas distintas deste conceito foram definidas: a forma forte, onde o fluxo obtido em operações abaixo do fluxo crítico é igual ao fluxo de água sob as mesmas condições; a forma fraca, em que o fluxo subcrítico é o fluxo rapidamente estabelecido e mantido no início do processo, mas não necessariamente igual ao fluxo de água.

A determinação do fluxo crítico varia conforme a metodologia utilizada. Para processos a fluxo constante, traça-se um gráfico do fluxo permeado em função da PTM, observando uma mudança na linearidade da PTM. Bouhabila *et al.* (1998) definiram, para processos a fluxo constante, o conceito de “fluxo sustentável”, em que este é menor que o fluxo crítico e consiste em um fluxo onde a PTM aumenta gradualmente a uma taxa aceitável.

No trabalho de Silva (2009), utilizando um sistema BRM sob pressão constante, a determinação do fluxo crítico foi realizada a partir do monitoramento do fluxo permeado em cada pressão pelo mesmo período de tempo. Havendo uma queda do fluxo dentro deste período, considera-se este fluxo como o fluxo crítico. De um modo geral, não é interessante operar sistemas de membranas com fluxos maiores

que o fluxo crítico, pois o custo operacional pode ser elevado para manter PTM maiores.

2.6.3.2 TDS e TDH

Nos BRM, as variáveis TDS e TDH podem ser controladas de maneira independente (Equações 2.3 e 2.4). Do ponto de vista prático, um TDS elevado resulta em uma maior concentração de lodo e, associado a um baixo valor de TDH, possibilita um tratamento eficiente em um curto espaço de tempo, entretanto problemas de incrustação mais intensos podem ocorrer nestas condições (Silva, 2009).

Para sistemas BRMS, o TDH utilizado pode ser bastante baixo, da ordem de 2 a 3 horas, ainda assim mostrando desempenho satisfatório, com remoção de matéria orgânica superior a 90%. Uma compilação de trabalhos realizada por Viero (2006) demonstra a versatilidade do processo BRM, sendo possível operar esses sistemas em diferentes TDH e TDS, assim como podem ser utilizados diferentes efluentes e diversas concentrações de sólidos no lodo e de matéria orgânica na alimentação.

A idade do lodo (TDS) impacta na incrustação a partir da concentração de MLSS, que aumenta juntamente com o TDS, reduzindo a carga orgânica mássica (Equação 2.1) e alterando as características da biomassa.

Pequenas idades de lodo podem apresentar uma forte tendência à incrustação (Trussel *et al.*, 2006). Por outro lado, para um valor infinito de TDS, utilizado no trabalho de Orantes *et al.* (2004), uma baixa geração de biomassa do lodo (praticamente nula) pode explicar a pequena tendência à incrustação.

A operação de BRM em elevados TDS, de certa forma, minimiza a geração de biomassa por parte do lodo, porém, o conseqüente aumento da concentração de sólidos suspensos do lodo ativado pode acarretar em problemas de entupimento nas membranas, devido à incrustação e à eficiência de aeração reduzida (Le-Clech *et al.*, 2005).

2.6.3.3 Retrolavagem

A retrolavagem consiste em bombear uma parte do permeado no sentido inverso ao de permeação, empurrando partículas aderidas à superfície da membrana

de volta ao líquido e, desta forma, promovendo a remoção parcial da torta formada. Considerada uma limpeza física, a retrolavagem é caracterizada pela frequência e pela duração da mesma, por exemplo, 10 segundos de retrolavagem (duração) a cada 10 minutos de permeação (frequência).

O uso da retrolavagem torna possível a operação com fluxo permeado estável, durante longos períodos de tempo. Côté *et al.* (1997) conseguiram operar seu sistema durante um ano, com retrolavagens de 15s a cada 15min de operação, obtendo melhores resultados de remoção de matéria orgânica quando comparados aos sistemas convencionais de tratamento.

No estudo de Jiang *et al.* (2005) foi observado que, embora menos frequente, longas retrolavagens (45s de retrolavagem a cada 10min de permeação) mostraram-se mais eficientes que condições com maior frequência e menor duração de retrolavagem (15s de retrolavagem a cada 200s de permeação). Em outro estudo (Schoeberl *et al.*, 2005), a frequência de retrolavagem apresentou maior efeito na remoção de incrustação, quando comparado à duração e, até mesmo, maior efeito que a intensidade de aeração.

A relação frequência/duração da retrolavagem deve ser estudada para cada sistema BRM. Embora se espere que uma limpeza eficaz seja aquela com a maior frequência e a maior duração da retrolavagem, é necessário explorar essa relação de maneira a recuperar o máximo de fluxo permeado com a menor demanda de energia.

2.6.4 Modelagem de Hermia para mecanismos de incrustação

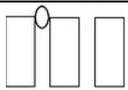
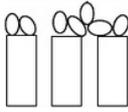
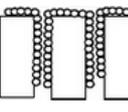
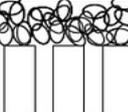
Com o intuito de descrever os mecanismos de incrustação, Hermia (1982) propôs um modelo baseado em processos de separação por membranas operando sob pressão constante. Inicialmente este modelo semi-empírico foi apresentado para filtração transversal (*dead-end filtration*), posteriormente sendo adaptado para filtração tangencial (*cross-flow filtration*) (Field *et al.*, 1995). A equação original do modelo é apresentada pela Equação 2.9 a seguir:

$$\frac{d^2t}{dV_p^2} = K \left(\frac{dt}{dV_p} \right)^n \quad (2.9)$$

onde, t é o tempo de filtração (s), V_p é o volume de permeado (m^3) e K e n são constantes que caracterizam o processo de incrustação. Esta equação descreve diferentes mecanismos de incrustação, dependendo do valor de n utilizado. Na Tabela 2.1 é possível observar uma ilustração e a equação de cada mecanismo de incrustação anteriormente citado.

Nas equações da Tabela 2.1, J é o fluxo permeado, J_{ss} é o fluxo permeado no estado estacionário; J_0 é o fluxo permeado inicial; K_C , K_P , K_i e K_t são parâmetros de cada modelo.

Tabela 2.1: Equacionamento e ilustração dos modelos de mecanismo de incrustação. Adaptado de Silva (2009).

n	Modelo	Ilustração	Equação
$n = 2$	Bloqueio Completo		$J = J_{ss} + (J_0 + J_{ss}) \cdot \exp(-K_C \cdot J_0 \cdot t)$
$n = 1$	Bloqueio Intermediário		$J = \frac{J_0 \cdot J_{ss} \cdot \exp(K_i \cdot J_{ss} \cdot t)}{J_{ss} + J_0 \cdot (\exp(K_i \cdot J_{ss} \cdot t) - 1)}$
$n = 1,5$	Bloqueio Padrão		$J = \frac{J_0}{(J_0 + J_0^{1/2} \cdot K_p \cdot t)^2}$
$n = 0$	Camada de torta		$t = \frac{1}{K_t \cdot J_{ss}^2} \cdot \ln \left(\frac{J}{J_0} \cdot \left(\frac{J_0 - J_{ss}}{J - J_{ss}} \right) - J_{ss} \cdot \left(\frac{1}{J} - \frac{1}{J_0} \right) \right)$

As considerações de cada mecanismo são apresentadas a seguir (Vela *et al.*, 2009).

- Modelo de bloqueio completo ($n=2$): supõe-se que cada molécula de soluto que encontra a superfície da membrana obstrui a passagem de um poro, além disso, uma molécula nunca se estabelece sobre outra previamente depositada na superfície. O fluxo permeado através dos poros desbloqueados não é afetado, deste modo, a fração de redução do fluxo é igual à fração de redução da área de membrana correspondente aos poros desbloqueados. Este tipo de incrustação

ocorre quando o tamanho das moléculas do soluto são maiores que os poros da membrana.

- Modelo de bloqueio intermediário ($n=1$): a sobreposição das partículas é considerada, ou seja, o bloqueio de cada poro da membrana não é necessariamente realizado por uma única molécula. O bloqueio do interior dos poros não é considerado. Este tipo de incrustação ocorre quando as moléculas apresentam tamanhos semelhantes ao tamanho dos poros da membrana.
- Modelo de bloqueio padrão ($n=1,5$): considera que a obstrução ocorre no interior dos poros da membrana, reduzindo o volume dos mesmos. Outra consideração é que os poros têm diâmetro e comprimento constantes ao longo da espessura da membrana. Este tipo de incrustação é causado por moléculas menores que o tamanho de poro da membrana.
- Modelo de formação de camada de torta ($n=0$): as moléculas do soluto formam uma camada gel sobre a superfície da membrana. Portanto, o bloqueio de poro na superfície é negligenciado, embora tanto para o modelo de bloqueio completo como para camada de torta assume-se que as partículas do soluto são maiores que os poros da membrana.

Esta adaptação foi utilizada por Silva (2009) para avaliar os mecanismos de incrustação em seu estudo com um sistema BRMS. O autor observou que os mecanismos de bloqueio completo e intermediário prevaleceram sobre os demais e que os valores de fluxo estacionário foram muito parecidos com os valores de fluxo permeado final para os experimentos, mesmo estes ainda apresentando uma tendência de diminuição do fluxo. O modelo de bloqueio padrão não se ajustou à maioria dos dados experimentais obtidos pelo autor.

2.7 Influência das condições hidrodinâmicas

Os aspectos relacionados às características da membrana, da biomassa e das condições operacionais influenciam de maneira sinérgica o fenômeno de incrustação. Além de conhecê-los para determinar as melhores condições, necessita-se de um gerenciamento das condições hidrodinâmicas para limitar o nível de incrustação na membrana. Do ponto de vista da questão energética, atenta-se à aeração, que é responsável por 80-90% dos custos totais de operação de um BRMS (Melin et al., 2006).

Esta seção apresenta alguns aspectos importantes relativos às condições hidrodinâmicas de um sistema BRMS necessárias para minimizar a incrustação. Divide-se em duas partes: a primeira ressalta a importância de uma aeração homogênea e, a segunda, descreve os efeitos globais da aeração em um BRMS.

2.7.1 Homogeneidade de aeração

A homogeneidade das condições hidrodinâmicas é um fator importante nos BRM e pode depender da qualidade do projeto do sistema de aeração (Lebegue et al., 2008).

Segundo o trabalho de Nguyen Cong Duc et al. (2008), foi observado um problema de homogeneidade de aeração em um BRMS, conforme esquema apresentado na Figura 2.9. Os autores verificaram a ocorrência de um *loop* de circulação, provocando a formação de uma zona estagnada próxima ao centro desta região. Esse comportamento foi observado devido à distribuição não uniforme da quantidade de gás através dos orifícios do aerador.

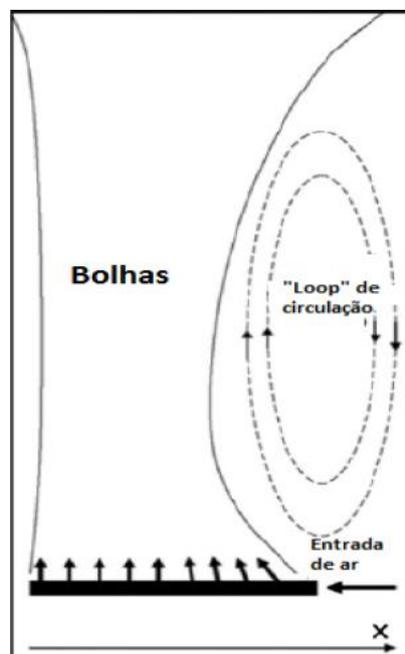


Figura 2.9: Representação esquemática da heterogeneidade de aeração em um sistema BRMS. Adaptado de Nguyen Cong Duc et al. (2008).

Mayer *et al.* (2006) recomendam o uso de sistemas providos de grande quantidade de orifícios, para que a distribuição de ar seja mais homogênea e, portanto, mais eficaz. Outra solução, reportada por Ghosh (2006), seria confinar as bolhas próximo às fibras ao invés de deixá-las difundirem ao longo do BRMS.

Num estudo posterior de Lu *et al.* (2008), o confinamento das bolhas também foi usado para controlar a incrustação em um módulo de fibra oca submerso. Um tubo de 2cm de diâmetro foi utilizado para contornar 12 fibras ocas de 0,7mm de diâmetro externo, mantendo as bolhas próximas à superfície da membrana de modo a aproveitar a energia do sistema com mais eficiência. Os resultados foram comparados com um estudo similar de Wicaksana *et al.* (2006) onde as bolhas não foram confinadas. O módulo com confinamento das bolhas forneceu um aumento médio na pressão transmembrana (PTM) de 0,02 kPa/min e um fluxo de 36 LMH, em comparação a uma taxa de 0,07 kPa/min e fluxo de 30 LMH para o outro módulo. Embora a comparação não tenha sido realizada para módulos idênticos (mesmo número e comprimento das fibras), esta analogia permite observar que o confinamento das bolhas parece ser uma alternativa para limitar o fenômeno de incrustação em sistemas BRMS.

A densidade de empacotamento do módulo (relação entre a área de permeação e o volume do módulo) também exerce influência na homogeneidade de aeração no sistema BRM. Segundo o trabalho de Yeo e Fane (2005), houve uma melhora acentuada com a diminuição da densidade de empacotamento do módulo. Esses autores concluíram que, em densidades de empacotamento maiores, algumas fibras poderiam se fundir através das tortas formadas na superfície e, portanto, sofreriam influência da incrustação mais rapidamente. Outros autores (Lebegue *et al.*, 2008) observaram a ocorrência de zonas estagnadas no centro de feixes de fibra oca, dependendo do diâmetro do feixe e da densidade de empacotamento do mesmo. Sendo assim, há um limite entre um espaço suficiente entre as fibras (baixa densidade de empacotamento) e uma maior área de permeação (alta densidade de empacotamento).

2.7.2 Efeitos globais da aeração

A aeração utilizada em sistemas BRMS tem três funções principais: fornecer oxigênio aos microrganismos, manter o lodo ativado em suspensão e limitar a ocorrência da incrustação pela remoção das partículas aderidas à superfície. Esta

última merece atenção especial devido à grande influência que exerce no desempenho de um BRMS.

Diversos trabalhos na literatura reportam a existência de um valor limite para a vazão de aeração. Ueda *et al.* (1997) concluíram que a aeração reduz a incrustação em um BRMS até um valor máximo de vazão e, que, acima deste, não há um grande efeito no comportamento da pressão transmembrana.

Resultados semelhantes também foram observados por Chua *et al.* (2002) e Delgado *et al.* (2008), em que a taxa de incrustação caiu consideravelmente devido a um aumento da velocidade superficial de gás no sistema, atingindo um valor limite de vazão de aeração benéfico. A existência de um valor máximo para a vazão de aeração pode estar associada ao fato de que a velocidade de ascensão das bolhas não é proporcional à taxa de aeração e, acima de determinado valor, o efeito deste aumento seria insignificante na velocidade superficial de gás (Nguyen cong duc *et al.*, 2008).

O efeito benéfico da aeração também pode ser visto através de um aumento no fluxo permeado, onde a velocidade superficial de gás influencia o fluxo crítico, como mostrado na Figura 2.10. Novamente pode ser observado um patamar de eficiência com o aumento da taxa de aeração.

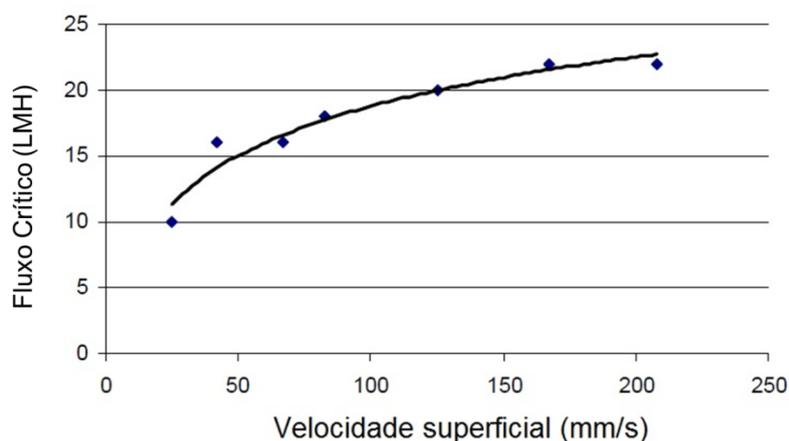


Figura 2.10: Variação do fluxo crítico em função da velocidade superficial de gás. Adaptado de Howell *et al.*(2004).

Existem alguns efeitos adversos da aeração, como observado no trabalho de Meng *et al.* (2008), onde a aeração intensa resultou na quebra dos flocos e promoveu a liberação de partículas coloidais e solúveis, agravando a incrustação. Em níveis

elevados de aeração, as partículas tendem a ser menores, aumentando a chance de formação de incrustações no interior dos poros devido à maior presença de partículas solúveis e coloidais (Wu *et al.*, 2012). A estrutura da torta formada na superfície da membrana em altas vazões de aeração tende a ser mais compressível, aumentando exponencialmente a resistência da camada de incrustação. A torta formada por partículas maiores apresenta aumento na porosidade, podendo funcionar como um pré-filtro às partículas solúveis e coloidais (Wu *et al.*, 2011).

Pela investigação dos efeitos globais da aeração, a tendência é o surgimento de um limiar para a eficiência de filtração. Além disso, devido às diversas configurações de BRMS e condições operacionais utilizadas, não é possível fixar um valor ótimo de taxa de aeração, sendo este dependente de cada sistema em estudo.

2.8 Considerações finais sobre a Revisão Bibliográfica

Vários aspectos relacionados à incrustação em Biorreatores com Membranas foram apresentados, de maneira a entender como cada um deles atua de forma mais independente, embora pelos estudos apresentados confirma-se uma forte interação entre as características da membrana, da biomassa e das condições operacionais.

Com relação às características da membrana para minimizar a incrustação, é recomendado o uso de membranas hidrofílicas às hidrofóbicas, pois estas últimas podem apresentar altas quedas de permeabilidade devido às interações com os componentes majoritários do lodo ativado, que possuem características hidrofóbicas.

A utilização de um lodo com características de lodo normal (semelhante ao utilizado no TCE), com concentrações moderadas de biomassa, são características que contribuem para minimizar o fenômeno de incrustação.

Algumas condições operacionais devem ser ajustadas com o intuito de operar em longos períodos. Recomenda-se o uso de fluxos permeados abaixo do fluxo crítico do sistema, retrolavagens periódicas e elevada aeração, assim como realizado no trabalho de Silva (2009). Porém, neste estudo, dentre todas as condições operacionais testadas, o autor não conseguiu obter um valor ótimo de taxa de aeração que representasse a melhor condição operacional. Como mencionado anteriormente, a aeração elevada pode ser benéfica até certo limite, sendo este o principal aspecto a ser estudado no sistema BRMS deste trabalho.

3 Materiais e Métodos

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos utilizados para desenvolvimento deste trabalho. Primeiramente, será apresentado o sistema BRM em estudo, assim como as membranas utilizadas nos experimentos, metodologia de construção dos módulos e funcionamento do sistema de aeração da unidade BRM. Na sequência, são apresentadas as técnicas de caracterização utilizadas para as membranas, a solução de alimentação do sistema e o detalhamento dos ensaios de permeação com lodo realizados para estudo das condições hidrodinâmicas. Ao final, são mostradas as técnicas analíticas de determinação de matéria orgânica, medidas de pH, condutividade elétrica e turbidez e determinação da concentração de sólidos suspensos totais e sólidos suspensos voláteis.

3.1 Sistema de Biorreator com Membranas

O sistema de biorreatores com membranas foi construído durante o desenvolvimento do trabalho de Silva (2009), de forma a atender as características básicas de um sistema de tratamento BRM. A construção deste sistema permitiu o estudo entre as interações da membrana com o lodo, assim como a realização de experimentos de longa duração de forma automatizada e coleta de dados de forma contínua. As conexões elétricas do sistema BRM estão apresentadas no Anexo A.

Na Figura 3.1 está apresentada uma ilustração do fluxograma simplificado do sistema BRMS utilizado e, na Figura 3.2 está apresentada uma fotografia do sistema BRMS. As partes principais do sistema consistem nos tanques 1, 2, 6 e 7, nas válvulas solenoides 3, 4, 5 e 8, nas bombas centrífugas 9 e 10, uma bomba de vácuo e um sistema de aeração. Também apresenta um medidor de pressão, visto que a pressão transmembrana é a força motriz do processo, além de uma célula de carga presa ao tanque 7, utilizada para medir a massa de permeado ao longo do tempo.

O medidor de pressão está situado na tubulação que conecta o módulo de membranas ao tanque de coleta de permeado (tanque 7 da Figura 3.1). Com o sistema BRM desse estudo, é possível realizar somente operações a pressão constante, sendo esta pressão escolhida na interface gráfica. O algoritmo inserido no CLP controla a pressão do sistema a partir de uma válvula solenoide normalmente fechada (válvula 5 da Figura 3.1), de maneira que, quando a pressão do sistema está acima do valor fixado (*set-point*), um sinal elétrico é enviado com o comando de abrir a

válvula, até que a pressão atinja o *set-point*. Se a pressão do sistema estiver abaixo do *set-point*, o controlador não envia sinal elétrico, mantendo a válvula fechada.

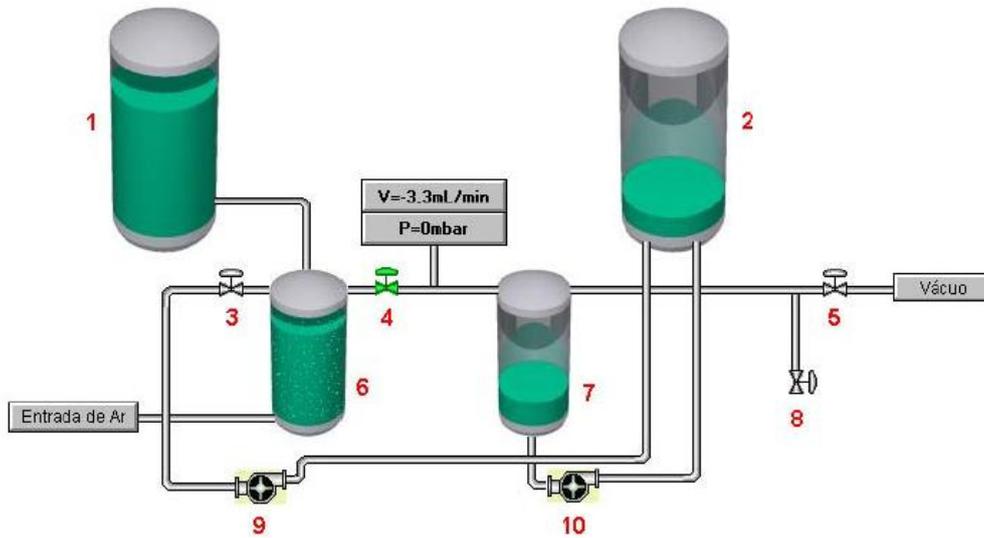


Figura 3.1: Ilustração esquemática do sistema de biorreator com membranas. 1 – Tanque de armazenamento do efluente; 2 – Tanque de armazenamento do permeado; 6 – Biorreator; 7 – Tanque de coleta do permeado; 3, 4, 5 e 8 – Válvulas de controle do tipo solenoide; 9 – Bomba de retrolavagem; 10 – Bomba de esvaziamento do tanque 7. (Silva, 2009).



Figura 3.2: Fotografia do sistema BRMS.

A medida de vazão do processo é realizada a partir de uma célula de carga fixada ao tanque de coleta de permeado, podendo ser visualizada na Figura 3.3. A célula de carga é um dispositivo que determina a massa a partir da deformação do material do dispositivo. Essa deformação é convertida em um sinal elétrico, sendo este enviado à interface gráfica que exibe o valor da massa. A célula de carga utilizada possui uma capacidade máxima de 15 kg.

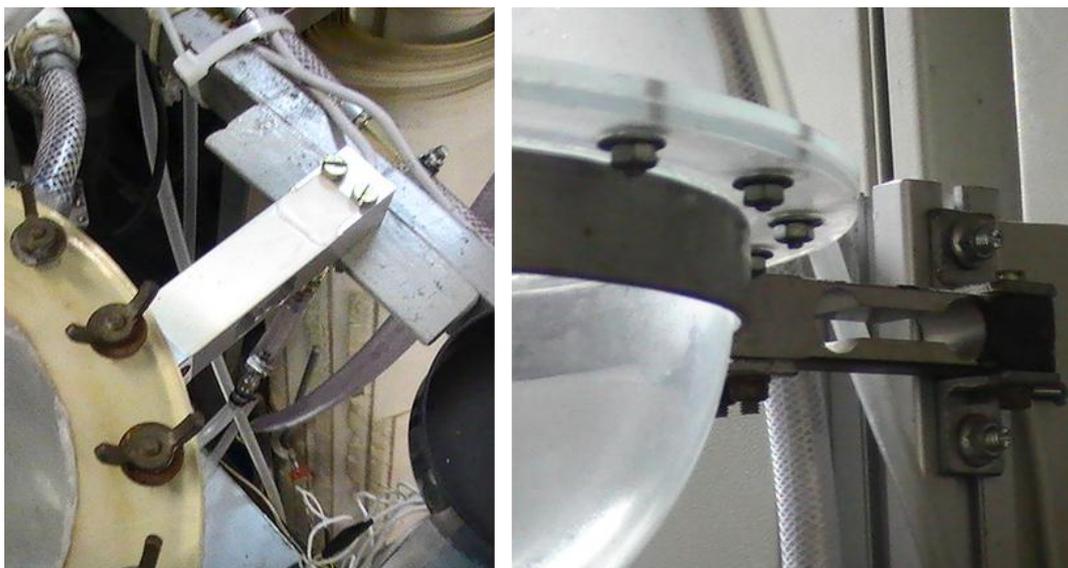


Figura 3.3: Célula de carga fixada ao tanque de coleta de permeado utilizada para medida de vazão do processo.

O processo ocorre da seguinte maneira: o efluente fica armazenado no tanque 1 e é alimentado ao biorreator (tanque 6) através de uma chave de nível e uma válvula solenoide instalada no tanque de armazenamento do efluente, de maneira que, se a chave no tanque 6 marcar nível baixo, a válvula se abre até que o nível de líquido neste mesmo tanque atinja a marca da chave, fazendo, assim, com que a válvula solenoide se feche. A válvula utilizada é do tipo normalmente fechada, logo a corrente na mesma só passa quando o nível estiver baixo, de maneira a evitar que o tanque 6 transborde em casos de falta de energia na rede elétrica.

O módulo de membranas de fibras ocas fica submerso no tanque 6 que possui um sistema de aeração no fundo, necessário para o suprimento de oxigênio aos microrganismos contidos no lodo. A sucção é realizada por uma bomba de vácuo, sendo o efluente tratado (permeado) recolhido no tanque 7, que está acoplado a uma

célula de carga, usada para aferir a massa de permeado recolhida ao longo do tempo. O tanque 7 apresenta um sensor de nível alto que, quando atingido, aciona a bomba 10 e transfere o permeado para o tanque 2, de maior capacidade. Neste momento, as válvulas 4 e 5 são fechadas, para isolar o tanque 7, e a válvula 8 é aberta, para igualar a pressão interior do tanque 7 à pressão atmosférica. A função da válvula 5 é de regular o vácuo, sendo sua abertura controlada por um CLP (Controlador Lógico Programável) conforme a informação da diferença entre o valor medido e o valor atribuído (*set point*).

O sistema foi projetado com uma linha de retrolavagem, que consiste em bombear o permeado no sentido contrário ao de permeação. Quando esta linha é acionada, a válvula 4 se fecha, a bomba 9 liga e a válvula 3 se abre, de maneira que o permeado armazenado no tanque 2 seja bombeado ao módulo de membranas. O processo funciona de forma intermitente, onde é possível escolher os intervalos desejados de permeação e retrolavagem, como por exemplo, 10 segundos de retrolavagem a cada 10 minutos de permeação.

Para a utilização de todos estes equipamentos de forma automatizada como descrito anteriormente, foi necessária a edição de um algoritmo específico para o CLP. Juntamente, foi criada uma interface gráfica (Figura 3.4) para o computador, com o objetivo de acompanhar o experimento e monitorar os dados obtidos.

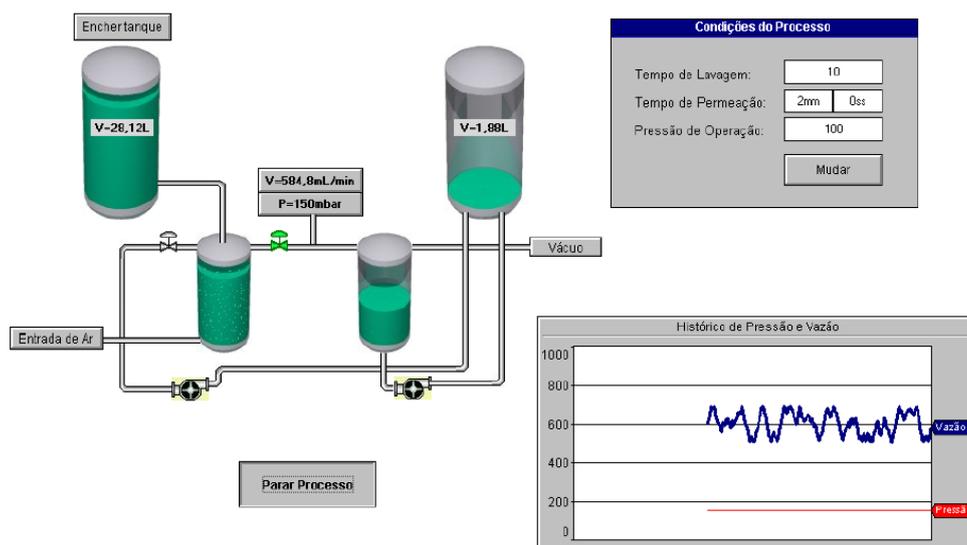


Figura 3.4: Interface gráfica do sistema BRM no modo de operação contínua (Silva, 2009).

Esta interface foi editada utilizando o software Elipse SCADA, e permite a operação do sistema em três modos distintos descritos a seguir:

- Modo 1 – Operação propriamente dita – neste modo, é possível realizar o processo de maneira contínua, sendo possível alterar os intervalos de permeação e retrolavagem, assim como a pressão de operação desejada para o processo.
- Modo 2 – Permeação – este modo é utilizado para caracterização da membrana (permeabilidade hidráulica), a partir da modificação dos limites de operação (pressão inicial e final), passo de operação (tempo que permanece em determinada pressão) e degrau de operação (incremento dado na pressão a cada passo). Este modo também é utilizado para calcular o fluxo crítico do sistema, a partir da permeação com lodo.
- Modo 3 – Manutenção – através do painel de equipamentos é possível ligar/desligar bombas e abrir/fechar válvulas; utilizado para operações de manutenção.

3.1.1 Membrana e módulos

As membranas poliméricas na configuração fibras ocas utilizadas para construção dos módulos são fabricas pela PAM – Membranas Seletivas Ltda, cujo material é a poli(éter-imida) (PEI). Algumas características disponibilizadas pelo fabricante estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Características da membrana informadas pelo fabricante.

CARACTERÍSTICAS	VALORES
Pressão máxima (bar)	4
Temperatura máxima (°C)	100
Faixa de pH	2 – 13
Diâmetro externo da fibra (mm)	0,8 – 1,0
Diâmetro dos poros (µm)	0,1 – 0,5
Permeância Hidráulica (L.m ² .h ⁻¹ .bar ⁻¹)	300

As características da membrana, na medida do possível, devem ser confirmadas a partir procedimentos adicionais, pois as características fornecidas são valores médios e, quando se utiliza uma área pequena de membrana, as variações são mais acentuadas. O diâmetro externo da fibra foi medido com a utilização de um micrômetro. O diâmetro dos poros pode ser determinado com a análise de MEV. A permeância hidráulica das membranas é calculada a partir do teste de permeabilidade, onde o fluxo permeado é medido em cada pressão transmembrana (PTM) aplicada ao feixe de membranas, assim obtendo a relação do fluxo com a PTM (Equação 2.8).

Com as membranas do tipo fibra oca descritas, foi realizada a construção dos módulos, em duas etapas. Na primeira delas, fez-se a colagem das fibras no interior de um tampão de PVC (Policloreto de vinila), com o intuito de manter o lúmen (parte interna das fibras) fechado, pois a retirada do permeado é realizada pela outra extremidade (Figura 3.5). Para garantir que a estrutura do módulo seja mecanicamente estável, insere-se na etapa de colagem uma haste rígida de fio de cobre (espessura de 10 mm).

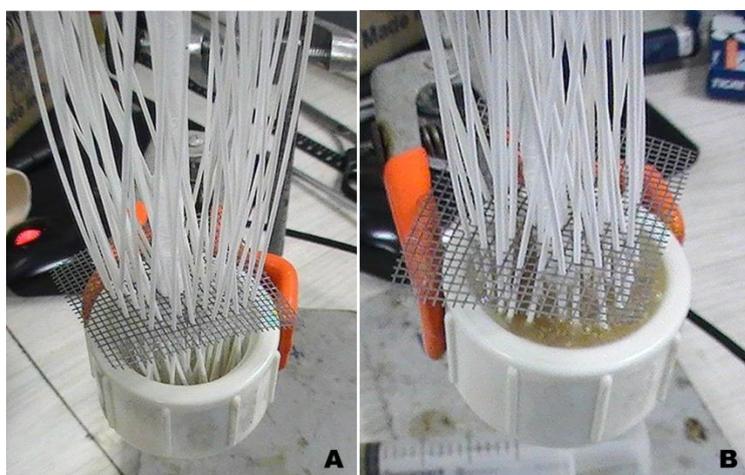


Figura 3.5: Primeira etapa de colagem do módulo de membranas. A - Inserção das fibras; B - Colagem das fibras em um tampão de PVC de 1 in (2,54 cm).

A segunda etapa de construção do módulo foi realizada 24 horas após a primeira etapa, a partir da colagem das fibras da outra extremidade no interior de um *niple* de PVC. Para conter a cola, foi feito um pequeno envelope de plástico na extremidade da rosca do *niple* e pela outra extremidade as fibras foram inseridas (Figura 3.6). Após o tempo de cura da cola (24 horas), a parte do envelope é cortada

para permitir que o lúmen fique aberto. Esta metodologia foi semelhante à utilizada por Silva (2009), apenas modificando as dimensões das peças de PVC utilizadas por esse autor.

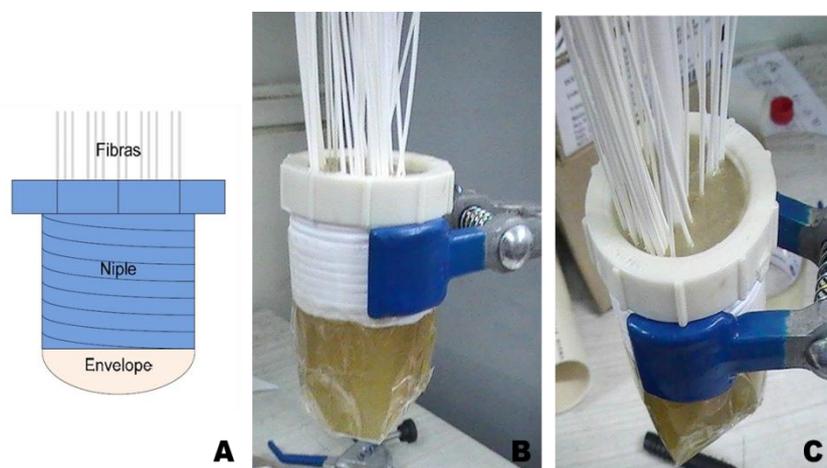


Figura 3.6: A – Ilustração esquemática do envelope (Silva, 2009); B – Colagem das fibras no interior de um *niple* de PVC de 2,54 cm (1 in); C – Visão superior.

Para execução deste trabalho, foram confeccionados módulos contendo de 50 a 60 fibras, com comprimento entre 24 e 28 cm, resultando em uma área de permeação média de 0,038 m². O diâmetro dos módulos é determinado pela dimensão das peças de PVC, sendo que, neste trabalho, foram utilizados *niples* de 1,91 cm (3/4 in) e 2,54 cm (1 in), de maneira que a densidade de empacotamento dos módulos para cada diâmetro foi de, respectivamente, 307 e 543 m².m⁻³. Foram construídos 4 módulos de cada diâmetro, utilizados até o rompimento das fibras. Os feixes de membranas eram armazenados em um tanque de 20 litros de água destilada, sendo este volume trocado a cada semana.

Após a construção dos módulos e anteriormente à realização de experimentos de permeação com lodo, era realizada a injeção de ar no sentido contrário ao de permeação com o mesmo submerso em água destilada, com o intuito de verificar se a colagem das fibras foi adequada, evitando assim a contaminação do permeado com algum microrganismo presente no lodo ativado. Os procedimentos de limpeza adotados para os módulos de membranas consistiram em limpezas físicas (retrolavagens) e lavagens com água destilada após experimentos com lodo ativado, com o intuito de recuperar ao máximo a permeância hidráulica.

3.1.2 Sistema de aeração

O sistema de aeração é composto de três partes principais: compressor, rotâmetro e aeradores. O compressor é responsável pelo suprimento de ar comprimido ao sistema, cuja vazão de operação será determinada pelo rotâmetro, que possui uma faixa de medição de 0 a 10 L.min⁻¹, na pressão de 2 bar.

Os aeradores constituem a parte do sistema que está em contato com o processo, sendo dispostos no interior do biorreator para promover turbulência e fornecer oxigênio à biomassa. Foram utilizados dois modos de aeração distintos neste trabalho, denominados de Modo 1 e Modo 2. Estes modos de aeração estão descritos a seguir.

3.1.2.1 Aeração Modo 1

A aeração Modo 1 consiste em fazer a alimentação de ar comprimido somente no fundo do biorreator, a partir do aerador mostrado na Figura 3.7, com o detalhe da formação de bolhas. A confecção do mesmo foi realizada manualmente, segundo metodologia de Silva (2009), utilizando 5 pedras porosas de aquário em formato cilíndrico de 105 mm de diâmetro e 3,2 cm de comprimento. O aerador é colocado no fundo do biorreator, preenchendo quase totalmente a área do fundo do tanque, evitando que o lodo se deposite nessa região, tornando a hidrodinâmica mais homogênea.



Figura 3.7: A – Fotografia do aerador utilizado no fundo do tanque; B – Detalhe da formação de bolhas.

3.1.2.2 Aeração Modo 2

A aeração Modo 2 consiste em realizar a alimentação de ar comprimido no fundo do biorreator e no interior do módulo de membranas, a partir dos aeradores mostrados na Figura 3.8, construídos com as próprias fibras de PEI utilizadas para confecção do módulo. As fibras dos aeradores são enroladas em torno das fibras do módulo, de maneira que o ar entre por um lado do lúmen e saia pelo outro, liberando bolhas no interior do feixe de membranas.

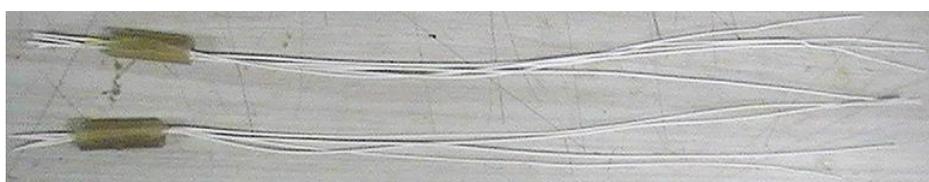


Figura 3.8: Fotografia dos aeradores utilizados no interior do módulo de membranas.

Essa modalidade de aeração busca promover uma aeração mais homogênea, de maneira que o ar fique distribuído sobre todo o conteúdo do biorreator e no interior do módulo. A aeração Modo 2 é ativada a partir de uma válvula esférica do tipo abre-fecha, conforme esquema ilustrativo apresentado na Figura 3.9. Assim, podem-se comparar dois modos distintos de aeração, para uma mesma vazão de ar comprimido.

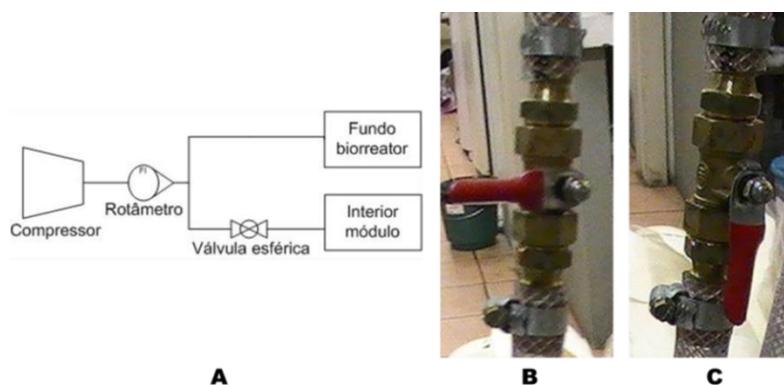


Figura 3.9: A - Fluxograma do sistema de aeração; B - Aeração Modo 1 (válvula fechada); C - Aeração Modo 2 (válvula aberta).

3.2 Solução de alimentação

O efluente utilizado para alimentação do sistema BRM é do tipo sintético, utilizando como substratos principais glicose e peptona. A composição do mesmo foi baseada no trabalho de Silva (2009) e está apresentada na Tabela 3.2. A solução foi preparada de forma a produzir uma alimentação com DQO de 150 mg/L e pH final de 7, ajustado com solução de hidróxido de sódio (NaOH).

Tabela 3.2: Composição do efluente sintético (Silva, 2009).

Composto	Concentração (mg/L)
Glicose	75
Peptona	75
(NH ₄) ₂ SO ₄	72
KH ₂ PO ₄	13,2
CaCl ₂ .2H ₂ O	0,4
MgSO ₄ .7H ₂ O	5
FeCl ₃ .6H ₂ O	1,5
NaCl	1

3.3 Ensaio de permeação

3.3.1 Compactação da membrana

Anteriormente às medidas de permeância hidráulica e, também, aos experimentos de permeação com lodo no sistema BRM, é necessário que se verifique a tendência de compactação da membrana.

A compactação da membrana consiste no adensamento da sua microestrutura quando aplicada determinada diferença de pressão. A pressão de 300 mbar foi utilizada para compactação da membrana, até que fosse atingido um fluxo permeado de água estável. Esse procedimento foi realizado antes de cada experimento, para permitir a análise dos fenômenos de compactação e de incrustação separadamente.

3.3.2 Fluxo Crítico

O fluxo crítico do sistema foi determinado pela mesma metodologia utilizada na determinação da permeância hidráulica. O monitoramento do fluxo permeado foi realizado por 3 horas, para 3 pressões de vácuo distintas: 350, 400 e 450 mbar (PTM iguais a 650, 600 e 550 mbar).

Como demonstrado na Figura 2.10, do trabalho de Howell *et al.* (2004), o fluxo crítico pode variar com a mudança de velocidade superficial de ar (razão entre a vazão de aeração e a área de seção transversal do tanque). Logo, utilizou-se a condição hidrodinâmica menos favorável de todas testadas (todas as condições estão mostradas na Tabela 3.3) para a determinação do fluxo crítico. Assume-se a condição hidrodinâmica menos favorável aquela em que se utilizou módulo de 0,75 polegada, aeração Modo 1, com vazão de 2 L.min⁻¹.

A determinação do fluxo crítico somente para esta condição foi realizada para estabelecer qual pressão transmembrana será utilizada nos demais experimentos, considerando-se que para condições mais favoráveis o fluxo crítico seja maior.

3.3.3 Operação com lodo ativado

Após a membrana ser condicionada e caracterizada, os experimentos com lodo ativado foram iniciados a fim de estudar o efeito das condições hidrodinâmicas no desempenho do processo. Algumas condições operacionais mantiveram-se fixas ou não foram manipuladas ao longo dos experimentos, objetivando analisar somente a influência das variáveis hidrodinâmicas. Essas condições estão listadas a seguir:

- Área de membrana por módulo: os módulos foram construídos, segundo a metodologia descrita na seção 3.1.1, com uma área de permeação entre 35 e 40

cm². Para cada módulo foram utilizadas de 50 a 60 fibras, cada uma com diâmetro externo médio de 0,9 mm e um comprimento final de 24 a 28 cm.

- Concentração de sólidos: as concentrações de SST e SSV utilizadas no processo foram de, 12.000 e 8.000 mg/L, respectivamente.
- Pressão de operação: a permeação com lodo foi realizada sob vácuo de 400 mbar, ou seja, uma pressão transmembrana (PTM) de 600 mbar.
- Tempo de operação: cada experimento foi realizado por um tempo de aproximadamente 4 (quatro) dias.
- Idade do lodo (TDS): no ponto de coleta, a idade do lodo esteve entre 15 e 20 dias, segundo informações dos operadores. O lodo ativado utilizado nos processos foi obtido na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) São João-Navegantes, umas das unidades do Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) da Prefeitura de Porto Alegre. Semanalmente, 15 litros de amostra eram coletados e realizavam-se as análises gravimétricas para atingir os valores de SST e SSV anteriormente mencionados.
- TDH: essa condição operacional não se manteve constante ao longo do processo, pois o TDH é inversamente proporcional à vazão e, em todos os experimentos, ocorreu um decréscimo de fluxo permeado com o tempo. Logo, os experimentos iniciaram-se com um TDH menor do que aquele ao final do tempo de operação (4 dias).
- Solução de alimentação: a alimentação consistiu no efluente sintético cuja composição está apresentada na Tabela 3.2.
- Ciclo de retrolavagem: a duração/frequência de retrolavagem utilizada foi de 10 segundos de retrolavagem a cada 15 minutos de permeação (15min/10s).
- Temperatura: a temperatura de cada processo foi monitorada, para posterior ajuste do fluxo permeado a partir da Equação 2.9.

A seguir, estão listadas as variáveis hidrodinâmicas avaliadas neste trabalho.

- Vazão de aeração: a partir do rotâmetro do sistema de aeração, é possível fixar um valor constante para todo o processo. Os valores analisados foram de 2, 5 e 8 L.min⁻¹. Esses valores foram escolhidos baseados no trabalho de Silva (2009), que testou 4 diferentes intensidades de aeração (2, 4, 6 e 8 L.min⁻¹) e não encontrou um valor limite de aeração benéfico ao desempenho.
- Modo de aeração: foram utilizados os dois modos de aeração descritos anteriormente. O Modo 1 consiste em injetar o ar somente pelo fundo do biorreator, e, no Modo 2, injeta-se ar pelo fundo e pelos aeradores localizados no interior do módulo.

- Densidade de empacotamento do módulo: como a área de cada módulo é fixa (35 a 40 cm²), a densidade de empacotamento é modificada a partir do volume do módulo, sendo este determinado a partir das dimensões das peças de PVC utilizadas na construção, segundo a metodologia descrita em 3.1.1. Foram construídos módulos de 2 diâmetros distintos: 0,75 in (1,91 cm) e 1 in (2,54 cm).

A Tabela 3.3 apresenta uma visão geral de quais condições foram utilizadas nos processos de permeação com lodo ativado, separando aquelas que não foram manipuladas das variáveis avaliadas e de interesse do estudo.

Tabela 3.3: Condições de operação dos ensaios com lodo ativado no sistema BRM.

Variável	Valor assumido
VARIÁVEIS FIXAS OU NÃO MANIPULADAS	
Área de permeação por módulo	35 – 40 cm ²
Concentração SST e SSV	12.000 e 8.000 mg/L
PTM	600 mbar
Tempo de operação	4 dias
Idade do lodo (no ponto de coleta)	15 – 20 dias
TDH	Dependente da vazão do processo
Alimentação	Efluente sintético (DQO = 150 mg/L)
Ciclo de retrolavagem	15 min permeação/ 10 s retrolavagem
Temperatura do biorreator	14 – 28 °C
VARIÁVEIS AVALIADAS	
Vazão de aeração	2, 5 e 8 L.min ⁻¹
Modos de aeração	Modo 1 e Modo 2
Diâmetro de módulo	0,75 e 1 in

Durante os 4 dias de operação, amostras do permeado foram coletadas a cada 24 horas, para posterior análise da concentração de matéria orgânica. Também foram realizadas medidas de pH, condutividade elétrica e turbidez do efluente e do permeado, a fim de avaliar a eficiência do tratamento. Ao final da operação, o perfil de

decréscimo de fluxo permeado durante o processo é obtido, e os respectivos valores são ajustados aos modelos de incrustação de Hermia no software Statistica.

3.4 Caracterização da Membrana

3.4.1 Morfologia

A morfologia da superfície e da seção transversal das membranas foi determinada a partir de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para seção transversal, as fibras foram fraturadas em nitrogênio líquido, sendo analisadas 3 amostras de membrana nova e 3 amostras de membrana usada. Para análise da superfície, não foi necessário realizar a fratura com nitrogênio líquido, sendo analisadas 3 amostras para membrana nova e 3 amostras da membrana usada.

3.4.2 Hidrofilicidade

A hidrofilicidade da membrana de PEI foi determinada a partir de um analisador da forma de gota, equipado com uma câmara fechada e uma lente, onde é possível visualizar o ângulo de contato formado entre a gota d'água e a superfície do material. O equipamento é da marca Kruss modelo DSA30, capaz de medir ângulos de 0 a 180°, com um erro de 0,1°.

3.4.3 Permeância Hidráulica

A medida da permeância hidráulica (L_p) se baseia na determinação do fluxo de água através da membrana como uma função da pressão aplicada. Este parâmetro é determinado a partir de medidas de fluxo permeado (J_p) obtido em cada pressão transmembrana (PTM), conforme equação 3.1:

$$J_p = L_p \times \Delta P \quad (3.1)$$

onde, $\Delta P = PTM = P_{atm} - P_{v\u00e1cuo}$.

O monitoramento do fluxo permeado foi realizado durante 15 minutos para cada pressão avaliada, sendo este intervalo denominado de “passo”. A cada “passo”, a pressão foi alterada para uma pressão 50 mbar superior a anterior, sendo esta mudança denominada “degrau”. As pressões de vácuo avaliadas foram de 350 a 800 mbar, ou seja, os “degraus” da PTM avaliados foram de 650 a 200 mbar. O intervalo de “passo” foi escolhido de maneira que os testes de permeância hidráulica não ultrapassassem o tempo total de 3 horas. As medidas de permeância hidráulica foram realizadas nos módulos de membranas antes e após cada experimento de permeação com lodo ativado, sem a realização de nenhuma etapa de limpeza.

3.5 Técnicas analíticas

As amostras de efluente, lodo e permeado foram caracterizadas em relação a alguns parâmetros físico-químicos brevemente descritos a seguir.

3.5.1 Determinação da Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Carbono Orgânico Total (COT)

A determinação de DQO foi realizada segundo o método colorimétrico de refluxo fechado, descrito na técnica 5220-D do Standard Methods 20th (Apha, Awwa, Wef, 1998).

O COT foi determinado a partir de um analisador de carbono total da marca Shimadzu Modelo TOC VCSH. O equipamento realiza a medição de carbono total e carbono inorgânico, sendo a diferença igual ao COT.

3.5.2 Medidas de condutividade elétrica, pH e turbidez

Algumas propriedades do efluente e do permeado foram medidas ao longo dos experimentos, de forma a avaliar a capacidade do sistema em suportar distúrbios na corrente de entrada.

A condutividade elétrica foi determinada a partir de um condutivímetro digital da marca Digimed modelo DM31. O pH foi determinado por meio de um pHmetro da

marca Digimed modelo DM 20. Para a turbidez, foi utilizado o turbidímetro da Policontrol modelo AP2000.

3.5.3 Teor de sólidos

A análise de sólidos é de suma importância para o controle físico e biológico de um processo de tratamento de efluentes. O teor de sólidos foi analisado a partir da técnica gravimétrica, descrita na seção 2540 do Standard Methods 20th (Apha, Awwa, Wef , 1998).

4 Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com os estudos relacionados ao sistema BRM. Primeiramente, apresentam-se os resultados relativos aos testes de pré-operação do sistema, com o comportamento da pressão transmembrana e a calibração da célula de carga. Na sequência, são apresentados resultados de caracterização da membrana utilizada, como MEV, medidas de ângulo de contato, teste de compactação e de permeância hidráulica. Após, apresentam-se os principais resultados deste trabalho, consistindo nos estudos das condições hidrodinâmicas como vazão de aeração, densidade de empacotamento do módulo e modos de aeração. Por fim, são apresentados os resultados de concentração de matéria orgânica e medidas de algumas propriedades do efluente e permeado. Neste capítulo, os dados utilizados para construção dos gráficos estão apresentados nas tabelas situadas no Anexo B.

4.1 Pré-operação do sistema BRM

O sistema BRM em estudo é composto por equipamentos que são essenciais ao monitoramento do processo. Anteriormente aos ensaios de permeação com lodo, realizaram-se alguns testes com o intuito de verificar a precisão dos medidores de pressão e de vazão da unidade experimental. O comportamento da pressão do sistema com relação ao *set-point* está apresentado na Figura 4.1.

Observando o gráfico, percebe-se que o medidor de pressão não apresentou problemas de precisão nas medidas acima de 300 mbar de pressão absoluta, mostrando um comportamento adequado em testes de mudança de *set-point*. Porém, deve-se salientar que o sistema apresentou um limite operacional de pressão, não sendo possível atingir pressões absolutas menores que 287 mbar. O comportamento também mostrou-se estável para valores de *set-point* maiores que 350 mbar, atendendo adequadamente aos valores de pressão utilizados neste estudo.

A medida de vazão do processo é realizada a partir de uma célula de carga fixada ao tanque de coleta de permeado. O sinal elétrico deve ser calibrado de maneira a obter a relação entre a massa real e a massa obtida pela célula de carga. A Tabela 4.1 apresenta os valores de massa utilizados na calibração do equipamento, a massa obtida pela célula de carga e o erro máximo em cada faixa. Observando os valores, percebe-se um erro muito pequeno para as menores massas e um erro

máximo de 12% para os maiores valores. Esta diferença deve estar associada à não-linearidade do sinal elétrico com a deformação para os valores mais elevados.

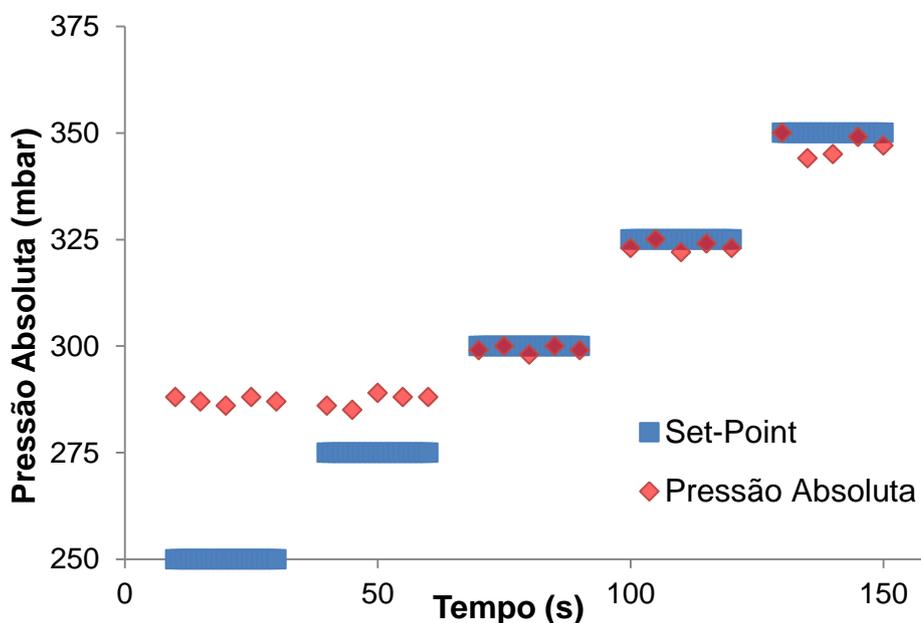


Figura 4.1: Valores de pressão absoluta do sistema ao longo do tempo para diferentes valores fixados.

Tabela 4.1: Valores de massa medidos pela célula de carga e respectivo erro máximo para cada medida.

Massa real (g)	Massa Célula de carga (g)	Erro (%)
45,5	45,20	0,7%
136,5	136,95	0,3%
227,5	221,61	2,6%
454,7	451,83	0,6%
908,5	883,77	2,7%
1816,3	1967,93	8,3%
2724,1	3035,85	11,4%
4992,3	5578,95	11,8%

Apesar da existência desse erro, optou-se por utilizar a célula de carga em preferência aos medidores de vazão convencionais devido à natureza do escoamento. A aplicação de vácuo sob as membranas tende a resultar em um escoamento bifásico

(mistura de ar e água/permeado) e as medidas de vazão em equipamentos de medição volumétrica podem apresentar problemas se as fases não forem separadas, devido à grande diferença de massa específica da fase líquida e gasosa. Utilizando a célula de carga, não há necessidade de separação das fases, pois a massa da fase gasosa é desprezível com relação à massa da fase líquida.

4.2 Caracterização da Membrana

As membranas utilizadas neste trabalho foram fornecidas pela PAM – Membranas Seletivas Ltda., cujo material é a poli(éter)imida (PEI). Alguns testes de caracterização e condicionamento foram realizados com a intenção de conhecer as características do material utilizado, tais como morfologia, capacidade de compactação e permeância hidráulica à água.

4.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Figura 4.2 apresenta a fotomicrografia da superfície da membrana. A filtração ocorre da parte externa para a parte interna (de fora para dentro), a partir da superfície lateral da membrana. O diâmetro externo médio das fibras, medido a partir de um micrômetro, ficou em torno de 0,9 mm. Nesta fotomicrografia é possível visualizar com nitidez a morfologia da superfície, podendo observar os pequenos tamanhos de poros da camada seletiva.

A análise da figura revela que a membrana apresenta elevada porosidade superficial e, devido às partes escuras percebe-se que os poros são ativos, isto é, contribuem para o fluxo permeado. Além disso, através de uma medida visual, com o uso de uma régua, verificou-se que os poros estão na faixa de tamanhos fornecida pelo fabricante.

A fotomicrografia da seção transversal da membrana está apresentada na Figura 4.3. Pela análise da mesma, observa-se que a membrana utilizada consiste em uma membrana porosa e assimétrica, pois, do lado externo à fibra percebe-se a existência de uma camada seletiva com poros muito pequenos, e do lado interno, uma camada com poros maiores. Além disso, percebem-se alguns poucos macrovazios

próximos à camada seletiva e o aumento do tamanho de poros na seção transversal é gradual e, aparentemente, com poucos defeitos.

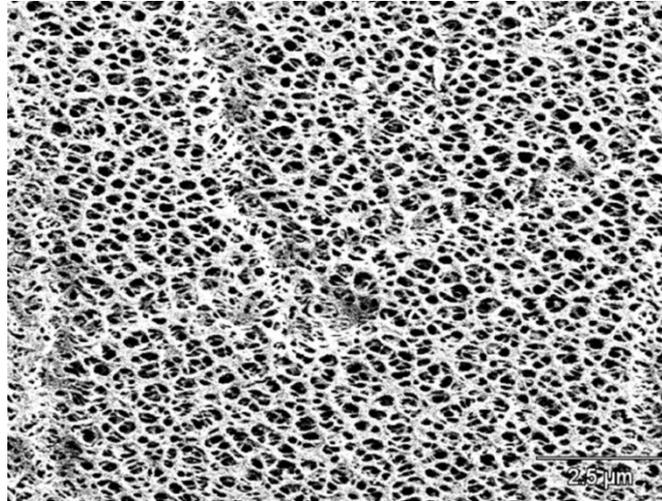


Figura 4.2: Fotomicrografia da superfície da membrana obtida por MEV (5 kV). Aumento de 1.000x.

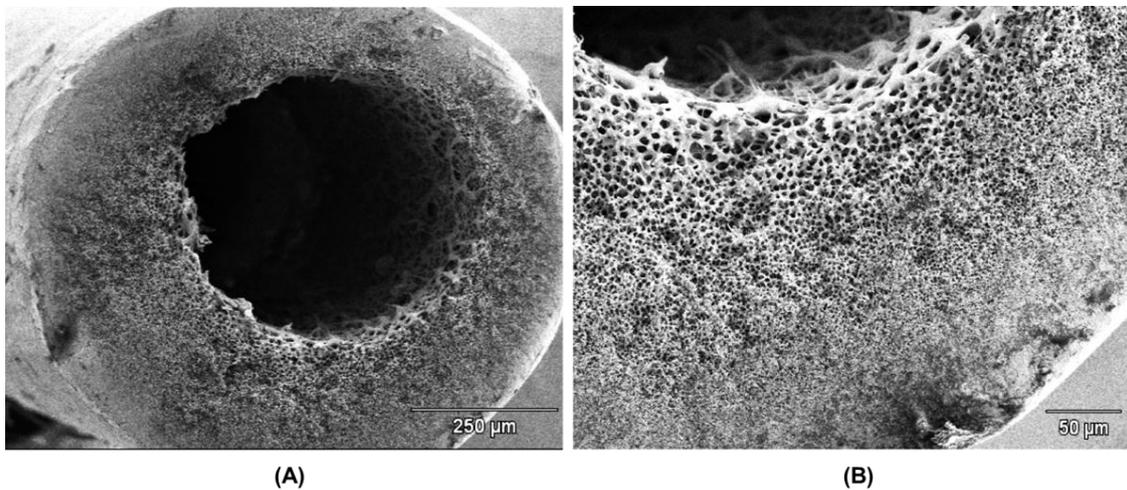


Figura 4.3: Fotomicrografias da seção transversal da membrana PEI utilizada obtidas por MEV (5 kV). A – Aumento de 130 x; B – Aumento de 350 x.

4.2.2 Hidrofilicidade

A hidrofilicidade do material da membrana (PEI) foi determinada a partir de medidas de ângulo de contato, realizadas em um goniômetro. Foram determinados os ângulos de contato para a membrana nova, sem ter sido usada no tratamento com lodo ativado, e na membrana usada, após a utilização no tratamento biológico. Os valores de ângulo de contato médio e desvio-padrão estão apresentados na Tabela 4.2. Para as medidas, foram utilizadas 5 amostras de membrana nova e 5 amostras de membrana usada, realizando-se duas medidas para cada uma delas.

Tabela 4.2: Ângulo de contato médio para membrana nova e membrana usada.

	Membrana Nova	Membrana Usada
Ângulo de contato médio	77,5°	97,1°
Desvio-padrão (%)	16,4° (21,1 %)	18,8° (19,4 %)

A membrana usada apresentou um maior ângulo de contato médio que a membrana nova, podendo indicar que houve uma alteração na hidrofilicidade do material após o tratamento, devido à incrustação. Porém, pelos valores de desvio-padrão das medidas, não é possível afirmar que houve mudança significativa no ângulo de contato do material antes e após o tratamento. A variação nas medidas também pode estar associada à geometria do material.

A Figura 4.4 apresenta fotografias de algumas medidas de ângulo de contato das amostras. Observa-se que a gota d'água usada para medir o ângulo não se estabelece de maneira plana na superfície do material, isso porque, sendo a membrana do tipo fibra oca, a superfície lateral da mesma é cilíndrica.

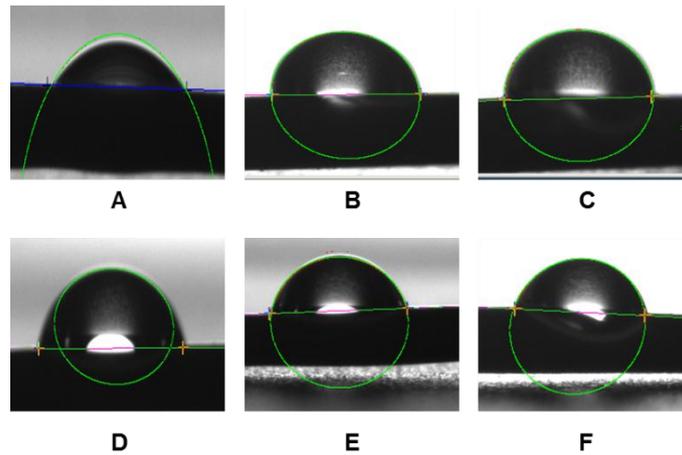


Figura 4.4: Fotografias das medidas de ângulo de contato. A, B e C - Membrana nova; D, E e F - Membrana usada.

4.2.3 Compactação

Na Figura 4.5 está apresentado o resultado da compactação, sendo os valores de fluxo permeado iguais à média de dois valores de fluxo, correspondentes a dois módulos de membranas distintos utilizados para o experimento.

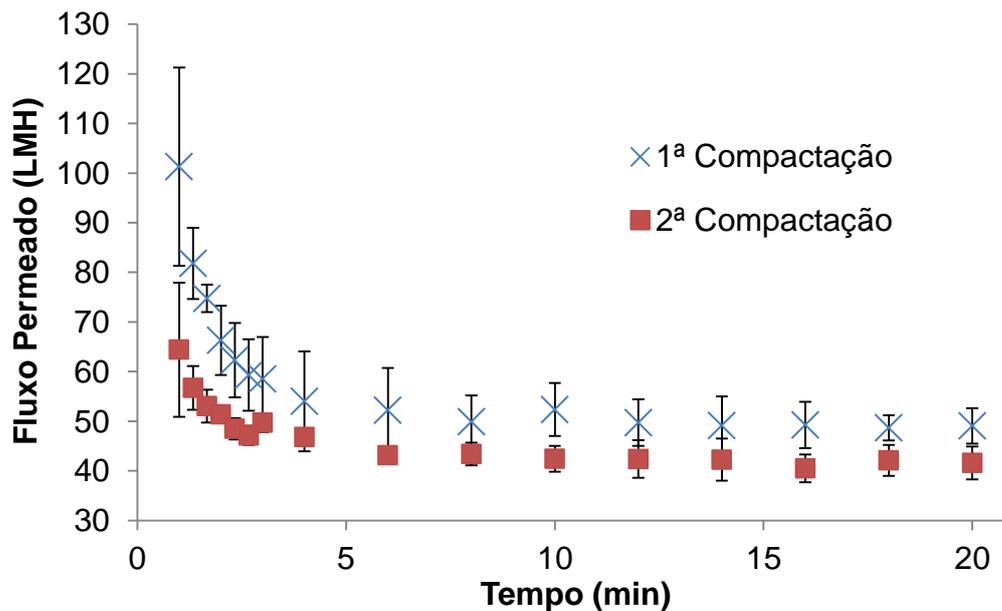


Figura 4.5: Resultados do fluxo permeado de água destilada versus tempo no experimento de compactação da membrana nova na pressão absoluta de 300 mbar.

Observa-se que a membrana mostrou-se bastante compactável, contudo, o processo ocorreu rapidamente. A compactação foi realizada nas membranas novas, até que fosse atingido um fluxo permeado de água estável, sendo este tempo de aproximadamente 6 minutos, na pressão absoluta de 300 mbar.

Este procedimento foi repetido 24 horas depois e observou-se que a membrana sofre uma leve descompactação, provavelmente, decorrente da estrutura microporosa da membrana e acomodação das cadeias poliméricas de PEI. O fluxo permeado final para a 1ª e 2ª compactação foram, respectivamente, em torno de 49 e 41 LMH.

O fluxo inicial da 1ª compactação foi de 101 LMH, resultando numa redução de 52% da permeabilidade; para a 2ª compactação, o fluxo inicial foi de 65 LMH, reduzindo em 35% a permeabilidade da membrana. Por estes valores, ressalta-se a importância de realizar previamente a compactação da membrana nova, de maneira a permitir a análise dos fenômenos de incrustação e compactação separadamente.

Pela análise do gráfico, nota-se um maior desvio-padrão nos instantes iniciais do teste de compactação e um desvio menos acentuado nos instantes finais. Essa discrepância nos valores de fluxo permeado está associada à diferença de permeância hidráulica entre os módulos usados no teste (resultados apresentados na seção 4.2.4).

4.2.4 Permeância Hidráulica

A permeância hidráulica de uma membrana consiste na relação entre o fluxo permeado e a pressão transmembrana. Na Figura 4.6 estão apresentados os resultados de fluxo permeado de água destilada versus pressão transmembrana.

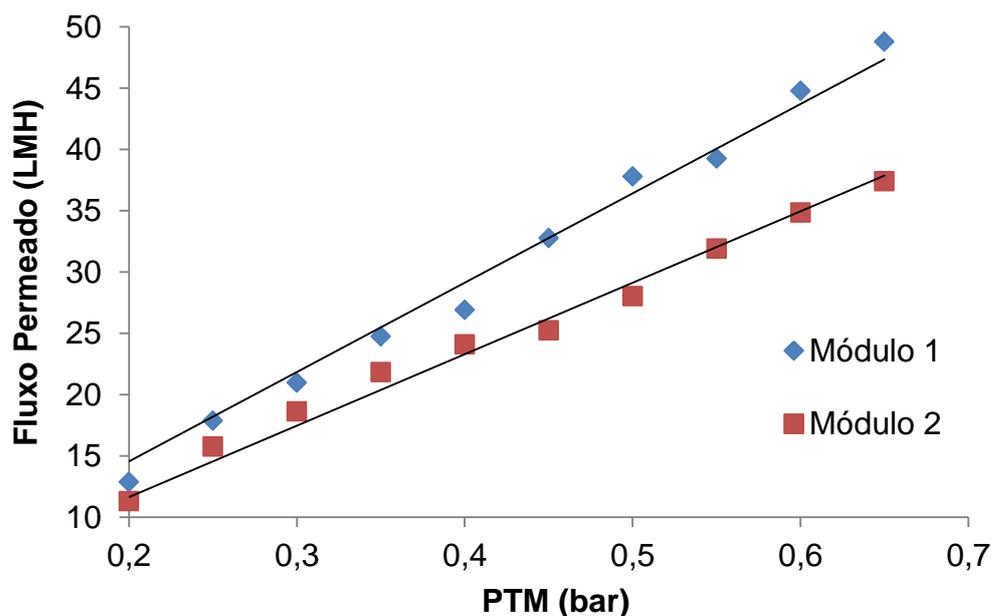


Figura 4.6: Fluxo permeado em função da pressão transmembrana: permeância hidráulica de dois módulos diferentes. Módulo 1 – permeância hidráulica de 73 LMH/bar e R^2 de 0,9883. Módulo 2 – permeância hidráulica de 58 LMH/bar e R^2 de 0,9872.

Os valores de permeância hidráulica obtidos para os dois módulos distintos apresentados são de 73 LMH/bar e 58 LMH/bar. O valor informado pelo fabricante é de 300 LMH/bar, resultando numa diferença em torno de 80%. Isto pode estar associado à diferente área de permeação utilizada pelo fabricante para determinar a permeância, ou a algum outro fator de variabilidade no processo de fabricação das membranas.

4.3 Permeação com lodo ativado

Posteriormente aos testes de pré-operação do sistema BRM, de condicionamento e caracterização das membranas, os experimentos com lodo ativado foram realizados buscando avaliar a influência das condições hidrodinâmicas no desempenho do processo.

Para a realização dos testes de longa duração com lodo ativado é necessária a determinação das condições de operação. Primeiramente, será apresentada a

avaliação realizada no sistema BRM com relação ao fluxo crítico para determinar a pressão de trabalho.

Na sequência, serão apresentados os resultados de fluxo permeado obtidos nos estudos da vazão de aeração, da densidade de empacotamento do módulo e do modo de aeração. Para estes estudos, foram realizados mais de 20 experimentos de permeação com lodo, sendo apresentados somente os resultados referentes aos experimentos que apresentaram menor variação nas variáveis fixas ou não manipuladas ao longo dos 4 dias. Nas tabelas e gráficos apresentados, o fluxo permeado inicial é considerado igual ao fluxo permeado dos 10 minutos iniciais do experimento e o fluxo permeado ao longo do tempo corresponde ao intervalo de tempo que o tanque de coleta de permeado levou para ser esvaziado.

4.3.1 Avaliação do fluxo crítico

Inicialmente, fez-se uma avaliação da pressão transmembrana a ser utilizada nos experimentos, visando operar os processos na região abaixo do fluxo crítico. Considerou-se a condição hidrodinâmica considerada menos favorável para avaliação do fluxo crítico, isto é, aquela de módulo de $\frac{3}{4}$ in, aeração Modo 1 e vazão de aeração de $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

Na Figura 4.7 estão apresentados os resultados desta avaliação do fluxo crítico, sendo que os valores de fluxo permeado estão representados por valores de fluxo normalizado, obtido a partir da razão entre o fluxo permeado com lodo e o fluxo permeado de água na mesma pressão. Os valores de fluxo permeado correspondem à média de dois valores de fluxo, correspondentes a dois módulos de membranas distintos utilizados para o experimento.

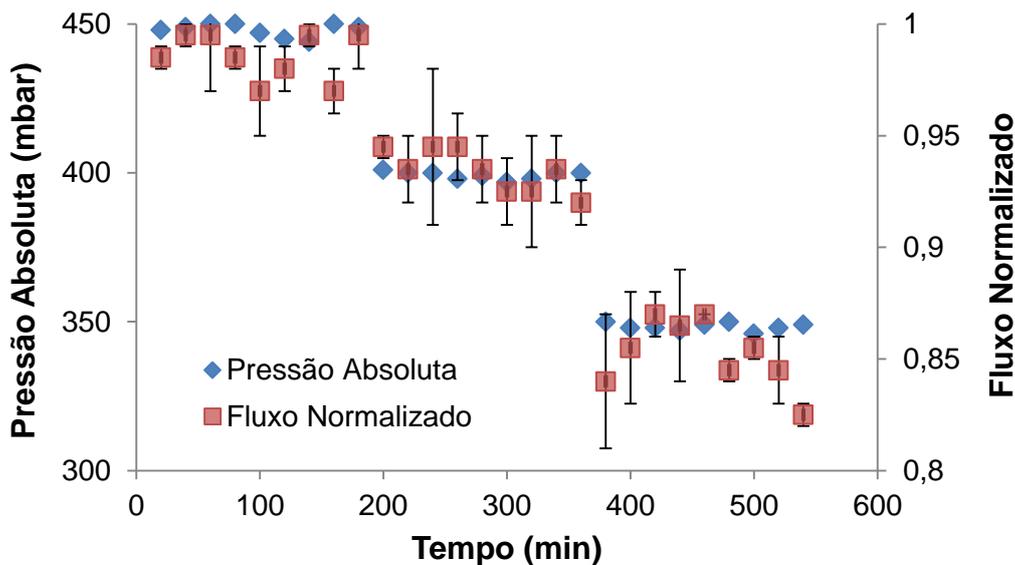


Figura 4.7: Resultados da avaliação do fluxo crítico realizada nas seguintes condições hidrodinâmicas: vazão de aeração de 2 L.min⁻¹, módulo de 3/4 in e aeração Modo 1 e intervalo de tempo de 200 min.

Pela análise do gráfico, observa-se que, para a pressão de 450 mbar, o fluxo normalizado é praticamente igual à unidade, ou seja, o fluxo permeado de lodo é igual ao fluxo de água. Esse comportamento está de acordo com a forma forte da definição de fluxo crítico feita por Field *et al.* (1995), em que o fluxo subcrítico é igual ao fluxo permeado de água nas mesmas condições. Logo, conclui-se que na pressão absoluta de 450 mbar, o sistema ainda não está na região de operação do fluxo crítico.

Na pressão de 400 mbar, os valores de fluxo permeado são levemente menores que o fluxo de água (aproximadamente 94%) e mantêm-se praticamente constantes ao longo do tempo de observação. Esse comportamento está de acordo com a forma fraca da definição de Field *et al.* (1995), em que o fluxo subcrítico consiste em um fluxo permeado estabelecido e mantido no início do processo, mas não necessariamente igual ao fluxo de água.

Em 350 mbar de pressão, o fluxo permeado atinge valores em torno de 85% do fluxo de água e começa apresentar um decaimento com o passar do tempo, indicando que o sistema já está operando na região acima do fluxo crítico.

Com base nestes resultados, conclui-se que na pressão de 400 mbar o sistema atingiu o limite da região do fluxo crítico. Logo, a pressão absoluta de 400 mbar foi a condição operacional de pressão escolhida para os demais experimentos de permeação com lodo ativado.

4.3.2 Avaliação da vazão de aeração

A vazão de aeração é uma importante condição operacional para gerenciamento do desempenho em um BRMS, visto que exerce função de limpeza na superfície das membranas e fornecimento de oxigênio à biomassa. Os valores de vazão de aeração testados neste estudo foram de 2, 5 e 8 L.min⁻¹ e, ao longo dos 4 dias de operação, o valor selecionado permaneceu constante. Na Figura 4.8 estão apresentados os resultados do comportamento do fluxo permeado para diferentes vazões de aeração, utilizando o módulo de ¾ in de diâmetro (1,91 cm).

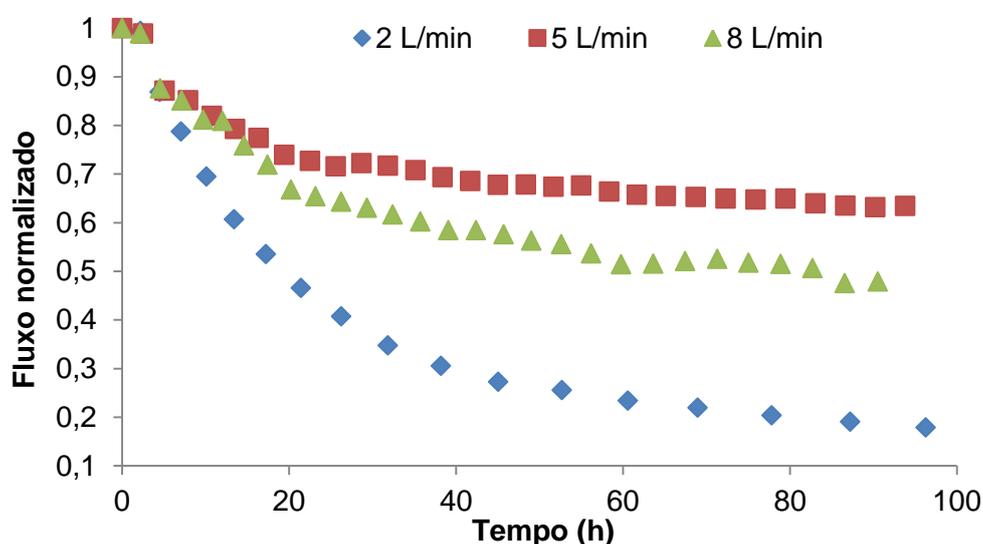


Figura 4.8: Fluxo permeado normalizado ao longo tempo para ensaios de permeação com lodo em diferentes vazões de aeração: 2, 5 e 8 L.min⁻¹; pressão transmembrana de 600 mbar, temperatura de 20°C e o diâmetro do módulo utilizado é de ¾ in.

Em todas as vazões testadas, houve um decréscimo de fluxo permeado ao longo do tempo. A taxa de decaimento do fluxo permeado também diminuiu ao longo do tempo, sendo que, para os valores de 5 e 8 L.min⁻¹, ao final do experimento, obteve-se uma taxa de decaimento menor que o valor de 2 L.min⁻¹.

Os fluxos permeados finais para cada condição e as respectivas permeâncias hidráulicas estão expressos na Tabela 4.3. Ao final do tempo de experimento, os valores de fluxo normalizado para os níveis de 2, 5 e 8 L.min⁻¹ foram de, respectivamente, 0,18, 0,63 e 0,48. Considerando o erro máximo de medida de fluxo

como 12% (erro de medida da célula de carga), os níveis de aeração testados apresentaram fluxos normalizados finais significativamente diferentes.

Tabela 4.3: Valores de fluxo permeado e permeância hidráulica iniciais e finais para os diferentes níveis de aeração testados utilizando módulo de diâmetro 1,91 cm (3/4 in).

Vazão de aeração (L.min ⁻¹)	Fluxo Permeado (LMH)		Permeância Hidráulica (LMH/bar)	
	Inicial	Final	Inicial	Final
2	41,8	7,5	76,8	35,3
5	33,1	21,0	78,4	33,1
8	35,3	16,9	59,5	33,0

O nível de aeração de 2 L.min⁻¹ mostrou-se insuficiente para manter um valor adequado de fluxo permeado ao longo do tempo, pois, no início do experimento, houve uma queda acentuada do fluxo. O valor de fluxo inicial estabelecido foi de 41,8 LMH, podendo ser um indicativo do elevado decaimento nos períodos iniciais.

Este comportamento está de acordo com os resultados obtidos por Chua *et al.* (2002), onde foi avaliado o fenômeno de incrustação para diferentes fluxos permeados, em sistemas BRM sob fluxo constante. Os autores observaram que uma baixa vazão de aeração pode acarretar em um crescimento exponencial da incrustação e, também, que a taxa de incrustação aumenta exponencialmente em relação ao fluxo permeado. Assim, percebe-se que na condição de 2 L.min⁻¹, o BRM em estudo apresentou condições para uma alta taxa de incrustação nos períodos iniciais de operação.

O baixo valor de fluxo permeado final para esta condição também está associado a um acúmulo considerável de lodo na superfície da membrana, na parte inferior do módulo, conforme imagem apresentada na Figura 4.9. Esse acúmulo acarreta em uma perda na área útil de permeação, mostrando que o nível de 2 L.min⁻¹ não foi suficiente para promover a turbulência necessária para realizar a limpeza na superfície da membrana, assim como foi insuficiente para manter uma homogeneidade na suspensão de lodo ativado.



Figura 4.9: Fotografia do acúmulo de lodo na superfície da membrana, na parte inferior do módulo, na condição de $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, pressão transmembrana de 600 mbar , temperatura de 27°C , diâmetro do módulo de $\frac{3}{4} \text{ in}$, concentração SSV do lodo de $8.000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

Com relação aos níveis de 5 e $8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, esperava-se que um aumento na vazão de aeração resultasse em um fluxo permeado final maior, porém isso não foi observado nos resultados. A vazão de aeração de $5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ mostrou-se a condição de melhor desempenho do sistema, indicando a presença de um valor limite de aeração benéfico ao controle da incrustação, dentro dos valores testados.

A ocorrência de uma vazão de aeração limite também foi observada por Ueda *et al.* (1997), em que, utilizando um sistema BRMS sob fluxo constante, foram estudadas as taxas de incrustação em diferentes fluxos permeados, variando a vazão de aeração para cada um destes. Foi observado que, para todos os fluxos, houve uma queda na taxa de incrustação com o aumento da vazão de aeração, atingindo um valor limite para a vazão de aeração.

Destaca-se também que o sistema BRM em estudo apresentou um baixo desempenho com o valor mais alto de aeração testado ($8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$). A utilização de uma vazão de aeração intensa pode ter resultado em uma modificação nas características da biomassa, onde, devido a uma maior taxa de cisalhamento promovida pela aeração, pode-se ter ocasionado a quebra dos flocos, liberando

partículas solúveis e coloidais que contribuíram fortemente para a incrustação no interior dos poros da membrana.

Comportamento semelhante a estes foram obtidos por Meng *et al.* (2008), operando em um BRMS sob pressão constante e por longos períodos. Foi observado que, para os períodos iniciais do processo, a mudança nas características da biomassa pode ser ignorada. Porém, com o passar do tempo, as elevadas vazões de aeração ($13 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$) promoveram uma quebra nas partículas do lodo, diminuindo o tamanho médio dessas e, por consequência, provocando maior incrustação.

Com o objetivo de avaliar as características do lodo antes e após a aeração, foram determinados os valores de SST e SSV iniciais e finais de cada condição testada. Conforme observado na Tabela 4.4, apesar de não ser possível obter uma distribuição do tamanho das partículas, o valor final de SST para o nível de vazão de $8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ apresentou um decaimento maior que para os outros níveis testados. Este comportamento sugere que as partículas suspensas sofreram algum tipo de quebra e, conseqüentemente, esse fato pode ter aumentado a incrustação no interior dos poros da membrana.

Tabela 4.4: SST e SSV iniciais e finais para os diferentes níveis de aeração testados com módulo de diâmetro 1,91 cm (3/4 in).

Vazão de aeração ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	SST (mg/L)		SSV (mg/L)	
	Inicial	Final	Inicial	Final
2	12.969	13.164	8.375	8.620
5	12.575	12.185	8.246	7.951
8	13.731	11.595	8.455	7.896

A modelagem de Hermia pode auxiliar na compreensão dos mecanismos de incrustação predominantes em cada condição. Os valores de fluxo permeado normalizado foram utilizados no ajuste, e na Tabela 4.5 estão representados os coeficientes de determinação para cada mecanismo, em cada condição de aeração.

Tabela 4.5: Coeficientes de determinação (R^2) dos modelos de incrustação de Hermia para as diferentes vazões de aeração testadas para o módulo de 1,91 cm (3/4 in).

Vazão de aeração (L.min ⁻¹)	R^2			
	Bloqueio completo	Bloqueio intermediário	Bloqueio Padrão	Camada de torta
2	0,997	0,992	0,985	0,996
5	0,961	0,967	0,768	0,959
8	0,967	0,965	0,893	0,972

Os mecanismos de bloqueio completo, bloqueio intermediário e camada de torta ajustaram-se adequadamente aos modelos para todos os níveis de aeração testados, mostrando que estes mecanismos ocorrem simultaneamente.

As duas condições de aeração com o menor fluxo normalizado final, 2 e 8 L.min⁻¹, foram as que melhor se ajustaram ao mecanismo de bloqueio padrão. A condição de 2 L.min⁻¹ apresentou um alto valor de R^2 , podendo indicar que o fluxo permeado estacionário atingiria o valor de zero se o tempo de operação fosse estendido.

Para o nível de 8 L.min⁻¹, o modelo de bloqueio padrão não se ajustou adequadamente aos dados experimentais. Isto leva a crer que as partículas menores não foram suficientes para promover uma queda acentuada no fluxo permeado, podendo a camada de torta ter atuado de maneira a amenizar essa queda, servindo como uma barreira às partículas pequenas, impedindo que estas penetrem nos poros da membrana (Wu *et al.*, 2011). Silva (2009), também utilizando os modelos de incrustação de Hermia, obteve uma baixa correlação ao ajuste do modelo de camada de torta para o nível de aeração mais intenso (8 L.min⁻¹), justamente aquele que apresentou o pior resultado de fluxo permeado final, mostrando então, que a formação da camada de torta pode atuar de maneira benéfica ao desempenho do sistema.

A influência da vazão de aeração também foi estudada para o módulo de 1 in. O comportamento do fluxo normalizado com o tempo pode ser visualizado na Figura 4.10 e, os valores de fluxo permeado e permeância hidráulica iniciais e finais para cada condição estão apresentados na Tabela 4.6.

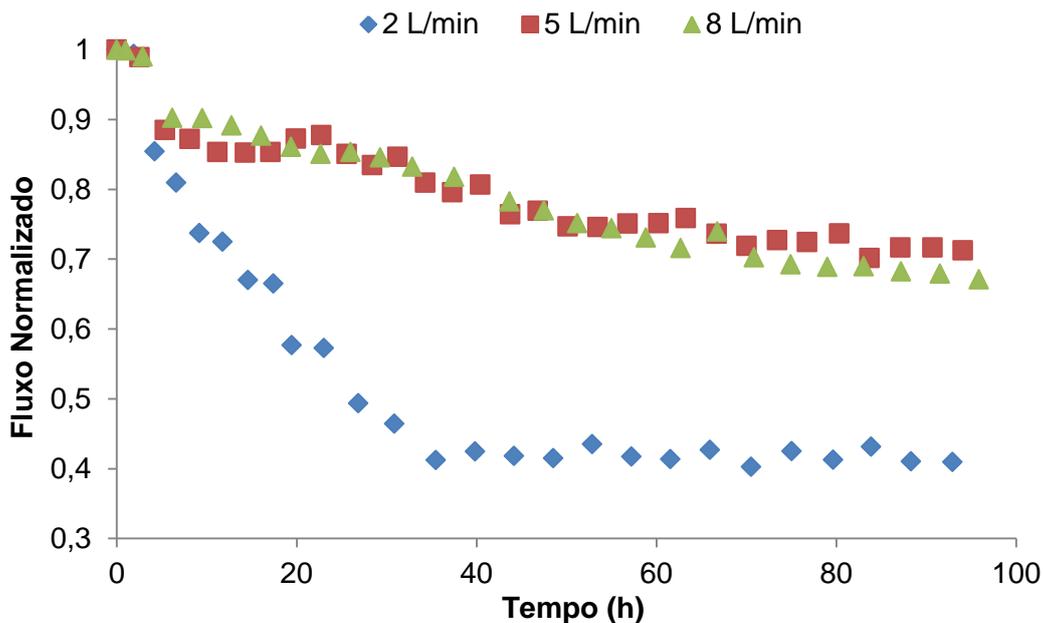


Figura 4.10: Fluxo permeado normalizado ao longo do tempo para ensaios de permeação com lodo em diferentes vazões de aeração: 2, 5 e 8 L.min⁻¹; pressão transmembrana de 600 mbar, temperatura de 20°C e o diâmetro do módulo utilizado é de 1 in.

Tabela 4.6: Valores de fluxo permeado e permeância hidráulica iniciais e finais para os diferentes níveis de aeração testados utilizando módulo de diâmetro 2,54 cm (1 in).

Vazão de aeração (L.min ⁻¹)	Fluxo Permeado (LMH)		Permeância Hidráulica (LMH/bar)	
	Inicial	Final	Inicial	Final
2	35,3	14,5	58,2	31,7
5	32,0	22,8	54,0	35,6
8	33,0	22,5	50,9	30,5

Os valores de fluxo normalizado finais para os níveis de 2, 5 e 8 L.min⁻¹ foram de, respectivamente, 0,41, 0,71 e 0,68, indicando então, que os níveis de 5 e 8 L.min⁻¹ não apresentaram resultado distinto, podendo ser assumido o mesmo valor final para o fluxo normalizado.

Para a condição de 2 L.min⁻¹, da mesma maneira que ocorreu com o módulo de ¾ in, o fluxo permeado nas horas iniciais de experimento apresentou uma queda

acentuada, porém a partir do tempo de 40 horas, o fluxo permeado estabilizou-se em torno de 41% do valor de fluxo inicial, mantendo-se estável até o fim do experimento. Apesar de um fluxo permeado final com um valor baixo, este comportamento torna-se interessante do ponto de vista do consumo energético do sistema, pois uma pequena vazão de aeração foi suficiente para manter o fluxo permeado em um valor estável.

Para os níveis de 5 e 8 L.min⁻¹ testados, levando em consideração um erro de medida de vazão de 12%, não houve diferença significativa no valor final de fluxo permeado, assim como ao longo do experimento. A taxa de decaimento de fluxo foi muito semelhante, reforçando os resultados obtidos por Ueda *et al.* (1997), que observaram uma vazão de aeração limite que seja benéfica à formação de incrustação. Pela análise da Tabela 4.7, onde são apresentados os valores de SST e SSV para as 3 condições testadas, nota-se que não houve uma queda nas concentrações de sólidos que poderia representar uma quebra das partículas de biomassa presentes no biorreator. Este fato pode estar associado ao valor limite de ascendência das bolhas de ar que o sistema apresentou nas condições de 5 e 8 L.min⁻¹ (Nguyen Cong Duc *et al.*, 2008), e dessa forma, a condição mais intensa de aeração não foi suficiente para quebrar as partículas suspensas no lodo.

Tabela 4.7: SST e SSV iniciais e finais para os diferentes níveis de aeração testados com módulo de diâmetro 2,54 cm (1 in).

Vazão de aeração (L.min ⁻¹)	SST (mg/L)		SSV (mg/L)	
	Inicial	Final	Inicial	Final
2	13.278	12.219	8.528	8.469
5	12.850	11.972	8.364	7.667
8	12.778	11.563	8.055	8.438

Os dados experimentais foram novamente ajustados aos modelos de incrustação de Hermia (Tabela 4.8) e mostraram resultados semelhantes às condições testadas no módulo ¾ in. Os modelos de bloqueio completo e bloqueio intermediário se ajustaram adequadamente a todas as condições de aeração testadas para o módulo de 1 in.

Tabela 4.8: Coeficientes de determinação (R^2) dos modelos de incrustação de Hermia para as diferentes vazões de aeração testadas para o módulo de 2,54 cm (1 in).

Vazão de aeração (L.min ⁻¹)	R^2			
	Bloqueio completo	Bloqueio intermediário	Bloqueio Padrão	Camada de torta
2	0,983	0,973	0,847	0,819
5	0,921	0,922	0,877	0,941
8	0,964	0,965	0,962	0,976

O modelo de bloqueio padrão apresentou um bom ajuste à condição mais severa testada (8 L.min⁻¹), indicando que este nível de aeração, por mais que não tenha provocado alterações relevantes na estrutura das partículas, pode ser prejudicial quando se deseja manter o processo por longos períodos de operação, podendo resultar em um fluxo permeado estacionário próximo de zero. As condições de 2 e 5 L.min⁻¹ não apresentaram um bom ajuste ao modelo de bloqueio padrão, indicando que poderiam ser utilizadas para processos mais longos, sem resultar em um fluxo permeado estacionário nulo.

O modelo de camada de torta apresentou um bom ajuste para as condições de 5 e 8 L.min⁻¹, indicando novamente que a formação de camada de torta beneficia o desempenho do processo, uma vez que ela serve como barreira a partículas menores que possam penetrar nos poros da membrana.

Com base em todos os resultados anteriormente apresentados, observa-se que o sistema BRM em estudo apresentou uma vazão limite de aeração, tanto para o módulo de 1,91 cm (3/4 de in) quanto para o módulo de 2,54 cm (1 in), consistindo em ambos os casos no nível de 5 L.min⁻¹. O nível de 2 L.min⁻¹ foi insuficiente para promover a limpeza na superfície da membrana e manter um valor aceitável de fluxo permeado, porém deve-se ressaltar que, para o módulo de 1 in, a vazão de aeração de 2 L.min⁻¹ resultou em um valor estável de fluxo permeado a custo de um baixo consumo energético relativo à aeração do sistema. O nível de 8 L.min⁻¹, apesar de ter apresentado resultados próximos do nível de 5 L.min⁻¹, não deve ser considerado para manter uma boa condição de processo, já que, com um nível de aeração mais reduzido (5 L.min⁻¹), consegue-se o mesmo desempenho, ou até melhor, além de que

evita-se o risco de uma quebra de partículas na biomassa (quebra dos flocos) que pode ocorrer na condição de $8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

4.3.3 Avaliação da densidade de empacotamento do módulo

Neste trabalho, o efeito da densidade de empacotamento do módulo foi analisado utilizando módulos de diâmetro de 1,91 cm ($3/4$ in) e 2,54 (1 in), e em cada módulo, utilizou-se sempre uma área de membrana entre 35 e 40 cm^2 . As Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 apresentam o comportamento do fluxo normalizado com o tempo para as condições de aeração de 2, 5 e $8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, respectivamente.

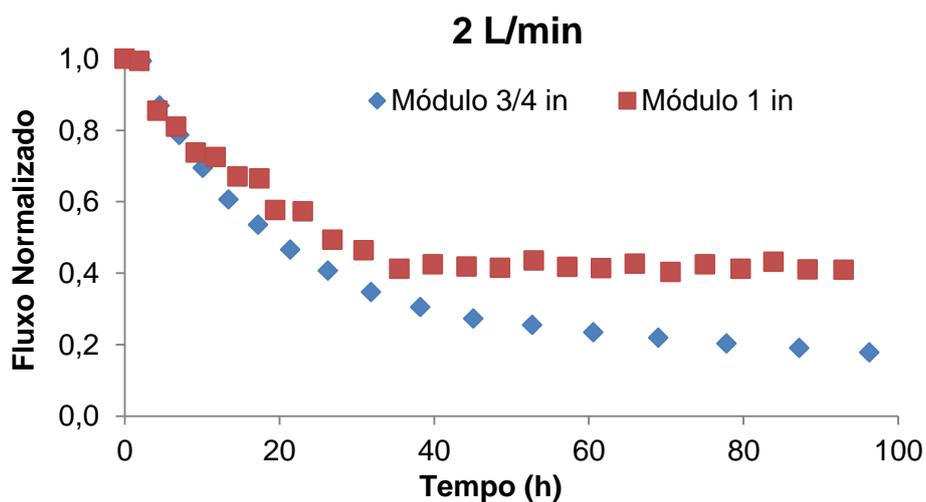


Figura 4.11: Fluxo permeado normalizado utilizando módulo de 1,91 cm ($3/4$ in) e 2,54 cm (1 in), para o nível de aeração de $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$; pressão transmembrana de 600 mbar, temperatura de 20°C .

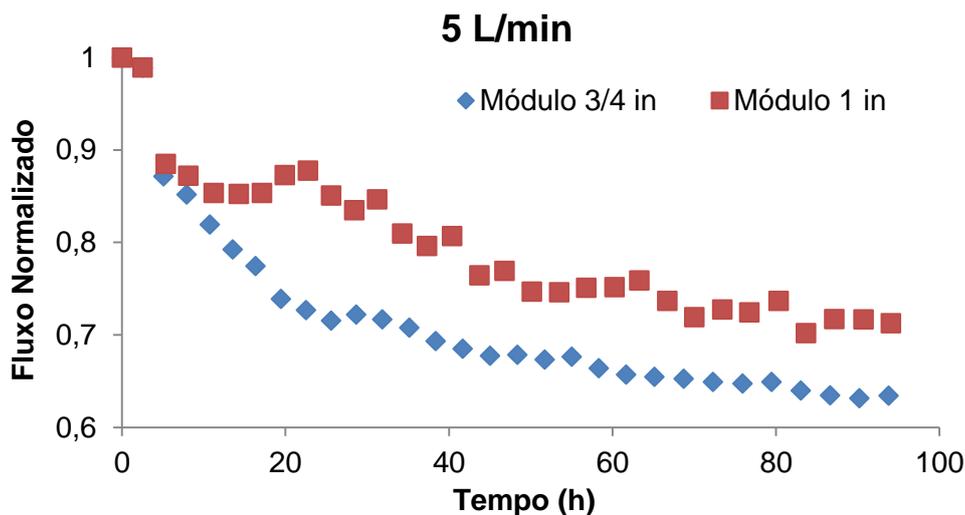


Figura 4.12: Fluxo permeado normalizado utilizando módulo de 1,91 cm (3/4 in) e 2,54 cm (1 in), para o nível de aeração de 5 L.min⁻¹; pressão transmembrana de 600 mbar, temperatura de 20°C.

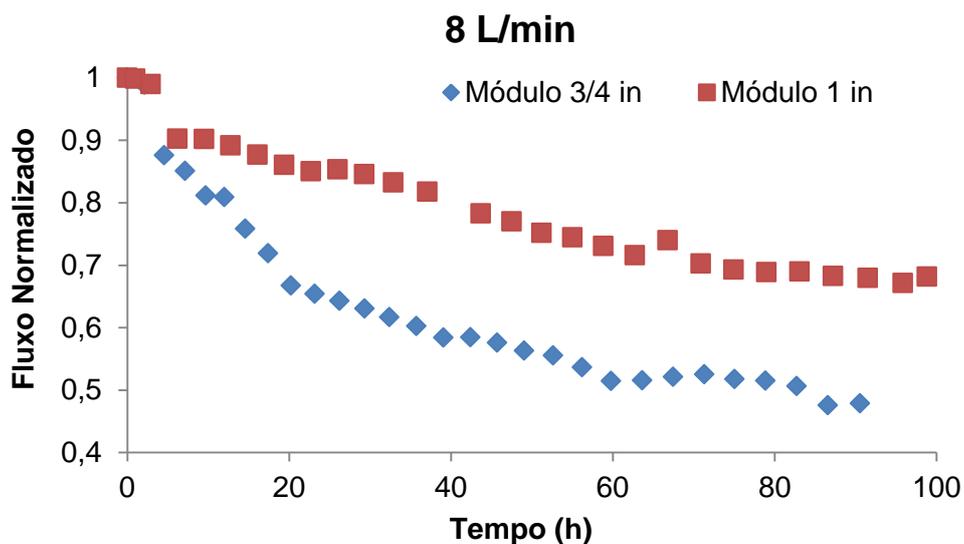


Figura 4.13: Fluxo permeado normalizado utilizando módulo de 1,91 cm (3/4 in) e 2,54 cm (1 in), para o nível de aeração de 8 L.min⁻¹; pressão transmembrana de 600 mbar, temperatura de 20°C.

Pela análise das Figuras 4.11, 4.12 e 4.13, observa-se que o módulo de 2,54 cm (1 in) resultou em um melhor desempenho do que o módulo de 1,91 cm (3/4 in), apresentando um fluxo permeado final maior e, também, uma taxa de decaimento de fluxo menor ao longo do tempo de processo. Na Tabela 4.9 são apresentados os

valores de fluxo permeado final e inicial para cada condição testada. Na condição de 5 L.min⁻¹, os valores de fluxo permeado para os dois módulos não foram significativamente diferentes, ficando dentro da faixa de erro da célula de carga de 12%. Para os níveis de 2 e 8 L.min⁻¹, os valores de fluxo permeado para o módulo de 1 in foram maiores e significativamente diferentes.

A densidade de empacotamento, para os módulos de 1,91 cm (3/4 in) e 2,54 cm (1 in) são, respectivamente, de 543 e 307 m²/m³. A redução da densidade de empacotamento para o módulo de 2,54 cm de quase 45% promoveu uma melhora no desempenho do sistema, assim como relatado por Yeo e Fane (2005), em que, reduzindo em 35% a densidade de empacotamento do feixe de membranas, obteve uma melhora acentuada no processo. Esses mesmos autores concluíram que, em altas densidades de empacotamento, algumas fibras poderiam se fundir através das tortas formadas na superfície, prejudicando significativamente a capacidade de permeação das fibras situadas nas proximidades do centro do módulo.

Tabela 4.9: Fluxo permeado inicial e final para o módulo de ¾ in e 1 in, nas condições de aeração de 2, 5 e 8 L.min⁻¹.

Vazão de aeração (L.min ⁻¹)	Módulo ¾ in		Módulo 1 in	
	Fluxo inicial (LMH)	Fluxo Final (LMH)	Fluxo inicial (LMH)	Fluxo Final (LMH)
2	41,8	7,5	35,3	14,5
5	33,1	21,0	32,0	22,8
8	35,3	16,9	33,0	22,5

Mesmo a redução da densidade de empacotamento tendo promovido uma melhora de desempenho, uma redução de 45% é bem elevada, fazendo-se necessário estudar outras faixas de empacotamento do módulo entre os valores de 307 e 543 m²/m³, de forma a maximizar a área de membrana e, simultaneamente, manter um espaço suficiente entre as fibras de forma a garantir uma maior homogeneidade de aeração no interior dos feixes.

4.3.4 Avaliação do modo de aeração

De maneira a promover uma maior homogeneidade de aeração no biorreator e no interior do módulo de membranas, uma nova geometria dos aeradores foi testada, onde, além de dispersar as bolhas no fundo do tanque de lodo ativado, elas também são dispersas próximas a superfície das fibras, a partir dos aeradores, conforme anteriormente apresentado na Figura 3.7. Essa nova modalidade de aeração foi denominada Modo 2 e o conjunto final, constituído pelo módulo e os novos aeradores, são mostrados na Figura 4.14, onde as fibras dos aeradores estão enroladas nas fibras responsáveis pela filtração.

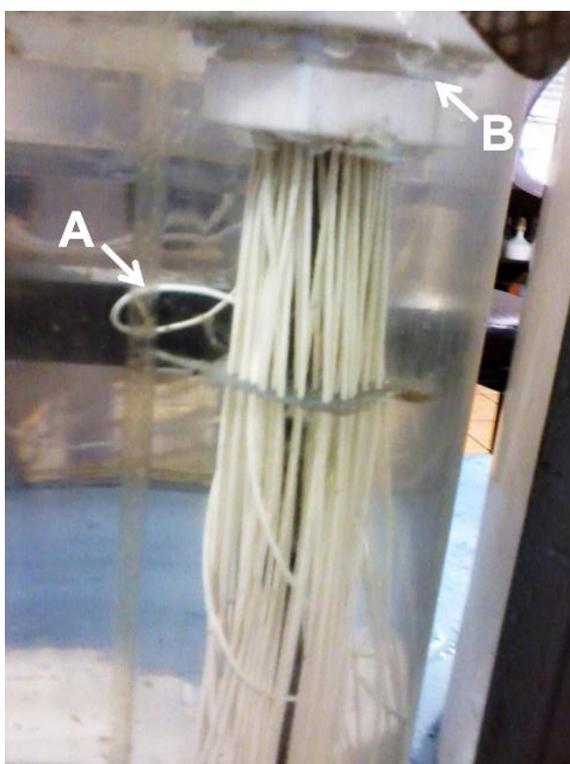


Figura 4.14: Disposição do modo 2 de aeração utilizado. A - Fibra dos aeradores; B - Bolhas formadas pelos aeradores.

O comportamento do fluxo permeado ao longo do processo foi comparado para o Modo 1 e Modo 2 de aeração, utilizando módulo de $\frac{3}{4}$ in, nas vazões de aeração de 2, 5 e 8 L.min⁻¹, cujos resultados estão apresentados, respectivamente, nas Figuras 4.15, 4.16 e Figura 4.17 e, na Tabela 4.10, estão apresentados os valores de fluxo permeado inicial e final para cada condição.

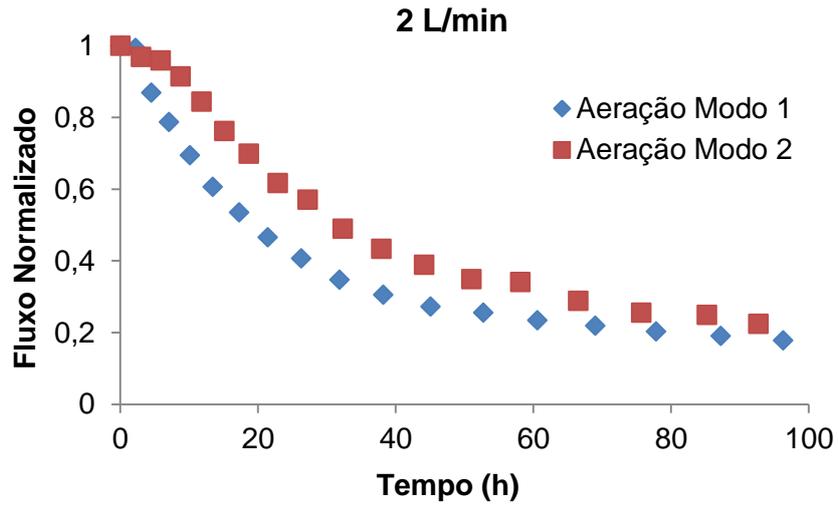


Figura 4.15: Fluxo normalizado para os dois modos distintos de aeração, na vazão de $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, módulo de $3/4 \text{ in}$; pressão transmembrana de 600 mbar , temperatura de 20°C .

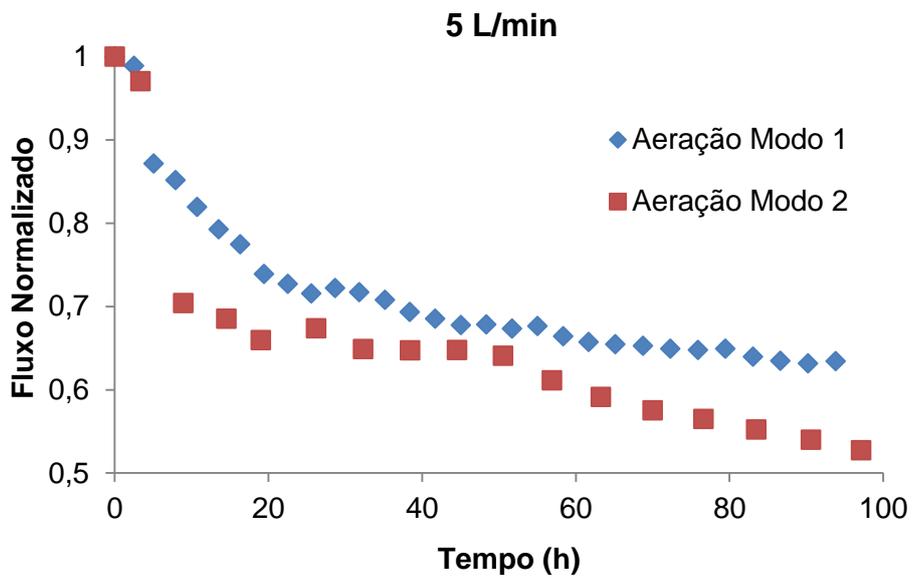


Figura 4.16: Fluxo normalizado para os dois modos distintos de aeração, na vazão de $5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, módulo de $3/4 \text{ in}$; pressão transmembrana de 600 mbar , temperatura de 20°C .

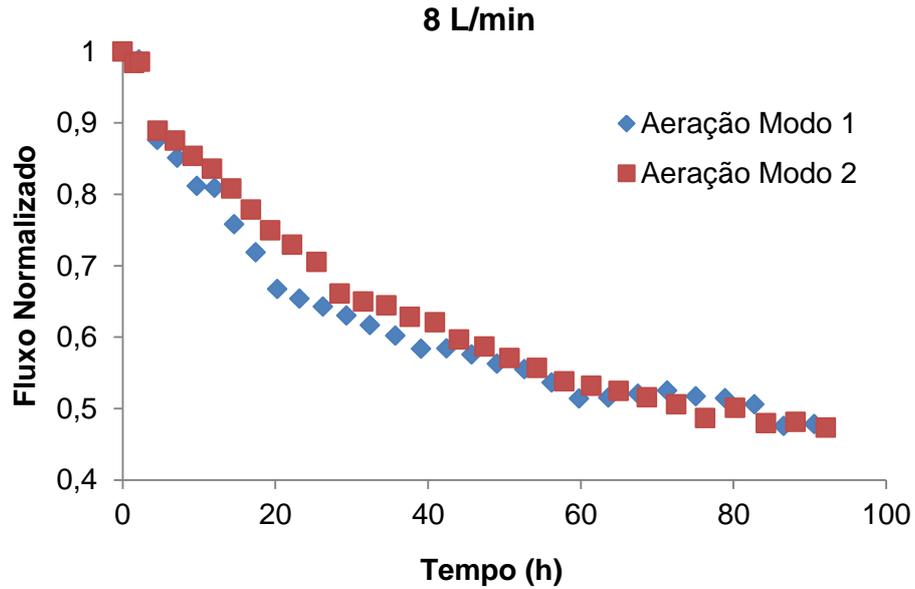


Figura 4.17: Fluxo normalizado para os dois modos distintos de aeração, na vazão de $8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, módulo de $3/4 \text{ in}$; pressão transmembrana de 600 mbar , temperatura de 20°C .

Tabela 4.10: Fluxo inicial e final para os dois modos distintos de aeração testados, para os 3 níveis de aeração, utilizando módulo de $1,91 \text{ cm}$ ($3/4 \text{ in}$).

Vazão de aeração ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	Aeração Modo 1		Aeração Modo 2	
	Fluxo Inicial (LMH)	Fluxo Final (LMH)	Fluxo Inicial (LMH)	Fluxo Final (LMH)
2	41,8	7,5	38,0	8,5
5	33,1	21,0	24,2	12,8
8	35,3	16,9	44,2	20,6

Observa-se que, o Modo 2 promoveu uma aeração homogênea suficiente para melhorar o desempenho do sistema somente na vazão de $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, apresentando um menor decaimento do fluxo permeado com o tempo quando comparado ao Modo 1 e, também, um valor maior de fluxo permeado normalizado ao final do processo, sendo esses valores, para o Modo 1 e Modo 2 de $0,19$ e $0,24$, respectivamente.

Na vazão de $5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, o Modo 2 não promoveu uma homogeneidade de aeração necessária para uma melhora de desempenho, apresentando inclusive, fluxos permeados normalizados menores que o Modo 1 por todo tempo de processo. Destaca-se ainda, que no Modo 2, para a vazão de $5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, a partir das 50 h de processo, a taxa de incrustação aumenta inesperadamente, ocorrendo uma queda significativa no fluxo permeado. Essa resposta pode estar associada a um mau funcionamento dos aeradores utilizados no interior do módulo, que, como são enrolados em torno das fibras, sem prendê-los, esses podem se soltar ao longo do tempo de operação devido ao movimento das bolhas provenientes dos aeradores do fundo; uma fotografia deste módulo de membranas com as fibras enroladas é apresentada na Figura 4.18.



Figura 4.18: Fotografia da fibra de aeração solta ao longo do processo, na vazão de $5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, Modo 2 de aeração.

Uma medida que seria possível consiste em interromper o processo por alguns instantes para rearranjar as fibras soltas, porém não se consegue obter informação visual sobre a condição dos aeradores do interior do módulo, devido à

presença do lodo ativado. Na vazão de $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, o movimento de ascensão das bolhas não foi suficiente para soltar as fibras dos aeradores, fazendo com que elas permanecessem enroladas nas fibras responsáveis pela filtração ao final do processo. Esses resultados e problemas observados para os aeradores construídos com as fibras indica que o projeto dessa geometria de aeração deve ser revisto a fim de melhorar a homogeneidade de aeração no sistema e contornar esses problemas que ocorrem ao longo do processo.

Na condição de $8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ de vazão de aeração, os valores de fluxo permeado para o Modo 1 e Modo 2 foram praticamente iguais ao longo de todo o tempo de operação, logo, a nova geometria de aeração não apresentou diferença no desempenho do processo. Mesmo o nível de agitação da solução do biorreator sendo maior na vazão de $8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, não houve desprendimento das fibras dos aeradores neste caso, como havia ocorrido anteriormente na vazão de $5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. Certamente, este fato colaborou para que o Modo 2 apresentasse resultados tão semelhantes ao Modo 1. Mesmo a condição de aeração de $8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ no Modo 2 tendo apresentado o desempenho mais próximo do Modo 1 de aeração, não deve-se aceitar que esta vazão necessariamente apresentará resultados melhores que a vazão de $5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. Na Figura 4.19, são mostrados os valores de fluxo normalizado com o tempo para os 3 níveis de aeração utilizados no Modo 2 e observa-se a existência de uma vazão de aeração limite benéfica ao desempenho do sistema, assim como observado no Modo 1 de aeração.

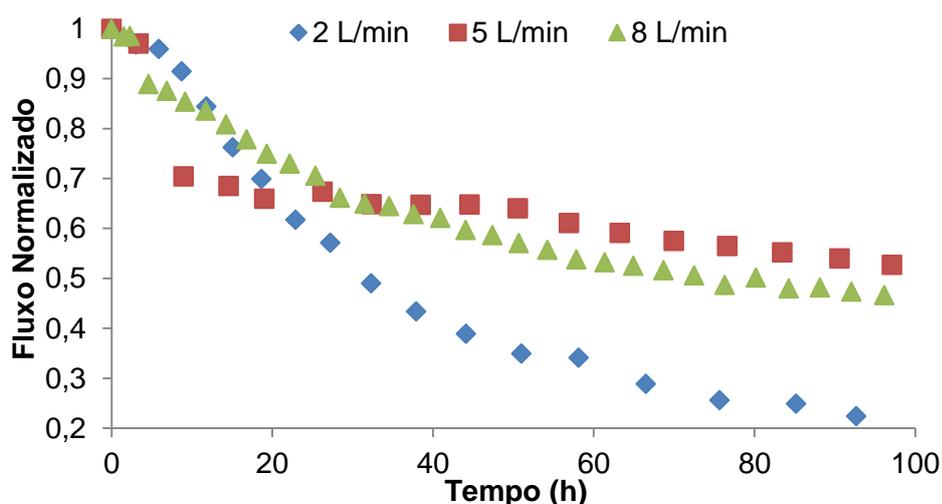


Figura 4.19: Fluxo permeado normalizado ao longo tempo, para o Modo 2 de aeração, para diferentes vazões de aeração. O diâmetro do módulo utilizado é de $\frac{3}{4}$ in; pressão transmembrana de 600 mbar, temperatura de 20°C .

A nova geometria de aeração (Modo 2) também foi testada utilizando o módulo de diâmetro de 2,54 cm (1 in), para as vazões de aeração de 2, 5 e 8 L.min⁻¹; os resultados estão apresentados, respectivamente, nas Figuras 4.20, 4.21 e 4.22. Os valores de fluxo permeado inicial e final para cada condição de vazão testada são apresentados posteriormente na Tabela 4.11.

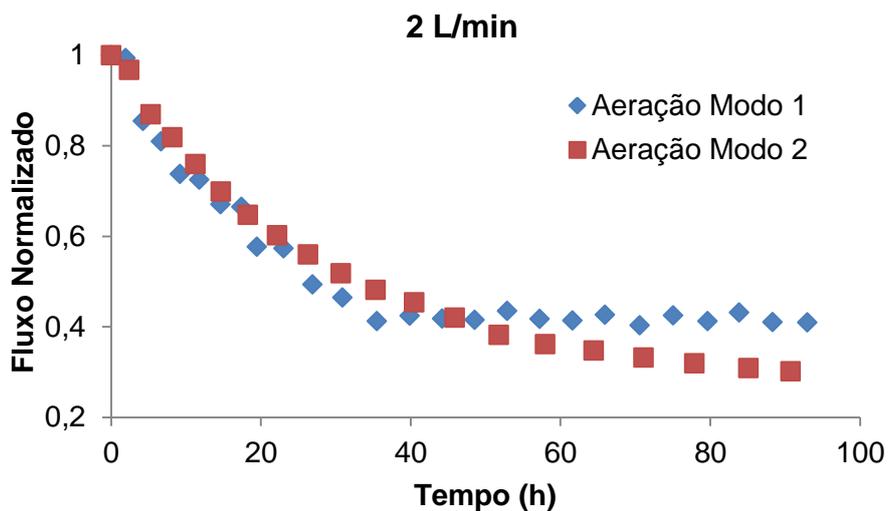


Figura 4.20: Fluxo normalizado para os dois modos distintos de aeração, na vazão de 2 L.min⁻¹, módulo de 1 in; pressão transmembrana de 600 mbar, temperatura de 20°C.

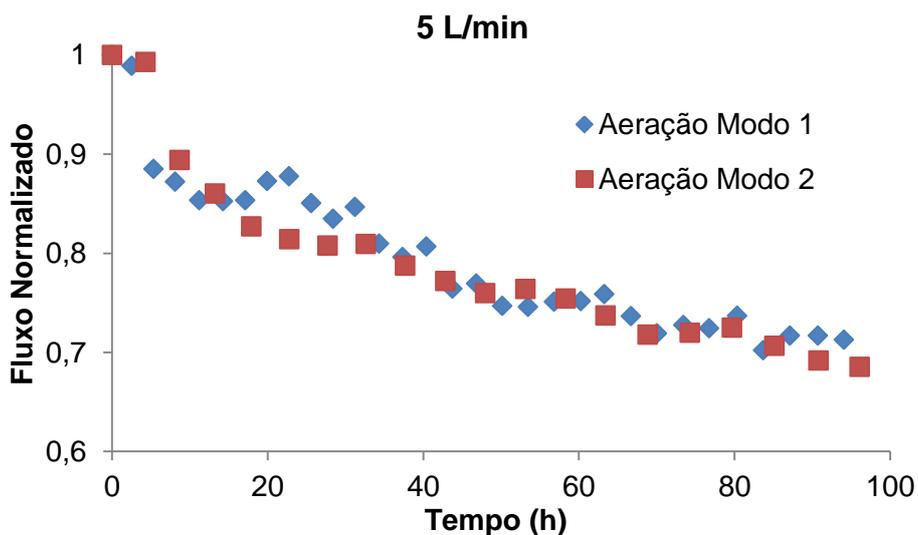


Figura 4.21: Fluxo normalizado para os dois modos distintos de aeração, na vazão de 5 L.min⁻¹, módulo de 1 in; pressão transmembrana de 600 mbar, temperatura de 20°C.

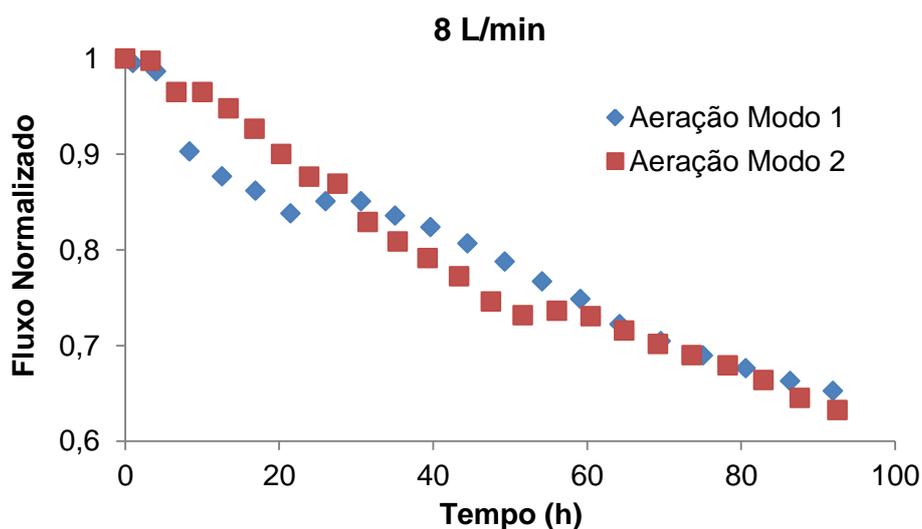


Figura 4.22: Fluxo normalizado para os dois modos distintos de aeração, na vazão de $8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, módulo de 1 in; pressão transmembrana de 600 mbar, temperatura de 20°C .

Tabela 4.11: Fluxo inicial e final para os dois modos distintos de aeração testados, para os 3 níveis de aeração, utilizando módulo de 2,54 cm (1 in).

Vazão de aeração ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	Aeração Modo 1		Aeração Modo 2	
	Fluxo Inicial (LMH)	Fluxo Final (LMH)	Fluxo Inicial (LMH)	Fluxo Final (LMH)
2	35,3	14,5	35,1	10,6
5	32,0	22,8	17,6	12,0
8	33,0	22,5	23,3	14,7

Para o módulo de 1 in, o Modo 2 de aeração não apresentou um desempenho melhor que o Modo 1 para todas vazões de aeração testadas. Para a vazão de 5 e $8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, a diferença no fluxo normalizado final para os dois modos distintos de aeração não foi significativa. Já para a vazão de ar de $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, o Modo 2 apresentou um desempenho mais baixo, sendo seu fluxo normalizado final igual a 0,31, e para o Modo 1, de 0,40.

Vale ressaltar que, utilizando o Modo 2 de aeração e módulo de 1 in, o sistema também apresentou a ocorrência de uma vazão de aeração limite benéfica ao desempenho, conforme observado nas condições anteriores. Para o Modo 2 de aeração, em todas as vazões de aeração testadas, os resultados foram mais

satisfatórios para o módulo de 1 in, em comparação ao módulo de $\frac{3}{4}$ in, reforçando os resultados obtidos para a densidade de empacotamento do feixe de membranas.

De maneira geral, o Modo 2 de aeração não promoveu uma melhora de desempenho no sistema BRM. O projeto desta nova geometria dos aeradores não foi satisfatório para promover uma melhor homogeneidade de aeração no interior do feixe e assim, obter maiores valores de fluxo permeado normalizado.

Nguyen Cong Duc *et al.* (2008) ressaltaram em seu trabalho a importância de uma aeração homogênea no sistema BRM e no interior do feixe de membrana, de forma a evitar zonas estagnadas que poderiam provocar desempenhos individuais diferentes para as fibras. Os autores observaram que a ocorrência de zonas estagnadas é provocada pela má distribuição de ar pelo orifício dos aeradores.

No presente trabalho, observou-se que as fibras utilizadas nos aeradores não liberam tantas bolhas quanto os aeradores do fundo do tanque. Esse número de bolhas depende da quantidade de fibras utilizadas na construção dos aeradores, que, neste trabalho, ficou limitada em 4 ou 5 fibras. O pequeno número de fibras utilizados nos aeradores deve-se a baixa pressão de entrada do ar comprimido nos aeradores, limitada a pressão do rotâmetro de 2 bar. Dessa maneira, um melhor desempenho pode ser obtido com a mesma geometria, mudando a pressão de entrada do ar comprimido e aumentando o número de fibras utilizadas na construção dos aeradores.

4.4 Eficiência do tratamento

O principal objetivo da utilização de um sistema de tratamento de efluentes, como o sistema BRM, consiste em reduzir a matéria orgânica presente na corrente inicial (efluente) para um valor aceitável, de maneira que o efluente tratado possa ser disposto em ecossistemas naturais sem prejudicá-los ou mesmo ser utilizado como corrente de reúso.

Para este estudo, a concentração de matéria orgânica foi obtida a partir de análises de COT e DQO do efluente e do permeado, comparando assim, o valor inicial e final destes parâmetros para análise da eficiência no processo de remoção. O efluente sintético foi preparado de acordo com a formulação apresentada na Tabela 3.2. O permeado foi coletado a cada 24 horas, de maneira que, para cada experimento, 4 amostras de permeado fossem submetidas às análises de determinação de matéria orgânica. Os valores obtidos estão mostrados na Tabela

4.12, correspondendo a uma amostra de 15 valores para o efluente, e 96 valores para o permeado.

Tabela 4.12: Dados de COT e DQO do efluente e do permeado utilizados para determinar a remoção de matéria orgânica do tratamento.

	COT (mg/L)		DQO (mg/L)	
	Efluente	Permeado	Efluente	Permeado
Média	108	4	149	11
Desvio padrão (%)	11 (10%)	1 (25%)	9 (6%)	4 (36%)
Máximo	124	10	162	21
Mínimo	92	2	130	3
Remoção (%)	96% (92 – 98 %)		93% (87 – 98 %)	

A análise dos valores apresentados na Tabela 4.12 mostra que o tratamento foi eficiente para remover a matéria orgânica presente no efluente, atingindo valores de remoção média, para COT e DQO de 96% e 93%, respectivamente

O efluente sintético foi preparado de maneira a obter uma DQO de 150 mg/L, resultando assim, numa carga orgânica mássica de $0,04 \text{ kgDQO.kgSSV}^{-1}.\text{d}^{-1}$. As variações obtidas na quantidade de matéria orgânica do efluente estão associadas ao fato de que, com o tempo, a solução apresentava algumas mudanças de cor, pH e odor, podendo ter ocorrido algum processo natural de degradação da matéria orgânica do efluente.

Comparando com o trabalho de Silva (2009), que utilizou o mesmo efluente sintético a base de glicose e peptona, com uma carga orgânica mássica de $0,18 \text{ kgDQO.kgSSV}^{-1}.\text{d}^{-1}$, a carga utilizada neste trabalho é bem menor. Esse pequeno valor foi adotado propositalmente de maneira a obter as altas taxas de remoção verificadas nos resultados previamente apresentados.

Outras variáveis que foram aferidas com o intuito de mensurar a eficiência do tratamento foram a condutividade elétrica, o pH e a turbidez, do efluente e do permeado. Os respectivos valores são apresentados na Tabela 4.13, correspondendo a uma amostra de 61 valores tanto para o efluente quanto para o permeado.

Tabela 4.13: Valores de condutividade elétrica, pH e turbidez para efluente e permeado.

	Condutividade elétrica ($\mu\text{S/cm}$)		pH		Turbidez (NTU)	
	Efluente	Permeado	Efluente	Permeado	Efluente	Permeado
Média	192	240	6,8	5,8	4,4	0,7
Desvio (%)	21 (11%)	41 (17%)	1,5 (22%)	0,5 (9%)	4,0 (89%)	0,2 (22%)
Máximo	278	315	9,4	6,8	13,3	1,0
Mínimo	170	133	3,9	4,8	0,5	0,4

Pela análise dos dados apresentados na Tabela 4.13, observa-se que a condutividade elétrica, tanto do efluente quanto do permeado, apresentaram variações semelhantes ao longo dos experimentos, obtendo desvios-padrão para o efluente e permeado de, respectivamente, 11 e 17% em relação à média de todas as medidas. A variação observada para o efluente explica-se pela degradação natural da matéria orgânica com o tempo, e também pela utilização de NaOH para atingir o pH neutro. No permeado, a variação pode estar associada à natureza do lodo ativado, que, como fora coletado em uma estação municipal de tratamento, durante um período de 8 meses, pode ter apresentado quantidades diferentes de sais e outros compostos.

Com relação ao pH das correntes, o efluente apresentou uma variação maior que o permeado. O valor máximo de pH da corrente de efluente explica-se por uma superdosagem de base (NaOH) para neutralizar a corrente, já que, com o passar do tempo, parte da matéria orgânica naturalmente se degradava, fazendo com que o pH do efluente ficasse ácido. O pH do permeado teve pouca variação ao longo dos experimentos e observou-se que este é muito parecido com o pH do lodo ativado, que apresentou uma média de 5,7.

A turbidez foi o parâmetro que mais variou dentre os 3 mensurados. O desvio-padrão para as medidas do efluente atingiu um valor de quase 90%, chegando a atingir um valor máximo de turbidez de 13,3. Esse elevado valor pode estar associado à degradação da matéria orgânica desta corrente, fazendo com que a solução ficasse turva com o passar do tempo. Apesar da grande variação ocorrida nas medidas de turbidez da corrente de efluente, para o permeado, esta propriedade apresentou um

desvio-padrão bem menor, mostrando então, a capacidade que o sistema BRM tem de suportar distúrbios na corrente de alimentação.

Ainda sobre a eficiência do tratamento, cabe ressaltar as variações de temperatura ocorridas no período em que os experimentos foram realizados. Durante 8 meses de ensaios, a temperatura da solução do biorreator e temperatura ambiente, variaram, respectivamente, de 28 a 14 °C e, de 35 a 11 °C. Essa grande variação na temperatura ambiente pode ter sido responsável por acelerar o processo natural de degradação da matéria orgânica no efluente, porém, não modificou drasticamente as propriedades do permeado, que variaram dentro de um intervalo menor no período. Este comportamento demonstra que, mesmo com uma variação de temperatura na solução do biorreator, o sistema BRM se mostrou robusto e foi capaz de manter a mesma remoção de matéria orgânica.

5 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Um sistema de Biorreator com Membranas Submersas (BRMS), utilizando membranas de fibra oca de poli(éter)imida (PEI), foi operado por um período de 8 meses, com o objetivo principal de estudar algumas condições hidrodinâmicas que influenciam o processo, tais como, vazão de aeração, densidade de empacotamento do módulo e geometria dos aeradores.

Para as diferentes vazões de aeração testadas, o sistema BRM apresentou comportamentos distintos de fluxo normalizado ao longo do tempo, mostrando que esta é uma variável que exerce influência no desempenho do processo. Três diferentes vazões de aeração foram estudadas (2, 5 e 8 L.min⁻¹), mostrando, a partir dos resultados, que existe uma vazão de aeração limite benéfica ao sistema, em que acima deste valor, um melhor desempenho não pode ser atingido, inclusive, podendo prejudicá-lo. Para o sistema de estudo, a vazão de 5 L.min⁻¹ apresentou o melhor desempenho, seguido de 8 e 2 L.min⁻¹.

O estudo da densidade de empacotamento do módulo mostrou que esta é uma variável que também exerce influência no desempenho do processo de BRM. Módulos com dois diferentes diâmetros foram testados (2,54 cm e 1,91 cm), cujo melhor resultado foi observado no módulo de maior diâmetro. A menor densidade de empacotamento deste módulo promoveu um maior espaçamento entre as fibras, provocando uma aeração mais homogênea no interior do feixe de membranas.

As duas geometrias de aeração testadas apresentaram resultados semelhantes de fluxo permeado, indicando que, a nova geometria utilizada não influenciou o desempenho do processo. A maior homogeneidade de aeração no interior de feixe, a partir de aeradores construídos com as próprias fibras, não foi atingida, mostrando que um novo projeto de aeradores deve ser estudado.

A eficiência do tratamento utilizando o sistema BRM foi verificada, uma vez que a remoção de matéria orgânica da corrente de efluente foi superior a 90% para a maioria dos experimentos. Propriedades do permeado, como condutividade elétrica, pH e turbidez foram mensuradas, apresentando variações menores que as medidas do efluente, revelando assim, a capacidade que o sistema apresenta em suportar as variações na corrente de alimentação.

Finalmente, para o sistema proposto verificou-se que existem condições ótimas de operação e que estas dependem de uma série de parâmetros que devem ser cuidadosamente investigados; além disso, este estudo contribuiu especificamente

para o entendimento da influência das condições de vazão de aeração, bem como sobre a densidade de empacotamento dos módulos de membrana.

Alguns aspectos que não puderam ser avaliados neste trabalho podem ser investigados em estudos de continuidade e estão listados a seguir.

- Estudar o desempenho de módulos com o mesmo diâmetro e diferentes áreas de permeação.
- Estudar o desempenho do sistema em relação aos ciclos de permeação/retrolavagem.
- Avaliar a influência no desempenho do processo em concentrações mais elevadas de matéria orgânica no efluente.
- Estudar a influência da concentração de sólidos e sua interação com a vazão de aeração.
- Desenvolver novos projetos de aeradores para melhorar a homogeneidade de aeração do sistema.

6 Referências Bibliográficas

- APHA, AWWA e WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, Washington, D. C., 20th edition, 1998.
- BAE, T. H., TAK, T.M. Interpretation of fouling characteristics of ultrafiltration membranes during the filtration of membrane bioreactor mixed liquor. *Journal of Membrane Science*, 264, 151 – 160, 2005.
- BEMBERIS, I., HUBBARD, P. J., LEONARD, F. B. *Membrane sewage treatment systems potential for complete wastewater treatment*. In: American Society for Agricultural Engineering Winter Meeting, 71-878 (pp. 1 – 28), 1971. Apud: JUDD, S. *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment*. Elsevier, Second Edition, 2011.
- BIN, C., XIAOCHANG, W., ENRANG, W. Effects of TMP, MLSS concentration and intermittent membrane permeation on a hybrid submerged MBR fouling. In: *Proceedings of water environment-membrane technology conference*, Seoul, Korea, June 7 – 10, 2004. Apud: JUDD, S. *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment*. Elsevier, Second Edition, 2011.
- BOUHABILA, E. H., BEN AIM, R., BUISSON, H. Microfiltration of activated sludge using submerged membrane with air bubbling (application to wastewater treatment). *Desalination*, v. 118, 315 – 322, 1998.
- CHOI, H., ZHANG, K., DIONYSIOU, D. D., OERTHER, D. B., SORIAL, G. A. Influence of crossflow velocity on membrane performance during filtration of biological suspension. *Journal of Membrane Science*, 248, 189–199, 2005.
- CHUA, H. C., ARNOT, T. C., HOWELL, J. A. Controlling fouling in membrane bioreactors operated with a variable throughput. *Desalination*, v. 149, p. 225–229, 2002.
- CÔTÉ, P., BUISSON, H., POUND, C., ARAKAKI, G., Immersed membrane activated sludge for the reuse municipal wastewater. *Desalination*, v. 113, p. 189 – 196, 1997.
- DELGADO, S., VILLAROEL, R., GONZÁLEZ, E. Effect on the shear intensity on fouling in submerged membrane bioreactor for wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, v. 311, p. 173–181, 2008.

- FANG, H. H. P., SHI, X. Pore Fouling of Microfiltration Membranes by Activated Sludge. *Journal of Membrane Science*, v. 264, p. 161–166, 2005.
- FIELD, R. W., WU, D., HOWELL, J. A., GUPTA, B. B. Critical Flux Concept for Microfiltration Fouling. *Journal of Membrane Science*, v. 100, p. 259 – 272, 1995.
- GHOSH, R. Enhancement of membrane permeability by gas-sparging in submerged hollow fibre ultrafiltration of macromolecular solutions: role of module design. *Journal of Membrane Science*, v. 274, p. 73–82, 2006.
- HE, Y., XU, P., LI, C., ZHANG, B. High-Concentration Food Wastewater Treatment by an Anaerobic Membrane Bioreactor. *Water Research*, v. 39, p. 4110 – 4118, 2005.
- HERMIA, J. Constant Pressure Blocking Filtration Laws-Application to Power-Law Non-Newtonian Fluids. *Trans. Institute of Chemical Engineering*, v. 60, p. 183 – 187, 1982. Apud: VELA, M. C. V., BLANCO, S. A., J. L. GARCÍA, J. L., RODRÍGUEZ, E. B., Analysis of Membrane Pore Blocking Models Adapted to Crossflow Ultrafiltration in the Ultrafiltration of PEG, *Chemical Engineering Journal*, v. 149, p. 232–241, 2009.
- HOWELL, J. A., CHUA, H. C., ARNOT, T. C. In situ manipulation of critical flux in a submerged membrane bioreactor using variable aeration rates, and effects of membrane history. *Journal of Membrane Science*, v. 242, p. 13–19, 2004.
- Icon. The 2009 – 2014 world outlook for membrane bioreactor (MBR) systems for wastewater treatment. *Icon Group Publications (2008)*. Apud: JUDD, S. *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment*. Elsevier, Second Edition, 2011.
- ITONAGA, T., KIMURA, K., WATANABE, Y. Influence of suspension viscosity and colloidal particles on permeability of membrane used in membrane bioreactor (MBR). *Water Science and Technology*, v. 50, 301 – 309, 2004.
- JIANG, T., KENNEDY, M. D., GUINZBOURG, B. F., VANROLLEGHEM, P. A., SCHIPPERS, J. C. Optimising the operation of a MBR pilot plant by quantitative analysis of the membrane fouling mechanism. *Water Science and Technology*, v. 51, 19 – 25, 2005.
- JUDD, S. *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment*. Elsevier, Second Edition, 2011.
- LEBEGUE, J., HERAN, M., GRASMICK, A. Membrane bioreactor: distribution of critical flux throughout an immersed HF bundle. *Desalination*, v. 231, p. 245–252, 2008.

- LE-CLECH, P., JEFFERSON, B., JUDD, S. J. Impact of aeration, solids concentration and membrane characteristics on the hydraulic performance of a membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, 218, 117 – 129, 2003.
- LE-CLECH, P., FANE, A., LESLIE, G., CHILDRESS, A. The operator's perspective. *Filtration + Separation*, v. 42, 20 – 23, 2005.
- LIAO, B. Q., BAGLEY, D. M., KRAEMER, H. E., LEPPARD, G. G., LISS, S. N. A Review of Biofouling and its Control in Membrane Separation Bioreactors. *Water Environmental Research*, v. 76, n. 5, 425 – 436, 2004.
- LU, Y., DING, Z., LIU, L., WANG, Z., MA, R. The influence of bubble characteristics on the performance of submerged hollow fiber membrane module used in microfiltration. *Separation and Purification Technology*, v. 61, p. 89–95, 2008.
- MAYER, M., BRAUN, R., FUCHS, W. Comparison of various aeration devices for air sparging in crossflow membrane filtration. *Journal of Membrane Science*, v. 277, p. 258–269, 2006.
- MELIN, T.; JEFFERSON, B.; BIXIO, D.; THOEYE, C.; DE WILDE, W.; DE KONING, J.; VAN DER GRAAF, J.; WINTGENS, T. Membrane bioreactor technology for wastewater treatment and reuse. *Desalination* v. 187, p. 271–282, 2006.
- MENG, F., YANG, F., SHI, B., ZHANG, H. A comprehensive study on membrane fouling in submerged membrane bioreactors operated under different aeration intensities. *Separation and Purification Technology*, v. 59, p. 91–100, 2008.
- MIYOSHI, T., TSUYUHARA, T., OGYU, R., KIMURA, K., WATANABE, Y. Seasonal variation in membrane fouling in membrane bioreactors (MBRs) treating municipal wastewater. *Water Research*, v. 43(20), 5109 – 5118, 2009.
- NGUYEN CONG DUC, E., FOURNIER, L., LEVECQ, C., LESJEAN, B., GRELIER, P., TAZI-PAIN, A. Local hydrodynamic investigation of the aeration in a submerged hollow fibre membrane cassette. *Journal of Membrane Science*, v. 321, p. 264–271, 2008.
- ORANTES, J. C., WISNIEWSKI, C., HERAN, M., GRASMICK, A. Influence of total sludge retention on the performance of a submerge membrane bioreactor. In: *Proceedings of water environment - membrane technology conference*. Seoul, Korea, June 7 – 10, 2004. Apud: JUDD, S. *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment*. Elsevier, Second Edition, 2011.

- PUSPITASARI, V., GRANVILLE, A., LE-CLECH, P., CHEN, V. Cleaning and ageing effect of sodium hypochlorite on polyvinylidene fluoride (PVDF) membrane. *Separation and Purification Technology*, 72, 301 – 308, 2010.
- ROSENBERGER, S., EVENBLIJ, H., TE POELE, S., WINTGENS, T., LAABS, C. The importance of liquid phase analyses to understand fouling in membrane assisted activated sludge processes e six case studies of different European research groups. *Journal of Membrane Science*, v. 263, 113 – 126, 2005.
- SCHOEBERL, P., BRIK, M., BERTONI, M., BRAUN, R., FUCHS, W. Optimization of operational parameters for a submerged membrane bioreactor treating dyehouse wastewater. *Separation and Purification Technology*, v. 44, 61 – 68, 2005.
- SILVA, M. K. *Biorreatores com membranas: uma alternativa para o tratamento de efluentes*. Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2009.
- SRINIVASAN, J. MBR still growing in EU wastewater treatment market. *Water and Waste International*, v. 22, 43 – 44, 2007.
- TRUSSELL, R. S., MERLO, R. P., HERMANOWICZ, S. W., JENKINS, D. The Effect of Organic Loading on Process Performance and Membrane Fouling in a Submerged Membrane Bioreactor Treating Municipal Wastewater, *Water Research*, v. 40, p. 2675 – 2683, 2006.
- UEDA, T., HATA, K., KIKUOKA, Y., SEINO, O. Effects of aeration on suction pressure in a submerged membrane bioreactor. *Water Research*, v. 31, p. 489–494, 1997.
- VELA, M. C. V., BLANCO, S. A., J. L. GARCÍA, J. L., RODRÍGUEZ, E. B., Analysis of Membrane Pore Blocking Models Adapted to Crossflow Ultrafiltration in the Ultrafiltration of PEG. *Chemical Engineering Journal*, v. 149, p. 232–241, 2009.
- VIERO, A. F. *Avaliação do desempenho de um biorreator com membranas submersas para tratamento de efluente*. Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.
- WICAKSANA, F., FANE, A. G., CHEN, V. Fibre movement induced by bubbling using submerged hollow fibre membranes. *Journal of Membrane Science*, v. 271 (1 – 2), 186 – 195, 2006.
- WU, J., HE, C., JIANG, X., ZHANG, M. Modeling of the submerged membrane bioreactor fouling by the combined pore constriction, pore blockage and cake formation mechanisms. *Desalination*, v. 279, p. 127–134, 2011.

- WU, J., HE, C., ZHANG, Y. Modeling membrane fouling in a submerged membrane bioreactor by considering the role of solid, colloidal and soluble components. *Journal of Membrane Science*, v. 397, p. 102–111, 2012.
- YAMAMOTO, K., HIASA, M., MAHMOOD, T., MATSUO, T. Direct Solid–liquid Separation using Hollow Fiber Membrane in an Activated-sludge Aeration Tank. *Water Science Technology*, v. 21, p. 43–54, 1989. Apud: LE-CLECH, P., CHEN, V., FANE, T. A. G. Fouling in Membrane Bioreactors Used in Wastewater Treatment. *Journal of Membrane Science*, v. 284, p. 17–53, 2006.
- YEO, A., FANE, A.G. Performance of individual fibers in a submerged hollow fiber bundle. *Water Science and Technology*, v. 51, p. 165–172, 2005.
- YU, H. Y., XIE, Y. J., HU, M. X., WANG, J. L., WANG, S. Y., XU, Z. K. Surface Modification of Polypropylene Microporous Membrane to Improve its Antifouling Property in MBR: CO₂ Plasma Treatment. *Journal Membrane Science*, v. 254, p. 219–227, 2005.

ANEXO A

Conexões Elétricas do Sistema BRM

Neste anexo são apresentadas as conexões elétricas entre o CLP e os equipamentos. A montagem do sistema BRM foi realizada no trabalho de Silva (2009), sendo que neste trabalho o sistema foi adaptado, modificando-se o tamanho do biorreator e também, o medidor de vazão anteriormente utilizado por uma célula de carga e um condicionador de sinal.

Os equipamentos podem operar na voltagem de 24 V ou 220 V. As conexões elétricas em vermelho representam os equipamentos que operam em 24 V, as conexões em azul os equipamentos que operam em 220 V e em preto representa-se o neutro.

Na Figura A.1 são apresentados os equipamentos que utilizam a voltagem de 24 V: a célula de carga, o condicionador de sinal, o medidor de pressão e os sensores de nível. O medidor de pressão e o condicionador de sinal não podem utilizar a mesma fonte de alimentação, por isso utilizou-se duas fontes de 24 V. A Fonte 1 foi usada para o alimentar o medidor de pressão (P) e a Fonte 2 para alimentar o condicionador de sinal e os sensores de nível do tanque coletor de permeado (tanque 7 da Figura 3.1). A alimentação da célula de carga é realizada pelo próprio condicionador de sinal, que possui uma fonte interna de 10 V para a respectiva função. O sinal da célula de carga é transmitido ao condicionador de sinal na faixa de 0 a 50 mV e então, convertido para o sinal de entrada do CLP na faixa de 4 a 20 mA.

O condicionador de sinal e o medidor de pressão estão conectados às entradas analógicas do CLP que recebe sinal na faixa de 4 a 20 mA, representando o valor máximo e mínimo de cada equipamento. Para que estes sinais sejam convertidos em unidades compatíveis de pressão e massa, deve ser feita uma programação no CLP, em que valores intermediários de pressão e massa são enviados em termos de valores intermediários na faixa de 4 a 20 mA.

Os sensores de nível são alimentados pela Fonte 2 e estão conectados a entradas digitais no CLP, funcionando como interruptores, ou seja, quando o nível está baixo o circuito elétrico está cortado (desligado) e quando o nível está alto o circuito está fechado (ligado). As entradas digitais recebem apenas duas informações: 0 (desligado) e 1 (ligado). A partir destas informações o algoritmo do CLP pode efetuar alguma condição de operação.

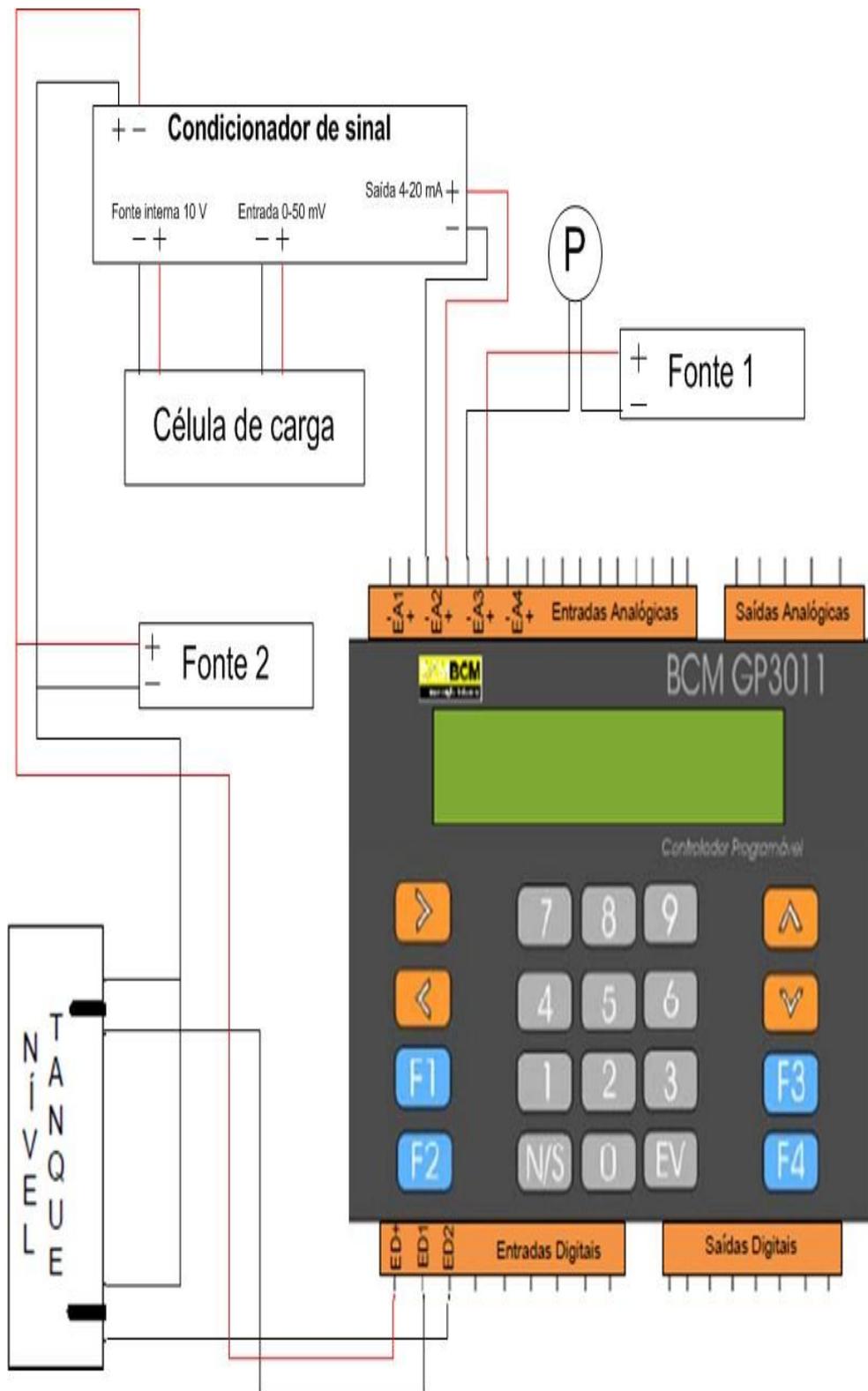


Figura A.6.1: Conexões elétricas dos equipamentos na voltagem de 24 V. Adaptado de Silva (2009).

Na Figura A.2 são apresentados os equipamentos que utilizam a voltagem de 220 V: as válvulas solenoide 1, 2, 3, 5 e 7, as bombas centrífugas 4 e 6, o sensor de nível do biorreator e a válvula solenoide do tanque de efluente (tanque 6 e tanque 1 da Figura 3.1, respectivamente).

As válvulas solenoide 1, 2, 3, 5 e 7 e as bombas centrífugas 4 e 6 estão ligados às saídas digitais do CLP, que diferente das entradas digitais, impõem condições de ligado e desligado, conforme a programação realizada no CLP.

O sensor de nível do biorreator e a válvula solenoide do tanque de efluente não estão ligados no CLP, e sim diretamente na rede elétrica de alimentação, atuando separadamente dos outros equipamentos supracitados. O sensor de nível funciona como um interruptor, sendo que, quando o nível está baixo, o circuito é fechado então a válvula solenoide (normalmente fechada) é energizada e fica aberta até que o sensor de nível atinja o máximo, cortando o circuito e a corrente da válvula.

Tanto as entradas digitais como as saídas digitais não suportam altas correntes elétricas. Os equipamentos envolvidos que ultrapassam as especificações de corrente elétrica das entradas/saídas digitais são as bombas.

Para contornar este problema, são utilizadas contadoras que funcionam como interruptores e consomem baixa potência. Assim quando o CLP impõe uma condição de ligado, a contadora é ligada e fecha (liga) o circuito elétrico das bombas. Na Figura A.3 é apresentada uma caixa de conexões elétricas que interliga todos os equipamentos elétricos envolvidos.

Por questões de segurança do equipamento, fez-se uso de aterramento na ligação do CLP à rede elétrica, evitando danos caso aconteça alguma descarga elétrica.

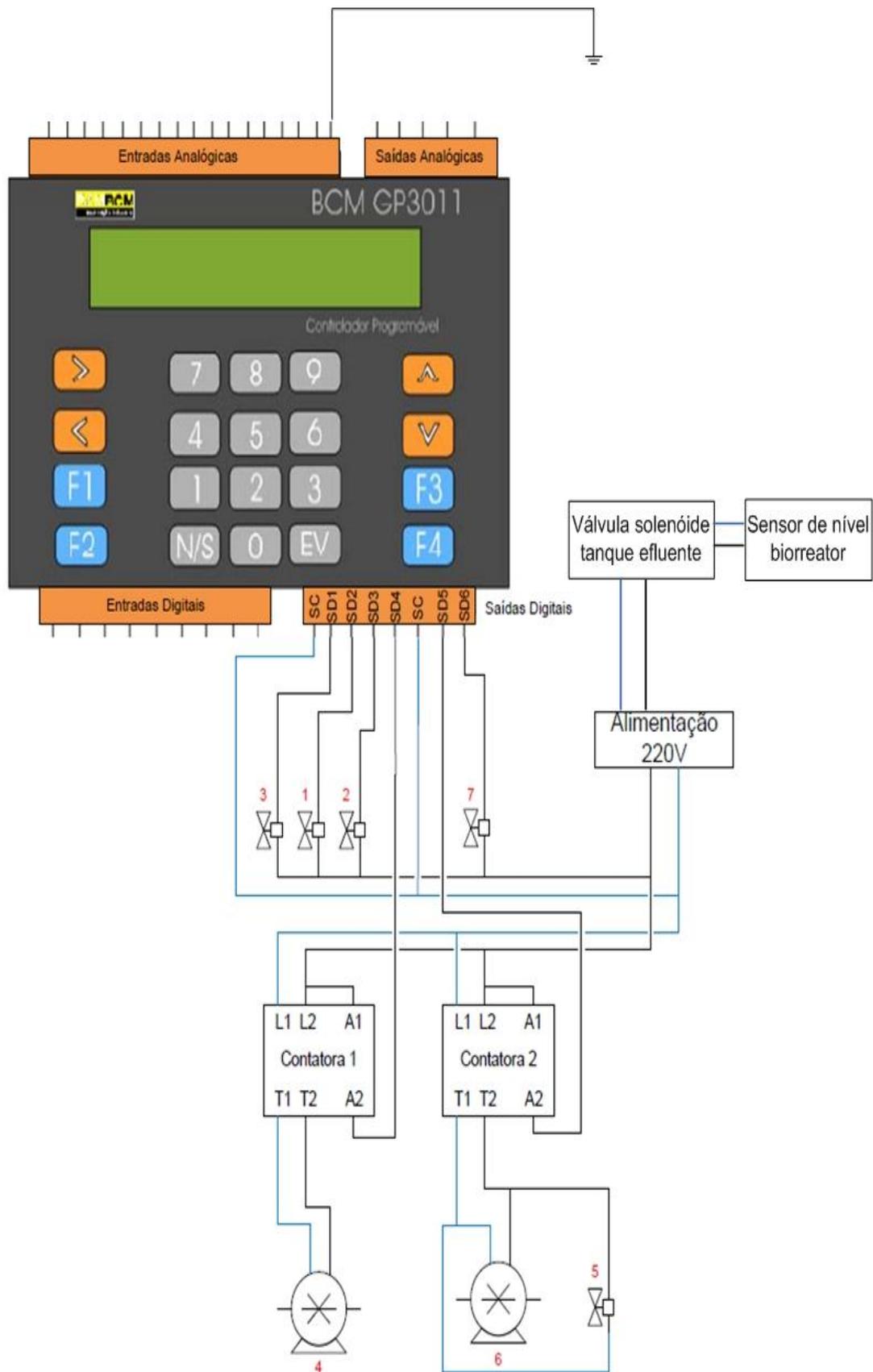


Figura A.6.2: Conexões elétricas dos equipamentos na voltagem de 220 V. Adaptado de Silva (2009).

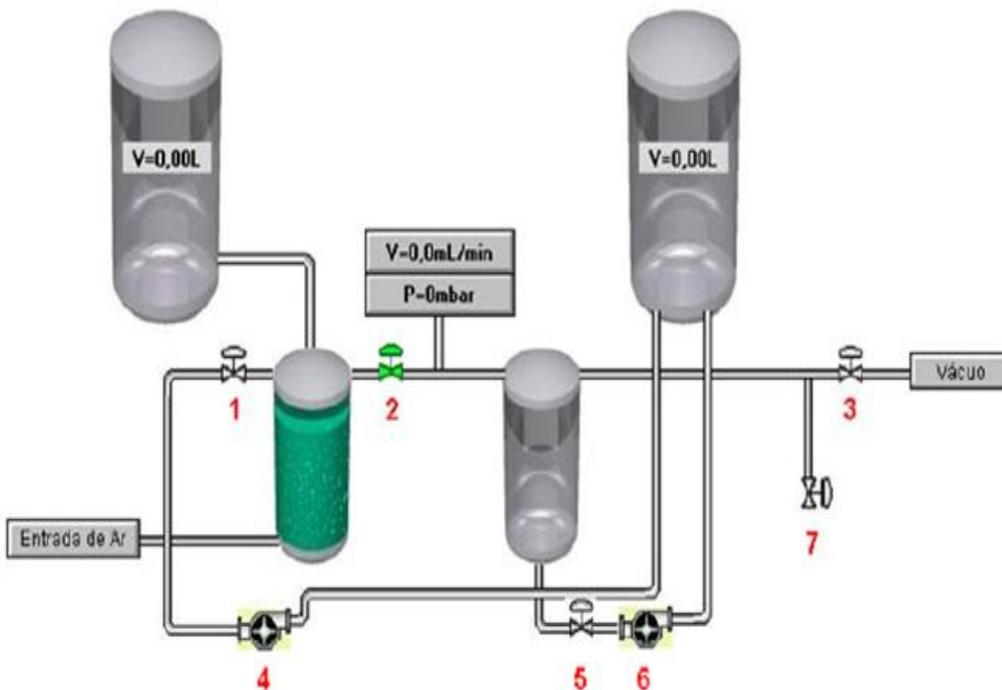
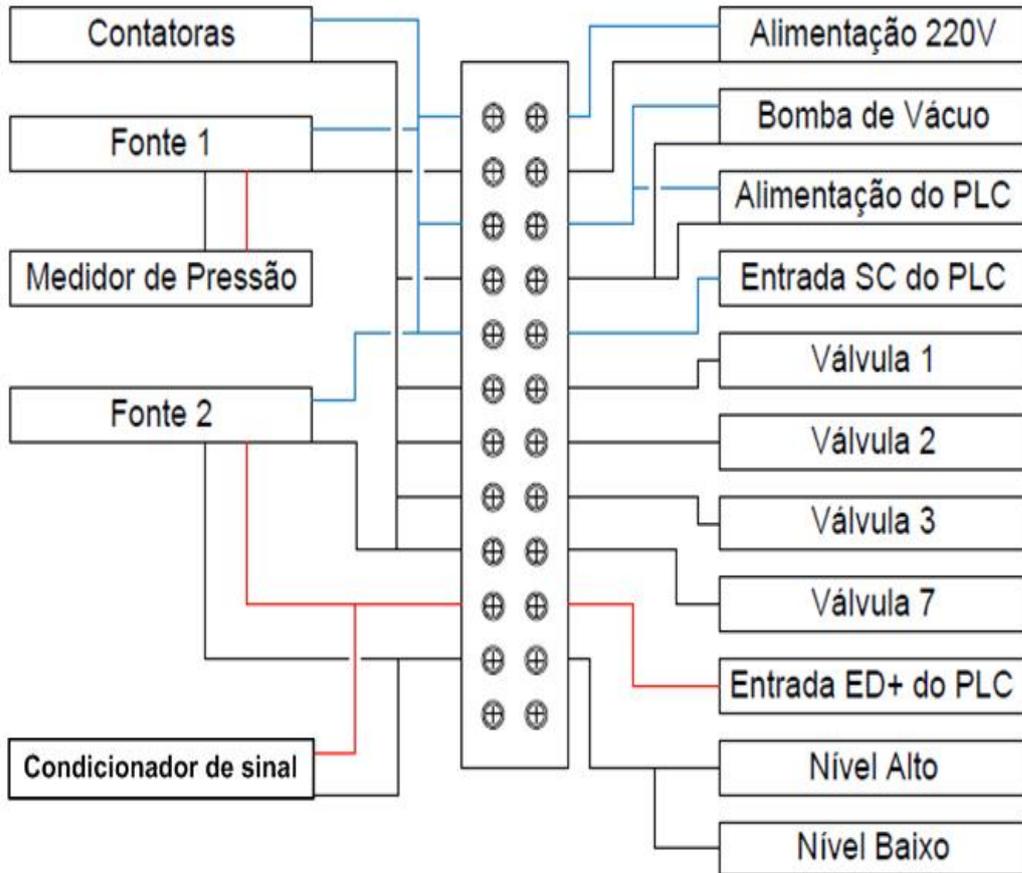


Figura A.6.3: Caixa de conexões elétricas dos equipamentos e acessórios. Adaptado de Silva (2009).

ANEXO B

Dados experimentais

Tabela B.1: Dados experimentais de mudança de set-point de pressão (Figura 4.1). Os valores de pressão estão representados em mbar.

Tempo (s)	Pressão de <i>setpoint</i>	Pressão Absoluta
10	250	288
15	250	287
20	250	286
25	250	288
30	250	287
40	275	286
45	275	285
50	275	289
55	275	288
60	275	288
70	300	299
75	300	300
80	300	298
85	300	300
90	300	299
100	325	323
105	325	325
110	325	322
115	325	324
120	325	323
130	350	350
135	350	344
140	350	345
145	350	349
150	350	347

Tabela B.2: Dados experimentais de fluxo permeado para 1ª e 2ª compactação, para dois módulos distintos (Figura 4.5). Os valores de fluxo permeado estão representados em L/(m².h).

Tempo (min)	1ª compactação		2ª compactação	
	Fluxo 1	Fluxo 2	Fluxo 1	Fluxo 2
1,0	121,3	81,3	77,9	50,9
1,3	89,0	74,6	61,1	52,3
1,7	72,0	77,5	56,4	49,7
2,0	59,3	73,3	52,9	49,8
2,3	54,8	69,8	50,7	46,3
2,7	52,1	66,5	49,1	45,2
3,0	50,0	67,0	51,6	47,8
4,0	43,9	64,1	48,1	45,5
6,0	43,8	60,7	44,2	42,0
8,0	44,6	55,2	45,7	41,1
10,0	47,0	57,7	45,0	39,8
12,0	45,0	54,4	46,2	38,6
14,0	43,3	55,0	46,5	38,0
16,0	44,6	53,9	43,3	37,7
18,0	46,1	51,2	45,2	39,0
20,0	45,5	52,6	44,9	38,3

Tabela B.3: Dados experimentais para determinação da permeância hidráulica dos módulos de membranas (Figura 4.6).

Pressão Transmembrana (bar)	Fluxo Permeado (LMH)	
	Módulo 1	Módulo 2
0,65	48,8	37,4
0,60	44,8	34,9
0,55	39,3	31,9
0,50	37,8	28,0
0,45	32,8	25,2
0,40	26,9	24,1
0,35	24,8	21,9
0,30	21,0	18,7
0,25	17,9	15,8
0,20	12,9	11,3

Tabela B.4: Dados experimentais do teste de fluxo crítico (Figura 4.7). Os processos foram realizados na vazão de 2 L.min⁻¹, módulo de 1,91 cm (3/4 in) e Modo 1 de aeração (somente no fundo).

Tempo (min)	PTM (mbar)	Fluxo 1 (LMH)		Fluxo 2 (LMH)	
		Fluxo água	Fluxo lodo	Fluxo água	Fluxo lodo
20	448	39,3	38,5	31,9	31,6
40	449	39,3	38,9	31,9	31,9
60	450	39,3	38,1	31,9	32,5
80	450	39,3	38,9	31,9	31,3
100	447	39,3	37,3	31,9	31,6
120	445	39,3	38,1	31,9	31,6
140	444	39,3	38,9	31,9	31,9
160	450	39,3	37,7	31,9	31,3
180	449	39,3	38,5	31,9	32,2
200	401	44,4	42,2	34,9	32,8
220	400	44,4	40,8	34,9	33,2
240	400	44,4	40,4	34,9	34,2
260	398	44,4	41,3	34,9	33,5
280	399	44,4	40,8	34,9	33,2
300	397	44,4	41,7	34,9	31,8
320	398	44,4	42,2	34,9	31,4
340	400	44,4	40,8	34,9	33,2
360	400	44,4	40,4	34,9	32,5
380	350	48,8	39,5	37,4	32,5
400	348	48,8	42,9	37,4	31,0
420	348	48,8	42,9	37,4	32,2
440	347	48,8	43,4	37,4	31,4
460	349	48,8	42,5	37,4	32,5
480	350	48,8	41,5	37,4	31,4
500	346	48,8	42,0	37,4	31,8
520	348	48,8	40,5	37,4	32,2
540	349	48,8	40,0	37,4	31,0

Tabela B.5: Dados de fluxo permeado ao longo tempo para ensaios de permeação com lodo em diferentes vazões de aeração (Figura 4.8), utilizando módulo de 1,91 cm (3/4 in).

2 L.min⁻¹		5 L.min⁻¹		8 L.min⁻¹	
Tempo (h)	Fluxo (LMH)	Tempo (h)	Fluxo (LMH)	Tempo (h)	Fluxo (LMH)
0,0	41,8	0,0	33,1	0,0	35,3
2,2	41,5	2,5	32,7	2,1	34,9
4,5	36,3	5,1	28,8	4,6	30,9
7,1	32,9	7,9	28,2	7,1	30,0
10,1	29,0	10,7	27,1	9,7	28,7
13,4	25,3	13,5	26,2	12,0	28,6
17,2	22,4	16,4	25,6	14,6	26,8
21,4	19,5	19,4	24,5	17,4	25,4
26,3	17,0	22,5	24,1	20,2	23,6
31,9	14,5	25,6	23,7	23,2	23,1
38,2	12,8	28,7	23,9	26,2	22,7
45,1	11,4	31,8	23,7	29,3	22,3
52,7	10,7	35,2	23,4	32,4	21,8
60,6	9,8	38,4	22,9	35,7	21,3
69,0	9,2	41,7	22,7	39,1	20,6
77,8	8,5	45,0	22,4	42,4	20,6
87,2	8,0	48,4	22,5	45,7	20,3
96,3	7,5	51,7	22,3	49,0	19,9
		55,0	22,4	52,6	19,6
		58,3	22,0	56,2	18,9
		61,7	21,8	59,8	18,1
		65,1	21,7	63,6	18,2
		68,7	21,6	67,5	18,4
		72,3	21,5	71,3	18,5
		75,9	21,4	75,1	18,3
		79,5	21,5	78,9	18,2
		83,1	21,2	82,7	17,9
		86,6	21,0	86,6	16,8
		90,2	20,9	90,6	16,9
		93,8	21,0		

Tabela B.6: Dados de fluxo permeado ao longo do tempo para ensaios de permeação com lodo em diferentes vazões de aeração (Figura 4.10), utilizando módulo de 2,54 cm (1 in).

2 L.min⁻¹		5 L.min⁻¹		8 L.min⁻¹	
Tempo (h)	Fluxo (LMH)	Tempo (h)	Fluxo (LMH)	Tempo (h)	Fluxo (LMH)
0,0	35,3	0,0	32,0	0,0	33,0
1,9	35,1	2,5	31,7	1,0	33,0
4,2	30,2	5,4	28,3	2,9	32,7
6,6	28,6	8,1	27,9	6,2	29,8
9,2	26,0	11,2	27,3	9,5	29,8
11,8	25,6	14,3	27,3	12,8	29,4
14,6	23,7	17,1	27,3	16,1	28,9
17,4	23,5	19,9	27,9	19,4	28,4
19,5	20,4	22,8	28,1	22,7	28,1
23,0	20,2	25,6	27,2	26,0	28,2
26,9	17,4	28,4	26,7	29,3	27,9
30,9	16,4	31,2	27,1	32,9	27,5
35,5	14,6	34,3	25,9	37,5	27,0
39,8	15,0	37,3	25,5	43,7	25,8
44,2	14,8	40,4	25,8	47,5	25,4
48,5	14,7	43,7	24,5	51,2	24,8
52,9	15,4	46,8	24,6	55,0	24,6
57,2	14,7	50,1	23,9	58,8	24,1
61,6	14,6	53,5	23,9	62,7	23,6
65,9	15,1	56,8	24,0	66,8	24,4
70,6	14,2	60,2	24,0	70,9	23,2
75,0	15,0	63,3	24,3	74,9	22,9
79,6	14,6	66,7	23,6	79,0	22,7
83,9	15,2	70,0	23,0	83,1	22,8
88,3	14,5	73,4	23,3	87,2	22,5
92,9	14,5	76,8	23,2	91,5	22,4
		80,4	23,6	95,9	22,2
		83,7	22,5	98,8	22,5
		87,1	22,9		
		90,7	22,9		
		94,1	22,8		

Tabela B.7: Dados de fluxo permeado utilizando módulos com dois diâmetros distintos (Figuras 4.11, 4.12 e 4.13). Na tabela, “t” representa o tempo (em horas) e o fluxo permeado está expresso em L/(m².h).

2 L.min⁻¹				5 L.min⁻¹				8 L.min⁻¹			
3/4 in		1 in		3/4 in		1 in		3/4 in		1 in	
t (h)	Fluxo	t (h)	Fluxo	t (h)	Fluxo	t (h)	Fluxo	t (h)	Fluxo	t (h)	Fluxo
0,0	41,8	0,0	35,3	0,0	33,1	0,0	32,0	0,0	35,3	0,0	33,0
2,2	41,5	1,9	35,1	2,5	32,7	2,5	31,7	2,1	34,9	1,0	33,0
4,5	36,3	4,2	30,2	5,1	28,8	5,4	28,3	4,6	30,9	2,9	32,7
7,1	32,9	6,6	28,6	7,9	28,2	8,1	27,9	7,1	30,0	6,2	29,8
10,1	29,0	9,2	26,0	10,7	27,1	11,2	27,3	9,7	28,7	9,5	29,8
13,4	25,3	11,8	25,6	13,5	26,2	14,3	27,3	12,0	28,6	12,8	29,4
17,2	22,4	14,6	23,7	16,4	25,6	17,1	27,3	14,6	26,8	16,1	28,9
21,4	19,5	17,4	23,5	19,4	24,5	19,9	27,9	17,4	25,4	19,4	28,4
26,3	17,0	19,5	20,4	22,5	24,1	22,8	28,1	20,2	23,6	22,7	28,1
31,9	14,5	23,0	20,2	25,6	23,7	25,6	27,2	23,2	23,1	26,0	28,2
38,2	12,8	26,9	17,4	28,7	23,9	28,4	26,7	26,2	22,7	29,3	27,9
45,1	11,4	30,9	16,4	31,8	23,7	31,2	27,1	29,3	22,3	32,9	27,5
52,7	10,7	35,5	14,6	35,2	23,4	34,3	25,9	32,4	21,8	37,1	27,0
60,6	9,8	39,8	15,0	38,4	22,9	37,3	25,5	35,7	21,3	43,7	25,8
69,0	9,2	44,2	14,8	41,7	22,7	40,4	25,8	39,1	20,6	47,5	25,4
77,8	8,5	48,5	14,7	45,0	22,4	43,7	24,5	42,4	20,6	51,2	24,8
87,2	8,0	52,9	15,4	48,4	22,5	46,8	24,6	45,7	20,3	55,0	24,6
96,3	7,5	57,2	14,7	51,7	22,3	50,1	23,9	49,0	19,9	58,8	24,1
		61,6	14,6	55,0	22,4	53,5	23,9	52,6	19,6	62,7	23,6
		65,9	15,1	58,3	22,0	56,8	24,0	56,2	18,9	66,8	24,4
		70,6	14,2	61,7	21,8	60,2	24,0	59,8	18,1	70,9	23,2
		75,0	15,0	65,1	21,7	63,3	24,3	63,6	18,2	74,9	22,9
		79,6	14,6	68,7	21,6	66,7	23,6	67,5	18,4	79,0	22,7
		83,9	15,2	72,3	21,5	70,0	23,0	71,3	18,5	83,1	22,8
		88,3	14,5	75,9	21,4	73,4	23,3	75,1	18,3	87,2	22,5
		92,9	14,5	79,5	21,5	76,8	23,2	78,9	18,2	91,5	22,4
				83,1	21,2	80,4	23,6	82,7	17,9	95,9	22,2
				86,6	21,0	83,7	22,5	86,6	16,8	98,8	22,5
				90,2	20,9	87,1	22,9	90,6	16,9		
				93,8	21,0	90,7	22,9				
						94,1	22,8				

Tabela B.8: Fluxo permeado para os dois modos distintos de aeração, nas vazões de aeração de 2, 5 e 8 L.min⁻¹, utilizando módulo de 3/4 in (Figuras 4.15, 4.16, 4.17). Na tabela, “t” representa o tempo (em horas) e o fluxo permeado está expresso em L/(m².h).

2 L.min ⁻¹				5 L.min ⁻¹				8 L.min ⁻¹			
Modo 1		Modo 2		Modo 1		Modo 2		Modo 1		Modo 2	
t (h)	Fluxo	t (h)	Fluxo	t (h)	Fluxo	t (h)	Fluxo	t (h)	Fluxo	t (h)	Fluxo
0,0	41,8	0,0	38,0	0,0	33,1	0,0	24,2	0,0	35,3	0,0	44,2
2,2	41,5	3,0	36,8	2,5	32,7	3,4	23,5	2,1	34,9	1,5	43,5
4,5	36,3	5,9	36,5	5,1	28,8	9,0	17,0	4,6	30,9	2,3	43,6
7,1	32,9	8,7	34,8	7,9	28,2	14,5	16,6	7,1	30,0	4,6	39,3
10,1	29,0	11,8	32,1	10,7	27,1	19,0	16,0	9,7	28,7	6,9	38,7
13,4	25,3	15,1	29,0	13,5	26,2	26,2	16,3	12,0	28,6	9,2	37,7
17,2	22,4	18,7	26,6	16,4	25,6	32,3	15,7	14,6	26,8	11,7	37,0
21,4	19,5	22,9	23,5	19,4	24,5	38,4	15,7	17,4	25,4	14,2	35,7
26,3	17,0	27,2	21,7	22,5	24,1	44,5	15,7	20,2	23,6	16,8	34,4
31,9	14,5	32,3	18,6	25,6	23,7	50,5	15,5	23,2	23,1	19,3	33,1
38,2	12,8	37,9	16,5	28,7	23,9	56,9	14,8	26,2	22,7	22,2	32,2
45,1	11,4	44,1	14,8	31,8	23,7	63,3	14,3	29,3	22,3	25,4	31,2
52,7	10,7	51,0	13,3	35,2	23,4	70,0	13,9	32,4	21,8	28,4	29,2
60,6	9,8	58,1	12,9	38,4	22,9	76,6	13,7	35,7	21,3	31,5	28,7
69,0	9,2	66,5	11,0	41,7	22,7	83,5	13,4	39,1	20,6	34,5	28,5
77,8	8,5	75,7	9,7	45,0	22,4	90,6	13,1	42,4	20,6	37,6	27,8
87,2	8,0	85,2	9,5	48,4	22,5	97,1	12,8	45,7	20,3	40,9	27,5
96,3	7,5	92,7	8,5	51,7	22,3			49,0	19,9	44,1	26,4
				55,0	22,4			52,6	19,6	47,4	25,9
				58,3	22,0			56,2	18,9	50,7	25,2
				61,7	21,8			59,8	18,1	54,3	24,6
				65,1	21,7			63,6	18,2	57,8	23,8
				68,7	21,6			67,5	18,4	61,4	23,5
				72,3	21,5			71,3	18,5	64,9	23,2
				75,9	21,4			75,1	18,3	68,7	22,8
				79,5	21,5			78,9	18,2	72,5	22,4
				83,1	21,2			82,7	17,9	76,3	21,5
				86,6	21,0			86,6	16,8	80,2	22,2
				90,2	20,9			90,6	16,9	84,3	21,2
				93,8	21,0					88,1	21,3
										92,1	20,9
										96,2	20,6

Tabela B.9: Dados de fluxo permeado ao longo tempo, para o Modo 2 de aeração, em diferentes vazões de aeração, utilizando módulo de 1,91 cm (3/4 in) (Figura 4.19). Na tabela, “t” representa o tempo (em horas) e o fluxo permeado está expresso em L/(m².h).

2 L.min ⁻¹		5 L.min ⁻¹		8 L.min ⁻¹	
t (h)	Fluxo	t (h)	Fluxo	t (h)	Fluxo
0,0	38,0	0,0	24,2	0,0	44,2
3,0	36,8	3,4	23,5	1,5	43,5
5,9	36,5	9,0	17,0	2,3	43,6
8,7	34,8	14,5	16,6	4,6	39,3
11,8	32,1	19,0	16,0	6,9	38,7
15,1	29,0	26,2	16,3	9,2	37,7
18,7	26,6	32,3	15,7	11,7	37,0
22,9	23,5	38,4	15,7	14,2	35,7
27,2	21,7	44,5	15,7	16,8	34,4
32,3	18,6	50,5	15,5	19,3	33,1
37,9	16,5	56,9	14,8	22,2	32,2
44,1	14,8	63,3	14,3	25,4	31,2
51,0	13,3	70,0	13,9	28,4	29,2
58,1	12,9	76,6	13,7	31,5	28,7
66,5	11,0	83,5	13,4	34,5	28,5
75,7	9,7	90,6	13,1	37,6	27,8
85,2	9,5	97,1	12,8	40,9	27,5
92,7	8,5			44,1	26,4
				47,4	25,9
				50,7	25,2
				54,3	24,6
				57,8	23,8
				61,4	23,5
				64,9	23,2
				68,7	22,8
				72,5	22,4
				76,3	21,5
				80,2	22,2
				84,3	21,2
				88,1	21,3
				92,1	20,9
				96,2	20,6

Tabela B.10: Fluxo permeado para os dois modos distintos de aeração, nas vazões de aeração de 2, 5 e 8 L.min⁻¹, utilizando módulo de 2,54 cm (1 in) (Figuras 4.20, 4.21, 4.22). Na tabela, “t” representa o tempo (em horas) e o fluxo permeado está expresso em L/(m².h).

2 L.min ⁻¹				5 L.min ⁻¹				8 L.min ⁻¹			
Modo 1		Modo 2		Modo 1		Modo 2		Modo 1		Modo 2	
t (h)	Fluxo	t (h)	Fluxo	t (h)	Fluxo	t (h)	Fluxo	t (h)	Fluxo	t (h)	Fluxo
0,0	35,3	0,0	35,1	0,0	32,0	0,0	17,6	0,0	33,0	0,0	23,3
1,9	35,1	2,4	34,0	2,5	31,7	4,3	17,5	1,0	33,0	3,3	23,2
4,2	30,2	5,3	30,5	5,4	28,3	8,7	15,7	2,9	32,7	6,7	22,5
6,6	28,6	8,1	28,7	8,1	27,9	13,3	15,1	6,2	29,8	10,0	22,5
9,2	26,0	11,3	26,7	11,2	27,3	17,9	14,6	9,5	29,8	13,4	22,1
11,8	25,6	14,6	24,5	14,3	27,3	22,8	14,3	12,8	29,4	16,8	21,6
14,6	23,7	18,3	22,7	17,1	27,3	27,7	14,2	16,1	28,9	20,2	21,0
17,4	23,5	22,1	21,1	19,9	27,9	32,6	14,2	19,4	28,4	23,9	20,4
19,5	20,4	26,3	19,7	22,8	28,1	37,7	13,9	22,7	28,1	27,6	20,3
23,0	20,2	30,7	18,2	25,6	27,2	42,8	13,6	26,0	28,2	31,5	19,3
26,9	17,4	35,3	16,9	28,4	26,7	48,0	13,4	29,3	27,9	35,4	18,8
30,9	16,4	40,4	15,9	31,2	27,1	53,2	13,4	32,9	27,5	39,3	18,4
35,5	14,6	45,9	14,8	34,3	25,9	58,3	13,3	37,5	27,0	43,4	18,0
39,8	15,0	51,8	13,4	37,3	25,5	63,5	13,0	43,7	25,8	47,5	17,4
44,2	14,8	57,9	12,7	40,4	25,8	68,9	12,6	47,5	25,4	51,7	17,0
48,5	14,7	64,4	12,2	43,7	24,5	74,3	12,7	51,2	24,8	56,0	17,2
52,9	15,4	71,1	11,7	46,8	24,6	79,7	12,8	55,0	24,6	60,4	17,0
57,2	14,7	77,9	11,2	50,1	23,9	85,2	12,4	58,8	24,1	64,8	16,7
61,6	14,6	85,1	10,8	53,5	23,9	90,8	12,2	62,7	23,6	69,2	16,3
65,9	15,1	90,7	10,6	56,8	24,0	96,1	12,1	66,8	24,4	73,6	16,1
70,6	14,2			60,2	24,0			70,9	23,2	78,2	15,8
75,0	15,0			63,3	24,3			74,9	22,9	82,9	15,5
79,6	14,6			66,7	23,6			79,0	22,7	87,6	15,0
83,9	15,2			70,0	23,0			83,1	22,8	92,5	14,7
88,3	14,5			73,4	23,3			87,2	22,5		
92,9	14,5			76,8	23,2			91,5	22,4		
				80,4	23,6			95,9	22,2		
				83,7	22,5						
				87,1	22,9						
				90,7	22,9						
				94,1	22,8						