

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências Faculdade de Engenharia

Maria dos Remédios Meira Mainenti

Aeração e consumo energético em biorreatores com membranas (MBR):

Revisão de literatura e estudo de caso

Maria dos Remédios Meira Mainenti

Aeração e consumo energético em biorreatores com membranas (MBR):

Revisão de literatura e estudo de caso

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental — Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Gandhi Giordano Coorientador: Prof. Dr. Olavo Barbosa Filho

CATALOGAÇÃO NA FONTE UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

M225 Mainenti, Maria dos Remédios Meira.

Aeração e consumo energético em biorreatores com membranas (MBR): revisão de literatura e estudo de caso / Maria dos Remédios Meira Mainenti. -2018.

175f.

Orientador: Gandhi Giordano. Coorientador: Olavo Barbosa Filho.

Dissertação (Mestrado) — Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia ambiental - Teses. 2. Águas residuais - Purificação - Tratamento biológico - Teses. 3. Energia - Consumo - Teses. 4. Águas residuais - Purificação - Aeração - Teses. I. Giordano, Gandhi. II. Barbosa Filho, Olavo. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

Bibliotecária: Júlia Vieira - CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta	ı
dissertação, desde que citada a fonte.	
Assinatura Data	

Maria dos Remédios Meira Mainenti

Aeração e consumo energético em biorreatores com membranas (MBR):

Revisão de literatura e estudo de caso

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental — Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Aprovada em 16 de agosto de 2018.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Gandhi Giordano (Orientador)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Olavo Barbosa Filho (Coorientador)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Daniele Maia Bila
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Juacyara Carbonelli Campos
Escola de Química – UFRJ

Prof. Dr. Geraldo Lippel Sant' Anna Junior

PEQ/ COPPE/UFRJ

Rio de Janeiro

DEDICATÓRIA

A Deus, por me permitir cumprir esta tarefa. Ao meu Pai, *in memoriam*, que sempre reconheceu o conhecimento como o vetor alavancador do progresso humano e à minha família, pela compreensão sobre minha ausência nos momentos de estudos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me permitir cumprir esta tarefa.

Ao meu orientador, Prof. Doutor Gandhi Giordano e Coorientador, Prof. Doutor Olavo Barbosa Filho por toda orientação e acolhimento, apontando os melhores caminhos para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores, pelos ensinamentos nas aulas das disciplinas do mestrado.

Aos meus colegas de mestrado, pelo companheirismo e apoio quando necessário.

Aos colaboradores Eng. Rafael Caputo, João Paulo Miliante e Debora Mainenti.

À UERJ, por me permitir realizar o sonho de fazer um mestrado.

A todos aqueles, que embora não citados nominalmente, contribuíram direta e indiretamente para a realização deste trabalho.



RESUMO

MAINENTI, Maria dos Remédios Meira. **Aeração e consumo energético em biorreatores com membranas (MBR)**: revisão de literatura e estudo de caso. 2018. 174f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

Em tratamento de águas residuárias, o sistema de biorreatores de membrana (MBR) geralmente tem um custo operacional mais alto do que o sistema de lodo ativado clássico (LAC), principalmente devido aos custos de energia relacionados à aeração. Este trabalho revisou a literatura no sistema MBR, buscando identificar os fundamentos da aeração tanto no processo biológico quanto no uso do ar como agente de limpeza para mitigar a incrustação na superfície das membranas, seus impactos no consumo de energia, estratégias para reduzir esse consumo, bem como avaliou sua aplicabilidade em um estudo de caso em escala industrial, no qual o sistema MBR é utilizado como uma etapa em um sistema de tratamento de efluentes de uma fábrica de laticínios. O resultado da revisão da literatura apresentou várias estratégias que visam à redução do consumo de energia e o estudo de caso confirmou: o bom desempenho desta tecnologia, com as seguintes eficiências de remoção de matéria orgânica alcançadas - DBO, 98,6 a 99,5%, DQO, 96,1 a 99,2% e o elevado percentual de energia consumida por aeração no MBR (em torno de 85%). Este fato torna evidente que a redução do consumo de energia deve sempre ser vista com especial atenção, a fim de aumentar a competitividade dessa tecnologia.

Palavras chaves: biorreator com membranas (MBR); incrustação na membrana; aeração; mitigação da incrustação; hidrodinâmica; consumo de energia; custo e energia; água residuária de laticínios.

ABSTRACT

MAINENTI, Maria dos Remédios Meira. *Aeration and energy consumption in membrane bioreactors (MBR): literature review and case study.* 2018. 174f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

In wastewater treatment, membrane bioreactor system (MBR) usually has a higher operational cost than the conventional activated sludge system (CAS), mainly due to the energy costs related to the aeration. This work reviewed the literature in the MBR system, seeking to identify the aeration fundamentals both in the biological process and in the use of air for membrane scouring to mitigate incrustation on membrane surface, its impacts on energy consumption, strategies to reduce this consumption, as well as evaluated its applicability in an industrial scale case study, in which the MBR system is used as a step in an effluent treatment system of a dairy factory. The result of the literature review presented several strategies aimed at reducing energy consumption and the case study confirmed: the good performance of this technology, with the following organic matter removal efficiencies achieved - BOD, 98,6 to 99,5%, COD, 96,1 to 99,2% and the high percentage of energy consumed by aeration in the MBR (around 85%). This fact renders evident that the reduction of energy consumption always must been seen with special attention, in order to increase the competitiveness of this technology.

Keywords: membrane bioreactor (MBR); membrane fouling; aeration; fouling mitigation; hydrodynamics; energy consumption; cost & energy; dairy wastewater.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação entre o esquema de tratamento com LAC e com MBR28
Figura 2 – Evolução de capacidade de plantas de MBR ao longo do mundo (escala maior que
$100.000 \text{ m}^3/\text{d})$
Figura 3 – Diâmetro médio dos poros de membranas de MF, UF, NF e OI35
Figura 4 - Configuração com módulo de membrana externa (sidestream) e submersa
(immersed) ao tanque de aeração
Figura 5 - Ilustração esquemática da ocorrencia de salto na TMP40
Figura 6 - Tendências de pesquisa em biorreatores com membranas com base no número de
publicações em cada área de assunto chave na base de dados Scopus42
Figura 7 - Representação simplificada de EPS e SMP
Figura 8 – Inter-relações entre parâmetros MBR e incrustação
Figura 9 - Consumo específico de energia como função da vazão de água tratada47
Figura 10 - Configuração da planta de MBR em Wuxi da província de Jiangsu na China51
$Figura\ 11-Monitoramento\ de\ longo\ prazo\ do\ consumo\ de\ energia\ em\ escala\ completa\ de\ MBR$
e sua constituição
Figura 12 – Esquema do Processo de Lodo Ativado Clássico
Figura 13 - Esquema ilustrativo de um ensaio de sedimentalidade do lodo
Figura 14- Etapas da remoção de poluentes orgânicos
Figura 15 – Etapas envolvidas na biodegradação de poluentes orgânicos
Figura 16 – Curva de crescimento e decréscimo da biomassa em função do tempo60
Figura 17 - Variação temporal do teor de sólidos suspensos voláteis e da DBO solúvel em um
biorreator operando em batelada
Figura 18 - Análise estatística dos dados de Stephenson et al. (2000) para A/M - efluente
municipal e industrial
Figura 19 - Inter-relações existentes entre a aeração e os vários parâmetros e aspectos do
sistema iMBR
Figura 20 - Esquema de um sistema de reatores de mistura completa utilizando o processo
Ludzack-Ettinger Modificado
Figura 21 - Número de publicações sobre escoamento com duas fases em processos de
membranas ao longo do tempo
Figura 22 – Padrões de fluxo em duas fases

LISTA DE FIGURAS

Figura 23 - Tipos de elementos de membranas usados em processos de membrana com fluxo
em duas fases
Figura 24 - Mudança no fluxo de permeado para membranas aeradas por borbulhamento com
macrobolhas e microbolhas durante longo tempo de operação
Figura 25 - Demanda específica de aeração de MBR com borbulhamento tipo microbolhas e
macrobolhas
Figura 26 - Energia de aeração por permeado de MBR com borbulhamento tipo microbolhas e
macrobolhas
Figura 27 - Resultados de CFD para tensão máxima de cisalhamento de parede exercida por
bolhas de tamanhos diferentes ascendendo na velocidade de subida terminal em canais de
diferentes espaçamentos
Figura 28 - Representação esquemática de vários arranjos de borbulhamento em membranas
97
Figura 29 - Frequências estatísticas de como os dados de energia são relatados na literatura
Figura 30 - Média mensal do consumo de energia específico em 11 plantas de MBRs de
pequena escala no Japão
Figura 31 – Impacto no OPEX
Figura 32 - Distribuição percentual do consumo de energia na MBR em Heenvliet - Holanda
Figura 33 – Dados de custo e energia para as 3 capacidades de vazão
Figura 34 – Comparação do consumo específico de energia de seis plantas avaliadas: ETEs total
e MBR apenas
Figura 35 - Consumo específico de energia de seis ETEs versus carga hidráulica (a) e carga
orgânica (b)
Figura 36 – Distribuição percentual do consumo de energia
Figura 37 – Influência de variáveis na performance energética por classe de tamanho de estação
tecnologia utilizada e país
Figura 38 - Concentração MLSS de acordo com o tipo da membrana e aplicação121
Figura 39 - Fator α como função do MLVSS

LISTA DE FIGURAS

Figura 40 – Aumento nas velocidades líquidas alcançadas pela modificação e localizaçã	ăo dos
aeradores	125
Figura 41 - Deflectores ou chicanas como componentes chaves de um biorreator de mem	ıbrana
(MBR)	127
Figura 42 – Imagens de superfície de membranas em quatro meses de operação (após lin	mpeza
física)	128
Figura 43 - Mapa conceitual da metodologia	134
Figura 44 – Descrição do processo de tratamento de efluentes da indústria de laticínios	135
Figura 45 - Reações químicas de formação dos íons metálicos responsáveis pela aç	ão do
processo de coagulação	136
Figura 46 – Esquema representativo da etapa de floculação	137
Figura 47 - Configuração do MBR	138
Figura 48 – Módulos das membranas no tanque de extração	139
Figura 49 – Módulo de ultrafiltração de placas planas	140
Figura 50 – Processo de funcionamento do módulo de ultrafiltração	140
Figura 51 – Sistema de aeração da planta de MBR	141
Figura 52 – Difusores de ar tubulares perfurados para os módulos das membranas	142
Figura 53 – Difusor tipo membrana para o tanque de aeração	142
Figura 54 – Malha de difusão	143
Figura 55 - Qualidade do permeado (efluente biológico)	155

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Distribuição do consumo de energia em 03/01/2018	161
Gráfico 2 - Distribuição do consumo de energia em 05/02/2018	161
Gráfico 3 – Remoção de matéria orgânica pelo MBR para DBO	163
Gráfico 4 – Remoção de matéria orgânica pelo MBR para DQO	163
Gráfico 5 - Eficiência de tratamento MBR considerando DBO	164
Gráfico 6 - Eficiência de tratamento MBR considerando DQO	164

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de processo de reatores biológicos
Tabela 2 – Eficiência de remoção dos processos biológicos
Tabela 3 – Consumo de energia de várias instalações de MBR municipais49
Tabela 4 - Condições Operacionais para o processo de lodo ativado54
Tabela 5 - Parâmetros aplicáveis às modalidades do Processo de Lodo Ativado57
Tabela 6 - Parâmetros Operacionais de MBR64
Tabela 7 – Diferenças entre condições operacionais das duas tecnologias – LAC e MBR64
Tabela 8 – Dados operacionais típicos e de performance para MBR67
Tabela 9 – Fatores ambientais que favorecem a Nitrificação e Desnitrificação73
Tabela 10 – Eficiência de difusores em condições <i>standard</i>
Tabela 11 - Variáveis possíveis que influenciam o grau de aprimoramento do processo83
Tabela 12- Desempenho hidráulico de placa plana e fibra oca
Tabela 13 - Faixas de valores de SAD _m e SAD _p
Tabela 14 - Valores de SAD _m e SAD _p para MBRs tratando efluentes municipais no Nordeste
da Espanha
Tabela 15 - Consumo específico de energia para MBRs tratando efluentes municipais 101
Tabela 16 – Parcelas que compõe o custo de capital (CAPEX) e custo operacional (OPEX) em
uma planta de MBR (continua)104
Tabela 17 – Resumo de dados de consumo de energia em instalações de MBR de efluentes
municipais na Holanda111
Tabela 18 – Características das plantas municipais auditadas nos EUA, França e Espanha . 123
Tabela 19 – Parâmetros físico-químicos monitorados144
Tabela 20 - Estratégias para redução do consumo energético (continua)
Tabela 21 – Vazão e carga orgânica
Tabela 22 – Classificação dos corpos de águas doces
Tabela 23 - Eficiência de remoção de DBO e DQO no MBR, obtida na operação155
Tabela 24 - Determinação da relação A/M em função de DBO
Tabela 25 - Determinação da relação A/M em função de DQO
Tabela 26 – Determinação da razão SSV _{TA} /SS _{TA}
Tabela 27 - Condições operacionais do MBR – tanque de extração
Tabela 28 – Medições de potência e amperagem na ETEL

LISTA DE TABELAS

Tabela 29 – Consumos específicos de energia no MBR (continua)
Tabela 30 - Teor de saturação do oxigênio dissolvido na água destilada em função d
temperatura (mg/L)

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASM Activated Sludge Model (modelo de lodo ativado) **BMBR** Baffled membrane bioreactors (biorreatores com membranas com defletores) Compound anual growth rate (taxa de crescimento anual composta) CAGR **CAPEX** Expenditure capital (Custo de Capital) CFD Computational Fluid Dinamic (Dinâmica do Fluido Computacional) **CFV** Crossflow velocity (vazão de circulação pela área transversal do módulo) DBO Demanda bioquímica de oxigênio (na língua inglesa BOD) DBO_5 Demanda bioquímica de oxigênio determinada para cinco dias DQO Demanda química de oxigênio (na língua inglesa COD) **DWF** Dry Weather Flow (Vazão Climático Seco) **EPS** Substâncias poliméricas extracelulares ETE Estação de Tratamento de Efluentes Municipais **ETEI** Estação de Tratamento de Efluentes Industriais FS Flat Sheet (Placa plana) **GAC** Granular Activated Carbon (Carvão Ativado Granular) HRT Hydraulic Retention Time (Tempo de Retenção Hidráulica) I Corrente elétrica **KPI** *Key Performance Indicator* (Indicador de Performance Chave) Energia elétrica kWh LAC Lodo Ativado Clássico (na língua inglesa CAS) **MBR** Membrane Biological Reactor (Reator Biológico com Membrana) **MBR** Reator biológico com membranas MF Microfiltração MLD Milhões de litros por dia NF Nanofiltração OI Osmose Inversa **OPEX** Expenditure operational (Custo Operacional) P Potência elétrica PAC Powdered Activated Carbon (Carvão Ativado em Pó)

Peak daily flow (vazão diária máxima)

PDF

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PE População equivalente

 SAD_{m} Demanda específica de aeração por área de membrana

SAD_p Demanda específica de aeração por fluxo (volume) de permeado

SED Demanda Específica de Energia

SMP Produtos microbiológicos solúveis

SRT Sludge Retention Time (o mesmo que θ c)

SST Sólidos suspensos totais

SSV Sólidos suspensos voláteis

TMP Pressão transmembrana

UF Ultrafiltração

V Voltagem elétrica

Ø Fator de potência

A/M Relação alimento/microrganismo

LISTA DE SÍMBOLOS

C_{L}	Concentração do oxigênio no meio líquido
C_s	Concentração de saturação de oxigênio dissolvido
Q	Vazão afluente
Q'	Vazão de efluente
Q''	Vazão de excesso de lodo ativado
Q_{r}	Vazão de recirculação do lodo ativado
Q_{U}	Vazão de retirada do lodo do sedimentador secundário = $Q_r + Q$ "
r	Razão de recirculação = Q_r/Q
S_{e}	Concentração da DBO5 efluente (e no tanque de aeração), solúvel
S_{o}	Concentração da DBO ₅ afluente
V	Volume do tanque de aeração
X	Concentração de SST efluente do sedimentador primário, desprezível
X_a	Concentração de SST ou do lodo no tanque de aeração (SSTA), na literatura representado por MLSS (<i>mixed liquor suspended solids</i>)
X_{av}	Concentração de SSV no tanque de aeração (SSVTA)
X_{e}	Concentração de SST efluente
X_{ev}	Concentração de SSV no efluente
X_{u}	Concentração de SST no lodo recirculado
X_{uv}	Concentração se SSV no lodo em excesso
ΔX	Ganho de produção de lodo no tanque de aeração
uG	Velocidade superficial do gás

Velocidade superficial do líquido

Coeficiente de produção celular

Razão $u_G/(u_L + u_G)$

uL

θ

Y

LISTA DE SÍMBOLOS

Kd Taxa específica de respiração endógena

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	23
1 REATORES BIOLÓGICOS COM MEMBRANAS	27
1.1 Descrição geral dos reatores biológicos com membranas	27
1.1.1 Histórico	29
1.1.2 Mercado	30
1.2 Tipos de membranas utilizadas nos MBR	32
1.3 Configurações dos reatores MBR: iMBR (Imersa) e sMBR (Lateral)	35
1.4 Parâmetros operacionais dos MBR	38
1.4.1 Parâmetros relativos à biodegradação	38
1.4.2 Parâmetros relativos às membranas	38
1.5 Limitações dos MBR: incrustações (fouling) e alto consumo de energia	39
1.5.1 Incrustações (fouling)	39
1.5.2 Alto Consumo de Energia	45
1.5.3 Dependência de vazão	46
1.5.4 Comparação do consumo de energia em sistemas LAC /CAS e MBR	47
1.6 Algumas comparações entre MBR e os reatores biológicos de lodo ativado clássico (L	
1.6.1 Processo LAC: descrição do processo e parâmetros operacionais	52
1.6.1.1 Parâmetros operacionais do processo de biodegradação e de dimensionamento tanque de aeração	
1.6.1.2 Etapas do processo de remoção e biodegradação da matéria orgânica	58
1.6.1.3 Crescimento Microbiano	59
1.6.2 Vantagens e desvantagens comparativas	63
1.7 Síntese do capítulo	68
2 SISTEMAS DE AERAÇÃO E CONSUMO ENERGÉTICO NOS REATORES BIOLÓGICOS O MEMBRANAS	
2.1 Funções da aeração em MBR	70
2.2 Aeração da biomassa: oxigênio dissolvido e transferência de oxigênio	71
2.3 Aeração da membrana: ar como agente de limpeza da membrana, difusores e aspenidrodinâmicos	
2.4 Valores da literatura referentes a parâmetros operacionais, eficiências de tratamento, de aeração, consumo específico de energia, entre outros, para MBR aeróbios	

SUMÁRIO

2.4.1 Parâmetros Operacionais de MBR	99
2.4.2 Eficiência de remoção da matéria orgânica	100
2.4.3 Demandas específicas de aeração, SAD _m e SAD _p	100
2.4.4 Consumo Específico de Energia.	101
2.4.5 Frequências estatísticas de como os dados de energia são reportados na le efluentes municipais	-
2.4.6 Efeito do aumento de capacidade em unidades do Japão	103
2.4.7 Contribuições das parcelas que compõe o custo de capital (CAPEX) e custo (OPEX) em uma planta de MBR	
2.4.8 Dados do estudo de viabilidade técnica econômica de uma configuração nanofiltração para reuso de água de efluentes de laticínios em Minas Gerais	
2.5 Custo operacional e demanda de energia nos MBR	105
2.6 Estratégias para redução do consumo energético	118
2.6.a Operar em condições ótimas de vazão	118
2.6.b Controle automático de oxigênio dissolvido	118
2.6.c Aeração intermitente para desnitrificação (tanque de aeração)	119
2.6.d Instalação de variador de velocidade em equipamentos eletromecânicos (bombas)	
2.6.e Redução de MLSS	120
2.6.f Aspectos Hidrodinâmicos	123
2.6.g Limpeza de Difusores – monitoramento on line	125
2.6.h Módulos de membranas mais compactos	126
2.6.i Utilização de chicanas	126
2.6.j Materiais Granulados - Agentes de limpeza Scouring agentes - Granular mé	dia127
2.6.k Realizar ações de gerenciamento de Energia	129
2.6.1 Estratégias Diversas	130
2.7 Síntese do capítulo	132
3 METODOLOGIA	133
3.1 Revisão da Literatura	133
3.2 Construção do estudo de caso – MBR em ETEI de indústria de laticínios	134
3.2.a Diagrama de blocos simplificado da estação – descrição da estação	134
3.2.b Configuração do MBR e tipo de membrana	138

SUMÁRIO

3.2.c Descrição sucinta do sistema de aeração adotado	141
3.2.d Procedimentos para coleta e análises	143
3.2.e Valores dos parâmetros de projeto e/ou obtidos na operação do MBR:	144
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	149
4.1 Da revisão da literatura	149
4.2 Estudo de caso – MBR em ETEI de indústria de laticínios	153
4.2.1 Vazão e carga orgânica	153
4.2.2 Eficiência de tratamento (%)	155
4.2.3 A/M – Relação alimento/microrganismo	156
4.2.4 Demanda específica de aeração para a membrana $(SAD_m \ e \ SAD_p)$	157
4.2.5 Cálculo da Razão SSV _{TA} /SS _{TA}	157
4.2.6 Condições Operacionais do MBR – Tanque de extração	159
4.2.7 Consumo específico de energia no MBR – kW h/m³ de efluente tratado, kW reduzida, kW h/kg DQO reduzida	•
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	165
REFERÊNCIAS	167
ANEXO 1 – Teor de saturação do oxigênio dissolvido na água destilada em função da (mg/L)	-

INTRODUÇÃO

A tecnologia de biorreator com membranas (MBR) combina o tratamento biológico com o processo de filtração de membrana, substituindo a unidade de sedimentação gravitacional dos sistemas clássicos de lodo ativado (LAC). Neste sistema, módulos de microfiltração ou ultrafiltração funcionam como uma barreira, retendo a biomassa. [1] [2] [3]

Várias vantagens têm sido destacadas na comparação do MBR com o LAC, como: a elevada qualidade do efluente tratado decorrente da viabilidade de manutenção de elevada concentração de sólidos suspensos no biorreator, baixa relação alimento microrganismos, reduzidos tempo de residência e baixa produção de lodo, resultando em unidades mais compactas do que as de LAC. [4] No entanto, os custos operacionais (OPEX) ainda são uma das principais limitações que afetam a viabilidade desta tecnologia, principalmente devido à aeração da membrana, perda de permeabilidade e reposição de membranas. [1] [5]

A tecnologia está cada vez mais favorecida para aplicações de tratamento de águas residuárias em que é necessária uma alta qualidade do efluente tratado, em particular para sua reutilização e onde o espaço é limitado [6] e possui os seguintes impulsionadores [7]: legislações ambientais cada vez mais restritivas (Brasil - Resolução CONAMA 430/2011 - Condições e padrões de lançamento de efluentes (Resolução CONAMA 357/2005 - Classificação de corpos hídricos), escassez de água levando a necessidade de reuso, aumento na confiabilidade da tecnologia de MBR - grande número de unidades instaladas e em implantação no mundo, redução nos custos de investimentos e incentivos do estado para tratamento de aguas residuárias e para reuso.

A confiança no processo parece aumentar à medida que o número e o tamanho das instalações de referência crescem mundialmente, com cerca de 40 estações de tratamento de efluentes municipais com mais de 100 megalitros/dia (MLD – milhões de litros por dia) agora instalado e um total de global de capacidade instalada provavelmente excedendo 15.000 MLD. Atualmente existem instalações de tratamento de efluentes industriais de mais de 50 MLD. [6]

Sistema MBR normalmente apresenta custo operacional maior que o LAC, principalmente os custos relativos ao consumo de energia. Esta energia é em sua maioria consumida pela aeração tanto no reator biológico para a degradação dos poluentes quanto para mitigar a incrustação da membrana. [1] [5] [8] [9]

No processo MBR, o percentual da energia da aeração é de 70-80% do consumo do total da energia consumida no tratamento de águas residuárias municipais, com 40-60% consumidos pela etapa biológica do processo. [9]

A aeração é o maior fator de custo individual em operação MBR. Assim, o maior salto para a economia de custos operacionais de energia pode ser alcançado por meio da melhoria da utilização do ar. [10]

Com alto requerimento de energia e com até 70% do total custos de energia, a aeração da membrana é a maior contribuição para os custos operacionais. A partir de 10 anos de experiência de operação de uma MBR de escala industrial, descobriu-se que apenas em 10% do tempo de operação, isto é, durante as cargas máximas, a energia fornecida é usada de forma otimizada. Isso mostra o grande potencial de otimização da aeração. [10]

Assim, está delimitado o problema a ser explorado na presente pesquisa: a aeração gerando alto consumo energético nos reatores biológicos com membranas (MBR).

Neste contexto, esta pesquisa se propõe a revisar a literatura procurando identificar os fundamentos da aeração (tanto na parte biológica como no uso do ar como agente de limpeza para mitigar a incrustação nas membranas), seus impactos no consumo energético, estratégias para redução desse consumo energético, bem como avaliar a aplicabilidade do MBR em sistema de tratamento de efluentes de uma indústria de laticínios no estado do Rio de Janeiro, em um estudo de caso no qual será quantificado e comprovado o alto percentual de consumo energético pela aeração.

A pesquisa tem como hipótese que na operação de reatores biológicos com membranas existe o grande desafio do alto consumo energético devido à aeração, mas existem estratégias para redução deste consumo energético, de modo que este desafio pareça não ser insuperável [6].

Objetivo geral

Revisar a literatura procurando identificar os fundamentos da aeração, em biorreatores com membranas (MBR), seus impactos no consumo energético, bem como avaliar a aplicabilidade desta tecnologia em sistema de tratamento de efluentes de uma indústria de laticínios.

Objetivos específicos

- Realizar um embasamento teórico sobre o reator biológico com membranas (MBR) em relação ao sistema clássico de lodo ativado (LAC);
- Identificar as funções da aeração e aspectos pertinentes a estas funções;
- Analisar aspectos de custo operacional e demanda de energia consumidos pela aeração;
- Identificar as atuais estratégias que otimizam a aeração, de modo a promover a redução da demanda de energia na operação dos MBRs e quantificar alguns aspectos revisados em um estudo de caso MBR em planta de laticínios.

Delimitação da pesquisa

A pesquisa foi restrita ao tratamento de efluentes líquidos por meio do sistema de biorreatores com membranas (MBR) com foco no aspecto de aeração deste sistema e o estudo de caso foi realizado em uma estação de tratamento de efluentes de uma planta de laticínios, no estado do Rio de Janeiro, em um MBR com capacidade de 300 m³/d.

Estruturação da Dissertação

Esta dissertação está composta de 5 blocos (uma introdução e quatro capítulos), além das referências e anexo. O bloco intitulado "Introdução", visa estabelecer as condições iniciais sobre o problema abordado na pesquisa, mostrando a origem e relevância do problema investigado, hipótese, a delimitação e proposição da pesquisa, seus objetivos (gerais e específicos) e a estruturação da dissertação.

O capítulo 1, "Reatores Biológicos com Membranas", apresenta um embasamento teórico preliminar, abordando aspectos fundamentais (como tipos de membranas, configurações e parâmetros), limitações dos reatores biológicos com membranas (MBR) e algumas

comparações entre os MBRs e os reatores biológicos de lodo ativado clássico (LAC), obtidos da pesquisa bibliográfica sobre este tema.

O capítulo 2, "Sistemas de aeração e consumo energético nos reatores biológicos com membranas", é constituído de uma revisão bibliográfica sobre a aeração em MBR, destacando as funções da aeração como aeração da biomassa e aeração como agente de limpeza da membrana, na qual difusores e aspectos hidrodinâmicos são contemplados. O impacto no custo operacional e na demanda de energia também são considerados e finalizando este capítulo, as estratégias para redução do consumo energético são elencadas.

O capítulo 3, "Metodologia", é constituído de duas partes: identificação do modo como a pesquisa bibliográfica foi realizada, palavras chaves, base da dados (como por exemplo o *Science direct*, periódico Capes) e a construção de um estudo de caso em MBR de um sistema de tratamento de efluentes de uma planta de laticínios, que apresenta o diagrama de blocos simplificado da estação - descrição da estação, a configuração do MBR e tipo de membrana, sistema de aeração adotado, procedimentos para coleta e análises contendo o plano de amostragem e valores dos parâmetros de projeto e/ou obtidos na operação do MBR.

O capítulo 4, "Resultados e Discussão", apresenta a quantificação de alguns aspectos revisados, realizada no estudo de caso na mesma sequência dos parâmetros do item 3.2e, bem como a análise crítica dos valores encontrados e comparação destes com dados valores encontrados na literatura.

Por fim o capítulo 5, "Conclusões e Recomendações", contém as conclusões obtidas com a pesquisa apresentada, seus resultados e discussão, bem como as recomendações para trabalhos futuros, que possam complementar ou cobrir possíveis lacunas da presente dissertação.

1 REATORES BIOLÓGICOS COM MEMBRANAS

A revisão na literatura apresentada nos capítulos 1 e 2 foi realizada nas bases de dados *Science Direct*, Google Acadêmico, biblioteca de dissertações da UERJ, periódicos CAPES, sites específicos da área de MBR, legislações ambientais, palestras de congressos e livros da área, procurando identificar os fundamentos da aeração, seus impactos no consumo energético e estratégias para redução deste consumo, no período de 2000 a 2017, predominantemente. Foram utilizadas as seguintes palavras chaves:

Na língua inglesa: membrane bioreactor (MBR), membrane fouling, aeration, fouling mitigation, hydrodynamics, energy consumption, cost & energy, dairy wastewater.

Na língua portuguesa: biorreator com membranas (MBR), incrustação na membrana, aeração, mitigação da incrustação, hidrodinâmica, consumo de energia, custo e energia, água residuária de laticínios.

O detalhamento dos métodos se encontra no capítulo 3.

1.1 Descrição geral dos reatores biológicos com membranas

A tecnologia de biorreator com membranas (MBR) combina o tratamento biológico com o processo de filtração de membrana, substituindo a unidade de sedimentação gravacional dos sistemas clássicos de lodo ativado (LAC), conforme Figura 1. [2]

Nestes sistemas, módulos de microfiltração ou ultrafiltração funcionam como uma barreira, retendo a biomassa, permitindo o controle do tempo de retenção da biomassa de forma completamente independente do tempo de detenção hidráulica. [3]

LAC
→ Afluente

Tanque de equalização

Tanque de aeração Clarificador secundário Tanque de efluente

Tanque de equalização (tanque de membrana)

Efluente

Lodo ativado

Clarificador secundário Tanque de efluente

Lodo ativado

Figura 1 – Comparação entre o esquema de tratamento com LAC e com MBR

Fonte: Adaptado do site da Kubota [11].

A tecnologia está cada vez mais favorecida para aplicações de tratamento de águas residuárias em que é necessária uma alta qualidade do efluente tratado, em particular para sua reutilização e onde o espaço é limitado. [6]

Várias vantagens têm sido destacadas na comparação dos MBRs com os LAC, como: a elevada qualidade do efluente tratado decorrente da viabilidade de manutenção de elevada concentração de sólidos suspensos no biorreator, baixa relação nutriente microrganismos, reduzidos tempo de residência e baixa produção de lodo, resultando em unidades mais compactas do que as de LAC. [4] No entanto, os custos operacionais (OPEX) ainda são uma das principais limitações que afetam a viabilidade desta tecnologia, principalmente devido à aeração da membrana, perda de permeabilidade e reposição de membranas. [5] [1]

As Tabelas 1 e 2 apresentam uma comparação entre os parâmetros típicos de sistemas clássicos de lodos ativados e biorreator com membrana (MBR) para efluente de refinaria [12]. O alto valor de sólidos suspensos totais (SST) apresentado para o processo de MBR vem sendo substituído por valores na faixa de 8 a 12 g L⁻¹ em virtude do alto dimensionamento de areação (para transferência de oxigênio) e das incrustações nas membranas. [13]

Tabela 1 – Parâmetros de processo de reatores biológicos

Parâmetro	Lodos ativados	MBR
Sólidos suspensos (g.L ⁻¹)	2 - 5	15 - 20
empo de retenção hidráulico (h)	4 - 8	2 – 5
Idade do lodo (dias)	4 - 15	30 - 60

Fonte: TORRES e SANTIAGO, 2006 apud FLORIDO, 2011.

Tabela 2 – Eficiência de remoção dos processos biológicos

Parâmetro	Lodos ativados	MBR
Demanda Química de Oxigênio - DQO (mg.L-1)	85 – 90%	90 – 98%
Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO₅ (mg.L-¹)	85 – 95%	> 97%
Sólidos suspensos (g.L-1)	85 – 95%	> 99%
Bactérias	60 – 90%	99,9999%

Fonte: TORRES e SANTIAGO, 2006 apud FLORIDO, 2011.

O item 1.6, algumas comparações entre MBR e os reatores biológicos de lodo ativado clássico (LAC), irá tratar com mais detalhes estes parâmetros das duas tecnologias.

1.1.1 Histórico

A primeira geração de sistemas MBR utilizados na década de 1980 baseou-se principalmente na configuração do *sidestream*, na qual a membrana está localizada fora do biorreator e a biomassa é circulada a alta velocidade de fluxo transversal (geralmente em torno de 2-4 m/s). Embora apresentando alto fluxo de permeado e relativa facilidade na adaptação aos processos existentes, esses sistemas raramente foram desenvolvidos em grande escala principalmente devido ao alto consumo de energia da bomba de recirculação. A introdução da configuração de membrana submersa no MBR, em 1989, permitiu uma redução significativa dos custos de capital e de operação, resultando no desenvolvimento da segunda geração de MBRs. Com a membrana diretamente imersa dentro do biorreator, a leve pressão negativa imposta ao lado do permeado é responsável pela força motriz que permite que a água permeie a membrana. O uso de aeradores por baixo da membrana também foi implementado nesta nova configuração para limitar a incrustação de membrana (mais detalhes sobre a incrustação seguem). Neste novo contexto, a simplificação resultante do sistema geral de tratamento estimulou o desenvolvimento da tecnologia MBR em todo o mundo. [14]

Smith e colaboradores foram os primeiros a descrever, em 1969, o uso de membranas de ultrafiltração substituindo os sedimentadores secundários no processo de tratamento de esgotos por lodos ativados. A primeira aplicação de reatores biológicos aeróbios associados a módulos de membrana em escala comercial ocorreu na América do Norte, no final dos anos 70, e depois no Japão, no início dos anos 80. [3] Até meados dos anos 90, a tecnologia do tratamento de esgotos por processos biológicos aeróbios associados a membranas ainda não havia sido introduzida na Europa. [15]

Nos últimos anos houve uma grande evolução não só no número de estações que utilizam MBR, como também na capacidade destas estações. [3]

O avanço da tecnologia MBR ocorreu em 1989 para submergir membranas no biorreator. [16] O menor custo de funcionamento obtido com a configuração submersa, juntamente com a constante diminuição do custo da membrana estimulou o desenvolvimento significativo da tecnologia MBR. Até à data, muitos progressos foram alcançados na pesquisa e aplicações práticas de sistemas MBR. Em conjunto com esse progresso, o campo de aplicação se ampliou do tratamento de águas residuárias municipais e algumas áreas especiais para o setor de tratamento de águas residuárias industriais. [17]

Nos casos em que são tratados fluxos de resíduos industriais complexos de alta resistência e problemas de sedimentação e clarificação são encontrados regularmente, sistemas MBR podem tornar-se uma opção atrativa. [17]

1.1.2 Mercado

A confiança no processo parece aumentar à medida que o número e o tamanho das instalações de referência crescem mundialmente, com cerca de 40 estações de tratamento de efluentes municipais com mais de 100 megalitros/dia (MLD) em capacidade (expressa como vazão diária máxima ou PDF – *peak daily flow*) agora instalado e um total de global de capacidade instalada provavelmente excedendo 15.000 MLD. Atualmente existem instalações de tratamento de efluentes industriais de mais de 50 MLD. [6]

Todas as regiões geográficas parecem estar experimentando uma taxa de expansão comparativamente elevada (expressa como taxa de crescimento anual composta, *compound anual growth rate* - CAGR) do mercado MBR, com referência ao PIB do país em que a tecnologia está sendo instalada. Atualmente, os MBRs são implementados em mais de 200 países e as taxas de crescimento do mercado global de até 15% são relatadas regularmente em várias análises de mercado, embora as variações regionais sejam significativas. O valor total de mercado da tecnologia MBR deverá chegar a quase US\$ 3 bilhões até 2019, com valor em torno de US \$ 1,2 bilhões em 2016. [6]

A tecnologia MBR já é aplicada para o tratamento de vários tipos de efluentes, como esgotos domésticos, chorume, efluentes de cervejaria, de laticínios, da indústria farmacêutica, de navios e de plantas de refino de petróleo. [3]

A taxa de crescimento anual dos MBRs nas marcas globais foi avaliada em cerca de 15% por uma série de relatórios de pesquisa. Além da ampla aplicação na China, plantas de MBR de grande escala também são adotadas nos Estados Unidos e União da Europa, conforme indicado na Figura 2 (dados de http://www.thembrsite.com/) que mostra a evolução da capacidade de plantas de MBR ao longo do mundo. Além disso, observa-se que a capacidade de tratamento da maioria das plantas MBR construídas antes de 2010 era menor do que 0,1 milhão de m³ d⁻¹. [18]

No entanto, as plantas MBR muito maiores estão sendo construídas no mundo desde 2010. Duas plantas MBR com capacidade de tratamento superior a 0,2 milhões de m³ d⁻¹ foram construídas na China em 2015. E, duas grandes plantas MBR (0,33 e 0,25 milhões de m³ d⁻¹) estão em construção no estado de Ohio, EUA. Até agora, a maior plataforma de construção a ser construída está localizada em Estocolmo, na Suécia. A capacidade de tratamento projetada deste MBR é aproximadamente 0,86 milhões de m³d⁻¹. O aumento do mercado global e a adoção de plantas MBR muito maiores também corroboram que a tecnologia MBR se torne cada vez mais sofisticada. Deve-se mencionar que a maioria desses MBR em larga escala foi aplicada para tratamento de águas residuárias municipais, considerando que os MBR utilizados para o tratamento de águas residuárias industriais são de pequena escala. [18]

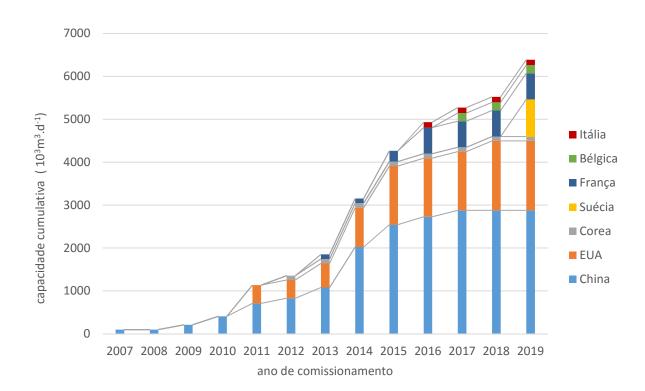


Figura 2 – Evolução de capacidade de plantas de MBR ao longo do mundo (escala maior que 100.000 m³/d)

Fonte: Adaptado de MENG, F. et al., 2017. [18]

1.2 Tipos de membranas utilizadas nos MBR

Para a tecnologia MBR existe basicamente dois tipos de material de membranas a polimérica e a cerâmica. [7]

Na prática, entretanto, o mercado é dominado por membranas preparadas a partir de materiais poliméricos orgânicos. Os polímeros mais utilizados são acetato de celulose, polisulfona, polietersulfona, polieterimida, poliálcoolvinílico, poliuretana, entre outros Membranas fabricadas com material inorgânico, no caso a cerâmicaa (de de óxidos de zircônio, alumínio ou titânio) apesar de apresentarem maiores resistências mecânica, térmica e química e vida útil mais longa, são mais caras, restringindo sua aplicação a soluções agressivas (pH muito baixo ou muito alto) ou quando a solução problema se encontra em temperatura elevada.

Embora, em princípio, qualquer polímero possa ser usado para formar uma membrana, apenas um número de materiais é adequado para o papel de separação por membranas, sendo os mais comuns: [7]

- difluoreto de polivinilideno (PVDF)
- polietilsulfona (PES)
- polietileno (PE)
- polipropileno (PP)

Quanto a aspectos geométricos as membranas voltadas para a tecnologia MBR se apresentam na geometria plana ou cilíndrica, conforme a seguir: [7]

- Placa plana flat sheet FS
- Fibra oca *hollow fibre* HF
- Multi tubular MT

Para serem utilizadas industrialmente, as membranas são acomodadas em módulos. Os módulos são estruturas com membranas capazes de suportar a pressão aplicada sobre o sistema. Estas estruturas devem apresentar canais para alimentação do módulo e para a remoção do concentrado e do permeado. [3]

Idealmente, a membrana deve ser projetada de modo a ter: [7]

- a) uma alta razão área da membrana por volume do módulo;
- b) um alto grau de turbulência para a promoção da transferência de massa no lado da alimentação;
- c) um baixo gasto de energia por unidade de volume de água do produto;
- d) um baixo custo por unidade de área da membrana;
- e) um desenho que facilite a limpeza;
- f) um design que permite a modularização.

A gama de materiais de membrana utilizados comercialmente para as tecnologias MBR é bastante limitada, e os tamanhos de poros avaliados geralmente estão na faixa entre 0,03 e 0,4 µm. Cerca de metade das membranas MBR poliméricas (25 dos 51 produtos para os quais a informação é fornecida) são baseados em difluoreto de polivinilideno ou PVDF; a maioria dos

outros são poliolefinas (polipropileno, PP ou polietileno, PE) ou polietilsulfona (PES). Há também um número cada vez maior de produtos cerâmicos, com membranas cerâmicas FS representando a inovação mais recente (quatro produtos introduzidos desde 2010). Embora existam muitos produtos de módulos de membrana, um número de membranas têm as mesmas especificações que sugerem que o número de fornecedores de materiais de membrana pode ser limitado. Por exemplo, as membranas PES 7-8 imersas são oferecidas exclusivamente como FS e são todas com 0.03 μm (ou 150 kDa). As duas membranas PE FS reconhecíveis tem 0,4 μm de tamanho de poro e são hidrofilizadas. Além disso, a natureza do material pode limitar o tamanho de poro viável de alguns materiais: os cinco produtos de membrana PE são quase todos oferecidos com tamanhos de poro de 0,2 a 0,4 μm, assim como as membranas de PTFE. Como oposição a isso, a versatilidade dos respectivos processos de fabricação das membranas de PVDF e cerâmicas mostram que estas são oferecidas em uma ampla gama de tamanhos de poros. [6]

Em função da composição da solução problema a ser filtrada, se desenvolveram os processos com membranas de microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose inversa (OI). Nestes processos, a força motriz é o gradiente de pressão e estes podem ser considerados como uma extensão dos processos de filtração clássica. O que os diferencia é o tamanho do poro e a pressão necessária para operação. Na microfiltração, o sistema de filtração costuma ser operado sob diferença de pressão de operação de 0,2 a 2,0 bar. Os sistemas com membranas de UF são operados com pressão variando de 2,0 a 7,0 bar, os com membranas de NF com pressão entre 7,0 e 20,0 bares, enquanto que, para a osmose inversa, pressões da ordem de 20,0 a 80,0 bar são necessárias. Quanto ao tamanho de poro, as membranas de MF apresentam poros de 0,1 a 2,0 μm, enquanto a membrana de OI pode ser considerada densa, ou seja, não apresentando poros discretos. Na Figura 3 é apresentada a faixa de tamanho de poros dessas membranas comparando-as com dimensões médias de espécies normalmente existentes em esgotos sanitários ou efluentes industriais. [3]

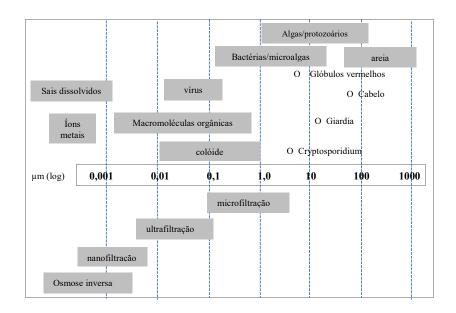


Figura 3 – Diâmetro médio dos poros de membranas de MF, UF, NF e OI

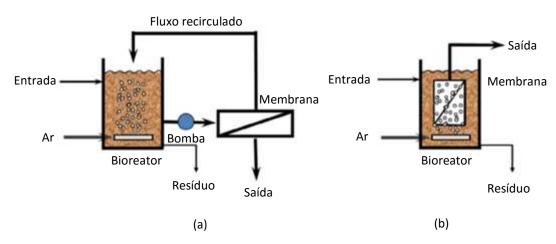
Fonte: Adaptado de VIANA, P.Z., 2004. [3]

Muitos fornecedores de membranas desenvolveram produtos de filtração especificamente projetados para aplicações MBR. As membranas microporosas hidrofílicas poliméricas de baixo custo usadas na configuração submersa são geralmente propostas com o seu tamanho de poro variando de 0,02 a 0,5 μm. Enquanto os MBR de poros grandes dependem da formação de uma camada de incrustação para produzir alta qualidade de produto, as retenções intrínsecas de sistemas baseados em UF não são dependentes do tempo de filtração e apresentam bons desempenhos desde o início da filtração. Em geral, os MBRs são operados com um fluxo de permeado variando entre 10 e 25 L/m² h, resultando em uma pressão transmembrana (TMP) de geralmente menos de metade de um bar. [14]

1.3 Configurações dos reatores MBR: iMBR (Imersa) e sMBR (Lateral)

A configuração tratada neste item é a forma como a membrana está integrada ao reator biológico. Neste contexto, existem duas principais configurações: Sistema MBR com membrana externa (sMBR) – *sidestream* – e Sistema MBR com membrana submersa/imersa no mesmo tanque do reator biológico (iMBR) - *submerged or immersed*, conforme ilustrada nas Figura 4a e Figura 4b. [7]

Figura 4 – Configuração com módulo de membrana externa (*sidestream*) e submersa (*immersed*) ao tanque de aeração



Legenda: (a) Fluxo lateral (externo); (b) MBR imersa (interno)

Fonte: JUDD, S., 2016. [6]

Entre os três tipos de biorreatores existentes, os quais se apresentam por: biorreator à membrana por fracionamento, de transferência de gás e extrativa, neste estudo se avaliará o biorreator à membrana por fracionamento no qual a seletividade é essencialmente para garantir a retenção compostos de alta massa molar e retenção de microrganismos. Normalmente, o biorreator por fracionamento é o escolhido para tratamento de efluentes. Assim, estas configurações são configurações de biorreator à membrana por fracionamento. [13]

No primeiro caso as membranas são instaladas externamente ao tanque de aeração e recebem o lodo ativado do tanque de aeração por bombeamento enquanto na segunda configuração, as membranas estão imersas no tanque de aeração e sujeitas a um vácuo, permitindo que o permeado seja retirado por sucção do interior do reator. [19]

Os iMBR geralmente consomem menos energia do que os sMBRs pois estes incorrem em uma penalidade de energia devido às altas pressões e fluxos volumétricos impostos. O surgimento desta configuração em 1989 levou ao avanço da tecnologia MBR para submergir membranas no biorreator. [16] O menor custo de operação obtido com a configuração submersa, juntamente com a constante diminuição do custo da membrana estimulou o desenvolvimento significativo da tecnologia MBR. [7]

Estes sistemas podem apresentar duas configurações distintas: a instalação das membranas imersas diretamente no tanque de processo do biorreator ou em tanque de membranas externo ao biorreator. [7]

Para membranas submersa, o fluxo de bolhas de ar é fornecido pelo sistema de aeração na base do módulo de membranas com as seguintes funções: manutenção da limpeza na

superfície das membranas, fornecimento de oxigênio para a comunidade microbiana e manutenção da biomassa em suspensão no interior do reator. O fluxo de bolhas ascendentes move-se no sentido axial em relação às membranas (fibras ocas ou placa plana), promovendo turbulência para minimizar o depósito na superfície da membrana, gerando o efeito de fluxo cruzado. A filtração em fluxo cruzado nos MBRs com membranas submersas ocorre devido à ascensão das bolhas formarem um fluxo tangencial à superfície da membrana enquanto que a filtração ocorre perpendicularmente a essa direção de escoamento. [13]

Nos MBRs com membranas submersas, a operação é feita em fluxo cruzado, ou seja, a permeação ocorre perpendicularmente à direção do escoamento do fluido no reator dando origem a duas correntes: o permeado, que é a fração do líquido que permeou a membrana e o concentrado, que permanece no tanque de processo. [13]

Enquanto os sMBR possuem como desvantagem o maior consumo de energia que a configuração imersa por outro lado, elas oferecem uma série de vantagens conforme a seguir:

As membranas podem ser facilmente limpas quimicamente in sito.

A incrustação demonstrou diminuir linearmente com o aumento do CFV (vazão de circulação pela área transversal do módulo). Por exemplo, um estudo em escala de bancada revelou que os valores de CFV de 2 e 3 m/s foram suficientes para prevenir a formação de incrustação reversível e que a incrustação foi suprimida para valores de CFV de até 4,5 m/s. [20]

Custos de manutenção/instalação e tempo de inatividade, especificamente com referência à substituição do módulo da membrana, geralmente são ligeiramente menores por causa da acessibilidade dos módulos, que permitem ser substituídos em aproximadamente 5 min.

A aeração pode ser otimizada por mistura e transferência de oxigênio, preferencialmente no tanque de aeração, em vez do exigente compromisso entre a aeração da membrana e a dissolução do oxigênio, como seria o caso para iMBRs de um tanque.

Permite maior flexibilidade Operacional e maior proteção da membrana, uma vez que variação de qualidade do afluente será absorvida pelo biorreator. [4]

Permite operar o biorreator com concentração de biomassa bem inferior ao tanque de membranas, o que faz reduzir o consumo de energia pelo aumento da eficiência de transferência de oxigênio. [4]

1.4 Parâmetros operacionais dos MBR

1.4.1 Parâmetros relativos à biodegradação

Os processos de biodegradação que acontecem nos reatores biológicos são representados pelos seguintes parâmetros operacionais e de dimensionamento do tanque de aeração: relação alimento/microrganismo (A/M), tempo de retenção hidráulica, tempo médio de retenção de sólidos e sedimentalidade do lodo. [21] Estes parâmetros operacionais estão apresentados detalhadamente no item Processo LAC desta dissertação (aqui serão tratados os parâmetros relativos às membranas): descrição sucinta e parâmetros operacionais.

1.4.2 Parâmetros relativos às membranas

Os parâmetros que devem ser monitorados em tecnologias com membranas são: [22]

• Fluxo de Permeado - definido como vazão de permeado através da área superficial da membrana. Normalmente expresso em LMH conforme Equação 1:

$$Fluxo = \frac{\text{vazão de permeado (L.}h^{-1})}{\text{área superficial da membrana (m}^2)} = \text{L.}h^{-1}\text{m}^{-2} \text{ expresso em LMH} \quad \text{Equação (1)}$$

Este parâmetro se relaciona com a formação de incrustação (*fouling*) e tende a diminuir com o tempo. [19]

• Pressão Transmembrana (TMP) é a pressão requerida para se alcançar um fluxo específico. É normalmente expressa em bar.

TMP é a diferença entre a pressão da alimentação e a pressão do permeado.

• **Permeabilidade da membrana** - é a relação entre o fluxo e a TMP, sendo expresso como LMH bar⁻¹ conforme equação 2:

$$Permeabilidade = \frac{fluxo}{TMP} = [LMH.bar^{-1}]$$
 Equação (2)

Demanda Específica de Aeração – é a vazão de ar por área de membrana (SAD_m) ou por vazão de permeado (SAD_p) , conforme Equações 3 e 4:

$$SADm = \frac{\text{vazão de ar } (m^3 \ h^{-1})}{\text{superficie da membrana } (m^2)}$$
 Equação (3)

$$SADp = \frac{\text{vazão de ar } m^3 \ h^{-1}}{\text{vazão de permeado } (m^3 \ h^{-1})}$$
 Equação (4)

1.5 Limitações dos MBR: incrustações (fouling) e alto consumo de energia

1.5.1 Incrustações (fouling)

A principal desvantagem da tecnologia MBR em comparação com a LAC ainda é seu alto custo operacional. Mesmo com os custos das membranas tendo sido bastante reduzido nos ultimos anos o que levou a redução do custo de capital, o alto consumo de energia para mitigação da incrustação nas membranas tem se tornado a principal contribuição para os custos operacionais globais do tratamento de águas residuárias com MBR. [10]

A incrustação nos sistemas MBR resulta da interação entre a membrana e a complexa suspensão biológica (licor misto). Os três principais mecanismos responsáveis pela incrustação da suspensão biológica são: (a) estreitamento dos poros causada pela sorção de substâncias solúveis e micro coloidais com dimensão muito menor do que a dimensão do poro da membrana, (b) obstrução dos poros pela deposição de partículas com uma dimensão semelhante à dos poros da membrana e (c) formação de uma camada de bolo na superfície da membrana causada pela deposição de substâncias na superfície da membrana. [23]

Os tipos de constituintes que ocorrem para as incrustações são: biofilmes incluindo substâncias poliméricas extracelulares (EPS), orgânicos solúveis, partículas, colóides, compostos inorgânicos dissolvidos. [24]

A performance hidráulica do MBR em função do tempo de filtração tem sido amplamente estudada e o mecanismo de incrustação envolve um processo em 3 estágios: [25] inicialmente ocorre incrustação na membrana por adsorção e fechamento do poro (TMP cresce

rápido por um curto período), seguido por um período de baixa subida de TMP (TMP cresce linearmente – a incrustação ocorre lentamente) que é denominado sustentável e por fim, um período no qual ocorre um salto na TMP (incrustação ocorre rapidamente), conforme Figura 5.

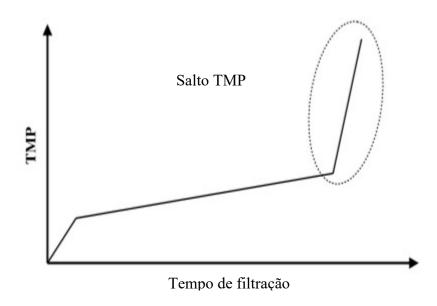


Figura 5 - Ilustração esquemática da ocorrencia de salto na TMP

Fonte: Adaptado de MENG, F. et al., 2009. [24]

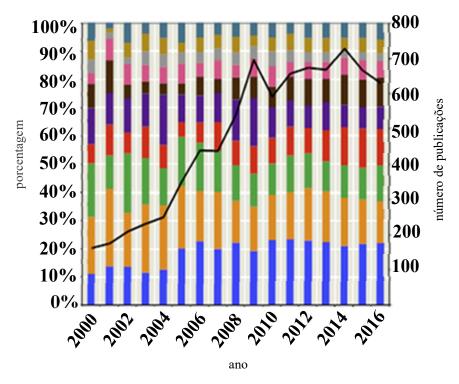
Embora os MBRs sejam atualmente uma tecnologia madura, a incrustação na membrana continua a ser o problema operacional mais importante, dificultando sua aplicação universal e ampla. A incrustação de membrana reduz a produtividade do MBR, aumenta a demanda de energia devido ao consumo de ar para membrana e requer uma limpeza freqüente da membrana para restaurar sua permeabilidade; esta última reduz o tempo de vida da membrana e resulta em maiores custos de substituição da membrana. Assim, uma imensa quantidade de literatura tem sido dedicada à incrustação de membrana, tentando mostrar os mecanismos responsáveis pela sua formação e apurar maneiras de mitigar esta problemática para tornar a tecnologia ainda mais atrativa. [23]

A perda da permeabilidade pela incrustação da membrana resulta em superfícies de membrana requeridas muito maiores, pressões aplicadas mais altas ou velocidades de fluxo cruzado/taxas de cisalhamento que resultam em maior gasto de energia ou limpezas químicas freqüentes das membranas contaminadas com as incrustações. As principais consequências da Incrustação são: [10]

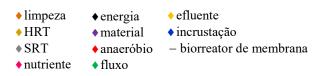
- Diminuição da capacidade de tratamento do sistema com consequente redução da produção de permeado devido à:
 - Interrupções na filtração durante as Operações de relaxamento e contralavagem para remover a camada de depósito;
 - limpeza freqüente das membranas (limpeza de manutenção aproximadamente a cada 2-7 d e de limpezas principais uma ou duas vezes por ano). Isso também leva para os riscos ambientais por conta da formação de produtos químicos indesejávies tipo halogênios orgânicos. [7] [26]
- Redução da vida útil dos módulos de membrana devido à limpeza química prejudicial, ineficiente ou tardia resultando em maior custo de substituição.
- Alta necessidade de energia para aeração: com até 70% do total dos custos de energia [7], a aeração da membrana é a maior contribuição para os custos operacionais. Foi observado em uma campanha de 10 anos de operação que em uma planta de MBR de escala completa, apenas em 10% deste tempo, isto é, durante os picos de cargas máximas, a energia fornecida foi otimizada. Isto mostra o grande potencial de otimização energética nestes sistemas.

Para enfatizar a importância do tema incrustação na tecnologia MBR, uma pesquisa na base de publicações SCOPUS foi realizada mostrando o numero de publicações realizadas relacionadas para MBR no campo de tratamento de águas residuárias e o percentual das palavras chaves encontradas nestas publicações, conforme mostrado na Figura 6. [18] Como pode ser visto nesta Figura 6, em MBR a palavra chave "incrustação" foi a que prevaleceu representando 22% de um total de publicações (600-700) no período entre 2010-2015.

Figura 6 - Tendências de pesquisa em biorreatores com membranas com base no número de publicações em cada área de assunto chave na base de dados Scopus



Legenda:



Fonte: Adaptado de MENG, F. et al., 2017. [18]

A incrustação em MBRs pode ser classificada em diferentes categorias, conforme a seguir: [10]

- Incrustação removível a que pode ser removida por meios físicos, como relaxamento e fluxo cruzado;
- Incrustação irremovível a que só pode ser removida por limpeza química e,
- Incrustação Irrecuperável Não pode ser removida por nenhuma limpeza.

Durante o funcionamento a longo prazo de um MBR de escala completa típica podem ser observadas duas taxas de incrustação distintas. Identificação de substâncias que promovem incrustações (*foulants*):

A biomassa MBR consiste em quantidades variáveis de partículas, frações dissolvidas e coloidais todas com potencial foulants. Depois de inicialmente a MLSS ter sido pensado governar a taxa de incrustação, o foco rapidamente se voltou para substâncias viscosas e pegajosas que podem estar ligadas aos flocos ou suspensas livremente.

Estes grupos de compostos são produzidos e excretados pelos microrganismos e são em sua maioria denominados de substâncias poliméricas extracelulares (EPS) quando são ligadas aos flocos, ou produtos microbiológicos solúveis (SMP) quando livremente suspensos no sobrenadante.

Estes componentes são como promotores de incrustação e incluem os compostos inorgânicos dissolvidos quando é citado que os ingredientes (foulants) que ocorrem para as incrustações são: biofilmes incluindo substâncias poliméricas extracelulares (EPS), orgânicos solúveis, partículas, colóides e compostos inorgânicos dissolvidos. [24]

Embora a incrustação de membrana em MBRs seja principalmente governada por incrustação orgânica, biofouling e formação de biofilmes, a incrustação inorgânica também foi observada em MBRs. É possível evitar ou limitar a incrustação inorgânica por pré-tratamento da água de alimentação. A limpeza química também pode ser aplicada para remover a incrustação inorgânica. [27]

A representação simplificada de EPS e SMP é apresentada conforme a Figura 7: [7]

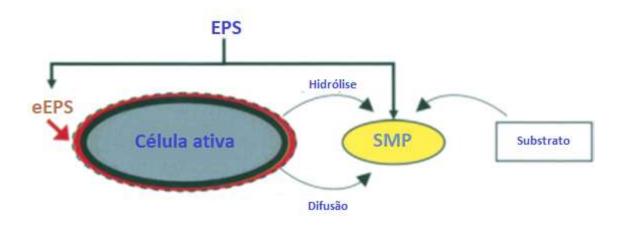


Figura 7 - Representação simplificada de EPS e SMP

Fonte: Adaptado de JUDD, S., 2006, p. 78. [7]

EPS e SMP são constituídos de polissacarídeos (PS), proteínas, lipídios, ácidos nucleicos etc., normalmente PS e proteínas são consideradas as principais frações que contribuem para a incrustação, desse modo a determinação da concentração de EPS ou SMP

dependerá quase que totalmente das medições de PS e proteínas e dos métodos utilizados nestas medições. Estes métodos têm sido exaustivamente descritos e discutidos na literatura e a padronização dos mesmos constitui um ponto chave para permitir comparação entre os resultados das pesquisas. [10]

A incrustação embora inevitável, pode ser controlada até certo ponto. O controle e mitigação da incrustação de membrana é essencial em MBR, a fim de garantir uma operação econômica e de longo prazo. As principais estratégias que são aplicadas para controle de incrustação e obstrução em MBR em escala completa incluem: [7]

- Aplicação de pré-tratamento apropriado às águas residuárias de alimentação;
- Utilização de protocolos de limpeza física (contralavagem com permeado/ relaxamento)
 ou química apropriados e contralavagem quimicamente aprimorado;
- Redução de fluxo;
- Aumento da aeração para prover bolhas grossas e,
- Modificação química ou bioquímica do licor misto

Estas estratégias são objeto de muitas pesquisas já publicadas sobre MBR, como publicações sobre aditivos que podem ser inseridos na biomassa para modificar as características dos licores mistos, favorecendo o processo de filtração e reduzindo a incrustação. Tais substâncias podem ser coagulantes, polieletrólitos, agentes de adsorção e intensificadores de desempenho de membrana. [23] A estratégia sobre o aumento da aeração para prover bolhas grossas, será revisitada no capítulo 2.

Os parâmetros que afetam a incrustação das membranas nos sistemas MBRs podem ser agrupados nas seguintes categorias principais: (a) as características das membranas, (b) as propriedades do licor misto, (c) as condições de operação e (d) as características da água residuária a ser tratada. [23]

As inter-relações entre os parâmetros de MBR e a incrustação, é apresentada na Figura 8, denotando que os fenômenos que ocorrem nas membranas devem ser avaliados integrados com as características das cargas, com as características da biomassa do processo biológico, com as condições de operação e características das membranas.

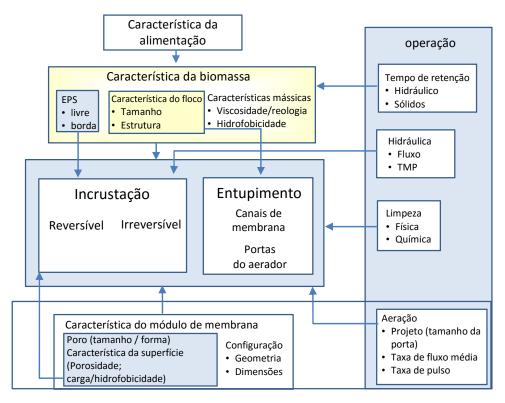


Figura 8 – Inter-relações entre parâmetros MBR e incrustação

Fonte: Adaptado de JUDD, S., 2006, p. 64. [7]

1.5.2 Alto Consumo de Energia

Embora a tecnologia de biorreator com membrana (MBR) já tenha sido apontada como estabelecida tendo em vista o grande número de plantas implantadas no mundo tratando efluentes municipais e industriais, ainda assim, a incrustação na língua inglesa *fouling*, e o consumo de energia, continuam sendo sérios desafios e impedimentos na propagação maior da tecnologia MBR, acarretando em consideráveis esforços de pesquisa e desenvolvimento em aspectos relacionados à redução de energia, controle de incrustação e novas configurações para melhorar desempenho do processo. [23]

As questões de energia MBR tem atraído a atenção de pesquisadores, profissionais e fornecedores de MBR acarretando em uma série de estudos sobre consumo de energia e eficiência dos MBRs envolvendo testes em plantas pilotos, em grande escala e auditorias de energia. Isso, por sua vez, tem resultado em várias soluções de economia de energia, estratégias de otimização e novos produtos comerciais. Nestes estudos muitos autores investigaram a

importância da utilização da capacidade hidráulica da membrana e operação em condições de fluxo óptimas, isto é, carga hidráulica próxima a vazão de projeto, para operação eficiente em energia de MBRs uma vez que a operação abaixo das condições de fluxo óptimas está associada à penalidade de energia. Muitas outras estratégias foram adotadas para otimização de energia e serão objeto do capítulo 2 desta dissertação.

A demanda de energia e problemas de custos relacionados, juntamente com problemas de incrustação de membrana, tornam-se um ponto de foco essencial no design e operação de MBR em escala total. De acordo com os dados recentemente relatados de MBRs municipais de grande escala, o consumo anual médio de energia varia entre: 0,8-2,4 kW h/m³ na França [28], 0,8-3,0 kW h/m³ no Japão [29], 0,4-0,6 kW h/m³ na China [30], 0,4-2,1 kW h/m³ em Espanha [2], 0,8-1,1 kW h/m³ nos Países Baixos [31] e 0,7-1,8 kW h/m³ na Alemanha [32]. Desenvolvimentos recentes na redução de energia MBR concentrou-se na configuração do módulo, estratégias de aeração, sistemas de controle e métodos de limpeza de membrana de baixa energia.

Nos casos de águas residuárias urbanas de baixa resistência, os custos de investimento anualizados dos MBR ainda são aproximadamente 50% maiores do que os de um CAS. Isto é devido ao custo de instalar, manter e substituir as membranas, a necessidade de um prétratamento mais extenso, maior grau de automação e maiores necessidades energéticas

A redução do consumo de energia dos MBRs é altamente importante para sua implementação mais ampla. A seleção de equipamentos adequados, juntamente com a implementação de controle rigoroso de aeração com base no monitoramento on-line de vários parâmetros do processo, pode contribuir para reduzir os requisitos energéticos específicos

1.5.3 Dependência de vazão

Em sistemas pequenos e descentralizados, os MBR sofrem de "down-scale" abordagem de design de MBRs grandes resultando em requisitos de energia específicos elevados (muitas vezes superiores a 3 kW h/m³). A viabilidade das plantas MBR na faixa de 50-2000 PE é restrita, principalmente devido à altos requisitos energéticos específicos. [33]

Por outro lado a operação em condições de vazões ótimas, isto é, próximo a vazão de projeto em condições de clima seco (DWF), resulta em baixo consumo de energia específico de cerca de 0,7-0,8 kW h/m³ conforme Figura 9 e na redução do consumo de energia,

dependendo da planta, entre 5 e 20 %, em comparação com o consumo médio de energia. Isto é devido ao fato de que as taxas de aeração da membrana requeridas não são proporcionais aos volumes de vazão tratados. Esta redução do consumo de energia também é parcialmente explicada pela operação do equipamento de processo, bombas e sopradores, em ou perto de seus melhores pontos eficientes quando a vazão aumenta. Contrariamente, a operação sub-ótima abaixo da vazão de projeto leva a valores de consumo de energia específicos mais altos. [31]

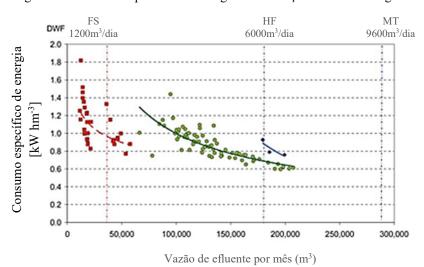


Figura 9 - Consumo específico de energia como função da vazão de água tratada

Legenda: • fibra oca; • placa plana (FS); • Tubular (MT); DWF- vazão de projeto Fonte: Adaptado de Krzeminski, P., Van Der Graaf, J. H.J.M., Van Lier, J.B., 2012. [31]

1.5.4 Comparação do consumo de energia em sistemas LAC /CAS e MBR

Devido às intensas taxas de aeração necessárias para gerenciar a incrustação e o entupimento da membrana, o consumo de energia MBR já foi três vezes maior mesmo quando comparado com os sistemas LAC/CAS combinados com técnicas avançadas de tratamento. No entanto, a diferença foi significativamente reduzida nos últimos anos. Hoje em dia, o requerimento de energia MBR é comparável ao LAC/CAS com tratamento terciário [5], ainda assim 10-30 % maior. É preciso observar, no entanto, que uma comparação equitativa/ justa dos sistemas MBR com sistemas LAC só é possível quando a qualidade do efluente produzido é a mesma. [31]

A demanda de energia no LAC, expressa por volume de água tratada , foi relatada ter o valor de 0,5 kW h/m³. [7] Um resumo com requerimentos de energia para várias MBRs municipais é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Consumo de energia de várias instalações de MBR municipais

Instalação	Tipo de	Capacidade	Vazão	Vazão	Início da	Período	Consumo de
	membrana	(P.E.)	climático seco	climático da	operação	de análise	energia (kW h m ⁻³)
			$(m^3 d^{-1})$	chuva (m³ d ⁻¹)			
Schwagalp (DE)	FS/Hubert	780	100	156	2003	N.A.	1,40
Park Place (US)	HF/Mencor	N.A.	610	890	2003	N.A.	1,10
METU Ankara (TR)	FS/Hubert	2.000	144	N.A.	2005	N.A.	$1,0-2,0 \ (\cong 1,4)$
Grasse Roumiguières (FR)	HF/Zenon	24.000	6.250	N.A.	2007	N.A.	0,47-2,2
Glessen (DE)	HF/Zenon	9.000	2.000	6.500	2008	N.A.	0,90
Rodingen (DE)	HF/Zenon	3.000	300	3.200	1999	2001	2,0-2,4
Markranstadt (DE)	HF/Zenon	12.000	2.700	4.320	2000	2001-2003	$0.8-1.5 \ (\cong 1.36)$
Knautnaumdorf (DE)	FS/Hubert	900	113	432	2002	2002-2003	1,3-2,0
Cauley Creek (US)	HF/Zenon	N.A.	9.464	18.930	2002	2003	1,59
Brescia-Verziano (IT)	HF/Zenon	46.000	12.000	42.500	2002	2003-2005	0,85
Monheim (DE)	HF/Zenon	9.700	1.820	6.900	2003	2003-2005	1,00
Viareggio (IT)	HF/Zenon	24.000	5.250	6.000	2005	2006	< 0,60
Nordkanal-Kaarst (DE)	HF/Zenon	80.000	16.000	45.000	2004	2004-2005	0,4-0,9 (≅ 0,9)
Seelscheid (DE)	FS/Kubota	11.500	8.544	11.000	2004	2004-2005	0,9-1,7 (≅ 1,5)
Pooler (US)	HF/Zenon	N.A	N.A	11.400	2004	2005	1,74
Schilde (BE)	HF/Zenon	10.000	5.520	8.500	2004	2005-2006	0,62-0,64
Fowler (US)	HF/Zenon	N.A	N.A	9.500	2004	2005-2007	4,23
Varsseveld (NL)	HF/Zenon	23.150	6.000	18.120	2005	2005-2009	0,75-1,0
Westbury (UK)	FS/Kubota	4.700	4.150	5.008	2002	2006-2007	1,98
Dundee (US)	FS/Kubota	N.A	2.990	5.700	2005	2006-2007	0,66-1,23
Heenvliet (NL)	FS/Toray	3.300	912	2.400	2006	2006-2009	0,7-1,2
Ulu Pandan (SG)	HF/Zenon	N.A.	23.000	23.000	2006	2007	0,54-0,55
Delphos (US)	FS/Kubota	50.000	5.700	45.500	2006	2007-2009	1,59-1,95
Healdsbrug (US)	HF/Memcor	N.A.	6.057	15.142	2004	2008-2009	1,82
LOTT (US)	HF/Memcor	N.A.	N.A.	7.600	2006	2008-2009	1,61
Bonita Springs (US)	HF/Zenon	N.A.	15.250	N.A.	2007	2008-2010	1,43
Running Springs (US)	FS/Kubota	5.000	2.300	4.500	2003	2009-2010	1,3-3,0 (≅ 0,7)
Sabadell-Riu Sec (ES)	FS/Kubota	200.000	35.000	62.880	2008	2010	0,8-1,0
Santa Paula (US)	HF/Koch	42.500	12.900	27.000	2010	2010	1,16

Legenda: HF – fibra oca; FS – placa plana; N.A – não disponível. Fonte: Adaptado de Krzeminski, P., Van Der Graaf, J. H.J.M., Van Lier, J.B., 2012.

Sobre avaliação de estratégias e custos operacionais de sistemas de grande escala de MBRs, o consumo de energia em MBRs foi relatado como sendo três vezes maior que o dos sistemas clássicos de lodo ativado combinado com o tratamento terciário avançado, mas a diferença foi significativamente reduzida pela otimização das configurações e controle do processo. A aeração é um importante consumidor de energia, muitas vezes excedendo 50% do consumo total de energia e a aeração das membranas representa um mínimo de 35% do consumo de energia. [2]

O consumo de ar para as membranas juntamente com a aeração de lodo ativado representam 60 a 80% do consumo de energia da etapa do tratamento biológico. [28]

Demais relatos evidenciaram o consumo de energia no range de 0,7 e 0,8 kW h/m³ [31] e de 0,5 e 0,7 kW h/m³ [28] de efluente tratado.

O sistema MBR normalmente apresenta custo operacional maior que o LAC, principalmente os custos relativos ao consumo de energia. Esta energia é em sua maioria consumida pela aeração tanto no reator biológico para a degradação dos poluentes quanto para mitigar a incrustação da membrana. [1] [5] [8] [9]

No processo MBR, o percentual da energia da aeração é de 70-80 % do consumo do total da energia consumida no tratamento de águas residuárias municipais, com 40-60% consumidos pela etapa biologica do processo. Assim, a otimização da aeração em MBRs é, portanto, de suma importância para redução do custo operacional e para o sucessivo aumento da competitividade da tecnologia MBR. [30] [9]

Foram apresentados dados de um tratamento de efluente municipal com a configuração da Figura 10 utilizando MBR imerso em um tanque de membrana com capacidade de 50000 m³/d instalado em Wuxi (operando a plena capacidade desde 2013) na província Jiangsu na China.

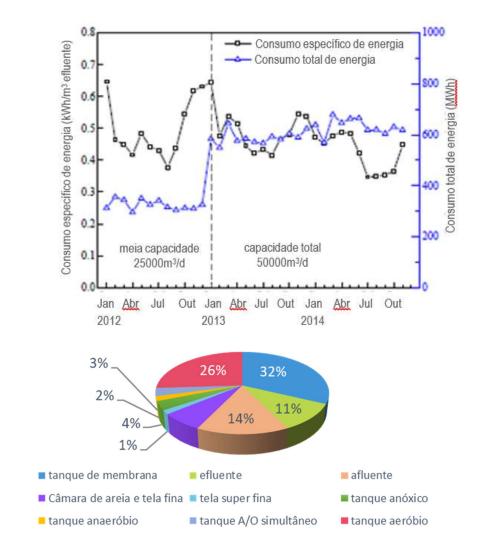
O consumo específico de energia desde 2013 variou entre 0,35-0,65 kW h/m³ de efluente (Figura 11). O valor médio de 0,47 kW h/m³ é inferior aos reportados para os MBR europeus (0,8-2,4 kW h/m³), mas ligeiramente superior aos valores de 0,39-0,43 anteriormente relatados para MBRs totalmente otimizados em Singapura e no Japão.

Figura 10 - Configuração da planta de MBR em Wuxi da província de Jiangsu na China



Fonte: Adaptado de SUN, J. et al., 2016. [9]

Figura 11 - Monitoramento de longo prazo do consumo de energia em escala completa de MBR e sua constituição



Fonte: Adaptado de SUN, J. et al., 2016. [9]

Em relação ao histórico sobre consumo energético em MBR, de 1960 a 1980, no inicio do processo MBR, o consumo energético era de 3 a 6 kW h/m³ de carga a ser tratada, impactando grandemente o sucesso comercial desta tecnologia. Mas em torno da virada do milênio com a introdução da membrana imersa e posterior otimização no consumo energetico da aeração, este valor caiu para em torno de 1 kW h/m³ e já é reportado consumo em torno de 0,5 kW h/m³ para unidades de carga elevada, que é comparável com a energia requerida em tratamentos convencionais de aguas residuárias. [34]

É muito difícil manter estes níveis, de consumo energético, devido às sazonalidades e cargas diferentes das condições ótimas nos MBRs. No capítulo 2, serão apresentadas as estratégias utilizadas para otimização da aeração que tem proporcionado reduções dos níveis energéticos nas plantas de MBR. [23]

1.6 Algumas comparações entre MBR e os reatores biológicos de lodo ativado clássico (LAC)

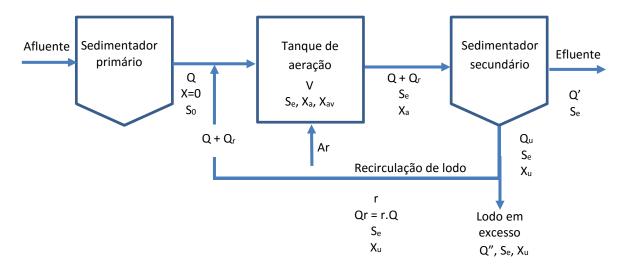
1.6.1 Processo LAC: descrição do processo e parâmetros operacionais

Inicialmente será apresentada uma revisão sobre a tecnologia de tratamento de efluentes pelo sistema de lodo ativado clássico (LAC) com seus equipamentos, modalidades do processo, condições e parâmetros operacionais. Em seguida, serão também revisados os principais fenômenos que ocorrem no processo de lodo ativado a saber: remoção e biodegradação da matéria orgânica, crescimento microbiano aeração e consumo de oxigênio com a influência da nitrificação e desnitrificação, transferência de oxigênio e por fim, são apresentados os microrganismos mostrando sua função no processo como agentes da biodegradação e sua importância como indicadores de tendências para vários parâmetros do processo, incluindo a sedimentação do lodo.

Lodo ativado é um processo biológico, aeróbio, de biomassa em suspensão no qual o efluente industrial ou esgoto sanitário (afluente) é misturado com microrganismos em tanques de aeração em condições específicas de temperatura, pH, teor de oxigênio dissolvido e nutrientes. Em seguida ocorre a biodegradação da matéria orgânica e os flocos biológicos são posteriormente separados nos tanques de sedimentação. O lodo ativado separado terá parte

retornando ao processo e parte sendo destinado ao tratamento específico. Nem todo lodo biológico gerado é recirculado, logo há uma produção de resíduos sólidos inerente do processo. [35] O efluente já tratado escoa para tratamento de polimento ou para descarte final. [36] [19] O esquema do processo de lodo ativado clássico é representado na Figura 12 a seguir:

Figura 12 – Esquema do Processo de Lodo Ativado Clássico



Legenda: Q – vazão afluente; X – concentração de SST efluente do sedimentador primário, desprezível; S_0 – concentração da DBO_5 afluente; Q_r – vazão de recirculação do lodo ativado; S_e – concentração da DBO_5 efluente (e no tanque de aeração), solúvel; X_a - Concentração de SST ou do lodo no tanque de aeração (SSTA), na literatura representado por MLSS (*mixed liquor suspended solids*); r – razão de recirculação = Q_r/Q ; X_u – concentração de SST no lodo recirculado; Q_u – vazão de retirada do lodo do sedimentador secundário = Q_r + Q"; Q" – vazão de efluente; Q" – vazão de excesso de lodo ativado; V – volume do tanque de aeração; X_{av} - Concentração de SSV no tanque de aeração (SSVTA).

Fonte: Adaptado de JORDÃO, P.E. & PESSÔA, A.C. et al. 2014, p. 517. [19]

O processo dos lodos ativados teve origem na Inglaterra em 1913. Os trabalhos pioneiros foram realizados na Inglaterra por Dr. Angres Smith e Dr. Gilbert John Fowler, em 1882 e 1897, respectivamente, e com os experimentos norte-americanos de Clark e Gauge na estação Experimental de Lawrence, em 1912.

No processo de lodo ativado além da degradação da matéria orgânica pode haver a remoção de nutrientes como amônia e fósforo, desse modo é de fundamental importância se observar a questão da nitrificação de amônia em nitrato. Quando esta transformação não se dá totalmente, o efluente lançado continuará a demandar oxigênio no corpo d'água. Assim, é mais adequado prover-se a quantidade de oxigênio necessária para atender a demanda nitrogenada já no tanque de aeração, conforme será visto no subitem de aeração. [19]

Os fenômenos que ocorrem no interior do tanque de aeração são similares aos que ocorrem na natureza quando um poluente é lançado num corpo d'água e gera uma depleção (variação de oxigênio dissolvido) ao longo do tempo.

O que se faz nas estações de tratamentos (ETEs) que utilizam a tecnologia de lodo ativado, como princípio geral, é acelerar o processo de oxidação e decomposição natural da matéria orgânica que acontece nos corpos hídricos receptores. Fundamentalmente é fornecer e garantir condições para que o processo biológico ocorra em um tempo em torno de 3 a 5 horas e de maneira controlada. [19]

A biodegradação de poluentes orgânicos nos corpos hídricos segue comportamento semelhante ao das estações de tratamento. Estas estações operam com elevadas taxas de concentração microbianas, com aportes de energia e nutrientes adequados, ficando habilitada para acelerar o processo de biodegradação, o qual pode ser efetivado em grande escala e tempos relativamente curtos. [37]

Neste contexto, estão citadas na Tabela 4, as condições operacionais para os processos de lodos ativados. [36]

Tabela 4 - Condições Operacionais para o processo de lodo ativado

Parâmetros	Referência
Temperatura (°C)	26 a 35
pH	6,8 a 8,2
Oxigênio dissolvido (mgO ₂ .L ⁻¹)	0,5 a 2
Proporção de nutrientes	100DBO:5N:1P
Micronutrientes (mg/kg DBO reduzida)	
Cálcio	573
Cobre	6,6
Cobalto	0,3
Magnésio	104
Zinco	39,7

Fonte: Adaptado de Giordano, G. e Sureus, V., 2015, p. 121-122.

As principais aplicações desta tecnologia são: Industria farmacêutica, alimentícia, de refrigerantes, cervejaria, sucos, química, de petróleo, têxtil, tratamento de esgotos sanitários, abatedouros e frigoríficos, tratamento de lixiviado de aterro sanitário e outras indústrias que produzem efluentes com matéria orgânica biodegradável. [36]

1.6.1.1 Parâmetros operacionais do processo de biodegradação e de dimensionamento do tanque de aeração

Os processos de biodegradação que acontecem nos reatores biológicos são representados pelos seguintes parâmetros operacionais e de dimensionamento do tanque de aeração: relação alimento/microrganismo (A/M), tempo de retenção hidráulica, tempo médio de retenção de sólidos e sedimentalidade do lodo. [21]

a) Relação alimento/microrganismo (A/M)

A relação (A/M) é a relação entre a massa de nutriente (fonte de carbono), expressa em termos de DBO₅ ou DQO, que é alimentada diariamente no reator e a massa de microrganismo contida neste reator, ou seja:

$$\frac{A}{M} = \frac{Q.So}{Xav.V}$$
 Equação (5)

Na qual, Q é a vazão, So é a concentração do substrato, V é o volume do reator e Xav é a concentração de sólidos voláteis em suspensão do meio reacional. A/M é expresso em kg de DBO/kg SSVTA.d ou simplesmente d⁻¹. É conhecida como alimento/microrganismo por semelhança com sua terminologia de língua inglesa, F/M (F de *food* e M de *microoorganism*). [21] [19]

Este parâmetro pode ser usado para dimensionar o tanque de aeração, pois uma vez já definidos A/M e Xav (concentração de sólidos suspensos voláteis no tanque de aeração – SSVTA), resta o volume do tanque de aeração para tratar a carga orgânica presente no afluente, ser determinado pelo projetista. Usualmente para os sistemas convencionais o valor de A/M se situa entre 0,3 e 0,4 d⁻¹ e entre 0,07 a 0,10 d⁻¹ para os sistemas de aeração prolongada. [19]

b) Tempo de retenção hidráulica

O tempo de retenção hidráulica – HRT (denominado de *Hydraulic Retention Time* na língua inglesa) outro parâmetro fundamental para o projeto e operação de biorreatores e referese ao tempo de residência do afluente no tanque de aeração. Normalmente é expresso em horas e é definido por:

$$HRT = \frac{V}{O}$$
 Equação (6)

c) Tempo médio de retenção de sólidos

O tempo médio de retenção de sólidos representa o tempo médio de detenção celular dentro do reator, é também conhecido como idade do lodo e é expresso em dias.

Este parâmetro é numericamente igual a razão entre a massa de sólidos suspensos voláteis dentro do tanque de aeração (ou reator biológico) e a massa de sólidos suspensos voláteis descartados por dia, conforme Equação 7. [19]

$$\theta c = \frac{\text{XavV}}{\text{Q'Xev} + \text{Q''Xuv}}$$
 Equação (7)

Para um valor desprezível de X_{ev}:

$$\theta c = \frac{\text{XavV}}{\text{Q"Xuv}}$$
 Equação (8)

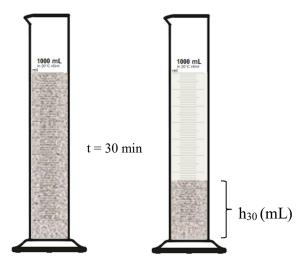
d) Sedimentalidade do Lodo

O controle do processo de formação e sedimentalidade do lodo, é realizado por alguns índices do lodo sendo o mais usado o Índice Volumétrico de Lodo ou Índice de Mohlman. [19]

É definido como o volume em ml ocupado por um grama de lodo, após uma sedimentação de 30 minutos, logo apresentado com a dimensão em mL/g. Tendo sido definido também, em trabalho realizado em 1996 no 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, como sendo a relação entre o volume de lodo que sedimenta após 30 minutos em uma proveta graduada de 1000 ml, conforme ilustrado na Figura 13 e a concentração de sólidos em suspensão nessa amostra. [38]

Valores de IVL entre 40 e 150 mL/g geralmente indica uma boa qualidade do lodo formado. Valores superiores a 200 mL/g indicam um lodo de qualidade inferior, com mal sedimentação. [19]

Figura 13 - Esquema ilustrativo de um ensaio de sedimentalidade do lodo



Fonte: Adaptado de SANT'ANNA JUNIOR, 2013, p. 81. [39]

Após a revisão dos parâmetros operacionais do processo segue Tabela 5 com valores típicos desses parâmetros aplicáveis às modalidades/variantes do processo de lodo ativado:

Tabela 5 - Parâmetros aplicáveis às modalidades do Processo de Lodo Ativado

Processo	Remoção DBO (%)	Tempo detenção (h)	SSTA (mg/L)	Idade do lodo (d)	A/M (kg DBO/ kg SSV.d)	Carga Volumétrica (kg.DBO/ m³TA)	Qr/Q (%)
Convencional	85-95	4-8	1500 - 4000	4-15	0,2-0,4	0,3-0,6	25-50
Aeração decrescente	85-95	4-8	1500 - 4000	4-15	0,2-0,4	0,3-0,6	25-50
Aeração escalonada	85-95	3-5	2000 - 4000	4-15	0,2-0,4	0,6-0,9	25-75
Modificado	60-75	1-2	500 - 1500	0,5-1	1,5-5,0	1,5-3,0	10-30
Aeração prolongada	90-95	16-36	3000 - 6000	20-30	0,05-0,15	0,05-0,4	100-300
Mistura Completa	85-95	3-5	3000 - 6000	4-14	0,2-0,6	0,8-2,0	25-100

Fonte: Adaptado de JORDÃO, E.P. e PESSÔA, C.A., 2014, p. 528.

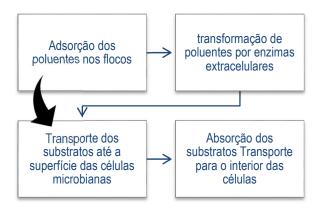
1.6.1.2 Etapas do processo de remoção e biodegradação da matéria orgânica

Uma das etapas mais significativas do tratamento biológico está na remoção e biodegradação da matéria orgânica das águas residuárias devido à extensão do impacto que estes poluentes trazem aos corpos hídricos, muito embora o tratamento biológico também se aplica à remoção de outros poluentes como o nitrogênio amoniacal, nitratos, nitritos e fósforo. [39]

Serão descritas a seguir as etapas do processo de remoção e degradação dos poluentes orgânicos. Ver Figuras 14 e 15, respectivamente a seguir:

- Primeiramente, os poluentes são adsorvidos pelos aglomerados microbianos, correspondendo ao processo de obtenção de alimentos realizado pelos microrganismos.
 Esta remoção é de natureza físico-química;
- Em seguida, conforme as características da molécula poluente ela poderá ser hidrolisada ou sofrer outras transformações estimuladas por enzimas excretadas pelos microorganismos; isto ocorre no exterior da célula microbiana.
- 3. As moléculas já modificadas são transportadas até a superfície das células microbianas sendo então absorvidas por estas células;
- 4. No interior das células microbianas as moléculas já modificadas são então metabolizadas. No metabolismo podem ocorrer as rotas de catabolismo (rotas geradoras de energia para as atividades celulares) e rotas de anabolismos (incumbidas da biossíntese das moléculas fundamentais ao funcionamento da célula).

Figura 14- Etapas da remoção de poluentes orgânicos



Fonte: Adaptado de SANT'ANNA JÚNIOR, 2013, p.24. [39]

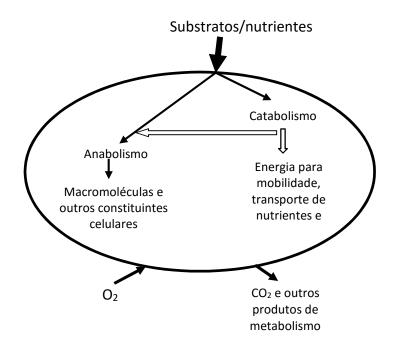


Figura 15 – Etapas envolvidas na biodegradação de poluentes orgânicos

Fonte: Adaptado de SANT'ANNA JÚNIOR, 2013, p.24. [39]

- O catabolismo corresponde a um conjunto de reações que permitem a recuperação de energia biologicamente utilizável e a produção de metabólitos a partir de substratos orgânicos ou de reservas celulares.
- O anabolismo representa um conjunto de reações que permitem a síntese celular a partir de metabólitos proveniente do catabolismo e de elementos do meio. [40]

1.6.1.3 Crescimento Microbiano

O controle efetivo das condições ambientais no tratamento de efluentes por lodo ativado de efluentes é baseado na compreensão dos princípios básicos que determinam o crescimento dos microrganismos. [40] Neste contexto, outros pesquisadores relataram as diversas fases de crescimento da biomassa em função do tempo, dentre esses o que elaborou o comportamento mostrado conforme Figura 16. [41]

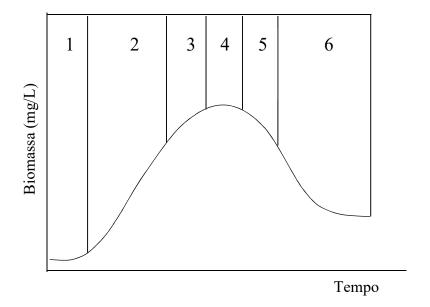


Figura 16 – Curva de crescimento e decréscimo da biomassa em função do tempo

Legenda: Fases: 1 - lag 2 - log aumento 3 - log decréscimo 4 - estacionária 5 - aceleração autodigestão log aumento 6 - desaceleração autodigestão log decréscimo. Fonte: Adaptado de GAUDY & GAUDY, 1988 *apud* ROZICH & GAUDY Jr., 1992. [41]

É destacado nesta curva o maior interesse principalmente pelas fases logarítmicas de aumento do crescimento (trecho 2) e da fase auto digestiva (trecho 6) dos micro-organismos porque nestas fases a taxa específica de crescimento e taxa específica de decaimento são constantes oferecendo uma maneira adequada de avaliação cinética quantitativa.

Em outra pesquisa as fases desta curva foram denominadas como **a**, **b**, **c**, **d**, **e** e **f**, e descritas conforme a seguir: [40]

- a. Fase lag: que é a fase 1 representa a aclimatação das células ao substrato, tendo a velocidade de crescimento próximo de zero.
- b. Fase de aceleração: o tempo de geração diminui e há um aumento na velocidade de crescimento está localizada entre a 1 e 2.
- c. Fase de crescimento exponencial que corresponde a fase 2: o tempo de geração é mínimo com velocidade de crescimento máxima e constante, resultando num aumento rápido no número de massa de organismos.
- fase de desaceleração que corresponde a 3: diminuição da velocidade do crescimento microbiano.
- e. Fase estacionária que corresponde a 4: taxa de reprodução é balanceada pela taxa de morte.

f. Fase de declínio - que corresponde a 5 e 6: densidade microbiana diminui, com uma alta taxa de morte dos microrganismos, resultando em um declínio do metabolismo.

Na fase 2, o crescimento de microrganismos se dá em presença de grandes quantidades de nutrientes para os organismos. Na fase 6, também chamada respiração endógena ou fase de decrescimento de micro-organismos, como ocorreu o esgotamento de nutrientes, os microrganismos metabolizam seu próprio material celular. [19]

Ainda é definido o metabolismo microbiano no reator biológico em duas etapas: a de síntese e a de auto oxidação (ou respiração endógena): [19]

Etapa de síntese - é a etapa na qual uma fração da matéria orgânica é sintetizada em novas células, correspondendo a aumento da massa de micro-organismos, e é representada por um coeficiente de produção celular (Y).

A outra fração da matéria orgânica a ser degradada é oxidada para produção de energia utilizada na fase de síntese.

Etapa de auto oxidação - é a etapa na qual fração das células dos microrganismos será destruída, conhecida também como etapa de respiração endógena ou de autodestruição dos organismos, sendo esta fração representada pela taxa específica de respiração endógena (Kd).

A variação de massa de microrganismos no reator é resultante do feito das duas etapas: do processo de síntese (aumento de massa) e da respiração endógena decréscimo de material celular.

Os parâmetros Y e Kd estão catalogados para lodos ativados tratando esgotos domésticos. Para despejos industriais é mais adequado que sejam obtidos por experiências de laboratório devido às diferentes características desses efluentes.

Acrescenta-se ainda, nesse tema, as curvas das fases de evolução da concentração microbiana e do consumo da matéria orgânica biodegradável em sistemas aeróbios, ao longo do tempo, como resultado de experimentos com amostras extraídas de biorreator operando em batelada. Representando tais comportamentos, a Figura 17 apresenta as curvas do teor de sólidos suspensos voláteis e da DBO solúvel, ao longo do tempo. [39]

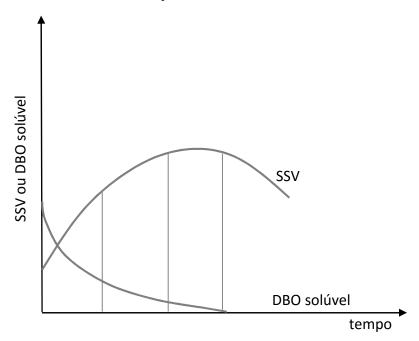


Figura 17 - Variação temporal do teor de sólidos suspensos voláteis e da DBO solúvel em um biorreator operando em batelada

Fonte: Adaptado de SANT'ANNA JUNIOR, 2013, p.127-128. [39]

Microrganismos

No processo de lodo ativado a degradação da matéria orgânica é executada pela ação de micro-organismos entre os quais se destacam os microrganismos com células procarióticas (bactérias) e os com células eucarióticas (protozoários, micro metazoários e fungos). Assim, além das bactérias existem outros componentes que integram a microbiota, os quais necessitam ser controlados de modo a garantir a eficiência deste processo. [39]

Bactérias

A comunidade bacteriana presente nos sistemas de lodo ativado promove a oxidação biológica da matéria orgânica e são classificadas em 2 tipos: as bactérias formadoras de flocos e as filamentosas. O equilíbrio entre estas duas espécies é responsável pelo êxito destes sistemas de tratamento em efluentes municipais e industriais.

A presença dos filamentosos garante a formação de um floco biológico forte, de boa sedimentalidade e adensamento do lodo. Quanto à sua dosagem é importante achar o ponto de equilíbrio pois a sua ausência acarreta em flocos fracos e pequenos, que complicam a sedimentação e causa turbidez ao sistema e o seu excesso, provoca a má formação do floco pelo fenômeno de intumescimento do lodo que prejudica a sedimentação do lodo. [36]

Protozoários, micro metazoários e fungos

Quanto à microbiota eucarionte é de grande importância o seu acompanhamento no reator biológico, de modo a indicar tendências do processo principalmente quanto à eficiência de remoção de DBO, sedimentação do lodo, nível de aeração empregado, presença de compostos tóxicos e possíveis vínculos com sobrecarga orgânica e de nitrificação. [37]

A recente evolução do processo de lodos ativados consiste na utilização de membranas para separação da fase sólida, tecnologia denominada biorreatores com membranas, simbologia na língua inglesa (MBR), na qual existe a eliminação do sedimentador secundário e menor produção de lodo e que será objeto do próximo capítulo.

1.6.2 Vantagens e desvantagens comparativas

O processo do Biorreator com membranas (MBR) é constituído de um biorreator com biomassa suspensa conjugado a uma unidade utilizando membrana para separação de sólidos, reunindo assim as vantagens dos processos biológicos às vantagens dos processos de separação por membrana, gerando um efluente tratado de alta qualidade. As membranas têm por função reter a biomassa substituindo os sedimentadores secundários dos sistemas de LAC. [4]

Em comparação com o processo de lodo ativado clássico (LAC), o processo do biorreator com membranas (MBR) apresenta as seguintes vantagens:

A elevada qualidade do efluente tratado devido à manutenção de elevada concentração de sólidos suspensos no biorreator, a alta eficiência de remoção de microrganismos, a baixa turbidez do efluente, a menor relação nutriente microrganismos, o maior tempo de retenção do lodo, reduzidos tempo de retenção hidráulica, a baixa produção do lodo e a substituição do

sedimentador secundário pelas membranas. Estas características fazem com que as unidades sejam mais compactas que as de LAC.

A completa retenção do lodo pelas membranas permite a manutenção de uma elevada concentração de sólidos suspensos no biorreator (MLSS - *mixed liquor suspended solids* - Xa da representação do LAC – Figura 12, p. 53) e elevado tempo de retenção de sólidos – θc (também denominado de SRT - *Sludge Retention Time* na língua inglesa), com consequentes: menor volume do reator e menor produção do lodo. No entanto, a demanda de aeração necessária é maior para maiores níveis de MLSS. Comenta-se também que uma das principais vantagens do MBR é desacoplar o SRT do HRT e fornece dados para MBR conforme Tabela 6 abaixo: [14]

Tabela 6 - Parâmetros Operacionais de MBR

Parâmetros	Valores para MBR
Razão carga orgânica/ microrganismo - F/M (d ⁻¹)	< 0,2
Tempo de retenção hidráulica (h)	4 a 6
Tempo de retenção de sólidos (d)	até 30
MLSS (g/L)	até 15
Fluxo (L/m ² h)	10 a 25

Fonte: LE-CLECH, P., 2010.

É apresentado para uma estação de tratamento de água residuária municipal em Schilde (Bélgica), as condições operacionais da Tabela 7. Observar as diferenças entre MLSS, SRT e HRT entre as duas tecnologias LAC e MBR. [42]

Tabela 7 – Diferenças entre condições operacionais das duas tecnologias – LAC e MBR

Parâmetros	LAC	MBR
Concentração da biomassa no	2,5 – 4	9 – 12
reator biológico (g MLSS/L)		
Tempo de retenção de sólidos	4 – 9	14 - 21
(dias)		
Tempo de retenção hidráulica (h)	3 – 75	3,5-5
Temperatura de operação (°C)	8 – 20	8 – 20
pH de operação	6 – 7	7 - 8
Fluxo líquido máximo médio	-	22 - 34
(L/m^2h)		
Pressão da Transmembrana (bar)	-	0,2-0,6
Duração da filtração (s)	-	300
Duração da retrolavagem (s)	-	25
Duração do relaxamento (s)	-	5
D / DENIII / / 2010		

Fonte: FENU, A. et al., 2010.

Apesar de ser um sistema que apresente maior eficiência de remoção de teor de sólidos e de matéria orgânica com qualidade para alguns tipos de reuso, o processo MBR requer maior consumo energético e produtos químicos. A vazão de permeado por unidade de área, ou seja, o

fluxo é sustentado da por meio da aeração permanente, limpezas químicas periódicas e retrolavagens envolvendo sistemas com bombas e válvulas. Um maior consumo energético também está associado com a aeração para o reator, por trabalhar com o MLSS 3 a 4 vezes superior ao do sistema LAC. [35]

Uma das grandes vantagens dos MBRs sobre o LAC é a viabilização de instalações compactas, pois elimina o sedimentador secundário e devido ao reator operar em altas concentrações de MLSS, mantendo-se a relação A/M (massa de alimento/massa de microrganismo) fixa, o volume para o reator também pode ser reduzido, resultando numa expressiva redução de área destinada às estações de tratamento de efluentes (ETEs). Esta vantagem tem valor expressivo para locais com pouca área para instalação das estações ou em terrenos bastante valorizados pois com menor área se consegue implantar um tratamento mais eficiente que o LAC. [3] [40]

O uso de membranas é um recurso bastante válido para ampliar a capacidade das ETEs, uma vez que os módulos das membranas podem ser submersos nos tanques de aeração já existentes. Desta maneira, a estação operará com concentração de biomassa mais elevada, podendo aumentar realmente sua capacidade de tratamento.

O efluente tratado do MBR além de atender aos padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos receptores, exigidos pelas legislações ambientais, pode também servir como água de reuso não potável em algumas aplicações nos grandes centros urbanos como: lavagens de pisos e equipamentos, descargas sanitárias, irrigação de áreas verdes, na construção civil, lavagens de ônibus e trens.

As variações de picos de carga orgânica e cargas com toxicidade são melhores suportadas nos MBRs devido à elevada concentração de lodo no tanque de aeração. Tanto para os sistemas com módulos submersos como para os sistemas com módulos externos, os flocos apresentam menores tamanhos propiciando maior área superficial em contato com a matéria orgânica, permitindo aos microrganismos metabolizar e adsorver maior carga orgânica. [3]

A incrustação das membranas é a principal limitação dos MBR, resultando em queda do seu desempenho, alto consumo de energia e limpezas frequentes das membranas ou mesmo substituição destas, o que aumenta os custos operacionais. Incrustação é um termo genérico que é associado com a redução do fluxo permeado de membranas, conforme já revisado no item 1.5. [21]

As vantagens dos sistemas de lodo ativados com a separação de sólidos por membranas são: [19]

- a. A excelente qualidade do efluente tratado com resultados de DBO e SST (Xe) < 5 mg/L,
 coliformes fecais (CF) < 10 NMP/100 mL e turbidez < 1 uT;
- b. A possibilidade de reuso do efluente tratado devido à qualidade conseguida;
- c. A capacidade de agregar ao sistema de tratamento os processos de remoção de nitrogênio e fósforo;
- d. A facilidade de se realizar ampliações em um sistema LAC já existente;
- e. Menor área ocupada que a do LAC pois elimina o sedimentador secundário;
- f. A menor produção de lodo, pois nos sistemas com MBR emprega-se tempo de retenção de sólidos muito maior. Isto leva à redução de todo processo de tratamento da fase sólida.

Como desvantagens citam principalmente:

- a. Os elevados custos das membranas, o que tem desviado sua aplicação para efluentes industriais em caso de reuso;
- b. Os maiores custos de energia quando comparados com o LAC;
- c. O processo contínuo de incrustação fouling, que reduz o fluxo pela membrana.

Em contrapartida às vantagens, a demanda de energia e os problemas de custos relacionados são, juntamente com os problemas de incrustação de membrana, grandes desvantagens que restringem a expansão da tecnologia do MBR. As altas taxas de aeração para limpeza de membranas frequentes continuam sendo um desafio em termos de consumo de energia e otimização de MBRs. [7] [43] [31]

Para pesquisar os requisitos energéticos específicos dos MBRs e esclarecer como a redução do consumo de energia pode ser alcançada, pesquisa extensiva sobre o consumo específico de energia em vários MBRs em plantas de grande escala tem sido realizadas e será objeto da revisão bibliográfica do próximo capítulo da presente dissertação, no item estratégias para redução do consumo energético.

Observa-se na Tabela 8 dados operacionais típicos e de performance para a tecnologia MBR: [44]

Tabela 8 – Dados operacionais típicos e de performance para MBR

Parâmetro Parametro	Unidade	Range
	Dados operacionais	
DQO carga	kg/m³ d	1,2 - 3,2
MLSS	mg/L	5.000 - 20.000
MLVSS	mg/L	4.000 - 16.000
F/M	g DQO/g MLVSS.d	0,1 - 0,4
SRT	d	5-20
HRT	h	4-6
Fluxo	$L/m^2 d$	600 - 1.100
Vácuo	kPa	4-35
OD	mg/L	0,5-1
	Dados performance	
DBO	mg/L	<5
DQO	mg/L	<30
NH ₃	mg/L	<1
TN	mg/L	<10
Turbidez	UNT	<1

Fonte: Adaptado de STEPHENSON et al., 2000 apud METCALF e EDDY, 2003, p.858.

As plantas de lodo ativados que tratam águas residuárias municipais apresentam um SRT de 5 a 15 dias com valores de F/M de 0,2 a 0,4/dia, ao aumentar o SRT aumenta a concentração da biomassa (MLSS) no reator. Um LAC operando a um SRT de 8 dias apresentou o MLSS de 2,5 g/L e que com o MBR ao se elevar o SRT para 40 dias o MLSS se elevou para 8-12 g/L. Uma razão F/M (A/M) baixa, implica um alto MLSS e baixo rendimento de lodo, o que se considera vantajoso com respeito à geração de resíduo. Isso representa uma das principais vantagens dos MBRs e uma análise dos dados da revisão de Stephenson *et al.* (2000) representada na Figura 18 revela que a maioria dos MBRs, em que o SRT pode ser prontamente estendido, opera em relações F/M < 0,12. [7]

Para 90% de remoção Municipal 8,0 Industrial Percentagem 0,6 cumulativa de plantas MBR Escala completa A/M MUN < 0.12 0 0,1 0,2 0,5 0,3 0,4 0,6 A/M (kg DQO/kg MLSS/d)

Figura 18 – Análise estatística dos dados de Stephenson *et al.* (2000) para A/M - efluente municipal e industrial

Fonte: Adaptado de JUDD, S., 2006, p. 45. [7]

Há também desvantagens de se trabalhar com alto MLSS com relação ao desempenho do processo de MBR. Em primeiro, a redução da razão MLSSV/MLSS na qual MLSSV é a parte volátil do MLSS (parte orgânica), um segundo ponto destacado é que nesta condição, ocorre o aumento da tendência ao acúmulo de sólidos nos paineis das membranas (*clogging*) e por ultimo, e de grande expressão, o efeito do alto MLSS na redução da eficiência de aeração, tema que será revisitado no capítulo 2 da presente dissertação. [7]

1.7 Síntese do capítulo

Pela revisão da literatura deste capítulo, destaca-se para a tecnologia MBR:

Vantagens: A elevada qualidade do efluente tratado devido à manutenção de elevada concentração de sólidos suspensos no biorreator, a alta eficiência de remoção de microrganismos, a baixa turbidez do efluente, a menor relação alimento microrganismo, o maior tempo de retenção do lodo, reduzidos tempo de retenção hidráulica, a baixa produção do lodo e a substituição do sedimentador secundário pelas membranas. Estas características fazem com que as unidades sejam mais compactas que as de LAC

Desvantagens: Embora o MBR sejam atualmente uma tecnologia madura, a incrustação continua a ser o problema operacional mais importante, que reduz a produtividade do MBR,

aumenta a demanda de energia devido ao consumo de ar para mitigá-la e requer limpeza frequente para restaurar a permeabilidade.

Aumento da confiabilidade: O aumento do mercado global com a implantação de plantas de MBR cada vez maiores (ex: Suécia: 860.000 m³/d) é o indicativo da maior confiabilidade nesta tecnologia. Caminha junto com o aumento de capacidade, as sofisticações de otimizações energéticas, investimentos em tecnologia das membranas/difusores e sistemas de controle, de modo a garantir a viabilidade econômica desta tecnologia.

Dependência de vazão: A operação em condições de vazões ótimas, isto é, próximo a vazão de projeto, resulta em baixo consumo específico de energia (cerca de 0,7-0,8 kW h/m³). Isto é devido ao fato de que as taxas de aeração da membrana requeridas não são proporcionais aos volumes de vazão tratados. Esta redução do consumo de energia também é parcialmente explicada pela operação do equipamento de processo, bombas e sopradores, em ou perto de seus melhores pontos eficientes quando a vazão aumenta. Contrariamente, a operação sub-ótima, abaixo da vazão de projeto leva a valores de consumo de energia específicos mais altos.

2 SISTEMAS DE AERAÇÃO E CONSUMO ENERGÉTICO NOS REATORES BIOLÓGICOS COM MEMBRANAS

2.1 Funções da aeração em MBR

A aeração é necessária em um MBR aeróbio para as seguintes funções: fornecer oxigênio dissolvido (OD) para os microrganismos, fazer com que os flocos de lodo permaneçam em suspensão e para mitigar a incrustação de membrana. O consumo de energia de aeração representa aproximadamente metade do consumo total de energia em MBRs. Assim, a otimização da aeração, incluindo taxas de aeração, tamanho da bolha e modos de aeração, é de grande importância tanto para controle de incrustação quanto para diminuição do uso de energia. A aeração de membrana em MBR utilizando a placa plana é muito maior que a de MBR utilizando a fibra oca. [18]

Para a tecnologia com a configuração iMBR, a aeração é o parâmetro operacional mais importante contribuindo expressivamente no custo de operação de sistemas com esta tecnologia. Neste caso a aeração tem como função atender tanto a parte biológica (aeração da biomassa) como o controle de incrustações (aeração para limpeza da membrana), *aeration scouring*, *scouring agent*. Assim, o projeto de MBR exige exige conhecimento de ambos: da qualidade da água de alimentação, que determina principalmente a demanda de oxigênio pelo biotratamento e da demanda de aeração para controle da incrustação. [7]

As inter-relações existentes entre a aeração e os vários parâmetros do sistema iMBR são mostradas na Figura 19.

Característica da aeração Característica da biomassa Operação da membrana Tamanho da bolha Tamanho Vazão do floco **TMP** Intensidade Área do Transferência ▶ Permeabilidade /iscosidade aerador de O₂ Fluxo **MLSS** Limpeza Taxa de carregamento

Figura 19 – Inter-relações existentes entre a aeração e os vários parâmetros e aspectos do sistema iMBR

Fonte: Adaptado de JUDD, S., 2006, p. 49. [7]

Considerando a aeração para a biomassa: o projeto do sistema de aeração para o processo de lodo ativado deve ser adequado para (1) satisfazer a DQO de resíduos, (2) satisfazer a respiração endógena pela biomassa, (3) satisfazer a demanda de oxigênio pela nitrificação, (4) fornecer mistura adequada e (5) manter um mínimo de concentração de oxigênio dissolvido em todo o tanque de aeração. Se a transferência de oxigênio do sistema de aeração é conhecida ou pode ser estimada, os requisitos reais de ar para a aeração de ar difusa ou potência instalada de aeradores de superfície mecânicos podem ser determinados. [44]

2.2 Aeração da biomassa: oxigênio dissolvido e transferência de oxigênio

Aeração e consumo de oxigênio

A aeração tem a função de suprir o oxigênio dissolvido em concentração requerida para a oxidação da matéria orgânica carbonácea, para a nitrificação (se o sistema apresentar condições para esta etapa) e para gerar turbulência no tanque de aeração, de modo a manter os sólidos em suspensão. A nitrificação reside na conversão por oxidação biológica da amônia para nitrito por ação das bactérias do gênero Nitrosomonas, e do nitrito para nitrato, por ação das bactérias do gênero Nitrobacter. [3]

Serão revisados a seguir os processos de nitrificação e desnitrificação e como suas presenças interferem nas configurações dos sistemas de lodo ativado.

Nitrificação Convencional

A transformação do nitrogênio amoniacal a nitrato se dá em 2 etapas e são denominadas de nitritação e nitratação, conforme reações a seguir: [39]

$$NH_3 + 1.5O_2 \rightarrow NO_2^- + H_2O + H^+$$
 Equação (9)

$$N{O_2}^- + 0.5O_2 \rightarrow N{O_3}^-$$
 Equação (10)

Desnitrificação Convencional

A desnitrificação corresponde ao processo que converte nitrato a nitrogênio gasoso passando por vários intermediários, com decrescentes graus de oxidação. Os agentes são bactérias que atuam em meios praticamente desprovidos de oxigênio dissolvido (condições anóxicas). A equação a seguir ilustra os produtos formados:

$$NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$$
 Equação (11)

Na Tabela 9 são apresentados os fatores ambientais que favorecem a ocorrência da nitrificação e desnitrificação.

Tabela 9 – Fatores ambientais que favorecem a Nitrificação e Desnitrificação

Fatores Ambientais	Referências			
	Nitrificação	Desnitrificação		
Temperatura (°C)	25 a 30 ¹	25 a 35		
рН	7,5 a 8,5 ¹	6,5 - 8,5 ²		
Oxigênio dissolvido (mgO ₂ .L ⁻¹)	2,0 a 2,9 ²	Anóxico (Oxigênio combinado NO ₃ -)		
Matéria orgânica (DBO ₅ /NTK)	<0,25 ³	Depende da natureza da fonte externa de carbono		

Fonte: Adaptado de SANT'ANNA JUNIOR 2013, p.284 – 286; 300 – 301.

Nota 1: WEF, 1004 apud SANT'ANNA JUNIOR, 2013, p.284 – 285.

Nota 2: Gerardi, 2002 apud SANT'ANNA JUNIOR, 2013, p. 285.

Nota 3: Grady e Lim, 1980 apud SANT'ANNA JUNIOR, 2013, p. 286.

Pela Norma ABNT NBR 12.209 [45] — De acordo com a finalidade a que se destinam, os sistemas de lodo ativado com operação contínua apresentam as seguintes configurações:

- a. Reatores aeróbios (denominados tanques de aeração) quando voltados para a remoção da matéria orgânica carbonácea com ou sem nitrificação;
- b. Reatores aeróbios e anóxicos, quando voltados para a remoção da matéria orgânica carbonácea, conversão de nitrogênio por nitrificação e remoção por desnitrificação;
- c. Reatores anaeróbios e aeróbios, quando voltados para a remoção da matéria orgânica carbonácea e reação biológica de fósforo sem nitrificação;
- d. Reatores aeróbios, anóxicos e anaeróbios quando voltados para a remoção da matéria orgânica carbonácea, remoção biológica de nitrogênio por nitrificação e desnitrificação, e também remoção biológica de fósforo;
- e. Reatores aeróbios, voltados para a remoção da matéria orgânica carbonácea e são especificamente projetados para a nitrificação e desnitrificação simultânea.

Um exemplo de uma configuração típica com nitrificação e desnitrificação para o processo Ludzack-Ettinger Modificado (MLE), conforme apresentado na Figura 20, consiste de uma etapa anóxica (na qual ocorre a desnitrificação) anterior a etapa aeróbia (em que ocorre a nitrificação). Devido ao tanque anóxico está situado antes do tanque de aeração o processo também é conhecido como pré desnitrificação anóxica. [46]

Entrada
Aeróbio/
nitrificante

Retorno do lodo

Descarte de lodo

Figura 20 - Esquema de um sistema de reatores de mistura completa utilizando o processo Ludzack-Ettinger Modificado

Fonte: Metcalf e Eddy, 2003, p. 791. [44]

Após a revisão em nitrificação e desnitrificação, será dado continuidade ao item aeração e consumo de oxigênio revisando que os sistemas de aeração podem fornecer oxigênio puro ou ar para os reatores biológicos, sendo o mais comum o fornecimento de ar e será este fornecimento que será tratado a seguir na presente dissertação, por ser o mais usual nos processos de lodo ativado.

Aeração por sistemas Convencionais

A forma pela qual o ar é introduzido no tanque de aeração se dá por difusores (Figura 54 p. 143), por agitadores mecânicos ou pela combinação destes dois sistemas. De acordo com o sistema de montagem os difusores podem classificar- se em difusores fixos - fixados no fundo do tanque (sua limpeza só pode ser efetuada com o esvaziamento do tanque) ou montados num sistema móvel (para sua limpeza basta ser acionado o braço sobre o qual estão montados) que dispensa a necessidade de esvaziamento do tanque para sua limpeza ou manutenção. [3] [19]

De acordo com os tipos de bolhas os difusores são classificados como: difusores de bolhas finas, difusores de bolhas médias e difusores de bolhas grandes. Os difusores de bolhas finas são os mais eficientes na transferência de oxigênio devido ao maior contato superficial

das bolhas de ar com o líquido, porém requerem que o ar seja filtrado de modo a evitar o seu entupimento. Os difusores de bolhas grossas não requerem a filtração do ar, contudo apresentam menor eficiência na transferência de oxigênio. [19]

Eficiência de Difusores

No que se refere ao difusor a eficiência de transferência de oxigênio é função do seu tipo, da sua porosidade, das dimensões das bolhas de ar, do tempo de detenção das bolhas no tanque de aeração, da sua profundidade no tanque, entre outros fatores.

Como exemplo, quanto maior a profundidade maior o tempo de detenção das bolhas no tanque e assim, maior a eficiência o que está comprovado nos dados da Tabela 10 sobre eficiência dos difusores em testes realizados em condição standard, isto é: água limpa a 20 °C e pressão de 1 atm.

Tabela 10 – Eficiência de difusores em condições standard

Tipo de difusor	Faixa de vazão por difusor (m³/h)	Eficiência de transferência de Oxigênio ETOS		
	unusor (m /n)	Profundidade (m)	Eficiência (%)	
Bolha grossa	13-34	2,0	4	
Boma grossa	13 3 1	3,8	8	
Bolha média	5-25	2,0	8	
Doma media	3-23	3,8	12	
Bolhas finas	5.25	3,0	10	
tubos cerâmicos	5-25	4,5	22	
Bolha fina		2.0	20	
domos ou discos	0,85-4	3,0	20	
cerâmicos	•	6,0	40	
Bolha fina				
Discos com membrana	_	4,50	40	
flexível				

Fonte: Adaptado de JORDÃO, E.P. e PESSÔA, C. A., 2014, p. 537.

Na aeração por sistemas de agitação mecânica, os agitadores revolvem o líquido, colocando-o em contato com a atmosfera, garantindo a transferência de oxigênio e a dispersão e incorporação do ar no meio líquido.

Nos processos convencionais de tratamento aeróbio de águas residuárias biológicas, o oxigênio é geralmente fornecido como ar atmosférico, seja através de difusores de bolha de ar imersos ou pela aeração superficial. [7]

As bolhas de ar difundidas (por aeração de bolhas finas) são adicionadas a massa líquida ou ocorre transferência de oxigênio do ar circundante para a massa líquida via uma interface líquido/ar.

O consumo de oxigênio para manter a comunidade de micro-organismos, para degradar a matéria orgânica e transformar amônia e nitrito para nitrato pode ser representado pelo balanço de massa no sistema conforme equação: [44]

$$mo = Q(S - S_e) - 1.42P_x + 4.33Q(NO_x) - 2.830(NO_x)$$
 Equação (12)

Na qual mo é o oxigênio total necessário (g/dia), o primeiro termo na equação referese a oxidação do substrato, o segundo refere-se à respiração da biomassa, o terceiro refere-se à nitrificação e o termo final refere-se à desnitrificação. Assim, alguns termos, portanto, desaparecem da equação dependendo se ou não o sistema é nitrificante e/ou desnitrificante.

Os microrganismos responsáveis pelas reações de oxidação biológica são aeróbios e necessitam de oxigênio para cumprirem com seus processos metabólicos, que é fornecido por sistemas de aeração que podem ser do tipo superficial ou por ar induzido. [35]

Fornecimento de Ar

O ar é fornecido por meio de compressores e chega aos difusores por meio um sistema de tubulações que tem como parâmetros o diâmetro (que obedece a faixas de velocidades típicas para o escoamento de ar) e a perda de carga envolvida no sistema. Assim, os compressores operam para vencer a altura estática da coluna e as perdas de carga no sistema de tubulações, filtros e difusores e são caracterizados pela sua potência e pela capacidade de fornecimento de ar. [19]

Transferência de Oxigênio

Para a transferência do oxigênio do ar para o meio líquido, a concentração de oxigênio dissolvido é função da temperatura das características do meio líquido e da pressão barométrica. [19]

A velocidade de transferência do oxigênio pode ser expressa pela equação:

$$N = K_L A(C_S - C_L)$$
 Equação (13)

Na qual:

N = massa de oxigênio transferido (kg O₂/h)

A= superficial interfacial (m²)

 C_s = concentração de saturação de oxigênio dissolvido (mg/L) – Vide Tabela 30 do Anexo 1 (p. 175), onde essa variável está tabelada em função da temperatura.

C_L = concentração do oxigênio no meio líquido (mg/L)

K_L= coeficiente global de transferência de massa líquida

Os equipamentos de aeração possuem uma capacidade de oxigenação nas condições de campo (reais) inferior à que se obtém no ensaio com condições padrão, em que foram testados, assim, deve-se calcular inicialmente a massa de oxigênio transferida por unidade de tempo nas condições padrão, onde os aeradores foram testados, e corrigi-la para as condições de campo. A correção se faz necessária porque os aeradores foram testados com água nas condições padrões (20 °C, 1 atm).

2.3 Aeração da membrana: ar como agente de limpeza da membrana, difusores e aspectos hidrodinâmicos

Histórico da aplicação e fluxo em duas fases:

Desde 2003, ano que ficou marcado pela revisão completa sobre o uso de bolhas de gás para melhorar os processos de membrana, surgiu uma vasta literatura com foco no uso do fluxo de duas fases em processos de membrana. Conforme mostrado na Figura 21, na ultima década, ocorreu uma expressiva quantidade de trabalhos publicados sobre este tema. [47]

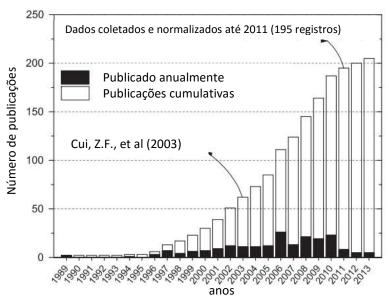


Figura 21 - Número de publicações sobre escoamento com duas fases em processos de membranas ao longo do tempo

Fonte: Adaptado de WIBISONO, Y. et al., 2014. [47]

Nichos de pesquisa ao redor do mundo

A pesquisa de fluxo em duas fases é predominantemente realizada no Reino Unido, França, China (incluindo Taiwan), América do Norte (EUA e Canadá) e os Países Baixos. Destacam-se alguns grupos nestes países, como:

No Reino Unido dominou o grupo de pesquisa de Cui na Universidade de Oxford e Cabassud e colegas de trabalho no INSA de Toulouse, na França. Com uma distinção entre suas

pesquisas, com a cobertura da simulação de CFD pelo grupo de Cui, e o amplo escopo de aplicação em NF e membranas capilares pelo grupo de Cabassud. [47]

Em Taiwan o grupo da Universidade Tamkang estudou o efeito da posição do módulo (inclinação) no fluxo MF de duas fases ou UF, e pesquisadores da Manana Chinamostly trabalharam na aeração MBR. [47]

No Reino Unido, a aplicação do fluxo de duas fases na aeração de MBR foi amplamente relatada pela pesquisa de Judd *et al.* na Universidade Cranfield, pelo grupo de Fane, ambos anteriormente na UNSW na Austrália e atualmente na NTU em Cingapura. [47]

Nos EUA, por Psoch *et al.*, e pelos grupos canadenses aplicação de fluxo de duas fases em processos de membrana de alta pressão (nanofiltração e osmose reversa). [47]

Os pesquisadores holandeses se juntaram ao campo de pesquisa de aeração de MBR com grupos em Wageningen. AtKWR e depois também na Universidade de Twente (no grupo Ciência e tecnologia de membrana) a aplicação de fluxo de duas fases em processos de membrana de alta pressão (nanofiltração e osmose reversa). [47]

Em uma das publicações revisadas na língua inglesa, as principais palavras-chave que foram usadas foram: air sparging, gas sparging, air flush, air scour, two-phase flow, gas-liquid flow, aeration, bubble flow, air/water cleaning (todas combinadas com "membrane processes"). 205 artigos científicos publicados em revistas foram revisados nesta publicação, entre 1989 e 2013. O resultado foi que a experiência de 25 anos relatada na literatura mostrou que o fluxo de duas fases é amplamente utilizado em ambas aplicações submersas, por exemplo em MBRs (que empregam membranas de micro ou ultrafiltração) e processos de membrana não submersa, por exemplo em microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF), osmose reversa (RO), destilação de membrana (MD) e eletrodiálise (ED). [47]

Padrões de fluxo em duas fases

A eficácia do fluxo em duas fases, são muito sensíveis à distribuição geométrica ou à topologia dos componentes dentro do fluxo. A distribuição geométrica depende da fração volumétrica de gás e líquido, das diferenças de velocidade entre as fases, das propriedades do fluido e da velocidade do deslizamento (a velocidade da fase gasosa em relação à da fase

líquida) devido à geometria do canal. Portanto, não é apenas uma questão de fluxo laminar ou turbulento. [47]

Em processos de membranas com membranas submergidas o escoamento do gás ocorre na mesma direção do fluxo de líquido sendo denominado co-corrente. Como exemplo, é o que ocorre na aeração nos MBRs. [47]

Um tipo específico de distribuição geométrica das fases (gás e líquido) é chamado de padrão de fluxo. A caracterização e as transições entre os padrões de fluxo são muitas vezes apresentadas na forma de um mapa de padrão de fluxo. [47]

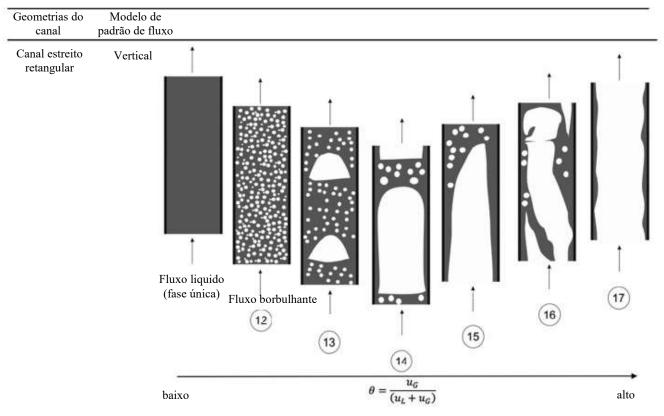
As ilustrações da Figura 22 mostram padrões de fluxo diferentes para canais estreitos retangulares verticais ascendentes em função da razão das velocidades superficiais de gás e líquido $\theta = u_G/(u_L + u_G)$. Cada padrão de fluxo está numerado e sua descrição está incluída abaixo.

Em canais estreitos rectangulares verticais ascendentes, os padrões de fluxo observados para fluxo de gás-líquido podem ser descritos como: [47]

- 12. *Bubbly flow*: bolhas discretas pequenas são razoavelmente uniformemente distribuídas na direção axial em uma fase líquida de fluxo contínuo. [47]
- 13. Cap-bubbly flow: À medida que o fluxo de gás aumenta, o movimento das paredes faz com que as bolhas crescentes se tornem achatadas e distorcidas, o que as faz aparecer como pequenas tampas. A coalescência de bolhas pode produzir tampas maiores com largura de até 60% da largura do canal. [47]
- 14. *Slug flow*: grandes bolhas de Taylor com tamanhos de mais de 75% da largura do canal são separadas por lâminas líquidas que atravessam a seção do canal e geralmente carregam pequenas bolhas. [47]
- 15. Slug-churn flow: as bolhas de slug individuais começam a interagir uma com a outra, e cada uma das ondas anteriores de forma a interface suave do próximo slug. Isso causa o início de uma ação de tipo *churn*, mas os *slugs* individuais ainda podem ser identificados. [47]
- 16. Churn turbulent flow: Isto é semelhante ao fluxo slug, mas é muito mais caótico, espumoso e desordenado. As bolhas em forma de bala tornam-se mais estreitas e distorcidas até que não sejam mais reconhecíveis. [47]

17. Annular flow: isto compreende um núcleo gasoso sólido, contínuo na direção axial, com uma película líquida que envolve o núcleo. [47]

Figura 22 – Padrões de fluxo em duas fases



Fonte: Adaptado de WIBISONO, Y. et al., 2014. [47]

Foram destacadas duas publicações que mostram a aeração como efetiva estratégia para controlar incrustações e ressaltada a necessidade de quantificar os mecanismos predominantes que melhoram o desempenho do MBR, ou seja: (i) turbulência, que tem um efeito positivo no aumento do transporte de volta, (ii) movimento da fibra, o que aumenta a probabilidade da membrana se beneficiar do ar pulverizante e permite que um maior cisalhamento seja induzido pelo líquido e (iii) tensões de cisalhamento do ar, que podem ter um impacto positivo e negativo e em que um equilíbrio deve ser encontrado entre o aumento de tensões de cisalhamento que permitem a remoção de incrustações da membrana e preservando a integridade do licor misto. [47] [48]

Com relação à otimização de geometrias de tanques, molas e módulos do MBR, esta poderia ajudar com respeito à economia de energia e custos operacionais. [47] [10]

A maior parte da literatura diz respeito ao fluxo de duas fases aplicado em membranas tubulares, seja com grandes diâmetros ou capilares. Seguem-se módulos de membrana de fibra

oca e de placa plana. Menos de 5 % dos estudos dizem respeito ao trabalho com elementos de membrana em espiral conforme mostrado na Figura 23. [47]

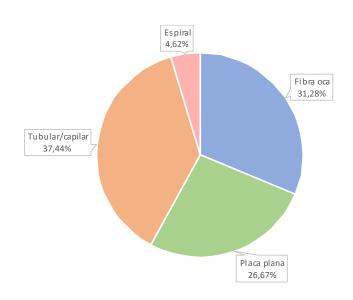


Figura 23 - Tipos de elementos de membranas usados em processos de membrana com fluxo em duas fases

Fonte: Adaptado de WIBISONO, Y. et al., 2014. [47]

Para aplicação de fluxo em duas fases é citado que a forma do módulo também afeta o desempenho de fluxo em duas fases: a eficiência da limpeza é maior em módulos de fibra oca do que em módulos tubulares e maior em canais estreitos do que em canais grandes em módulos de placa plana. Isso é causado pela maior força de cisalhamento induzida por bolhas em canais pequenos do que em grandes. Embora a maioria dos pesquisadores conclua que as grandes bolhas são capazes de melhorar os fluxos mais do que as bolhas menores, alguns relataram que, no caso das membranas submersas, as bolhas menores são melhores porque estas são distribuídas de forma mais uniforme. Isso contrasta com as bolhas grossas que levam à canalização. No entanto, bolhas maiores são benéficas devido ao seu esforço de cisalhamento induzido por bolhas na superfície da membrana para controlar a incrustação. Uma melhor distribuição de tais bolhas maiores pode ser conseguida aumentando-se a pressão do gás. Finalmente, o desempenho do fluxo em duas fases é muito dependente de: (i) forma do módulo de membrana, (ii) posição dos módulos, (iii) relação gás/líquido, (iv) velocidade do líquido e do gás, (v) tipo de alimentação, (vi) intensidade de borbulhamento, e (vii) tipo de processo de membrana. O balanço energético líquido de um fluxo em duas fases geralmente é positivo, o

que significa que as demandas de energia são menores por causa da redução na incrustação. [47]

Do banco de dados da pesquisa foram coletadas as tendências gerais e possíveis variáveis de fluxo de duas fases, que afetam o fluxo, a rejeição, o aumento de seletividade e/ou a diminuição da queda de pressão do canal de alimentação. A Tabela 11 resume as possíveis variáveis que influenciam o grau de aprimoramento do processo.

Tabela 11 - Variáveis possíveis que influenciam o grau de aprimoramento do processo

Membranas / módulos

- Posição do módulo
 - Tipo de membrana,
 - Tamanho da poro da membrana,
 - Hidrodinâmica no módulo,
 - Tipo de módulo,
 - Tipo de processo (UF / MF / NF / RO);

Componentes de alimentação

- Tipo de alimentação
- Concentração,
- Variação,
- pH;

Condições de processo

- Fluxo de alimentação,
- Pressão trans-membrana,
- Temperatura;

Fluxo em duas fases

- Tipo de gás,
- Relação gás / líquido,
- Direção do fluxo,
- Contínuo ou intermitente,
- Taxa de fluxo de gás e líquido,
- Freqüência do fluxo de duas fases.

Fonte: Adaptado de WIBISONO, Y. et al., 2014.

Nos MBRs aeróbios, a aeração é o método predominante de limitação da incrustação proporcionando um efeito de limpeza na superfície da membrana além de outros benefícios como fornecer oxigênio para os microrganismos e manter suspenso o lodo ativado. A introdução de bolhas em sistemas de membrana resulta em um fluxo gás-líquido de duas fases, no qual as bolhas próximas à superfície da membrana geram transientes de cisalhamento e o fluxo secundário induzido pelas bolhas aumenta a turbulência. Esse aumento em

cisalhamento/turbulência evita a deposição e melhora o transporte de volta de grandes partículas da superfície da membrana. [27]

Os transientes de cisalhamento e o fluxo secundário que provoca a turbulência são definidos pelo tamanho e forma da bolha. Com grandes bolhas (tampa esférica), o fluxo secundário induzido pela bolha é muito mais significativo do que o induzido por pequenas bolhas esféricas. [27]

As bolhas de tamanho pequeno geralmente favorecem o metabolismo microbiano devido à alta eficiência de transferência de oxigênio. [27]

O projeto específico de padrões de fluxo de ar e localização de aeradores tem sido identificados como parâmetros cruciais em um projeto de MBR. [27]

Foi verificado que a permeabilidade sustentável aumentou aproximadamente linearmente com a taxa de aeração, no entanto, tem sido relatado que a aeração intensa tem sido prejudicial à estrutura do floco, reduzindo o seu tamanho e liberando SMP para o biorreator. [27]

Quando o gás é injetado em um líquido estacionário, como a situação em sistemas de membrana submersa, bolhas são formadas e movem-se para cima conduzidos pela flutuabilidade. O movimento da bolha também gera um fluxo secundário atrás da bolha, ou seja, a região é despertada, ativada. O tamanho das bolhas formadas depende da forma como o gás é introduzido, o tipo de *sparger* e o fluxo de gás. Dependendo no tamanho da bolha, ela tende a tomar diferentes formas que determinam a força e extensão da região despertada. [27]

O custo da aeração contribui significativamente para a demanda de energia para a operação do sistema MBR. [27]

Procurando atender à limitação da quebra do floco e à limitação da incrustação, diferentes ranges de tamanhos de bolhas são preferidos para fornecer oxigênio. O requisito de aeração para cada parte (biológico e membrana) pode ser desacoplado, permitindo que a quantificação de demanda de energia para cada parte ser possível. Aproximadamente 35 % da demanda de energia foi utilizada para os aeradores de bolhas finas que fornecem oxigênio para a biomassa, e cerca de 38% da demanda de energia foi utilizada para a aeração de bolhas grossas necessária para controle de incrustação. [27]

A demanda de aeração específica (SAD), quer em relação à área da membrana (SAD $_{\rm m}$ em Nm 3 ar/(h m 2)) ou volume de permeado (SAD $_{\rm p}$ N m 3 ar/m 3 permeado) é usada na prática, como um indicador de eficiência de aeração na operação da planta MBR

Valores de SAD_m variando de 0,21 a 0,88 N m³/(h m²) foram relatados para seis MBR aeróbios em grande escala operando em condições ideais, com o fluxo sustentado entre 24 e 31 L/m² h. [27] [43]

Apesar da ampla aplicação de aeração em MBRs para mitigação de incrustação, existem limitações associadas a essa técnica. Para módulos de membrana altamente compactados a eficiência de remoção de incrustação pode ser limitada, devido à dificuldade em se alcançar boa distribuição de fluxo de gás ou líquido nestes módulos. [27]

Assim, uma proporção significativa de energia de aeração e bombeamento é geralmente dissipada, e o esperado aumento da força de cisalhamento não atinge a proximidade da superfície da membrana. Além de que, a força de cisalhamento induzida por bolhas de ar é sensível à viscosidade do meio reacional da solução de alimentação. [27]

O esforço direto hidrodinâmico sobre a superfície da membrana para mover o fluido ao lado da membrana é conseguido usualmente por intensa lavagem a ar com bolhas grossas. [23]

Ao longo dos anos, de modo a aumentar as forças hidrodinâmicas e reduzir a demanda de energia, foram propostas várias abordagens operacionais e geométricas: foram estudados dois regimes de borbulhamento, microbolhas e macrobolhas, em MBR paralelos de lâminas de placas planas. A energia de aeração média induzida para o borbulhamento com microbolhas, foi estimada em 2,07 kW h/m³ em comparação com 1,41 kW h/m³ para o borbulhamento com macrobolhas, destacando o potencial de fluxo de slug para economizar energia em MBRs de placa plana. Além disso, o fluxo tipo macrobolhas controla a incrustação melhor em comparação com a técnica de borbulhamento com microbolhas. [23] [49]

Aeração intermitente, aeração alternada com diferentes regimes de borbulhamento, introdução de grânulos/transportadores e promotores de turbulência (por exemplo, espaçador de membrana, defletores helicoidais) constituem as propostas abordadas. [23]

A modificação da forma e localização dos aeradores de membrana, ou seja, uma borda mais suave do tubo, aumentou a circulação do líquido em 30-50%, provavelmente resultando em menores requisitos para taxas de limpeza de ar. [23] [50]

Vários pesquisadores estudaram a introdução de um meio granular em MBRs submersas para mitigar a incrustação da membrana e, assim, reduzir os requisitos de aeração para a mesma, fornecendo limpeza mecânica para a superfície da membrana. A implementação de grânulos para o processo de limpeza mecânica (MCP) e programação PLC otimizada, permite uma operação de MBRs municipais com SED de 0,5 kW h/m³. A introdução de granulados reduziu a aeração em 50 % durante experimentos de bench-scale com MBRs de placa plana continuamente aerados. No entanto, um aspecto importante da limpeza mecânica com grânulos

ou transportadores, que requer mais estudos é a promoção de incrustação fisicamente irreversível e o risco de danos na superfície da membrana. Nos biorreatores de membrana com defletores (baffles) (BMBR), os defletores dividem o tanque de membrana em seções que durante a aeração, devido à diferença na pressão do gás e na densidade do fluido, crie um fluxo cruzado sobre a superfície da membrana. Ultimamente, o uso de defletores, inseridos no compartimento de membrana de MBR submersos, foram investigados para otimizar as condições hidráulicas no reator, a fim de melhorar a eficiência de aeração e aumentar a eficiência da limpeza mecânica com grânulos. [23]

Como métodos alternativos de limpeza de membrana de baixa energia, tem-se o cisalhamento na superfície da membrana gerado por vibração mecânica. Recentemente foram propostos sistemas de vibração diferentes, a saber, vibração transversal, movimento alternativo vertical, vibração de membrana induzida magneticamente (MMV) e vibração poderosa de alta freqüência (HFPV). Todos podem superar as limitações hidrodinâmicas do ar de limpeza da membrana e contribuir para uma operação com baixo consumo de ar de limpeza devido à implementação periódica de movimentos mecânicos. Por fim, sugere-se a aplicação de campos elétricos intermitentes para mitigação de incrustação como uma alternativa de poupança de energia para o air scouring. [23]

Formas inovadoras de diminuir os requisitos de energia já estão sendo transferidas das MBRs de demonstração para a prática, como exemplo a aeração com bolhas grossas. Processos de controle e automação, que limitam o fornecimento de ar sem pejudicar a qualidade do permeado e a incrustação da membrana também entrarão no mercado. [23]

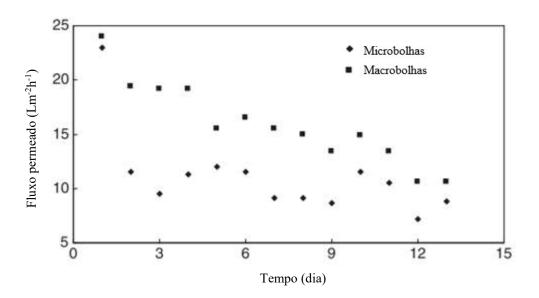
A aeração em MBR mitiga a incrustação da membrana, mas o consumo de energia para a aeração ainda é um dos principais custos operacionais para todos os MBRs. O efeito de diferentes características hidrodinâmicas induzidas por diferentes regimes de borbulhamento em canais retangulares, semelhante aos de MBR de placa plana, foi investigado com o objetivo de se obter um ótimo regime de borbulhamento para alcançar um método efetivo e econômico para aumentar o coeficiente de transferência de massa, induzir o alto cisalhamento na superfície da membrana enquanto consome apenas uma quantidade muito modesta de ar. Assim, foi investigada a propriedade anti-incrustante de dois regimes de borbulhamento diferentes em uma planta plana MBR de laboratório que trata as águas residuárias municipais, com taxas de aeração muito baixas. [49]

Esta investigação mostrou que o borbulhamento de ar com macrobolhas apresentou melhor desempenho anti-incrustante em MBR de placa plana sob operação de fluxo alto de curto prazo, como 36 h com um fluxo de 40 L m⁻² h⁻¹ e operação de fluxo moderado de longo

prazo de 14 dias com um fluxo inicial de 24 L m⁻² h⁻¹. A descoberta importante é que o borbulhamento com macrobolhas com baixa intensidade (2,5 L/min) deu uma excelente performance não só para limitar a incrustação reversível durante o período de borbulhamento, mas também para liberar a incrustação que ocorreu durante o período não borbulhante. Em contraste, a incrustação acumulada durante a aeração com microbolhas com a mesma intensidade de aeração, foi maior. Assim, na conclusão da publicação é citado que o borbulhamento com macrobolhas em MBR de placa plana, parece ser um regime de borbulhamento de economia de energia para substituir o borbulhamento com microbolhas, com valores SAD_p reduzidos de forma significativa. [49]

Para ambos os casos borbulhamento com macrobolhas e microbolhas para um fluxo constante de 24 L m⁻² h⁻¹ foi mantida para as primeiras 24h, no entanto, após este período houve uma forte diminuição do fluxo para o experimento com borbulhamento microbolhas. Em contrapartida, o declínio do fluxo de permeado foi mais moderado para o experimento com macrobolhas, como mostrado na Figura 24. [49]

Figura 24 - Mudança no fluxo de permeado para membranas aeradas por borbulhamento com macrobolhas e microbolhas durante longo tempo de operação



Fonte: Adaptado de ZHANG, K. et al., 2011. [49]

Assim, a demanda específica de aeração (m³/h de ar por m³/h de permeado, SAD_p) é mostrada na Figura 25. O SAD_p médio induzido pelo borbulhamento com microbolhas é quase 50 % mais elevado do que aquele induzido pelo borbulhamneto com macrobolhas, durante a

operação experimental. Para redução do custo operacional é necessário reduzir SAD_p para o MBR industrial, uma vez que a SAD_p se relaciona diretamente com o custo da energia de aeração para as membranas quando o sistema do aerador e a profundidade na operação no MBR são selecionados. [49]

Microbolhas

Macrobolhas

Macrobolhas

Tempo (dia)

Figura 25 - Demanda específica de aeração de MBR com borbulhamento tipo microbolhas e macrobolhas

Fonte: Adaptado de ZHANG, K. et al., 2011. [49]

A energia de aeração por unidade de permeado produzido na operação com livre ou slug borbulhamento destes experimentos é mostrada na Figura 26. O valor médio da energia da aeração da membrana para borbulhamento por microbolhas foi de 2,07 kW h/m³ enquanto que para o borbulhamento tipo slug o valor médio de energia foi de apenas 1,41 kW h/m³ durante a operação do MBR. [49]

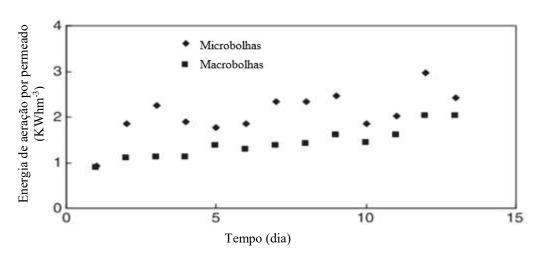


Figura 26 - Energia de aeração por permeado de MBR com borbulhamento tipo microbolhas e macrobolhas

Fonte: Adaptado de ZHANG, K. et al., 2011.

A principal desvantagem dos sistemas MBR em comparação com o processo de lodo ativado clássico (LAC) continua sendo o seu alto custo operacional. Isto ocorre principalmente porque até 70% da demanda total de energia dos sistemas MBR é para mitigar as incrustações por meio do ar como agente de limpeza (*air scouring*). Resultados operacionais de planta de escala completa apontam que a energia utilizada para mitigação de incrustação é usada de forma otimizada em apenas 10% do tempo de operação e, portanto, há oportunidades significativas para reduzir a demanda total de energia por sistemas MBR. [1] [51] [10]

A importância da dinâmica dos fluídos multifásicos para a mitigação de incrustação em sistemas MBR foi amplamente reconhecida com o uso de ar comercializado há cerca de 20 anos. [51]

O ar como agente de limpeza da membrana é usado para induzir favoráveis campos de fluxo hidrodinâmico na proximidade da superfície da membrana para promover o controle de incrustação. Esses campos de fluxo são induzidos pelas interações complexas entre os fluxos ortogonais e transversais e os redemoinhos turbulentos criados pelas bolhas ascendentes. [51]

As condições hidrodinâmicas na proximidade de uma membrana governam o tamanho da partícula depositada, a espessura e estrutura do bolo, bem como as comunidades de biofilme em um MBR. Ar como agente de limpeza da membrana (air scouring) aumenta significativamente as taxas de cisalhamento, mas o efeito sobre os níveis de controle de incrustação acima de um valor limite pode até ser prejudicial. Na prática, a lavagem a ar como meio de mitigação de contaminação continua a ser uma arte, que incentiva o funcionamento de MBRs com base na experiência em vez de uma compreensão física da condição. [51]

As investigações atuais se concentram nas tensões de cisalhamento que são induzidas pelo fluxo gás-líquido Para sistemas de folhas planas, muitos parâmetros de projeto geométrico e operacional ainda precisam ser otimizados (por exemplo, tamanho de bolha e espaçamento de membrana). A presença das paredes pode mudar significativamente a forma da bolha. Embora a velocidade de ascensão seja independente da largura do canal, a distância da placa influencia ao máximo possível o tamanho de bolha estável. Em comparação com as bolhas que se elevam em geometrias não confinadas, em canais estreitos, as bolhas menores quebram devido ao maior cisalhamento aparente. Conforme esperado, o cisalhamento maior pode ser alcançado para canais estreitos, no entanto, canais estreitos podem ficar entupidos facilmente em sistemas de lodos. [51]

Estudos de CFD foram realizados para quantificar o esforço máximo de cisalhamento da parede exercido por bolhas ascendentes em canais espaçados de forma diferente (ver Figura 27). Como esperado, as maiores tensões de cisalhamento foram obtidas para sistemas com os menores canais. Um aumento no tamanho da bolha acima de um diâmetro crítico não produziu maior esforço de cisalhamento. [51]

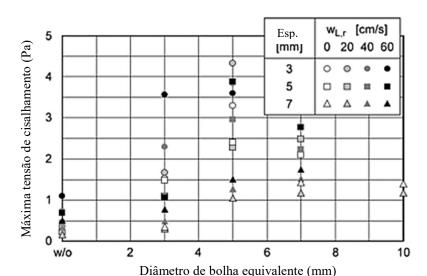


Figura 27 - Resultados de CFD para tensão máxima de cisalhamento de parede exercida por bolhas de tamanhos diferentes ascendendo na velocidade de subida terminal em canais de diferentes espaçamentos

Legenda: Esp. – espaçamento entre os canais. $W_{L,r}$ – velocidade de subida terminal Fonte: Adaptado de PRIESKE, H. *et al.*, 2010. [50]

A dinâmica de fluidos computacional (CFD) é uma estabelecida ferramenta que pode ser usada para obter informações mais aprofundadas sobre a relação entre a dinâmica dos fluidos e a incrustação da membrana. As publicações relacionadas ao CFD e a incrustação no MBR podem ser agrupadas em duas classes que diferem em tópicos, escalas observadas no espaço e no tempo e também nos modelos numéricos utilizados, assim, ora investigações de fluxo local nas proximidades da membrana é praticado e o objetivo é normalmente determinar o efeito de parâmetros geométricos e/ou operacionais sobre o esforço de cisalhamento na membrana, que tem sido identificado como o parâmetro mais importante para mitigação de incrustação e ora o fluxo global por conta da membrana é de interesse e o foco das investigações é geralmente o impacto de variações geométricas ou parâmetros operacionais na distribuição da fase gasosa e na velocidade de fluxo cruzado dentro do módulo de membrana. Portanto, a orientação e a posição das membranas, a localização dos aeradores e as dimensões dos reatores podem ser exploradas. [51]

Apesar do progresso no desenvolvimento de modelos numéricos e recursos computacionais, ainda existem limitações essenciais para a modelagem de fluxo em MBR, as quais dentre elas são destacadas: [51]

As propriedades do líquido real não são completamente mapeadas. As interações com e entre partículas, filamentos ou floculação não são consideradas. [51]

As membranas são consideradas como tendo uma geometria fixa. O balanço de fibras de membrana ou oscilação de painéis de membrana é normalmente negligenciado. [51]

A incrustação (*fouling*) em MBR é um problema complexo causado pela interação de fenômenos biológicos, químicos e físicos. Pesquisas recentes levaram ao surgimento de ferramentas de projeto de engenharia para otimizar a geometria do módulo e do tanque, bem como parâmetros operacionais com base em uma compreensão mais fundamental do efeito das condições hidrodinâmicas em MBRs no controle de incrustação. Isto tem contribuído para o desenvolvimento de novas estratégias inovadoras que resultam em uma redução de até 70 % nos custos de energia para o controle de incrustação. Mas ainda não existe um modelo válido que possa descrever de forma abrangente a relação entre a taxa de incrustação e as condições hidrodinâmicas. [51]

Embora o fluxo de duas fases gás/líquido tenha melhorado consideravelmente o desempenho de vários processos de membrana e tenha sido exaustivamente aplicado desde década de 1990, muitos fundamentos deste fluxo multifásico em MBRs ainda são desconhecidos e difíceis de acessar experimentalmente. Assim, as taxas de aeração aplicadas são normalmente baseadas em experiências anteriores e recomendações de fabricação. [10]

A demanda de aeração é geralmente apresentada em termos de valores específicos: taxa de fluxo de ar por área de superficie da membrana (SAD_m em m³/(m² h)) ou, mostrando importância econômica com a taxa de fluxo de ar por fluxo de permeado produzido (SAD_p em m³/m³). A velocidade superficial do ar (fluxo de ar por área de seção transversal do canal) é um parâmetro adequado para caracterizar a hidrodinâmica do sistema. Em MBRs de escala completa, os valores de SAD_m variam de 0,18 a 1,28 N m³/(m² h) e SAD_p de 10 a 65. [7] Normalmente, as membranas de placa plana apresentam maior SAD_m, mas valores SAD_p mais baixos, uma vez que são comumente operados com um fluxo mais elevado. [10]

Foram obtidas economias significativas por meio de ciclagem a ar ou borbulhamento intermitente. No entanto, a otimização de todos os parâmetros envolvidos no aumento da eficiência do escoamento do ar ainda não está no seu fim. [10]

Além da taxa de aeração e do tamanho da bolha (ou das portas do difusor), o módulo da membrana e a geometria do tanque (espaçamento entre membranas, folga da fibra, nível do líquido, áreas das sessões transversais do *riser* e *downcomer* etc.) têm efeitos decisivos sobre a velocidade de fluxo cruzado alcançada, esforço de cisalhamento e do contato bolha-membrana. Uma investigação hidrodinâmica sistemática terá, portanto, de levar em consideração vários

fundamentos deste fluxo de gás/líquido, começando pelo movimento de bolhas simples em módulos submersos, pelas colmeias de bolhas e, finalmente, focando no movimento do gás/líquido no tanque inteiro. [10]

Como a aeração é o maior fator de custo individual na operação de MBR, é claro que o maior salto para economia de energia e custos operacionais pode ser conseguido melhorando o uso do ar. Isso pode ser feito otimizando as geometrias do tanque MBR, do aerador e do módulo, como o uso de simulações CFD. Com a mesma taxa de fluxo de gás, um aumento de 30-50 % na velocidade de circulação do líquido foi conseguido por uma simples modificação do aerador e a zona de entrada na seção vertical. Deve-se também ter em mente que a hidrodinâmica não pode ser considerada independente dos fenômenos biológicos porque está intimamente relacionada com a reologia, o fornecimento de nutrientes, etc. [10]

Em sistemas submersos, a má distribuição de bolhas constitui grande preocupação. Várias técnicas são sugeridas para otimizar a distribuição das bolhas de ar nas membranas submersas. O posicionamento do difusor também tem sido uma variável estudada, sendo fundamental no controle da incrustação da membrana. [10]

Em módulos de folha de plana, esta distribuição incorreta ocorre tanto em um painel de membrana como em todo o módulo. Defletores foram introduzidos em módulos de placas planas para melhor distribuição de ar em um painel. Isso aumentou a área explorada, mas levou a uma diminuição da velocidade de circulação devido à resistência adicional causada pelos defletores. [10]

Uma zona de sedimentação de biomassa antes da filtração foi considerada, a fim de reduzir a concentração de MLSS diretamente em contato com a membrana. No entanto, essa estratégia deve ter um ótimo em termos de concentração de MLSS para além do qual um declínio na permeabilidade pode ocorrer devido ao reduzido diâmetro hidráulico do depósito produzido. [10]

É importante o uso de borbulhamento nos sistemas de membranas de baixa pressão como o MBR, para controlar a incrustação. Estratégias para melhorar a eficiência e, assim, reduzir a demanda de energia de borbulhar, está envolvido com questões de design de fibra, bem como a identificação do regime de borbulhamento ideal. A análise fundamental pela velocimetria de imagem de partículas (PIV) pode ajudar a identificar a bolha ideal e assim reduzir os requerimentos de energia. [52]

A técnica PIV faz uso de uma fina folha de luz laser que ilumina partículas de traçadores fluorescentes por uma duração muito curta. As imagens duplas, com cerca de 9 metros de distância, são gravadas digitalmente e processadas para fornecer uma matriz de vetores de

velocidade que caracterizam o movimento do líquido em função da posição e do tempo. Os dados podem ser convertidos em taxa de cisalhamento e tensão de cisalhamento no nível local. Ao se concentrar nas mudanças do vetor em uma região a menos de 1 mm da superfície da membrana, obtém-se variações locais e temporais no estresse de cisalhamento, como resultado de eventos únicos de bolhas. [52]

Embora estudos sejam realizados em escala laboratorial, eles levantam as questões: "o tamanho da bolha foi otimizado para fibras ocas submersas, e esse tamanho ótimo de bolha pode levar a uma demanda de energia mais baixa para o ar como agente de limpeza da membrana"? [52]

Efeito de condições hidrodinâmicas no fouling da membrana

Em MBR com configuração de membranas submergida, a tensão de cisalhamento é provocada pela aeração, que além de esfregar a superfície da membrana para mitigar as incrustações, abastece oxigênio para a biomassa e mantém os sólidos em suspensão. [24]

A aeração é um parâmetro importante que determina tanto o tamanho dos flocos do lodo como o controle da incrustação. Uma alta taxa de aeração realmente pode reduzir o ataque do lodo às membranas, mas em contrapartida tem uma influência negativa nas características da biomassa, pois, uma intensidade de aeração muito alta levará à quebra de flocos de lodo e produção de SMP prejudicando a função de mitigar a incrustação. [24]

Condições hidrodinâmicas favoráveis que mitigam a incrustação de membrana

A interação do fluxo de duas fases com as membranas em MBRs é uma questão complexa. Nos últimos anos, modelagem e simulação matemática CFD (por exemplo, Ahmad et al., 2005), tem sido utilizada para análise da hidrodinâmica e do padrão de escoamento do fluido adjacente à membrana. A simulação de fluxo multi-fase por técnica de CFD pode fornecer uma maior compreensão do mecanismo de incrustação, e provou ser uma ferramenta poderosa para auxiliar o projeto de membrana e módulo. Em estudos da incrustação em um MBR de placa plana submersa usando caracterização de fluxo de duas fases e simulação CFD,

verificou-se que ao aumentar o tamanho da bolha, ocorreu aumento do fluxo principalmente pelo aumento da tensão de cisalhamento geral na membrana e pela maior turbulência gerada pela introdução da fase gasosa. [24]

Em adição para a intensidade da aeração, as propriedades reológicas de suspensão de lodos além de impactarem fortemente na transferência de oxigênio e condicionamento de lodo no próximo passo, influencia também nos fenômenos de transporte perto da superfície da membrana. Para uma determinada intensidade de aeração, o aumento da viscosidade das lamas enfraquecerá as condições hidrodinâmicas próximas das membranas. Um exemplo é a diminuição acentuada do esforço de cisalhamento na superfície da membrana com aumento da viscosidade das lamas. Foi proposto um modo de aeração intermitente, que permite que as lamas ativadas reestruturem e possam efetivamente evitar a incrustação de MBR, de acordo com as propriedades reológicas das lamas ativadas. De particular interesse é a economia de energia da aeração intermitente. [24]

Em resumo, o aprimoramento das condições hidrodinâmicas é uma das abordagens efetivas para mitigar a incrustação de membrana em MBRs. Mas, as condições hidrodinâmicas têm uma relação próxima com intensidade de aeração, tamanho de bolha, módulo de membrana configuração, concentração de MLSS e viscosidade de lamas etc. [24]

Portanto, as condições hidrodinâmicas em MBRs são muito complexas. Modelagem CFD e simulação, combinadas com otimização do modulo da membrana e aeração podem ser úteis para a melhoria das condições hidrodinâmicas. [24]

Nos processos MBR com membrana submersa, a membrana pode ser de placas planas verticais, fibras ocas verticais ou horizontais ou, mais raramente, como tubos. As membranas geralmente são montadas em módulos ou cassetes, que incluem portas de aeração, conexões de fluxo permeado e quadros de suporte. O uso de borbulhamento grosseiro de ar na parte inferior do módulo de membrana tem um papel triplo: a aeração não só fornece oxigênio extra, mantém a biomassa em suspensão e também produz uma velocidade turbulenta de fluxo em duas fases (estimado em torno de 0,2-0,4 m/s) na superficie da membrana, limitando a deposição de incrustação. [53] Os módulos de fibra oca geralmente são mais baratos de fabricar, permitem alta densidade de empacotamento da membrana e podem tolerar uma vigorosa contra lavagem. No entanto, a dinâmica e as distribuições de fluidos podem ser provavelmente mais fáceis de controlar para placas planas e membranas tubulares, onde a largura do canal da membrana está bem definida. [20] Como resultado, as fibras ocas podem ser mais propensas a incrustação e obstrução, exigindo lavagem e limpeza mais freqüentes. [14]

Os MBR e os efeitos dos fluxos de duas fases que circulam na superfície da membrana foram extensivamente revisados. [20] No caso do MBR de fibra oca, a aeração também resulta em movimento de fibras, o que limita a deposição de materiais na superfície deles. Agora, já é conhecido que, uma vez que um determinado fluxo de ar é excedido, não é observada nenhuma limitação de incrustação significativa. Isso permite a possível otimização da taxa de aeração para um determinado projeto MBR e conjunto de condições operacionais. Embora poucos estudos tenham indicado o maior desempenho obtido com bolhas de tamanho pequeno, a grande maioria da literatura reconhece que grandes bolhas criam relativamente mais turbulência e, portanto, apresentam uma melhor opção para a estratégia anti-incrustação. [14]

O uso de agentes de limpeza em aplicações de MBR recebeu atenção como uma nova abordagem como uma maneira eficiente energéticamente para controlar a incrustação de membrana. Recentemente, a limpeza mecânica por agentes de limpeza está se tornando uma área de pesquisa intensa considerando alta eficiência de redução de incrustação, enquanto requer baixo consumo de energia. [54]

A filtração sempre induz a acumulação de uma camada de membrana dinâmica na superfície da membrana, proporcionando uma resistência extra. O regime de fluxo turbulento induzido pelas bolhas só pode reduzir a espessura desta camada limite laminar, enquanto que os agentes de limpeza (partículas) podem atravessar esta camada e quebrar a camada de membrana dinâmica. [54]

Partículas de carvão ativado, como carvão ativado granular (GAC) ou carvão ativado em pó (PAC) tem sido amplamente aplicados como agentes mecânicos de limpeza *scouring* media, para reduzir a incrustação de membrana em sistemas MBR. As partículas de carbono ativado são bem conhecidas como adsorventes eficazes para remover impurezas orgânicas das águas residuárias. Assim, a funcionalidade de adsorção das partículas de carvão ativado pode melhorar não só a remoção orgânica no permeado da membrana, mas também reduzir a incrustação de membrana por suas ações de limpeza na membrana. [54]

Muitos parâmetros, entre eles hidrodinâmica (esforço de cisalhamento), características do agente mecânico de limpeza *scouring* média, integridade da membrana, composição da carga, camada do bolo da incrustação, estão envolvidos no sucesso da limpeza mecânica. O envolvimento destes vários fatores afeta a limpeza mecânica em vários MBRs, tornando-se necessário se entender bem o efeito de cada fator e suas interações. [54]

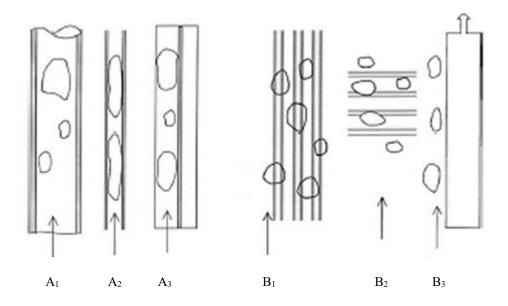
Para futuros trabalhos a pesquisa deve se mover na direção de uma melhor compreensão fundamental dos mecanismos implícitos e da hidrodinâmica dos diferentes parâmetros de limpeza mecânica, onde as características da media, o módulo de membrana, a geometria do

sistema MBR, a hidrodinâmica do fluxo multi-fase deve ser incorporadas em um modelo hidrodinâmico sólido/gás/liquido. Uma vez que a eficiência energética é um problema importante no tratamento de águas residuárias, o processo de limpeza mecânica é o ponto chave do MBR para a próxima geração. [54]

O surgimento das membranas submersas ou imersas, por um lado, eliminou a necessidade do módulo pressurizado, mas, por outro lado, forneceu um desafio para controlar a polarização da concentração e a incrustação. Borbulhamento é uma estratégia óbvia para induzir fluxo e produzir cisalhamento na superfície da membrana em sistemas submersos. [20]

Conforme ilustrado na Figura 28, os sistemas submersos incorporam fibras ocas ou folhas planas. Enquanto as folhas planas são verticais, as fibras ocas são usadas verticalmente ou horizontalmente, de modo que as bolhas ascendentes se movem axialmente ou transversalmente para as fibras. Normalmente, a alimentação está em contato com o exterior das fibras (a abordagem de fora), embora haja exceções a isso. [20]

Figura 28 – Representação esquemática de vários arranjos de borbulhamento em membranas



Legenda: A_1 – microbolhas/macrobolhas dentro do tubo; A_2 – dentro da fibra oca; A_3 – dentro da célula de fluxo cruzado; B_1 – microbolhas/macrobolhas sobre fibras ocas verticais; B_2 – sobre fibras ocas transversais; B_3 – sobre placas planas.

Fonte: Adaptado de CUI, Z.F. et al., 2003. [20]

Nas membranas de folhas planas as suas superfícies estão localizadas com precisão, ao contrário dos feixes de fibra oca, ficando mais acessíveis a bolhas bem direcionadas. Isto constitui uma vantagem potencial. Como desvantagens são relatadas a menor densidade de empacotamento, inferior em 25 % e a lavagem contracorrente vigorosa não é viável. [20]

Uma comparação com MBRs de placas planas e MBRs de fibra oca foi realizada por meio de uma investigação paralela desses dois sistemas de membrana instalados dentro de um biorreator de 7 e 9 m³, que tinham o mesmo afluente e condições operacionais similares. Os resultados mostraram que ambos os sistemas podem obter uma excelente qualidade de tratamento, mas o desempenho hidráulico da placa plana pareceu um pouco melhor do que o dos módulos de fibra oca, conforme mostrado na Tabela 12. A melhor distribuição de bolhas nos canais planos bem definidos e a perda de força motriz no sistema de fibra oca devido às quedas de pressão do lúmen, foram citadas como possíveis explicações para o melhor desempenho hidráulico da placa plana. [20]

Tabela 12- Desempenho hidráulico de placa plana e fibra oca

	Placa plana, 80m² (0,4μm)	Fibra oca, 83,4 m^2 (0,2 μ m, d_0 = 2mm)
Parâmetros de processo	COD: 200-300 mg/L, MLSS:	COD: 200-300 mg/L, MLSS: 12-18 g/L,
	12-16 g/L, SRT: 20-25 dias	SRT: 15-20 dias
Operação continua		
Condições operacionais	Flux: 18L/m²h; 8 min sucção, 2 min pausa	Flux: 17L/ m² h; 3,5 min sucção, 2s retrolavagem
Tempo de corrida (dia)	54	54
Limpeza química	Não	Não
Pressão (kPa)	6-8	28-24
Permeabilidade (L/m² h bar)	200	60
Operação com picos		
Fluxo máximo (L/m²h)	30	24
Pressão (kPa)	32	48

Fonte: Adaptado de Cui, Z.F. et al., 2003.

Aeração

As bolhas geradas pela aeração, além de suprir o oxigênio necessário à biomassa, são essenciais para limitar a formação de depósito na superfície das membranas. Por isso, a maioria dos MBR com módulo de membrana submerso utiliza configuração em que as bolhas entram em contato com a superfície da membrana, gerando tensões de cisalhamento moderadas, que

são responsáveis pela remoção parcial ou mesmo total da torta. A operação com altas concentrações de biomassa causa sérios problemas com relação à aeração, pois são necessárias altas vazões de ar para suprir oxigênio suficiente, bem como superar a dificuldade de "lavar" as membranas com bolhas, em função da alta concentração de sólidos do meio reacional. A influência da aeração no processo de transferência de oxigênio é bastante complexa, porém, geralmente, considera-se que o aumento da vazão resulta em elevação da taxa de transferência. Isso ocorre por efeito da turbulência causada pelas bolhas. [21]

As reações bioquímicas que ocorrem no interior do tanque de aeração são mantidas pelo sistema de aeração que transfere continuamente oxigênio e permitem a manutenção do metabolismo de microrganismos aeróbios. Devido à dificuldade de se difundir oxigênio no meio líquido, os sistemas de aeração são os principais responsáveis pelo alto consumo energético das plantas de lodos ativados. [44]

Sabe-se que os MBR usam mais energia em comparação com o lodo ativado clássico (LAC) porque os requisitos de aeração são maiores. A aeração é necessária tanto para os tanques biológicos quanto para membranas para degradar os orgânicos e esfregar a membrana, respectivamente. Normalmente, o consumo de energia de aeração representa 70-80 % da energia total utilizada para o processo de tratamento de águas residuárias municipais, com 40-60 % consumidos pela biologia do processo. Claramente, usar menos ar pode ir de alguma forma para reduzir os custos operacionais. A aeração de membrana é normalmente conseguida por meio de aeradores de bolhas grossas posicionados sob as unidades de módulos de membrana. [55]

2.4 Valores da literatura referentes a parâmetros operacionais, eficiências de tratamento, taxa de aeração, consumo específico de energia, entre outros, para MBR aeróbios

2.4.1 Parâmetros Operacionais de MBR

Os parâmetros operacionais do MBR já foram citados na Tabela 6 (p. 64) dentre os quais a razão carga orgânica/microrganismo, tempo de retenção hidráulica, tempo de retenção de sólidos entre outrs. [14]

Adicionalmente, para uma estação de tratamento de água residuária municipal em Schilde (Bélgica) as condições operacionais foram também citadas, conforme Tabela 7 (p. 64)

na qual se observa as diferenças entre MLSS, SRT e HRT para as duas tecnologias LAC e MBR. [42]

2.4.2 Eficiência de remoção da matéria orgânica

Para as eficiências de remoção da matéria orgânica foram encontradas referências para o caso de MBR tratando efluentes de laticínios em Minas Gerais e no Uruguai em planta de bancada de 5,5L e planta piloto de 1400L, respectivamente, conforme a seguir:

Planta de bancada de Minas Gerais : Eficiência MBR para DQO = 99,1%. [56]

Para a planta piloto do Uruguai a eficiência de remoção de matéria orgânica para DBO variou de 85 a 99 % e para DQO de 80 a 98 %. [57]

Adicionalmente para efluente de refinaria de petróleo, a literatura mostrou os dados citados anteriormente na Tabela 2 (p. 29). [13]

Por fim, a Tabela 8 (p. 67) também apresenta dados operacionais típicos e de performance para MBR. [44]

2.4.3 Demandas específicas de aeração, SAD_m e SAD_p

Para as demandas específicas de aeração (SAD_m e SAD_p) nos MBRs foram encontradas na literatura, as faixas citadas na Tabela 13. Foram também revisados os valores da Tabela 14, para MBRs tratando efluentes municipais no nordeste da Espanha.

Tabela 13 - Faixas de valores de SAD_m e SAD_p

Autores	$SAD_{m} (N m^{3} h^{-1} m^{-2})$	SAD_p
B. Verrecht et al., 2008, apud	0,21 a 0,88	-
Kola 2013		
Judd, 2006 apud Drews A.2010	0,18 a 1,28	10 a 65

Fonte: A autora, 2018, com dados da literatura.

Tabela 14 - Valores de SAD_m e SAD_p para MBRs tratando efluentes municipais no Nordeste da Espanha

Parâmetros	A	В	C	D	E	F	G
Vazão	21	18	18	23	24	25	27
Modelo de	Kubota	ZeeWeed	ZeeWeed	ZeeWeed	Kubota	ZeeWeed	ZeeWeed
membrana	EK 400	500d	500d	500c	EK 400	500d	500d

Tabela 14 - Valores de SAD_m e SAD_p para MBRs tratando efluentes municipais no Nordeste da Espanha (conclusão)

(conc.	iusao)						
Número de	14	80	96	264	192	1848	720
módulos							
Área de	4410	2526	3030	5808	61440	58400	22752
membrana (m²)							
SAD _m ^a (m h ⁻¹)	0,65	0,31	0,31	0,37	0,53	0,33	0,31
$SAD_p^b (m^3 m^{-3})$	31,9	17,5	17,09	15,9	22,1	14,4	11,4

Legenda: ^aSAD_m - demanda de aeração específica por superfície de membrana; ^bSAD_p - demanda de aeração específica por fluxo de permeado.

Fonte: Adaptado de GABARRON, S. et al, 2014.

2.4.4 Consumo Específico de Energia

Para o consumo específico de energia para MBRs tratando efluentes municipais, foram encontrados na literatura os valores da tabela 15.

Tabela 15 - Consumo específico de energia para MBRs tratando efluentes municipais

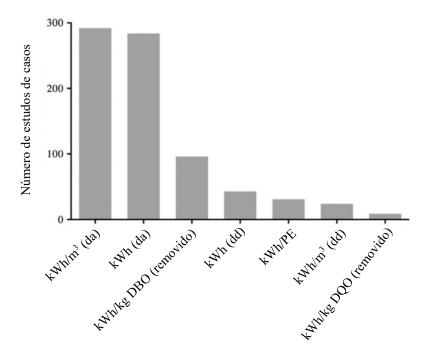
Autores	kW h/m³	kW h/kg DBO	kW h/kg DQO removido
	0,8-2,4 na França		
	0,8- 3,0 no Japão		
	0,4-0,6 na China		
Krzeminski, P. et al.	0,4- 2,1 na Espanha		
2017	0,8-1,1 nos Países Baixos 0,7-1,8 na		
2017	Alemanha		
	>3 - sistemas pequenos e		
	descentralizados		
Krzeminski, P. et al.	Tabela plantas variando de 0,4 a 4,23		
2012	0,7-0,8 próximo ao fluxo projeto e		
	clima seco		
Barillon et al. 2013	0,5 a 0,7	4,2 a 5,7	
	0,4 Ulu Pandan Singapura	Placa plana	
	0,8 a 3,0 (11 plantas capacidade		
Itokawa, H. et al.	acima 20% projeto) Japão		
2014	0,4 - Unidade demonstração várias		
	otimizações (membranas, bombas,		
	misturadores) em planta piloto e		
	fabricantes de membranas.		
			França – 3,3
Longo Stofono 2016			Canadá – 1,85
Longo Stefano 2016			USA - 1,31
			Espanha -0,97
			Alemanha – 0,95
			Italia – 0,85

Fonte: A autora, 2018, com dados obtidos da revisão da literatura.

2.4.5 Frequências estatísticas de como os dados de energia são reportados na literatura para efluentes municipais

As frequências estatísticas de como os dados de energia são relatados na literatura, são mostrados na Figura 29 e foram resultados de 600 publicações para ETEs - (Estação de Tratamento de efluentes municipais).

Figura 29 - Frequências estatísticas de como os dados de energia são relatados na literatura



Legenda: (da) – dados agregados; (dd) – dados desagregados.

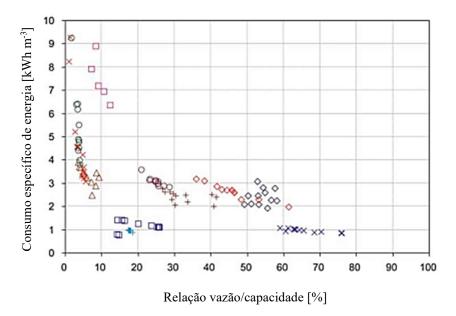
Fonte: Adaptado de LONGO, S. et al., 2016. [58]

Como mostrado na Figura 29, na maioria dos estudos analisados (cerca de 90 %), o consumo de energia de ETEs é reportado como o consumo global médio (dados agregados). Dados publicados desagregados (isto é, consumo de energia de cada um dos processos e seções de uma ETEs) são consideravelmente mais escassos na literatura.

2.4.6 Efeito do aumento de capacidade em unidades do Japão

A Figura 30 mostra a média mensal do consumo específico de energia de 11 MBRs de pequena escala no Japão com o efeito do aumento da relação vazão/capacidade sobre este consumo. [29]

Figura 30 – Média mensal do consumo de energia específico em 11 plantas de MBRs de pequena escala no Japão



Nota: Cada planta está designada por um símbolo diferente. O consumo de energia para MBR inclui o gradeamento do afluente e as bombas de equalização de fluxo.

Fonte: Adaptado de ITOKAWA, H. et al. 2014. [29]

2.4.7 Contribuições das parcelas que compõe o custo de capital (CAPEX) e custo operacional (OPEX) em uma planta de MBR

As contribuições das parcelas que compõem o *CAPEX* (custo de capital) e *OPEX* de uma planta de MBR são mostradas na Tabela 16.

Verifica-se o elevado valor % que as membranas ocupam no *CAPEX* e o elevado valor atribuído ao consumo de energia no *OPEX*.

Tabela 16 – Parcelas que compõe o custo de capital (CAPEX) e custo operacional (OPEX) em uma planta de MBR

	Unidade	MBR - Parte de uma planta híbrida
Vazão médio de afluente	m ³ /d	20.851
Máxima vazão para o MBR	m ³ /d	20.851
Volume total do tanque	m^3	6949
Média DQO	mg/L	32,6
Média N como NH ₄	mg/L	0,18
Média Nitrogênio como NO ₃	mg/L	17,7
Custo total de capital (CAPEX)	€	4.070.432
Telas	%	10,1
Membranas	%	53,4
Construção do tanque	%	26,6
Sopradores biológicos	%	1,6
Sopradores de membrana	%	1,7
Equipamentos de mistura	%	2,1
Recirculação de bombas	%	2
Custo operacional (OPEX)	€/ano	649.266
Energia	%	81,2
Tratamento e disposição do lodo	%	16,4
Químicos	%	2,4

Fonte: Adaptado de JUDD, S., 2011, p. 261.

2.4.8 Dados do estudo de viabilidade técnica econômica de uma configuração com MBR e nanofiltração para reuso de água de efluentes de laticínios em Minas Gerais

Em um estudo de viabilidade técnica econômica de uma configuração com MBR e Nanofiltração foram citados dados de consumo de energia e de preços praticados no Brasil, conforme abaixo: [59]

- Custo da membrana de microfiltração R $$280/m^2 = 84 \text{ US}/m^2$
- Custo da membrana de nanofiltração R $$400/m^2 = 120 \text{ US}/m^2$
- Consumo de Energia no MBR 1,1 kW h/m³
- Capacidade Planta de MBR 1.000 m³/h de permeado para nanofiltração
- Investimento em MBR e Nano filtração R\$ 5.000.000,00

2.5 Custo operacional e demanda de energia nos MBR

O sistema MBR normalmente apresenta custo operacional maior que o LAC, principalmente os custos relativos ao consumo de energia. Esta energia é, em sua maioria, consumida pela aeração tanto no reator biológico para a degradação dos poluentes quanto para mitigar a incrustação da membrana. [9]

No processo MBR, o percentual da energia da aeração é de 70-80 % do consumo do total da energia consumida no tratamento de águas residuárias municipais, com 40-60 % consumidos pela etapa biologica do processo. Assim, a otimização da aeração em MBRs é, portanto, de suma importância para redução do custo operacional e para o sucessivo aumento da competitividade da tecnologia MBR. [9]

Os custos de operação de uma planta de MBR são principalmente custos energia devido à demanda de energia (para aeração, bombeio e agitadores), de tratamento e eliminação de lodo, e custos pelo uso de produtos químicos para limpeza de membranas, conforme Figura 31 abaixo: [1]

Figura 31 – Impacto no OPEX

Consumo de energia

- Energia de aeração
 - Energia de aeração da membrana
 - Energia de aeração biológica
- Energia bombeio
 - Recirculação da biomassa
 - Bombeio do permeado
- Energia de misturadores

Tratamento e disposição do lodo

Custo de limpeza química

Fonte: Adaptado de JUDD, S.J., 2011, p. 256. [1]

Aeração é o maior fator de custo individual em operação MBR. Assim, o maior salto para a economia de custos operacionais de energia pode ser alcançado com a melhoria da utilização do ar. [10]

Com alto requerimento de energia e com até 70 % do total custos de energia, a aeração da membrana é a maior contribuição para os custos operacionais. A partir de 10 anos de experiência de operação de uma MBR de escala completa, descobriu-se que apenas em 10 % do tempo de operação, isto é, durante as cargas máximas, a energia fornecida é usada de forma otimizada. Isso mostra o grande potencial de otimização da aeração. [10]

O custo operacional em MBRs é composto de custos de demanda de energia, tratamento e disposição do lodo, e do uso químico para limpeza de membranas. [17]

A análise de custos dos sistemas MBR industriais deve ser semelhante à dos MBRs para tratamento de águas residuárias municipais, embora mais precauções e medidas de póspolimento envolvidas em tratamentos industriais de águas residuárias possam ser adiconadas aos custos gerais. [17]

Devido à uma ampla gama de valores de DQO, alto teor de sal e pouca informação confiável sobre o custo, é difícil resumir uma faixa estreita do valor de custo para aplicações industriais de águas residuárias. Estudos sugerem que a taxa de aeração e o fluxo de membrana afetam significativamente os custos de operação. O equilíbrio de fluxo e taxa de aeração representa um aspecto fundamental do projeto e operação MBR. [17]

Foi relatado que a aeração é um importante consumidor de energia, muitas vezes excede 50 % do consumo total de energia, com um mínimo de 35 % para a aeração da membrana. [31]

Componentes energéticos específicos

A Figura 32 mostra a distribuição percentual do consumo de energia em MBR de placa plana de escala completa em Heenvliet. A aeração é o principal componente do consumo de energia, pois os ventiladores que fornecem ar para a limpeza da membrana e o processo biológico contribuem para quase 70 % da demanda total de energia. A aeração de bolhas grossas é o maior consumidor sendo 56 % e 0,48 kW h/m³; a demanda por energia da aeração de processo é de 11 %; misturadores e bombas de recirculação consomem 9 e 6 %, respectivamente. O restante, 17 %, está associado principalmente ao bombeamento, isto é,

recirculação, extração de permeado e descarga de lodo, pré-tratamento, misturadores e aquecedores durante os meses de inverno. [31]

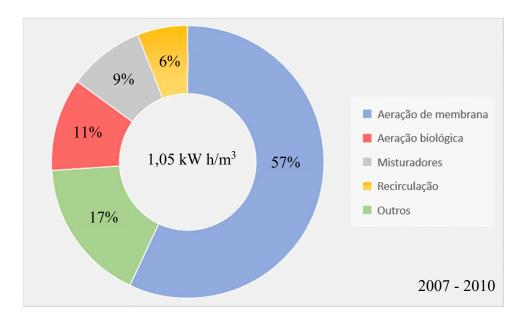


Figura 32 - Distribuição percentual do consumo de energia na MBR em Heenvliet - Holanda

Fonte: Adaptado de Krzeminski, P., Van Der Graaf, J. H.J.M., Van Lier, J.B., 2012. [31]

Foi citado que o consumo específico de energia para a aeração da membrana na placa plana MBR foi 33-37 % maior do que na fibra oca. [31]

Uma análise do custo de biorreator de membrana com capacidade de 500-2.500 m³/h e com base na tecnologia de membrana de placa plana revelou: [60]

- CAPEX (despesa de capital) aumenta com o fluxo de acordo com um expoente de valor de 0,87
- OPEX (despesa operacional por m3 de água tratada) diminui logaritmicamente com fluxo,

As contribuições de custo individual para os componentes pequenos MBR (capacidade de fluxo de 100-2.500 m³/d) são detalhadas e agrupadas para gerar custos gerais de capital e operação (CAPEX e OPEX) em função do tamanho. As curvas de custo, em função da capacidade de fluxo, indicam uma função logarítmica para OPEX. As correlações de OPEX estavam em concordância quantitativa com as relatadas na literatura. [60]

Três diferentes capacidades de plantas foram consideradas: 100, 500 e 2.500 m³/d. As especificações para os componentes: tanques, bombas, sopradores, misturadores, membranas e

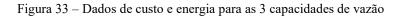
difusores foram utilizadas para obter custos detalhados fornecidos pelos fornecedores regionais em Taiwan e do sul da China. [60]

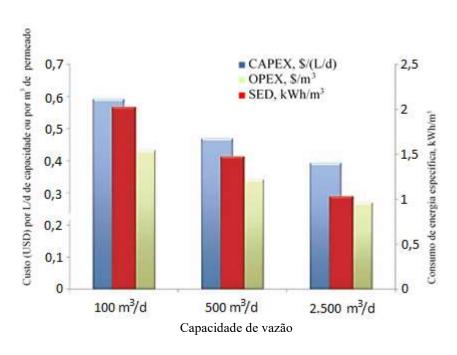
As correlações para custos absolutos (Figura 33) revelam a diminuição esperada no custo com capacidade da planta. De acordo com esses dados, com base nos dados de custo disponíveis e nas condições descritas, as tendências de custo seguem as relações com capacidade de vazão Q: [60]

$$CAPEX = 1060Q^{0,872}$$
 Equação 14

$$OPEX = -0.0509lnQ + 0.664$$
 Equação 15

O foco deste item é o OPEX.





Fonte: Adaptado de LO, C.H. et al., 2015. [60]

Nos MBRs o consumo de energia está diretamente ligado com a aeração tanto para o reator biológico como para o controle de incrustação na membrana, assim muito já foi dissertado sobre este tema no capítulo 1. Neste ponto da dissertação foca-se mais na pesquisa bibliográfica voltada para metodologia de avaliação de eficiência energética por meio dos cálculos de consumo de energia e nos valores de consumo energético encontrados em plantas de MBR, já em operação.

De 1960 a 1980, no início do processo MBR, o consumo energético era de 3 a 6 kW h/m³ de carga a ser tratada, impactando grandemente o sucesso comercial desta tecnologia. Mas em torno da virada do milênio, com a introdução da membrana imersa e posterior otimização no consumo energético da aeração, este valor caiu para em torno de 1 kW h/m³ e já é reportado consumo em torno de 0,5 kW h/m³ para unidades de carga elevada, que é comparável com a energia requerida em tratamentos convencionais de águas residuárias. [34]

É muito difícil manter estes níveis, de consumo energético, devido às sazonalidades e cargas diferentes das condições otimas nos MBRs. [23]

Em sistemas pequenos e descentralizados, os MBR sofrem de *down-scale* abordagem de design de MBRs grandes resultando em requisitos de energia específicos elevados (muitas vezes superiores a 3 kW h/m³). [23]

Por outro lado, citam que a operação em condições de fluxo ótimas, isto é, próximo ao fluxo de projeto em condições de clima seco (DWF), resulta em baixo consumo de energia específico de cerca de 0,7-0,8 kW h/m³. [31] Ver Figura 9 (p. 47).

De acordo com os dados recentemente relatados de MBRs municipais de grande escala, o consumo anual médio de energia varia entre (Vide Tabela 15): 0,8 -2,4 kW h/m³ na França, 0,8 - 3,0 kW h/m³ no Japão, 0,4 - 0,6 kW h/m³ na China, 0,4 - 2,1 kW h/m³ em Espanha, 0,8 - 1,1 kW h/m³ nos Países Baixos e 0,7 - 1,8 kW h/m³ na Alemanha. [23]

Três indicadores de performance de energia foram definidos, a saber: [58]

$$KPI_1 = \frac{consumo de energia elétrica}{volume de água residuária tratada} \left[\frac{kWh}{m^3}\right]$$
 Equação 16

$$\mathit{KPI}_2 = \frac{\mathit{consumo de energia elétrica}}{\mathit{PE servido}} \left[\frac{\mathit{kWh}}{\mathit{PE ano}} \right]$$
 Equação 17

$$\textit{KPI}_3 = \frac{\textit{consumo de energia elétrica}}{\textit{DQO remivida}} \left[\frac{\textit{kWh}}{\textit{kg DQO}_{removida}} \right]$$
 Equação 18

Na presente dissertação são utilizados os indicadores de numero (1) e (3). Embora a maioria da literatura utilize a expressão (1), ao comparar o consumo de energia em kW h/m³ ou kW h/PE, assume-se que as concentrações de poluentes no afluente (sólidos, matéria orgânica, nitrogênio e fósforo) não variam significativamente entre as ETEs ou as qualidades dos efluentes também são semelhantes, restringindo assim a aplicação dessas abordagens. [58]

Foi citado também que estudos que relatam o consumo de energia de ETEs em kW h/m³ geralmente resultam em valores que são influenciados pelo grau de diluição das águas residuárias. Por exemplo, no caso de plantas que tratam as águas residuárias combinados com esgoto geralmente mostram maior eficiência energética, o que é causado pela maior diluição dos poluentes no afluente. [58]

Para o KPI (Indicador de Performance Chave) como função da energia elétrica consumida por carga orgânica reduzida, equação (3), a vantagem de informar o consumo de energia por unidade de poluente removido depende do fato de que a remoção de matéria orgânica e nutrientes são os principais contribuintes do consumo de energia nas ETEs. [58]

Existe a necessidade de estabelecer KPIs adequados dentro da ETEs que permitem uma forma comparável, realista e universal de relatar os dados de energia. A escolha do KPI apropriado deve estar relacionada à função da ETEs.

Uma das conclusões citadas é que as abordagens de normalização, baseadas em KPIs únicos, podem ser adequadas para condições semelhantes, ETEs similares ou tecnologias similares/processos, mas não para avaliação global de plantas complexas em diferentes ambientes. [58]

Consumo de Energia Elétrica

Os dados de consumo de energia elétrica reportado como kW h para plantas municipais são baseados na potência elétrica consumida em cada ponto investigado. [31] Os dados específicos de consumo de energia são relatados como consumo específico de eletricidade por volume de águas residuárias tratadas e expressos em kW h/m³. Vide Tabela 3 (p. 49) e Tabela 17.

Tabela 17 – Resumo de dados de consumo de energia em instalações de MBR de efluentes municipais na Holanda

Item	Heenvllet MBR	Varsseveld MBR	Terneuzen MBR
Período de estudo	2008-2010	2005-2010	2010
Vazão projeto para fluxo climático seco	36.000	180.000	288.000
[m³/mês]			
Vazão tratada [m³/mês]	27.826	132.054	169.984
Energia mensal requerida [kW h]			
Máximo	33.869	146,051	166,332
Média	22.700	110.486	154,636
Mínimo	14.165	58.408	146.581
Energia diária requerida [kW h]	1.788	N.A.	5.888
Energia anual requerida [kW h]	227.001	1.325.833	N.A.
Consumo específico de energia [kW h/m³]			
Máximo	1,82	1,44	1,28
Média	1,06	0,84	0,97
Mínimo	0,77	0,60	0,76
Consumo específico de energia em 2008	89	67	N.A.
[kW h/PE]			

Fonte: Adaptado de Krzeminski, P., Van Der Graaf, J. H.J.M., Van Lier, J.B., 2012.

Na Europa a estimativa do consumo de energia com base na potência instantânea e no tempo de operação ainda é amplamente utilizada. [58]

Potência Elétrica

Para o cálculo da potência elétrica consumida em cada equipamento do MBR, inicialmente foi feito uma triagem dos equipamentos diretamente envolvidos com o MBR. [61]

Em seguida foi realizada a medição da corrente I no campo por meio de um multímetro digital (Voltcraft VC280) equipado com uma braçadeira de corrente (CLA-40 VC200). Como os motores eram sistemas trifásicos, portanto, a potência (P) de cada dispositivo foi calculada

112

considerando o valor médio obtido de três medidas de corrente (I), a voltagem (V), igual a 360 V no caso do artigo,mas no case desta dissertação é 220V e o fator de potência (Ø, especificado para cada dispositivo), de acordo com a Equação 19. [61]

$$P = \sqrt{3}.V.I.cos\emptyset$$
 Equação 19

Para a qual:

P= Potência (Watts) P/1000 = kW

V= Voltagem, igual a 220V

I = corrente (Ampères)

Ø = fator de potência

Medições de energia em seis plantas de escala industrial de MBR nos EUA, Espanha e França, tratando águas residuárias municipais, foram realizadas em todos os motores, incluindo potência consumida, tensão, intensidade de corrente e cos Ø, isso na freqüência média dos motores equipados com uma unidade de freqüência variável. A partir do tempo de operação de cada motor, registrado pela supervisão durante o monitoramento de longo prazo da planta (pelo menos 1 ano), o consumo de energia específico em kW h versus vazão diária ou carga orgânica diária foi calculado por esta abordagem, em kW h/m³ ou kW h/kg DBO₅. [28]

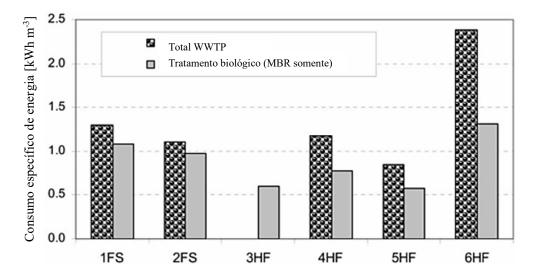
Escopo do consumo de energia

Relata-se sobre a importância e a atenção para que o escopo do consumo de energia seja sempre delimitado, se por exemplo o consumo é para toda a planta ou apenas ao tratamento biológico incluindo a unidade de filtração com as membranas, pois os valores de consumo energético específico (razões de energia) encontrados na literatura não mencionam o escopo do cálculo da demanda de energia. E é complementado que, dependendo do projeto da planta e das restrições locais, as ETEs podem incluir diferentes processos de tratamento da água, lodo e odor, que afetam fortemente o consumo geral de energia.

Para ilustrar a importância deste fato, utiliza-se a Figura 34 com a comparação do consumo anual médio anual de energia em kW h/m³ obtido para as seis ETEs auditadas para a

instalação total e apenas para o tratamento biológico. O consumo total de energia das ETEs inclui o sistema MBR, bombeamento de elevação e tratamento de lodo, enquanto o tratamento biológico considera a aeração para o reator biológico, aeração para mitigar incrustação na membrana, bombeamento de permeado, recirculações e agitadores.

Figura 34 - Comparação do consumo específico de energia de seis plantas avaliadas: ETEs total e MBR apenas



Fonte: Adaptado de BARILLON, B. et al. 2013. [28]

Demonstra-se assim que a comparação do consumo de energia deve ser feita na mesma base para um escopo bem definido (planta total ou unidade MBR somente).

Influência da carga hidráulica e de massa orgânica no consumo específico de energia

É apresentada a influência da carga hidráulica no consumo específico kW h/m³ mostrando que ele varia de 0,6 a 1,3 kW h/m³, que diminui com o aumento da carga hidráulica. O que justifica parcialmente esta redução é o fato de que quando as membranas estão em operação, a taxa de limpeza do ar é fixa, pois depende apenas da superfície da membrana. Como consequência, o menor consumo específico de energia é observado quando o fluxo hidráulico é próximo ao fluxo máximo de projeto. Esta tendência está de acordo com estudos anteriores, mostrando uma relação de energia ideal de 0,5-0,7 kW h/m³ quando a carga hidráulica é próxima ou superior ao valor do projeto. [5] [31]

A influência das cargas orgânicas nesta relação de energia kW h/kg de DBO₅, não é tão óbvia quanto a carga hidráulica, mesmo que diminua com o aumento das cargas orgânicas como uma porcentagem do valor de projeto, tendo sido citado que é muito mais clara a resposta da energia com a carga hidraulica do que com a carga orgânica. Este comportamento é principalmente a conseqüência do controle da aeração do lodo ativado, que é regulada em função da concentração de oxigênio, isto é, dependendo de cargas orgânicas. [28]

É relatado que raramente esta referencia é encontrada na literatura e é mostrada por meio da Figura 35 os valores encontrados variando entre 2,2 e 4,4 kW h/kg DBO₅ para MBR de fibra oca e 4.2-5.7 kW h/kg DBO₅ para os MBR de placa plana para as plantas auditadas. [28]

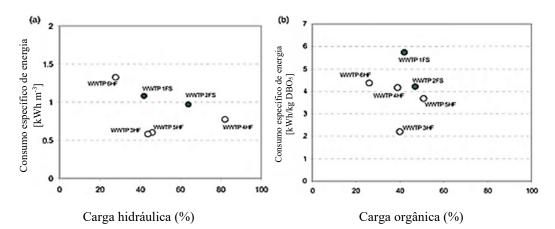


Figura 35 - Consumo específico de energia de seis ETEs versus carga hidráulica (a) e carga orgânica (b)

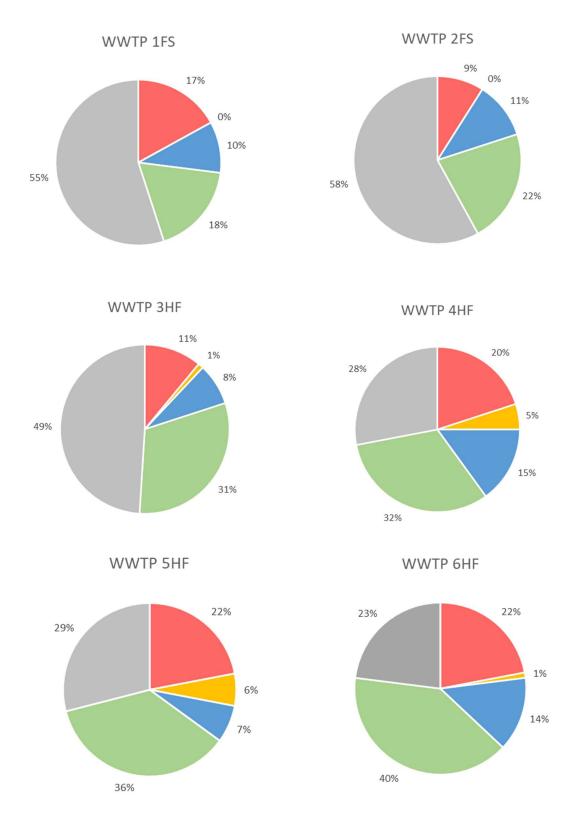
Legenda: ○ fibra oca; • placa plana.

Fonte: Adaptado de BARILLON, B. et al., 2013. [28]

Distribuição do Consumo de Energia

A distribuição de energia entre a aeração para limpeza da membrana (*air scouring*), a aeração para o lodo ativado, o bombeamento do permeado, a recirculação e a mistura interna e externa é resumida na Figura 36 para as plantas MBR avaliadas. Ar como agente de limpeza da membrana para evitar incrustações e o ar para o lodo ativado, são os principais componentes do consumo de energia. A contribuição global da aeração representa de 60 a 80 % do consumo de energia das unidades MBR (com a etapa do tratamento biológico, incluindo a filtração por membrana). [28]

Figura 36 – Distribuição percentual do consumo de energia



Legenda: ■ bombeio de reciclo; ■ bombeio de permeado; ■ misturadores; ■ aeração biológica; ■ aeração da membrana

Fonte: Adaptado de BARILLON, B. et al., 2013. [28]

A principal opção para a redução do consumo de energia parece ser no item do ar como agente de limpeza da membrana, principalmente para as estações com MBR com membrana de placa plana, para o qual o consumo específico de energia para a aeração da membrana parece ser 30 % maior do que nos sistemas de fibra oca. Os sistemas de controle de aeração otimizados de lodo ativado com base em controle de oxigênio dissolvido e/ou redox são eficientes o suficiente para reduzir a demanda de energia dos tanques de aeração. [28]

A otimização energética pode ser obtida focando-se em todos os componentes do consumo de energia e deve permitir-nos reduzir de forma significativa, em pelo menos 20 %, a diferença entre o consumo de energia em MBRs e processos LAC. [28]

O consumo de específico de energia em relação a carga orgânica removida, no caso DQO, foi ilustrado como resultado de pesquisa em grande número de plantas em operação (cerca de 388 ETEs), para efluentes municipais. Desses resultados pode-se extrair considerações tais como a influência de variáveis na performance energética por classe de tamanho de estação, tecnologia utilizada e país (Figura 37). [58]

De acordo com a Figura 37 (A), com o aumento da população equivalente (PE), o consumo de energia decresce. [58]

Sobre a influência das tecnologias utilizadas nas estações de tratamento, a Figura 37 (B) mostra para o MBR um consumo de energia muito maior que o processo LAC combinado com tratamento terciário (de modo a garantir a mesma qualidade obtida no MBR), devido principalmente a necessidade de utilização de ar para controle de incrustação nas membranas, sendo conhecido por processo com maior consumo energético. [58]

C В N=89 N=118 3.01 1.02 kW h/kg DQO removido 6 1.54 2.91 N=63 0.82 0.74 1.31 2KPE-10K 50×71:2100× 10×2PE-50× PE-100k França Alemanha Espanha Canada NBR EA BNR UST AP

Figura 37 – Influência de variáveis na performance energética por classe de tamanho de estação, tecnologia utilizada e país

Legenda: Consumo energético total (ETEs) por: (A) Tamanho da classe; (B) Tipo de tratamento; (C) país.

Nota: Os números acima das barras representam o tamanho da amostra e média. Amostras < 5 não foram mostradas, razão pela qual o total de amostras difere entre as figuras A, B e C. MBR = biorreator de membrana; EA = aeração estendida; BNR = remoção de nutriente biológico; UST = tratamento secundário inespecífico; AP = lagoa aeróbia; LAC = lodo ativado clássico.

Fonte: Adaptado de LONGO, S. et al., 2016. [58]

Quanto a influência do país, além da tecnologia da forma de tratamento e da escala, outros fatores, como o preço da energia elétrica, provavelmente influenciarão o consumo de energia de ETEs entre os vários países. Os preços mais elevados podem proporcionar incentivos mais fortes para medidas de eficiência energética. Por exemplo, a eletricidade na França é especialmente barata para a indústria (0,079 €/kW h na França, em vez de 0,120 €/kW h na Espanha, 0,130 €/kW h na Alemanha ou 0,178 €/kW h na Itália). Na Figura 37 (C) o cenário mostrado é de consumo específico de energia maior na França e Canadá (3,33 e 1,65 kW h/kg de DQO removido, respectivamente), e menores para, os EUA (USA), Espanha, Alemanha e Itália (1,31, 0,97, 0,95 e 0,85 kW h/kg DQO removida, respectivamente). [58]

Uma série de barreiras podem inibir a gestão proativa de energia para abordar questões de eficiência energética nas ETEs. Alguns deles estão profundamente enraizados na governança do setor, denominados questões institucionais e regulatórias: a politização das tarifas de água e águas residuárias, os baixos preços da eletricidade podem influenciar a eficiência energética nas ETEs. [58]

2.6 Estratégias para redução do consumo energético

Diante da literatura acima as principais estratégias para redução do consumo energético foram:

2.6.a Operar em condições ótimas de vazão

A condição é considerada ótima quando a vazão está perto da vazão projetada e em condições de clima seco (DWF) resultando em baixo consumo específico de energia de cerca de 0,7 a 0,8 kW h/m³. Nesta condição ocorre redução de 5 a 20 % no valor do consumo energético ver Figura 9, já apresentada na p. 47. Isto deve-se ao fato de que as taxas de aeração da membrana requeridas não são proporcionais aos volumes de vazão tratada. Este fenômeno também é parcialmente explicado pela operação do equipamento de processo, bombas e sopradores, em ou perto de seus melhores pontos eficientes, quando o fluxo aumenta. Ao contrário, a operação sub-ótima abaixo da vazão de projeto leva a valores de consumo de energia específicos mais altos. [31]

Os parâmetros operacionais mais importantes que influenciam a eficiência energética do MBR são as cargas hidráulica e orgânica. Como a maioria das instalações de MBR investigadas foram operadas com cargas mais baixas, de menos de 50 % do projeto nominal, o consumo de energia específico resultante foi relativamente alto devido à fração significativa do consumo fixo de energia, em estudos feitos durante a auditoria de 6 plantas na França, Espanha e USA. [28]

2.6.b Controle automático de oxigênio dissolvido

O controle OD tem sido uma prática comum no controle de processos por muitas décadas. Como exemplo, economias de 26 % da vazão de ar foram relatadas na Käppala WWTP (Suécia) após a instalação do controle *on-line* do OD. [58]

Ao empregar o controle do feedback, houve aumento da remoção de nitrogênio em 27% e economia de energia em aeração em 7 % quando o ponto de ajuste de oxigênio dissolvido (OD) foi reduzido de 1,2 para 0,8 mg/L. [18]

O uso de uma concentração muito baixa pode causar problemas operacionais, como o crescimento excessivo de bactérias filamentosas e o baixo desempenho da remoção de nitrogênio. Assim, a qualidade do efluente deve ser totalmente considerada durante a otimização dos modos de aeração. [18]

Adicionalmente, para um controle automático de feedback de amônia em um MBR em escala real foi obtida uma redução nos custos de aeração em 20%. [18]

Foi ressaltada a importância de controlar automaticamente as taxas de aeração combinando-as com dados de incrustação, pela incorporação de um modelo baseado em dados de um modelo de lodo ativado para a parte biológica e um modelo de resistência em série para a parte de filtração. [18]

Por fim, foi proposta mais uma estratégia de controle feedback, baseado no teor de amônia-N, para aeração em tanques aeróbios. Desta vez, via simulação de modelo e em uma aplicação de engenharia de larga escala (50.000 m³/d de efluente municipal). Um modelo de MBR em grande escala foi desenvolvido com base no modelo de lodo ativado (ASM) e foi calibrado para o MBR real. A determinação da demanda de aeração ótima é um equilíbrio entre aeração e qualidade de efluente. [9]

2.6.c Aeração intermitente para desnitrificação (tanque de aeração)

A aeração intermitente ou cíclica com tempos de intervalos entre a aeração (on) e sem aeração (off) cíclica tem sido considerada uma estratégia eficiente para controlar a incrustação de membranas com menor consumo de energia. Alguns exemplos de ciclos praticados: 10s on/30 off (desenvolvido por um fabricante de membrana para redução de até 50 % do consumo de aeração), 15s on/15 off (praticado em uma planta de MBR localizada em Varsseveld-Holanda) que também reduziu o consumo de energia, 10s on/10 off foi também utilizado, com 50 % de economia de energia. Considerações são feitas sobre o efeito positivo da aeração intermitente na remoção de nutrientes N e P. No entanto, há também o efeito negativo da aeração intermitente sobre a desfloculação. Quanto aos parâmetros de aeração intermitente ou cíclica, incluindo taxas de aeração e intervalos intermitentes, devem ser otimizados levando-se

em consideração as características do lodo, o controle de incrustação e a remoção de nutrientes. [18]

2.6.d Instalação de variador de velocidade em equipamentos eletromecânicos (sopradores e bombas)

Na conclusão de estudos durante auditoria em 6 plantas na França, Espanha e USA foi citado que a redução dos custos de energia também seria obtida pela implementação de unidades de velocidade variável nos principais equipamentos eletromecânicos. Isso permitiria a implementação de novas estratégias de controle sobre a limpeza de membranas, a aeração de processos e a recirculação. [28]

A instalação de drivers de velocidade variável em sopradores e bombas figura entre as abordagens para reduzir a demanda de energia e/ou melhorar a eficiência energética. [23]

A introdução de turbo-sopradores de alta velocidade e acionamento direto no mercado de águas residuárias tem sido de grande interesse em relação à potencial economia de energia. Investigações conduzidas em várias ETEs sugerem que a substituição de soprador convencional por turbo sopradores pode facilmente resultar em uma redução de energia de mais de 30 a 35 %. [85] Um teste de demonstração realizado na ETE de Franklin, em New Hampshire (EUA), mostrou que a economia de energia projectada poderia atingir 35 %. [58]

2.6.e Redução de MLSS

Embora uma das grandes vantagens do processo MBR em comparação ao LAC é poder se trabalhar com alto MLSS, foram citadas as desvantagens de se trabalhar com alto MLSS com relação ao desempenho do processo de MBR e destacada como sendo de grande expressão, o efeito do alto MLSS na redução da eficiência de aeração. Assim, os valores praticados podem ser vizualizados na Figura 38, que mostra a concentração MLSS de acordo com o tipo de membrana e aplicação. [6]

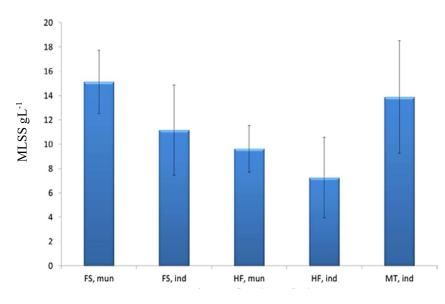


Figura 38 - Concentração MLSS de acordo com o tipo da membrana e aplicação

Configuração de membrana

Legenda: FS_{mun} — placa plana municipal; FS_{ind} — placa plana industrial; HF_{mun} — fibra oca municipal; HF_{ind} — fibra oca industrial; MT_{ind} — multitubo industrial; MLSS — concentração de SST no tanque de aeração.

Fonte: Adaptado de JUDD, S.J., 2016. [6]

O fator α que rege a transferência de oxigênio diminui com o aumento da concentração de MLSS. Duas razões são geralmente citadas como sendo responsáveis:

- (1) aumento na viscosidade aparente. [62]
- (2) Comportamento de coalescência elevado. [62]

1.0 y = -0.062x + 0.972□ Henkel et al. 2009a, b 0.9 $R^2 = 0.915$ ▲ Germain et al. 2007 0.8 △ Cornel et al. 2003 0.7 ◆ Rosenberger 2003 0.6 0.5 Krampe 2001 0.0 0 2 6 8 10 12 14 16 18 Concentração MLVSS [g/L]

Figura 39 - Fator α como função do MLVSS

Fonte: Adaptado de Henkel, J. et al., 2011. [63] [64] [65] [66] [67] [68]

A Figura 39 mostra para experimentos com MBR, SRT ≥ 20 dias, que o fator α diminui com o aumento concentração de MLVSS aproximadamente linearmente. Usando a regressão linear, a diminuição do fator α com o aumento da concentração de MLVSS pode ser aproximada como segue:

$$fator \alpha = -0.062 \times MLVSS + .972 \pm 0.070$$
 Equação 20

Com MLVSS de 1 a 12 g/L

Na conclusão de estudos feitos durante a auditoria de seis plantas na França, Espanha e USA, o menor consumo específico médio anual de energia de 0,6 kW h/m³ foi medido na planta MBR operada com uma baixa concentração de lodo de 3 g/L e fluxo constante, ver Tabela 18 a seguir e Figura 34 (p. 113). A operação da planta em concentrações mais baixas de MLSS também é favorável à transferência de oxigênio mais eficiente nos tanques de aeração. [28]

Tabela 18 – Características das plantas municipais auditadas nos EUA, França e Espanha

WWTP	Capacidade PE ^a	País	Tipo de membrana	Concentração MLSS (bacia de aeração) g/L ^b	Média anual da carga hidráulica do projeto ^c (%)	Média anual da carga orgânica do projeto ^d (%)
1 FS	30.000	EUA	Placa plana	9,8	42	47
2 HF	17.000	França	Placa plana	8,0	64	42
3 HF	90.000	Espanha	Fibra oca	2,9	46	40
4 HF	60.000	França	Fibra oca	6,8	82	39
5 HF	6.000	França	Fibra oca	8,1	44	51
6 HF	75.000	França	Fibra oca	3,5	28	26

Legenda: (a) – pessoa equivalente; (b) – no momento da auditoria energética detalhada; (c) - vazão média diária por vazão de projeto tempo chuvoso; (d) – carga de DBO₅ do projeto

Fonte: Adaptado de Barillon B., Martin Ruel, S., Lazarova, V., 2013.

2.6.f Aspectos Hidrodinâmicos

Muito deste tema já foi dissertado no item 2 tais como o estudo sobre dois regimes de borbulhamento, com microbolhas e macrobolhas, em MBR paralelos de lâminas de placas planas. A energia de aeração média induzida para o borbulhamento com microbolha foi estimada em 2,07 kW h/m³ em comparação com 1,41 kW h/m³ para o borbulhamento com macrobolha, destacando o potencial de fluxo de slug para economizar energia em MBRs de placa plana. Além disso, o fluxo tipo macrobolha controla a incrustação melhor em comparação com a técnica de microbolha. [49]

Assim, nesta parte apenas os aspectos hidrodinâmicos serão ressaltados com relação ao aumento da eficiência de aeração, isto é, economizar energia por um uso de ar muito mais eficiente.

As questões como velocidade do ar, características das bolhas, projeto da aeração e homogeneidade são fundamentais para a performance do ar como agente de limpeza para mitigação da incrustação na membrana em MBRs. Sobre a homogeneidade da aeração vale ressaltar: [48]

- Os furos do aerador não distribuem a mesma quantidade de gás. A queda de pressão devido ao atrito do ar na superfície interna do tubo de ventilação dificultou o controle da aeração. Se o atrito fosse muito forte, os buracos próximos à entrada de ar distribuíam quase todo o gás. Para

melhoria da homogeneidade de distribuição recomendou-se o uso de sistemas complexos para a distribuição de ar com inúmeros orifícios, o que tornaria a distribuição do ar mais homogênea e, portanto, mais efetiva. [48]

Outra solução é o confinamento de bolhas de ar perto da fibra, em vez de deixá-las difundir na fibra oca de SMBR. Em um estudo posterior, o confinamento de bolhas também foi usado para controlar a incrustação em um módulo de fibra oca submersa. [48]

Um tubo de 2 cm de diâmetro foi utilizado para cercar 12 fibras ocas e 0,7 mm de diâmetro externo. Ele manteve as bolhas próximas da superfície da membrana, usando assim a energia fornecida ao sistema de forma mais eficaz. Além disso, essa configuração criou fluxo de slug na superfície externa das fibras. [48]

Com a mesma concentração de alimentação (5 gL⁻¹), com o mesmo tamanho do bocal (1 mm), com maior fluxo de filtração (36 Lm⁻² h⁻¹ em vez de 30 L m⁻² h⁻¹), o módulo que confinou as bolhas proporcionou um aumento médio de TMP de 0,02 kPa min⁻¹ contra uma taxa de 0,07 kPa min⁻¹ para o outro módulo com um SAD_m menor (1,7 contra 11,7 m³ m⁻² h⁻¹). Embora os resultados sejam comparados em uma configuração mais semelhante (mesmo comprimento e número de fibra), esta comparação ajuda a quantificar a eficiência da configuração testada. Confinar bolhas próximas das fibras, além de possibilitar a criação de fluxo tipo slug, parece ser uma solução para limitar a incrustação na configuração de fibra oca submersa. [48]

Com a mesma taxa de fluxo de gás, um aumento de 30-50 % na velocidade de circulação do líquido foi conseguido por uma simples modificação do *sparger* e a zona de entrada na seção vertical. [10]

Aumento da velocidade de líquido por mudanças no areador: uma borda de tubo mais suave foi introduzida para obter menor perda de curvatura e, portanto, maiores velocidades de circulação (ver Figura 40). Uma aceleração adicional foi alcançada pela localização dos aeradores no fundo do tanque em vez de na entrada do tubo de sucção onde eles só bloqueiam a seção transversal disponível e diminuem o fluxo. Juntamente com aspersores no interior dos corpos de fluxo, gerando distribuição muito mais homogênea em todo módulo. [10]

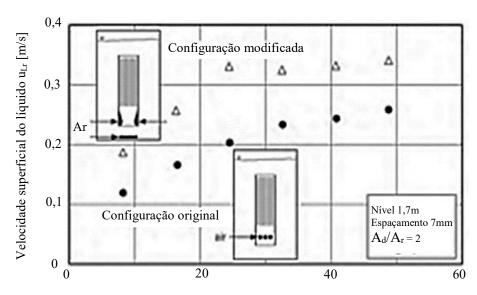


Figura 40 – Aumento nas velocidades líquidas alcançadas pela modificação e localização dos aeradores

Velocidade superficial do gás u_{Gr} [mm/s]

Legenda: • Configuração original; Δ Configuração modificada. A_d − Área do *downcomer*; A_r − área do *raiser*. Fonte: Adaptado de PRIESKE, 2010 *apud* DREWS, 2010. [10] [50]

Com esta configuração, podem ser alcançadas forças de cisalhamento mais altas na mesma aeração ou é necessária uma aeração significativamente menor para atingir a mesma velocidade do líquido.

2.6.g Limpeza de Difusores – monitoramento on line

Avanços tecnológicos também estão ocorrendo na área de limpeza de difusores. Foi documentado o desenvolvimento de um novo dispositivo de monitoramento *on-line* para ajudar a prever quando os sistemas de difusores de ar exigem limpeza. A melhoria da eficiência energética devido à instalação do dispositivo foi estimada em 15 %. [58]

Em contrapartida, a aplicação de sistemas de medição e controle exige maior conhecimento e esforço por parte dos operadores, como manutenção e monitoramento de sensores *on-line*. A falta de uma manutenção sistemática e monitoramento de sensores pode levar, na verdade, a afastar o processo do estado ideal. [58]

2.6.h Módulos de membranas mais compactos

Um estudo realizado em uma grande planta piloto com capacidade de 300 m³/dia, com membrana do tipo fibra oca para tratar efluente doméstico, em Singapura, apresentou uma demanda de energia mínima de 0,37 kW h/m³, com base na redução de 40 % de energia com um módulo de membrana mais compacto e com maior densidade de empacotamento. Isso permitiu redução de aeração da membrana, representada pela demanda específica de aeração por volume de permeado (SAD_p) de 1,5m³ de ar/m³ permeado e redução da demanda específica de energia (SED) do ar para limpeza da membrana de 0,08 kW h/m³. [23] [69]

2.6.i Utilização de chicanas

Os deflectores ou chicanas são um componente chave de um biorreator de membrana (MBR), conforme Figura 41, que pode aumentar a tensão de cisalhamento sobre a membrana para controlo de incrustações. A fim de obter uma condição hidráulica ideal do reator, os efeitos da localização e tamanho do defletor foram sistematicamente explorados. A dinâmica de fluidos computacional (CFD) foi usada para investigar a hidrodinâmica em um MBR de placa plana em escala de bancada com vários locais e tamanhos de defletores. Resultados de simulação validados mostraram que os defletores laterais foram mais eficazes em elevar o cisalhamento da superfície da membrana do que os defletores frontais. A tensão de cisalhamento média máxima foi alcançada ajustando o defletor em tamanho, quando os defletores dianteiro e lateral foram instalados. [8]

Na configuração otimizada do defletor, a tensão de cisalhamento foi de 10 a 30 % maior do que sem defletores, com a mesma intensidade de aeração (demanda específica de ar por área de membrana na faixa de 0 a 0,45 m³/m².h). A eficácia dos defletores foi particularmente proeminente em intensidades de aeração mais baixas.

Recirculação de água

Tensão de cisalhamento Defletor

Membrana

Tubo de aeração

Biorreator de membrana

Figura 41 - Deflectores ou chicanas como componentes chaves de um biorreator de membrana (MBR)

Fonte: Adaptado de YAN, X. et al., 2015. [8]

2.6. j Materiais Granulados - Agentes de limpeza Scouring agentes - Granular média

O uso de bolhas de gás, como aeração ou biogás, tem sido amplamente adotado para controlar a incrustação de membranas, no entanto, a aeração é responsável por uma parcela significativa no consumo de energia para a operação de MBR. Em função disto, recentemente a adição de agentes de limpeza tem sido estudada em sistemas MBRs como uma técnica promissora para mitigar incrustações na membrana de filtração. [54]

A integração de limpeza mecânica com biorreatores de membranas abriu novas perspectivas no desenvolvimento de MBRs. O movimento do agente de limpeza no reator MBR (*scouring* agentes – agentes de limpeza - granular média) pode melhorar não apenas o cisalhamento hidrodinâmico na superfície da membrana, mas também induzir a migração lateral dos materiais incrustantes para longe da membrana. [54]

O uso de *carriers* suspensos tem dois aspectos diferentes no controle de incrustação. Primeiro é o efeito positivo, como agente de limpeza mecânico para remover a camada de incrustação externa na superfície da membrana. O segundo é um efeito negativo, que se deve à desintegração dos flocos microbianos, possivelmente devido à força de corte excessiva gerada pelo agente na média em torno do floco. [54]

Um agente mecânico de limpeza de membranas que tem sido amplamente aplicado são as partículas de carvão ativados, como granular (GAC) ou em pó (PAC), anteriormente citado no item 2.3 (p. 96). [54]

Teste em escala piloto apresentou (SAD_m) de 0,9 m³/m² h⁻¹ para o MBR convencional e de 0,3 m³/m² h⁻¹ para o QQ-MBR que continha contas (grânulos em movimento livre) de alginato contendo quórum *quenching* (QQ) bactérias, que foram chamados QQ contas. [70] [54]

O consumo específico de energia foi de aproximadamente 0,46 kW h/m³ no MBR convencional e de 0,20 kW h/m³ no QQ-MBR. O QQ-MBR reduziu o consumo de energia relacionado à bioincrustação em aproximadamente 60 %. Além disso, considerando os custos de mão-de-obra e químicos necessários para a limpeza química das membranas usadas, os outros custos poderiam ser reduzidos no QQ-MBR. [54] [70]

Uma pesquisa em escala de bancada em duas plantas de MBR de 8L, em pequeno intervalo (2 semanas) e longo intervalo (4 meses) foi realizada com os grânulos compostos de polietilenoglicol em um dos MBR. No volume aparente de 0,8 L (correspondente a 10% do volume do reator), os grânulos foram colocados no MBR. [71]

Foram utilizadas membranas de microfiltração de placa plana compostas de polímero de PVDF neste estudo, ver Figura 42. O tamanho nominal dos poros das membranas foi de 0,1 µm. Os aeradores foram colocados sob os módulos de membrana e a aeração foi continuamente realizada (taxas de aeração: 17 L/min). Operação de intermitência (1 min de pausa para cada 12 min de operação) foi realizada e o sistema foi alimentado com água residuária sintética. [71]

(a) (b)

Figura 42 – Imagens de superfície de membranas em quatro meses de operação (após limpeza física)



Legenda: (a) sem grânulos; (b) com grânulos. Fonte: Adaptado de KURITA, T., 2014. [71]

3.0 µm

A introdução de grânulos no MBR submerso, aumentou o fluxo crítico em mais de 40 %. Aparentemente, a taxa de aeração da MBR pode ser reduzida usando grânulos. Foi observado que com a utilização de grânulos, a operação de MBR foi estável após a aeração ter sido reduzida em 50 %. A incrustação reversível foi quase inteiramente controlada por conta da introdução de grânulos. Entretanto, ocorreram incrustações irreversíveis na corrida do longo prazo, devido à eliminação da camada do bolo, que atua como um filtro dinâmico. O benefício geral dos grânulos foi aparente. [71]

Embora o uso de material granulado para desgastar as camadas de incrustação pareça ser eficaz como intensificador de fluxo, ele também carrega um alto risco de dano à folha de membrana em aplicações de biorreator de membrana (MBR). [47] [72]

2.6.k Realizar ações de gerenciamento de Energia

Para as ETEs que não tenham um programa sistemático para gerenciar o uso de energia, medidas iniciais podem ser tomadas para organizar e gradativamente desenvolver programas de gestão de energia, começando com a coleta interna de dados de energia, relatórios e análises e implementando medidas de conservação de energia pequenas/de baixo custo. Aprender com as ETEs pares que estabeleceram práticas bem sucedidas de gestão de energia também é fundamental. [58]

Em seguida, a fim de abordar questões mais amplas e ampliar os resultados, as empresas de serviços de águas residuárias podem tirar proveito das seguintes ações de gerenciamento de energia: (i) realização de auditorias energéticas mais abrangentes, (ii) fortalecimento da coleta e análise de dados via sistemas automatizados de uso de energia, monitoração e aquisição de dados, análise e relatórios e, (iii) busca de expertise técnica fora da empresa, envolvendo uma empresa de serviços de energia. [58]

2.6.1 Estratégias Diversas

Durante o *Third International Exergy, Life Cycle Assessment, and Sustainability Workshop & Symposium* (ELCAS3), 7 a 9 julho de 2013, Ilha de Nisyros – Grécia, em uma apresentação sobre práticas de otimização de energia para a operação sustentável do MBR em sistemas de tratamento de águas residuárias, foram destacados os seguintes pontos: [73]

• Percentual de energia em função da configuração da membrana

O percentual (%) de energia consumida pela aeração depende da configuração, se lateral, é de 20 % do custo operacional total. Se submerso, 90 % do custo total. Por outro lado, foi citado que o lateral consome duas vezes mais energia que o submerso. [73]

• Critérios de projeto

Foi relatado também como critérios de projeto para otimizar o consumo específico de energia: [73]

- Clarificação antes do MBR reduz a potência requerida para a areração e diminue a area do tanque biológico. [73]
- Equalização de fluxo Diminue a area da membrana e assim menor vazão de ar para limpeza (scouring). [73]
- Balanço dos sólidos (MLSS) reduz bombeio e aumenta a eficiencia de transferencia de oxigênio. [73]
- Configuração de bombas (retorno de solidos, retirada de permeado e reciclo para nutrientes) Usar bombas submersíveis de baixo *head*. Maior otimização – escoamento por gravidade. [73]

• Aspecto operacional para reduzir consumo de energia

Menor vazão de ar de limpeza a baixas vazões de carga

Permitindo períodos de repouso mais longos entre períodos de aeração, quando o fluxo está abaixo da vazão média de projeto

Otimizando membranas em serviço

Combinando o número de trens de membrana em serviço com o fluxo da planta, uma vez que as membranas que não estão em serviço não exigem o mesmo grau de ar de limpeza daquelas que estão. Tirar tanques de membrana fora do serviço quando o fluxo é baixo, prover a oportunidade de reduzir os requisitos de ar limpeza durante o período de descanso.

Otimizar o O2 dissovido do reator biológico

Usar o mínimo requerido. Retornar os sólidos do tanque de membrana para a parte oxica das bacias biológicas para utilizar o OD elevado, visando otimizar o O₂ dissolvido do reator biológico.

• Aspectos tecnológicos supridos pelos fabricantes de membranas

Um dispositivo mecânico fornece pulsos irregulares de ar e aumenta a eficácia da limpeza. Volume de ar é baseado no fluxo, exemplo: menor vazão de ar com menores fluxos. Sistema de vibração de membrana magneticamante induzida (MMV - uma vibração

magneticamente induzida é aplicada para prover tensão de cisalhamento (*shear*) na interface membrana líquido.

2.7 Síntese do capítulo

Pela revisão da literatura deste capítulo, destaca-se para a tecnologia MBR:

- A Tabela15 de consumo específico de energia (p.101), para MBRs tratando efluentes municipais, com destaque para a faixa otimizada que é de 0,4 a 0,8 kWh/ m³ de permeado e a faixa praticada em vários países que varia de 0,4 a 4,23 kWh/m³ de permeado.
- A desvantagem de maior consumo energético em relação ao LAC tem sido reduzida (1960 1980: 3 a 6 kWh/m³, 1990-2000: 1kWh/m³ e 2017: 0,4 a 0,8 kwh/m³) se aproximando do valor do LAC: 0,5 kWh/m³).
- Os valores da literatura referentes à eficiência de remoção da matéria orgânica, demandas específicas de aeração, SAD_m e SAD_p e consumo específico de energia, os quais serão utilizados como valores referenciais, permitindo comparações no estudo de caso.
- As estratégias para redução do consumo energético do item 2.6, as quais destacamos os grupamentos com medidas relativas: à operação/equipamento (2.6.a, 2.6.b, 2.6.c, 2.6.d e 2.6.e), à aspectos hidrodinâmicos (2.6.f, 2.6.g, 2.6.h, 2.6.i e 2.6.j) e às ações de gerenciamento e diversas (2.6.k e 2.6.l).
- Os custos de operação de uma planta de MBR (OPEX) são principalmente custos energia devido à demanda de energia (para aeração, bombeio e agitadores), de tratamento e eliminação de lodo, e custos pelo uso de produtos químicos para limpeza de membranas
- A equação 19 P = √3. V. I. cosØ, para o cálculo da potencia elétrica consumida em cada equipamento do MBR do estudo de caso, permitindo em seguida o cálculo do consumo energético.
- Valores de percentual de energia consumido pela aeração, variando de 60 a 80% da energia consumida em MBR, como resultado da auditoria em 6 MBRs municipais da França, Espanha e USA. Em consonância com outros estudos apresentados nesta revisão.

3 METODOLOGIA

3.1 Revisão da Literatura

A revisão na literatura, ver mapa conceitual da metodologia, Figura 43, foi realizada por meio do banco de publicações científicas *Science Direct*, do Google Acadêmico, da biblioteca de dissertações da UERJ, periódicos CAPES, em sites específicos da área de MBR, das legislações ambientais, em palestras de congressos na área e em alguns livros (The MBR book, *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*, Tratamento de esgotos doméstico, Efluentes industriais — estudo de tratabilidade, Tratamento Biológico de Efluentes - Fundamentos e Aplicações, Processos e Técnicas para o Controle Ambiental de Efluentes Líquidos), procurando identificar os fundamentos da aeração, seus impactos no consumo energético e estratégias para redução deste consumo, no período de 2000 a 2017, predominantemente, e com as seguintes palavras chaves:

Na língua inglesa: membrane bioreactor (MBR), membrane fouling, aeration, fouling mitigation, hydrodynamics, energy consumption, cost & energy, dairy wastewater.

Na língua portuguesa: biorreator com membranas (MBR), incrustação na membrana, aeração, mitigação da incrustação, hidrodinâmica, consumo de energia, custo e energia, água residuária de laticínios.

As estratégias para redução do consumo energético foram coletadas das várias publicações, bem como critérios e valores referenciais para análise de sistema de aeração, de modo a permitir comparações para o estudo de caso.

Outro aspecto da pesquisa bibliográfica é que referências de publicações recentes com grande número de referências, nos orientava para publicações importantes anteriormente publicadas. O arquivamento das publicações foi realizado com o *Software* Mendeley, o que facilitava a localização das mesmas rapidamente, no momento de analisá-las.

Algumas reuniões com especialistas e visitas a uma planta de lodo ativado clássico e a uma planta de MBR, foram realizadas.

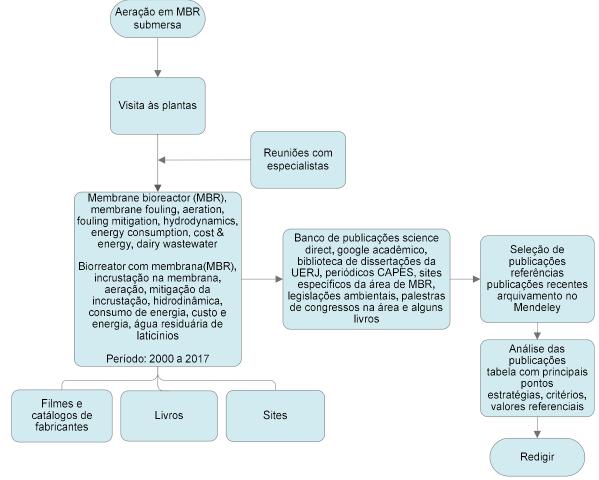


Figura 43 - Mapa conceitual da metodologia

Fonte: A autora, 2018.

3.2 Construção do estudo de caso - MBR em ETEI de indústria de laticínios

3.2.a Diagrama de blocos simplificado da estação – descrição da estação

O estudo de caso foi realizado em um MBR de uma estação de tratamento de efluentes (ETE) de uma indústria de laticínios, que tem como produtos o leite e seus derivados (iogurtes, requeijão, manteiga), localizada no estado do Rio de Janeiro, tendo a operação do MBR iniciado no último trimestre de 2017.

A ETEI consiste das etapas de gradeamento, equalização, clarificação físico química, floculação, flotação e reator biológico MBR com um volume diário com valor nominal de projeto de 300 m³/d ou 15 m³/h, conforme processo de tratamento descrito na Figura 44.

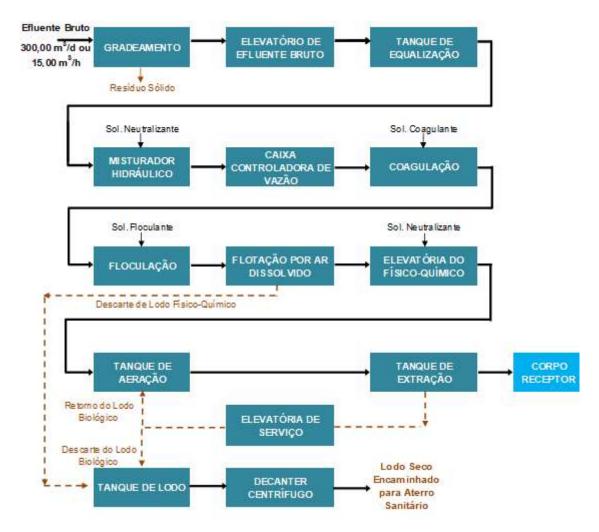


Figura 44 – Descrição do processo de tratamento de efluentes da indústria de laticínios

Fonte: GANDHI GIORDANO, 2017. [74]

Os efluentes líquidos gerados nas linhas de produção e os esgotos sanitários são reunidos em uma elevatória de efluente bruto e conduzidos para o tanque de equalização.

Na unidade de equalização ocorre o amortecimento dos picos de vazão e a homogeneização dos efluentes, por conta de um compressor de ar e malha difusora. Após a homogeneização, o efluente é bombeado com vazão constante para o tratamento primário, onde o pH é controlado para a faixa ideal de desenvolvimento do tratamento.

O sistema de correção do pH é automático, sendo composto por equipamento indicador/controlador acoplado a um sistema de dosagem de solução de ácido nítrico, pois predominam correntes básicas nos efluentes (pH na faixa de 8,0 a 11,5).

Após a correção do pH, os efluentes escoam para o tanque de coagulação, onde será dosada, por meio de bomba dosadora, a solução coagulante. Os flocos serão obtidos em função

da ação da solução coagulante e da agitação enérgica promovida por um misturador mecânico instalado na unidade.

A mistura coagulada escoará por gravidade para a unidade de floculação. Nesta unidade ocorre a dosagem da solução do polieletrólito que atua como agente floculante auxiliar. A dosagem da solução de polieletrólito também é realizada por bomba dosadora. Os flocos serão obtidos em função da ação da solução floculante e da agitação enérgica promovida por um misturador mecânico.

A etapa de tratamento físico-químico (coagulação/floculação) consiste das fases descritas a seguir.

Primeiramente, com a adição da solução de coagulante, as partículas coloidais serão adsorvidas pelos íons de metálicos formados no meio (Figura 45).

processo de coagulação $[Al(H_2O)_6]_3^+ \xrightarrow{OH^-} [Al(OH)(H_2O)_5]^{2+} \xrightarrow{OH^-} [Al(OH)_2(H_2O)_4]$ $= OH^- \xrightarrow{OH^-} OH^-$ $[Al_6(OH)_{15}]^{3+} \text{ (aq)} \quad \text{or} \quad [Al_8(OH)_{20}]^{4+} \text{ (aq)}$ $= [Al(OH)_3(H_2O)_3] \text{ (s)} \qquad \xrightarrow{OH^-} \quad [Al(OH)_4(H_2O)_2]$ $= 2 \text{ Me}(H_2O)_5OH^{2+} \qquad \Rightarrow \quad [(H_2O)_4Me \xrightarrow{OH^-} Me(H_2O)_4]^{4+} + 2 \text{ H}_2O$

Figura 45 – Reações químicas de formação dos íons metálicos responsáveis pela ação do processo de coagulação

Fonte: GANDHI GIORDANO, 2017. [74]

Estes íons, presentes na forma de hidróxidos mono e polinucleares, desestabilizam o equilíbrio de forças que, até então, mantinha as partículas emulsionadas separadas entre si, formando agora partículas maiores.

A solução de polieletrólito, composta por moléculas orgânicas poliméricas, promove o processo de floculação. As partículas, anteriormente coaguladas, são adsorvidas pelas moléculas poliméricas e unidas entre si, formando flocos (Figura 46) passíveis de remoção no flotador.

Partículas coaguladas
Polímeros
Partículas coaguladas
adsorvidas pelo polímero

Adsorção das
partículas coaguladas
pelo polímero por
meio da mistura
rápida

Polímeros
Partículas coaguladas
Floco formado

Floco formado

do floco

Figura 46 – Esquema representativo da etapa de floculação

Fonte: GANDHI GIORDANO, 2017. [74]

No flotador, parte do efluente será recirculado, passando pressurizado pelo ejetor gás/líquido, onde ocorrerá a admissão e dissolução do ar necessário à flotação e, em seguida, pelo tanque regulador da emulsão. A mistura ar/efluente, ao ser liberada no tanque de flotação, promoverá a formação de microbolhas que arrastarão os flocos para a superfície do flotador. O sistema de raspagem superficial do flotador removerá continuamente os materiais flutuantes, sendo o resíduo escoado para o tanque de lodo para posterior desaguamento mecânico.

O líquido clarificado, que consiste no efluente tratado, será conduzido a elevatória de serviço. Um conjunto de bombas submersíveis instaladas nesta unidade conduzirá os efluentes para a etapa secundária do tratamento.

A etapa secundária desenvolve o tratamento por via biológica aeróbia utilizando o processo de "lodos ativados" na sua variante "aeração prolongada", na versão MBR. Os microrganismos são utilizados para oxidar (converter) a matéria orgânica (dissolvida ou particulada) em compostos finais simples (CO₂ e H₂O) e em biomassa (no tanque de aeração com volume de 220 m³), como representado na Equação 21, típica de processos aeróbios.

A homogeneização e o fornecimento de oxigênio necessário ao tratamento aeróbio ficarão a cargo de sopradores de ar tipo "roots", que insuflarão o ar no fundo do tanque em malha de difusão equipada com difusores do tipo membrana.

A mistura efluente tratado e lodos ativados escoa por gravidade do tanque de aeração para o tanque de extração (volume de 26,5 m³).

O permeado (efluente tratado é separado do lodo por meio das membranas conforme item 3.2.b e Figura 47) será bombeado para o corpo receptor, após passar por um medidor de vazão eletromagnético.

O lodo biológico será direcionado continuamente do tanque de extração para a elevatória de serviço, por ação da gravidade, que por sua vez, retornará o lodo para o tanque de aeração.

Quando a concentração de lodo no tanque de aeração ultrapassar o limite desejado, parte do lodo produzido será encaminhado para o condicionamento com polieletrólito no tanque de lodo e posterior desaguamento mecânico.

Em resumo, o controle do teor de sólidos na faixa ideal no tanque de aeração é realizado por conta do descarte do excesso lodo biológico produzido.

O desaguamento mecânico será realizado por meio de *decanter* centrífugo. Após desidratado, o resíduo será encaminhado ao destino final. O lodo deverá ser classificado quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possa ter manuseio e destinação adequados, conforme ABNT NBR 10.004 2.004 [75]. O líquido drenado durante o processo de desidratação é conduzido à elevatória de serviço, retornando ao processo de tratamento pelo tanque de aeração.

3.2.b Configuração do MBR e tipo de membrana

A configuração do MBR é a de membrana submersa com as membranas instaladas em um tanque separado do biorreator, denominado de tanque de extração, conforme Figura 47.

Efluente físico-químico

Tanque de aeração

Elevatória de recirculação de lodo

Figura 47 - Configuração do MBR

Fonte: A autora, 2018

No tanque de extração estão instalados três módulos submersos de membrana de ultrafiltração (Figura 48), os quais serão responsáveis por separar o efluente tratado do lodo biológico. Está disponibilizado espaço para instalação futura de um quarto módulo, caso ocorra a necessidade de ampliar o sistema. Além do processo de separação, as membranas realizam a ultrafiltração do efluente, obtendo-se um efluente tratado com uma qualidade superior à dos processos convencionais.

As membranas são do tipo de placas planas de ultrafiltração e com material em difluoreto de polivinilideno (PVDF) e polietileno tereftalato (PET) e diâmetros dos poros de 0.08 mícrons.

- Área da membrana é de 1,4 m² por placa
- Total de 100 placas por módulo
- Total de 140 m² por módulo
- 3 módulos instalados
- Área Total de 420 m² instalada no sistema



Figura 48 – Módulos das membranas no tanque de extração

Foto: Gandhi Giordano, 2017. [74]

Os módulos são compostos de membranas de ultrafiltração que retêm a passagem de lodo e permitem a passagem da fase líquida tratada. Na parte inferior dos módulos encontra-se uma malha de difusão de ar para realização da limpeza da superfície das membranas,

aumentando o rendimento e a vida útil do sistema. As Figuras 49 e 50 a seguir, apresentam o módulo de ultrafiltração de placas planas e seu respectivo funcionamento:

Figura 49 – Módulo de ultrafiltração de placas planas



Fonte: Site do fabricante da membrana. [76]

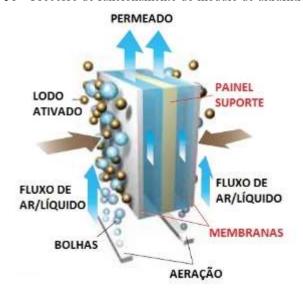


Figura 50 - Processo de funcionamento do módulo de ultrafiltração

Fonte: Site do fabricante da membrana. [76]

3.2.c Descrição sucinta do sistema de aeração adotado

Conforme Figura 51 o sistema de aeração é composto de 3 sopradores de ar assim distribuídos: um para prover ar para o tanque de aeração, outro para mitigar incrustações nas membranas e o terceiro usado como reserva em caso de falha de um dos dois já citados.

Figura 51 – Sistema de aeração da planta de MBR

Foto: A autora, 2018.

No tanque, onde se encontram as membranas, o ar é introduzido na parte inferior dos módulos da membrana através de difusores de ar, conforme Figura 52, do tipo tubulares e com furos perfurados para distribuição do ar. Como pode ser visto nesta figura, cada módulo de membrana possui 2 tubos perfurados e interligados como difusores.

Figura 52 – Difusores de ar tubulares perfurados para os módulos das membranas





Foto: GANDHI GIORDANO, 2018. [77]

Para a membrana, a vazão de ar (de projeto) como agente para mitigar incrustação na mesma, objeto de nosso estudo é de 78 N m³/h totalizando 234 N m³/h de ar para os 3 módulos.

Para o tanque de aeração, a homogeneização e o fornecimento de oxigênio necessário ao tratamento aeróbio, ficam a cargo de um soprador (e um segundo reserva) que insuflam o ar no fundo do tanque em malha de difusão equipada com difusores do tipo membrana conforme Figura 53. A vazão de ar de projeto neste caso é de 570 N m³/h.

Figura 53 – Difusor tipo membrana para o tanque de aeração

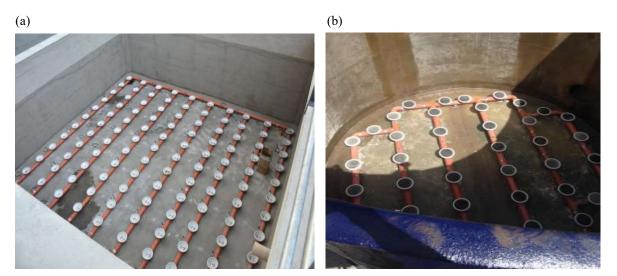


Fonte: GANDHI GIORDANO, 2018. [78]

A malha de difusão, representada na Figura 54 (a), é composta por uma grade dividida em 10 ramais de distribuição onde estão instalados os difusores circulares de membranas de bolhas finas. Estes ramais de distribuição são interligados a um *manifold* de diâmetro igual a 110mm.

Características dos difusores: Pratos em PVC com membranas perfuradas, difusor de membrana circular de diâmetro de 230 mm soldado, membrana EPDM alta performance, bases injetadas em PVC e difusor com dióxido de titânio. Na Figura 54 (b) encontram-se difusores semelhantes nos quais as membranas já estão instaladas, embora em outro serviço, mas reproduz a membrana de alta performance usada nos difusores do tanque de aeração.

Figura 54 – Malha de difusão



Legenda: (a) Malha de difusores de ar para o tanque de aeração sem as membranas; (b) Difusores com as suas membranas semelhantes ao do tanque de aeração

Foto: GANDHI GIORDANO, 2018. [79]

3.2.d Procedimentos para coleta e análises

Para alcançar os objetivos deste estudo de caso foram realizadas análises físico-químicas do Afluente, do Efluente Físico-Químico, do tanque de Aeração e do Efluente Biológico (MBR) para verificar a eficiência quanto à remoção da carga poluidora em cada etapa de tratamento e para avaliação dos parâmetros e variáveis que interferem no funcionamento e na operação do mesmo.

As amostras do efluente foram coletadas na entrada da ETEI (afluente bruto), na saída do tratamento físico-químico (efluente físico-químico), no tanque de aeração e na saída do

MBR (efluente biológico MBR). Cada amostra (de 1000 mL) foi composta de 4 coletas, com intervalo de 1 hora entre elas e foram condicionadas no gelo. Os parâmetros físico-químicos monitorados foram os apresentados na Tabela 19:

Tabela 19 – Parâmetros físico-químicos monitorados

Alcalinidade total (mg L ⁻¹ CaCO ₃)	Nitrogênio Kjeldahl (mg L ⁻¹ N)
Cálcio (mg L ⁻¹ Ca)	Óleos e graxas totais (mg L ⁻¹)
Cloreto total (mg L ⁻¹ Cl ⁻)	pH da amostra a 25 °C (*)
Condutividade a 25 °C (μS cm ⁻¹)	Potássio (mg L ⁻¹ K ⁺)
Cor (mg L ⁻¹ Pt-Co)	Resíduo não filtrável total (mg L-1) (*)
DBO (mg L ⁻¹ O ₂) (*)	Resíduo não filtrável volátil (mg L-1) (*)
Detergentes – MBAS (mg L ⁻¹)	Nitrato (mg L ⁻¹ N)
DQO (mg L ⁻¹ O ₂) (*)	Sódio (mg L ⁻¹ Na ⁺)
Fósforo reativo solúvel (mg L ⁻¹ P)	Sulfato (mg L ⁻¹ SO ₄ ²⁻)
Magnésio (mg L ⁻¹ Mg ²⁺)	Turbidez (NTU)

Legenda: (*) utilizados na dissertação. Fonte: GANDHI GIORDANO, 2017.

As amostras foram coletadas por um laboratório terceirizado, credenciado junto ao Instituto Estadual do Ambiente (INEA – RJ) e ao Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro).

Sendo que a metodologia das análises foi realizada de acordo com as normas *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* [80].

Com o resultado destas análises compara-se estes valores com os das Legislações vigentes e algumas vezes com valores de projeto, bem como esses resultados suprem dados para parâmetros calculados que avaliam a performance da unidade, como por exemplo, a eficiência de remoção de DBO e DQO, relação entre massa de nutriente e massa de microrganismo (A/M) e razão SSVTA/SSVT entre outros.

3.2.e Valores dos parâmetros de projeto e/ou obtidos na operação do MBR:

i - Vazão e carga orgânica total (m³/h; mg DBO/L; mg DQO/L)

Embora a produção de efluente biológico do MBR de projeto seja 15 m³/h, no período analisado em dias de novembro, dezembro e janeiro, a vazão de efluente biológico do MBR variou de 9,10 a 12,25 m³/h devido à menor produção de efluentes desta indústria, neste período.

A carga orgânica está mostrada na Tabela 21 (p. 153) do item de resultados e discussão a seguir, a qual foi analisada em vários pontos da estação, mas o foco da presente dissertação é o sistema MBR, portanto será analisado o efluente físico-químico passando pelo tanque de aeração, até a saída do MBR (efluente biológico MBR).

ii - Eficiência de tratamento (% DBO removida)

Para verificar a eficiência de remoção de matéria orgânica medida indiretamente como DBO no MBR, é necessário avaliar o efluente de entrada e saída do reator biológico.

A equação avalia a eficiência de remoção de DBO:

$$EF(\%) = \frac{(DBO_e - DBO_s)}{DBO_e} \times 100$$
 Equação (22)

Na qual:

EF (%) = Eficiência de remoção em porcentagem

DBOe = DBO entrada do reator biológico

DBOs = DBO saída do MBR

Para verificar a eficiência de remoção de DQO deve proceder-se da mesma maneira da DBO, substituindo os valores de DBO pelos de DQO, assim:

$$EF(\%) = \frac{(DQO_e - DQO_s)}{DQO_e} \times 100 \quad Equação (23)$$

iii - Relação alimento/microrganismo (A/M)

Esta equação já descrita anteriormente (Equação 5, p. 55), sendo aplicada para a estação de esgoto municipal e em termos de DBO. [19]

A maioria dos biorreatores com membranas tratando efluentes industriais em escala real operam com A/M menor que 0,25 kg DQO/kg SSV d, e que essa relação raramente excede 0,6 kg DQO/kg SSV d, agora em termos de DQO. [7]

O valor de A/M de 0,24 é utilizado no cálculo do volume do reator, com S_o representado por DQO. [36]

iv - Demanda específica de aeração para a membrana (SAD_m e SAD_p)

A demanda específica de aeração (SAD), quer em relação à área da membrana (SAD $_{\rm m}$ em Nm 3 ar/(h.m 2)) ou volume de permeado (SAD $_{\rm p}$ N m 3 ar/m 3 permeate) é usado na prática, como um indicador de eficiência de aeração na operação da planta MBR. No estudo de caso foi calculada, utilizando-se a Equação 3 (p. 39) para SAD $_{\rm m}$ e Equação 4 (p. 39) para SAD $_{\rm m}$ [22] [43]

Valores de SAD_m variando de 0,21 a 0,88 N m³/(h m²) foram relatados para seis MBR aeróbios em grande escala operando em condições ideais, com o fluxo sustentado entre 24 e 31 L/m^2 h. [27]

v - Razão SSV_{TA}/SS_{TA}

A razão SSV_{TA}/SS_{TA} foi calculada utilizando-se os resultados destas variáveis nas análises da amostragem (Tabela 21, p. 153) de dias de novembro e dezembro 2017 e de janeiro e fevereiro de 2018, referentes ao tanque de aeração.

vi - Condições Operacionais do MBR - Tanque de extração

As principais condições operacionais do MBR no tanque de extração, tais como a variação de pressão (ΔP - mbar), pH e T (°C) foram obtidas dos dias 03 e 09/01/2018 e 05/02/2018. Os resultados serão apresentados no item 4.2.6 (p.159).

Para o Delta P na membrana:

O Delta P da membrana está representado pela variação de pressão (ΔP - mbar), também denominado pressão transmembrana e aumenta com o aumento das incrustações na mesma, conforme já tratado no item 1.5 (p. 39) desta dissertação.

vii — Consumo específico de energia do sistema MBR (kW h/m^3 de efluente tratado), (kW h/kg DBO reduzida) e (kW h/kg DQO reduzida)

Na presente dissertação os dados de consumo de energia, reportados como kWh, são baseados na potencia elétrica consumida em cada local investigado. Os dados específicos de consumo de energia são relatados como consumo específico de eletricidade por volume de águas residuárias tratadas (efluente biológico MBR ou permeado), expressos em kW h/m³. [31] Foi também utilizada a relação em kW h/kg de DBO reduzida e por kW h/Kg de DQO reduzida

Para o cálculo da potência elétrica (P) consumida em cada equipamento do MBR, inicialmente foi feito uma triagem dos equipamentos diretamente envolvidos com o MBR e em seguida foi realizada a medição da corrente (I) em Ampères (para as 3 fases e feito a média aritmética) para cada equipamento, por meio de um multímetro digital (Minipa ET-3880), com a voltagem (V) de 220 V e Cos Ø = (por recomendação do artigo 95 da Resolução 414 de 09/09/2010 da ANEEL), pode-se obter a potência, por meio da Equação 19 (p. 112).

Para o consumo específico de eletricidade:

Energia = $kW/(m^3/h) = kW h/m^3$ de permeado

Na Europa, a estimativa do consumo de energia com base na potência instantânea e no tempo de operação ainda é amplamente utilizada. [61] [58]

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Da revisão da literatura

Estratégias para redução do Consumo de Energia

Foi citado que apenas em 10 % do tempo de operação de uma planta de MBR de escala completa, isto é, durante as cargas máximas, a energia fornecida é usada de forma otimizada. Isso mostra o grande potencial de otimização da aeração, logo de redução de consumo energético. [10]

Assim, são destacadas as principais estratégias para redução do consumo energético na Tabela 20, fruto da revisão bibliográfica apresentada no item 2.6 (p. 118) em que estas foram agrupadas como medidas relativas: à operação/equipamento (2.6.a, 2.6.b, 2.6.c, 2.6.d e 2.6.e), à aspectos hidrodinâmicos (2.6.f, 2.6.g, 2.6.h, 2.6.i e 2.6.j) e às ações de gerenciamento e diversas (2.6.k e 2.6.l). A apresentação nesta tabela segue esta mesma sequência.

Tabela 20 - Estratégias para redução do consumo energético (continua)

Estratégias	Autores	Resultados	Fatos relevantes
Operar em condições ótimas de fluxo — Carga próxima ao projeto	Krzeminski <i>et al.</i> 2012	Consumo de energia: 0,7 a 0,8 kW h/m³ Energia 5 a 20 % menor	Taxa de aeração não depende da vazão e sim da área da membrana Gráfico com escala industrial
Controle automático de oxigênio dissolvido	Fangang Meng <i>et al.</i> , 2017	7 % economia de energia (OD) foi reduzido de 1,2 para 0,8 mg/L	
	Longo Stefano <i>et al</i> . 2016	Economias de 26 % da vazão de ar Käppala (Suécia) com a instalação do controle on-line do DO	Escala industrial
Controle automático de feedback de amônia (em escala real)	Sun et al. (2016)	redução nos custos de aeração em 20%.	Aeração ótima é um equilíbrio entre aeração e qualidade de efluente.
Aeração intermitente para desnitrificação (tanque de aeração)	Fangang Meng et al. 2017	Ciclos: 10s on/30 off 15s on/15 off 10s on/10 off Redução de até 50 % consumo da aeração	Positivo para remoção nutrientes. Negativo para a floculação do lodo. Compromisso entre características do lodo, o controle de incrustação e a remoção de nutrientes.
Variador de velocidade em equipamentos eletromecânicos	Longo Stefano <i>et al.</i> , 2016	New Hampshire (EUA), economia poderia atingir 35 %	
	Krzeminski, P. et al., 2017	Reduzir a demanda de energia e / ou melhorar a eficiência energética.	
	Barillon et al. 2013	Em auditoria de plantas França, Espanha e USA permitiria implementar novas estratégias de controle	

TE 1 1 00 E 4 47 1	1 ~ 1	,,.	/ ' ~ \
Lahela /II Estrategias	para redução do consumo	energefico	(confinitacao)
1 abota 20 Estratogras	para redução do consumo	chici geneo	(COMMINAÇÃO)

Redução de MLSS	Judd 2006	Aumenta a transferencia de Oxigênio	
	Judd 2016	Industria: faixa de 10 a 11 g L ⁻¹	
	Henkel J. 2011	Fator α que rege a transferência de Oxigênio diminui com o aumento da concentração de MLSS fator $\alpha = -0.062$ MLVSS $+0.972 \pm 0.070$	
	Gabarron 2014	Redução do MLSS de 20 g L ⁻¹ L para < 15 g L ⁻¹ com Aeração intermitente no biológico Redução do SED de 1,12 para 0,71	Otimização de plantas de escala cheia na Espanha
Aspectos Hidrodinâmicos	Zhang et al.2011 apud Krzeminski et al., 2017	Dois regimes de borbulhamento microbolhas (2,07 kW h/m³) e macrobolhas (1,41 kW h/m³)	Economizar energia por um uso de ar muito mais eficiente
	Etienne Braak <i>et al.</i> 2011	Confinamento de bolhas proximo a membrana Redução no SAD _m de 11,7 para 1,7 m ³ m ⁻² h ⁻¹	Confinamento leva a escoamento slug
	Anja Drews 2010	Aumento na circulação de liquido de 30-50 % foi conseguida pela modificação no aerador uma borda de tubo mais suave	
Limpeza de Difusores – monitoramento on line	Longo Stefano <i>et al.</i> , 2016	A melhoria da eficiência energética foi estimada em 15%.	Dispositivo de monitoramento on line
Módulos de membranas mais compactos	Krzeminski, P. et al., 2017	Redução de 40 % de energia pela redução do ar como agente de limpeza	Teste em grande planta piloto (300 m³/d)
Utilização de chicanas	Yana Xiaoxu <i>et al.</i> , 2015	Tensão de cisalhamento de 10 a 30 % maior . mais ressaltado nas baixas intensidades de aeração	Utilização de CFD e escala de bancada

Materiais granulados - Agentes Aslam Muhammad e de limpeza Scouring agentes - al., 2017		Contas de alginatos (SAD _m 0,9 para 0,3 m ³ m ⁻² h ⁻¹	Teste em escala piloto
Granular media	at., 2017	para o QQ-MBR que continha contas (grânulos em movimento livre)	redução da bioincrustação em 60 %
		Energia: 0,46 para 0,20 kW h/m ³	
	Kurita Tokihiro <i>et al.</i> ,	Compostos de polietilenoglicol Fluxo crítico - 40 % maior	Escala de bancada
	2014	Aeração - 50 % menor	
	Wibsono et al. 2014	Alto risco de dano à folha de membrana em aplicações de MBR	
Realizar ações de gerenciamento de Energia	Longo, Stefano <i>et al.</i> , 2016	(i) Realização de auditorias energéticas mais abrangentes, (ii) fortalecimento da coleta e análise de dados via sistemas automatizados de uso de energia, monitoração e aquisição de dados, análise e relatórios e, (iii) busca de expertise técnica fora da empresa, envolvendo uma empresa de serviços de energia	
Estratégias Diversas	Tolkou A. <i>et al.</i> , 2013 Palestra em	Clarificação antes do MBR -	Reduz potencial para aeração Diminui área tanque biológico
	congresso na Grécia	Equalização de fluxo -	Diminui área da membrana menor vazão de ar de limpeza
		Configuração de bombas - Retornar os sólidos do tanque de membrana para a parte óxica das bacias biológicas para utilizar o DO elevado, visando otimizar o O ₂ dissolvido do reator biológico. Otimizando membranas em serviço – Membranas fora não precisam do mesmo grau de limpeza das que estão operando Tirar modulos de membranas nas vazões baixas	Bombas submesrsiveis de baixo head escoamento por gravidade.

Fonte: A autora, 2018, com dados obtidos da revisão da literatura.

4.2 Estudo de caso – MBR em ETEI de indústria de laticínios

4.2.1 Vazão e carga orgânica

A Tabela 21 mostra os valores dos principais resultados encontrados nas análises da amostragem de dias de novembro e dezembro 2017 e de janeiro e fevereiro de 2018, referentes ao afluente bruto, efluente clarificado físico-químico, tanque de aeração e efluente biológico do MBR.

Tabela 21 - Vazão e carga orgânica

Tabela 2	1 – v azao	e carga or	ganica							
Data	(iente 1) g/L)	quíi (te físico mico 2) g/L)	aeração	ue de o (mg/L) 3)	biol (m	uente 'ógico 'g/L) (4)	Vazão de permeado	рН (25°С)
	DBO	DQO	DBO	DQO	SST RNFTs	SSV RNFV	DBC	DQO	(m ³ /h)	(1)/(2)/(3)/(4)
27/11	531	1181	413	836	1703	1290	3	<15	12,25	11.5/5.7/7.5/7.7
19/12	1247	2549	875	2116	3520	2750	4	18	9,12	/6,9
26/12		2712		1262	3945	2970		26	9,12	/7,0
03/01	644	1882	286	561	6185	4880	4	22	9,10	/6,5
09/01		1625		1228	5570	4315		33	9,10	/6,3
05/02	768	1859	416	1104	6755	5280	3	15	9,10	/6,1
média	798	1968	498	1184	4613	3581	4	22	9,63	11,5/5,7/7,5/6,8

Legenda: RNFT – Resíduos não filtráveis totais; RNFV – Resíduos não filtráveis voláteis.

Fonte: Tabela construída pela autora com os dados do estudo de caso, 2018.

Com os dados demonstrados na Tabela 21, verificou-se que os valores de DBO para o afluente bruto apresentaram uma faixa de 531 a 1247 mg/L e os valores de DQO uma faixa de 1181 a 2712 mg/L, representando uma alta concentração de matéria orgânica neste afluente. Em afluentes industriais é normal se ter grandes variações de matéria orgânica. Já para o efluente primário, ou seja, o efluente físico químico, aquele que ingressa no reator biológico identificou-se uma faixa de média de DBO 286 a 875 mg/L e para DQO uma faixa de 561 a 2116 mg/L. Assim, o reator biológico recebe ainda uma elevada carga orgânica para biodegradar. Para o efluente tratado final (saída do efluente biológico MBR) obteve-se a faixa de DBO de 3 a 4 mg/L e para DQO uma faixa de <15 a 33 mg/L.

Com base nesses dados, compararam-se os resultados obtidos com os parâmetros estabelecidos nas legislações. Foram considerados na elaboração do projeto desta estação as normas e diretrizes aplicados pelo INEA (estadual), conforme descrito abaixo:

- NT 202 R. 10 INEA [81]
- **DZ 205 R. 06 INEA** [82], na qual consta:

Limite da DQO – 400 mg/L

Remoção da DBO - redução de 90 %

- NT 213 R. 04 INEA [83]
- Resolução CONAMA nº 430 [84]

No caso, para a DBO:

Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO 5 dias a 20°C): remoção mínima de 60% de DBO sendo que este limite só poderá ser reduzido no caso de existência de estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor.

Para o lançamento direto de efluentes oriundos de sistemas de tratamento de esgotos sanitários deverão ser obedecidas as seguintes condições e padrões específicos: [84]

Demanda Bioquímica de Oxigênio-DBO 5 dias, 20°C: máximo de 120 mg/L, sendo que este limite somente poderá ser ultrapassado no caso de efluente de sistema de tratamento com eficiência de remoção mínima de 60% de DBO, ou mediante estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor.

Assim, todas as amostras atendem as especificações exigidas para o lançamento direto de efluentes oriundos de sistemas de tratamento de esgotos sanitários, pois possuem valores de DBO menores que 120mg/L. Segundo a Resolução CONAMA 357 [85], ver Tabela 22:

Tabela 22 – Classificação dos corpos de águas doces

Classes	DBO (mg/L)
Classe 1	Até 3
Classe 2	Até 5
Classe 3	Até 10

Fonte: Resolução CONAMA 357 de 17/03/2005. [85]

Pela Tabela 22, o efluente biológico MBR da Tabela 21, em relação à qualidade apresentada (Figura 55), tem qualidade comparável à exigida para cursos d'água, classe 2 e assim, poderia ser lançado em corpo hídrico de Classe 2. Vale ressaltar que as análises isoladas dos parâmetros analisados não são suficientes para determinar a qualidade de uma amostra de água ou efluente. É recomendável avaliar, de forma complementar, outros parâmetros adicionais previstos na legislação ambiental vigente.

Figura 55 - Qualidade do permeado (efluente biológico)

Fonte: GANDHI GIORDANO, 2018. [86]

4.2.2 Eficiência de tratamento (%)

Sobre a aplicabilidade da planta de MBR em ETEI de indústria de laticínios, segue Tabela 23 com o desempenho em termos de eficiências de tratamento, para DBO e DQO, calculado pelas Equações 22 e 23 (p. 145).

Tabela 23 - Eficiência de remoção de DBO e DQO no MBR, obtida na operação

(*)/I	DBO	DBO	Eficiência DBO	DQO	DQO	Eficiência DQO
(*) mg/L	Pré*	Pós*	(%)	Pré*	Pós*	(%)
27/nov	413	3	99,27	836	15	98,21
19/dez	875	4	99,54	2116	18	99,15
26/dez				1262	26	97,94
03/jan	286	4	98,60	561	22	96,08
09/jan				1228	33	97,31
05/fev	416	3	99,28	1104	15	98,64
Média	498	3		1185	21	
Desvio padrão	258	0,5		527	7	
Mínimo			98,60			96,08
Máximo			99,54			99,15

Fonte: A autora, 2018.

Conforme pode ser observado pela Tabela 23, a eficiência de remoção de matéria orgânica (medida indiretamente como DBO e DQO) no MBR, obtida na operação, variou de 98,60 a 99,54 % para DBO e de 96,08 a 99,15 % para DQO o que está de acordo com eficiências encontradas para o processo MBR nas publicações revisadas. [56] [57] [44] [13]

4.2.3 A/M – Relação alimento/microrganismo

Seguem nas Tabelas 24 e 25, respectivamente, os valores de A/M determinados em função de DBO e DQO, utilizando a Equação 5 (p. 55).

Em termos de DBO:

Tabela 24 - Determinação da relação A/M em função de DBO

Dia	DBO	Vazão	Volume útil	SSV	A/M	A/M
Dia	(mg/L)	(m^3/h)	(m^3)	(mg/L)	(h ⁻¹)	(d^{-1})
27/11/2017	413	12,25	224,5	1290	0,017	0,42
19/12/2017	875	9,12	224,5	2750	0,013	0,31
26/12/2017						
03/01/2018	286	9,10	224,5	4880	0,002	0,06
09/01/2018						
05/02/2018	416	9,10	224,5	5280	0,003	0,08
Projeto	1000	15,00	224,5	12000	0,006	0,13

Fonte: A autora, 2018.

Observações

- 1. O volume total foi considerado como sendo 90% do volume do tanque de aeração mais o valor do volume útil do tanque de extração $(0.9 \times 220 + 26.5)$, totalizando 224,5 m³.
- 2. O MBR foi projetado com A/M de 0,13, calculada a partir da DBO de 1000 mg/L e SSV $_{\rm TA}$ de 12.000 mg/L

Em termos de DQO:

Tabela 25 - Determinação da relação A/M em função de DQO

Dia	DQO (mg/L)	Vazão (m³/h)	Vazão (L/d)	SSV _{TA} (mg/L)	Vol (L)	A/M (d ⁻¹)
27/11/2017	836	12,25	294000	1290	224500	0,84869
19/12/2017	2116	9,12	218880	2750	224500	0,75019
26/12/2017	1262	9,12	218880	2970	224500	0,41428
03/01/2018	561	9,10	218400	4880	224500	0,11184
09/01/2018	1228	9,10	218400	4315	224500	0,27686
05/02/2018	1104	9,10	218400	5280	224500	0,20341

Fonte: A autora, 2018.

4.2.4 Demanda específica de aeração para a membrana (SAD_m e SAD_p)

Cálculo de SAD_m

Para o cálculo deste parâmetro a vazão de ar adotada foi a de projeto, ou seja vazão de ar para mitigar a incrustação é de $78 \text{ N m}^3\text{/h}$ por módulo de membranas, totalizando $234 \text{ N m}^3\text{/h}$ para os 3 módulos. Com a área total de 420m^2 instalada de membranas, obtém-se: $SAD_m = 234/420 = 0,56 \text{ N m}^3$ ar/(h m²). Conforme literatura e Tabela 13 (p.100) este valor está dentro da faixa relatada na mesma que é de 0,21 a $0,88 \text{ Nm}^3$ ar /h m².

Cálculo de SAD_p

A vazão média de permeado durante os dias considerados neste estudo de caso foi de $9,63 \text{ m}^3/\text{h}$. Assim, $SAD_p = 234/9,63 = 24,30 \text{ N m}^3 \text{ ar/m}^3 \text{ permeado}$.

Da literatura em MBRs de escala completa, os valores de SAD_m variam de 0,18 a 1,28 N m³/(m² h) e SAD_p de 10 a 65. Asim, o valor de SAD_p está nesta faixa e permanece no valor inferior, até a vazão máxima de permeado de 23,4 m³/h de permeado. [7] [10]

4.2.5 Cálculo da Razão SSV_{TA}/SS_{TA}

Seguem na Tabela 26, os valores da razão SSV_{TA}/SS_{TA}:

Tabela 26 – Determinação da razão SSV_{TA}/SS_{TA}

		171 171	
DATA	SS _{TA}	SSV _{TA}	RAZÃO SSV _{TA} /SS _{TA}
27/11/2017	1703	1290	0,76
19/12/2017	3520	2750	0,78
26/12/2017	3945	2970	0,75
03/01/2018	6185	4880	0,79
09/01/2017	5570	4315	0,77
05/02/2018	6755	5280	0,78

Fonte: A autora, 2018.

O SSV_{TA} de projeto é 12.000 mg/L. Os baixos valores de SS_{TA} e SSV_{TA} em novembro foi devido à partida do sistema que foi se estabilizando em dezembro conforme verificado na Tabela 26 acima, atingindo valores maiores nos dias 03 e 05 de fevereiro. Em novembro, estava ocorrendo limpeza das membranas com muita frequência em função da baixa concentração de SSV_{TA}.

Concentrações muito baixas de biomassa podem levar a uma maior incrustação uma vez que a superfície da membrana fica mais disponível a adsorção e bloqueio de poros. Por outro lado, concentrações de lodo muito elevadas contribuem para a formação de uma torta mais espessa. [87]

Em testes de bancada com MBR tratando efluentes da indústria de laticínios foram encontrados os mesmos problemas de incrustação em valores baixos de SSVta e constantes limpezas da membrana foram exigidas. [56]

Foi avaliada a incrustação em dois biorreatores com membranas de microfiltração submersas, um com concentração de SSV de 3.000 mg/L e outro com 2.000 mg/L de sólidos voláteis fixados em um substrato e 100 mg/L em suspensão, e observaram que a taxa de aumento da pressão para um fluxo de permeado constante foi 7 vezes maior para o segundo sistema. [87]

Provavelmente, a concentração de sólidos SSV_{TA} que leva a menor incrustação tanto por bloqueio de poros e adsorção quanto por formação de torta, para este nível de carga, foi obtido nos dias de operação de janeiro, ocasião em que a frequência de limpeza diminui (2 a 3 vezes por semana para 1 vez por mês).

Para controle operacional, a relação entre SSV_{TA} e SS_{TA} deve ser mantida próxima a 0,82. No caso deste MBR a carga orgânica está inferior a de projeto o que permite maior digestão do lodo e portanto menor razão. [36]

<u>4.2.6 Condições Operacionais do MBR – Tanque de extração</u>

A variação de pressão (ΔP - mbar) na Tabela 27 abaixo, que mostra as condições operacionais do tanque onde estão localizadas as membranas, é o delta P nas membranas (Pressão Transmembrana). É recomendado pela operação realizar a limpeza da membrana a partir de 100-130 mbar, não deixando ultrapassar de 180 mbar. Após a limpeza o delta P nas membranas abaixa (geralmente para valores baixos, próximo de zero).

Para o pH e Temperatura existe também uma orientação pela operação, de faixa de trabalho com os seguintes valores: para o pH (5 a 9) e para a temperatura (< 40 °C).

Tabela 27 - Condições operacionais do MBR - tanque de extração

	Condições operacionais MBR – Tanque de Extração						
Data	ΔP (mbar)	pН	T (°C)				
03/01/2018	28 a 87	7,1 a 7,8	30,5 a 34,5				
09/01/2018	17 a 101	5,7 a 6,9	32,0 a 34,0				
05/02/2018	35 a 86	6,9 a 7,3	32,0 a 33,3				

Fonte: A autora, 2018.

Com o crescimento da concentração do lodo (SSVta) o intervalo entre as limpezas químicas está aumentando. O intervalo de limpeza que inicialmente estava em 2-3 dias, foi aumentando para 10, 12, 17 dias e atualmente a limpeza tem sido realizada com o MBR tendo atingindo o intervalo de 30 dias de operação.

4.2.7 Consumo específico de energia no MBR – kW h/m³ de efluente tratado, kW h/kg DBO reduzida, kW h/kg DQO reduzida

Para os dias 03/01 e 05/02 foram realizadas medições de potências e amperagens nos equipamentos da ETEI, conforme Tabela 28, objetivando o cálculo do consumo energético.

Tabela 28 – Medições de potência e amperagem na ETEI

l abela 28 – Medições de potencia e amperagem na ETEI						
EQUIPAMENTO	POT (cv)	CORRE	NTE (A)			
	03/01/2018	03/01/2018	05/02/2018			
BOMBA EFLUENTE INDUSTRIAL 1	2,0	5,7	5,8			
BOMBA EFLUENTE INDUSTRIAL 2	2,0	5,6	5,5			
COMPRESSOR TANQUE DE EQUALIZAÇÃO	6,25	8,0	8,1			
BOMBA EFLUENTE EQUALIZADO 1	2,0	1,3	1,4			
BOMBA EFLUENTE EQUALIZADO 2	2,0	1,6	1,4			
BB DOSADORA DE CORREÇÃO DE pH	0,33	1,20	1,5			
BOMBA RECIRCULAÇÃO FLOTADOR 1	5,0	8,0	7,8			
BOMBA RECIRCULAÇÃO FLOTADOR 2	5,0	8,0	8,0			
FLOTADOR	0,25	1,3	1,3			
BOMBA ELEVATÓRIA DE SERVIÇO 1	2,0	6,0	6,0			
BOMBA ELEVATÓRIA DE SERVIÇO 2	2,0	6,0	6,0			
MISTURADOR TANQUE DE COAGULAÇÃO	0,75	2,0	2,0			
SOPRADOR DE AR TANQUE DE AERAÇÃO	20	49,5	49,8			
SOPRADOR DE AR RESERVA	20	51,2	51,0			
SOPRADOR DE AR TANQUE DE EXTRAÇÃO	7,5	12,7	13			
BOMBA DOSADORA DE COAGULANTE	0,33	1,8	1,8			
MISTURADOR TANQUE DE FLOCULAÇÃO	0,25	1,8	1,9			
BOMBA HELICOIDAL DE FLOCULANTE	1,0	2,5	2,6			
MISTURADOR RÁPIDO TANQUE	0,5	1,4	1,5			
FLOCULANTE						
BOMBA EFLUENTE TRATADO 1	2,0	5,0	5,1			
BOMBA EFLUENTE TRATADO 2	1,5	4,9	5,0			
EXAUSTOR FÍSICO QUÍMICO	2,0	7,0	6,0			
ELEVATÓRIA DO FÍSICO-QUÍMICO 1	1,5	3,5	3,6			
ELEVATÓRIA DO FÍSICO-QUÍMICO 2	1,5	3,5	3,5			

Fonte: GANDHI GIORDANO, 2017.

Com as amperagens, voltagem de 220V e cos Ø, utilizando o método já descrito no item 3.2.e (vii), que contém a Equação 19 (p. 112), os consumos específicos de energia foram calculados, apenas para etapa do MBR. Vide Tabela 29.

Tabela 29 – Consumos específicos de energia no MBR (continua)

Equipamentos MBR		
Amperagem	03/01/2018	05/02/2018
Bomba elevatória de serviço 1	6,00	6,00
Soprador de ar tanque de aeração	49,50	49,80
Soprador de ar tanque de extração	12,70	13,00
Bomba efluente tratado 1	5,00	5,10
Voltagem (V)	220	220
Vazão de permeado m ³ .h ⁻¹	9,10	9,10
Energia (kW h.m ⁻³ permeado)	2,82	2,84
kg DBO reduzida.h ⁻¹	2,57	3,76
kg DQO reduzida.h ⁻¹	4,90	9,91
Energia (kW h kg ⁻¹ DBO reduzida)	9,99	6,89
Energia (kW h kg ⁻¹ DQO reduzida)	5,23	2,61

Tabela 29 – Consumos específicos de energia no MBR (conclusão)

Percentual de aeração	84,97	84,98
Percentual de aeração biológica	67,62	67,39
Percentual aeração membrana	17,35	17,59
Percentual bombeio	15,03	15,02

Fonte: A autora, 2018.

Gráfico 1 – Distribuição do consumo de energia em 03/01/2018

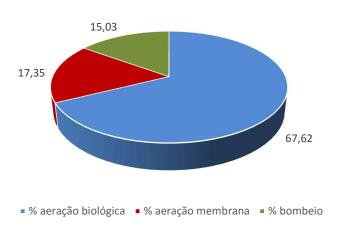
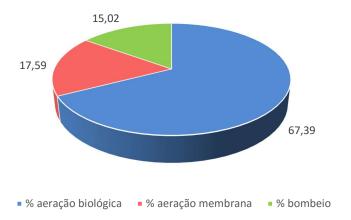


Gráfico 2 - Distribuição do consumo de energia em 05/02/2018



Conforme pode ser observado nos Gráficos 1 e 2, o percentual do consumo de energia devido à aeração (parte biológica e como agente de limpeza da membrana) constitui em torno de 85 % de toda energia da etapa do MBR, para os dois dias investigados, constituindo o maior percentual em custos energéticos do MBR, o que está de acordo com algumas publicações científicas. [28] [9] [31] [10] [1]

O consumo específico de energia dos dias 03/01 e 05/02 está dentro da faixa praticada pela literatura para efluentes municipais que é de 0,4 a 4,23 kW h/m³, mas muito maior que os valores otimizados que são de 0,4 a 0,8 kW h/m³ de permeado. Para o consumo específico de energia por kg de carga orgânica removida para DBO esta razão apresentou-se maior que o da literatura. Por kg de carga orgânica removida para DQO esta razão apresentou-se maior que a da literatura no dia 3/01/2018 e dentro da faixa no dia 05/02/2018. Ver Tabela 15 (p. 101)

A remoção de matéria orgânica pelo MBR está contemplada no Gráfico 3 com as caraterísticas de DBO na entrada (efluente físico químico) e saída (efluente biológico) do MBR. O mesmo para DQO, no Gráfico 4.

A eficiência de tratamento do MBR considerando DBO e DQO está apresentada nos Gráfico 5 e 6 (p. 164), respectivamente.

Gráficos:

a) Para a remoção de matéria orgânica pelo MBR

Gráfico 3 – Remoção de matéria orgânica pelo MBR para DBO

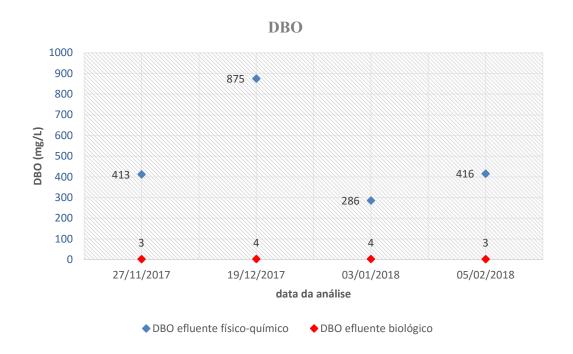
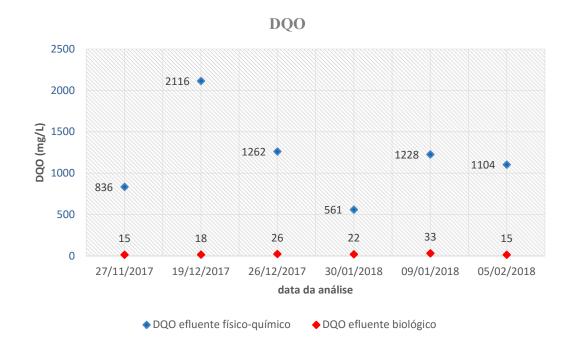


Gráfico 4 - Remoção de matéria orgânica pelo MBR para DQO



b) Eficiência considerando DBO e DQO

Gráfico 5 - Eficiência de tratamento MBR considerando DBO

DBO

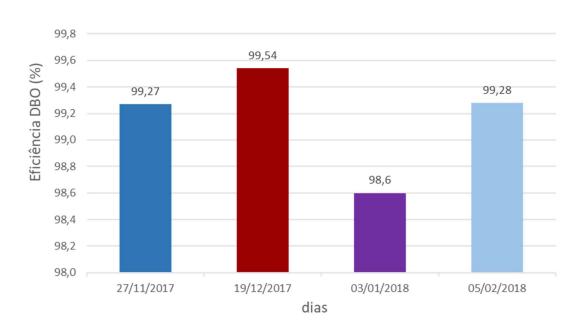
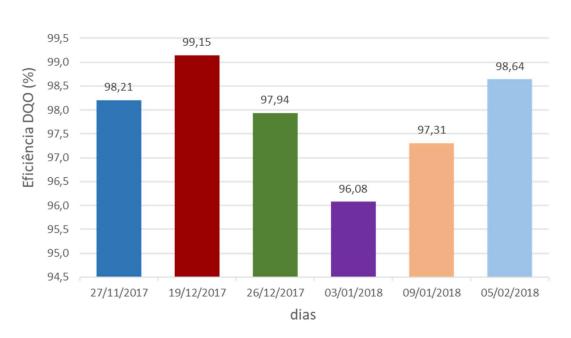


Gráfico 6 - Eficiência de tratamento MBR considerando DQO

DQO



5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Nesta dissertação revisou-se a literatura procurando identificar como a aeração impacta o consumo energético nos MBRs, as estratégias para redução deste consumo energético e avaliou-se a sua aplicabilidade em um estudo de caso no qual o MBR é utilizado como etapa de um sistema de tratamento de efluentes de uma indústria de laticínios, procurando evidenciar os aspectos revisados. Com base nos pontos apresentados, na revisão da literatura e do estudo de caso, as seguintes conclusões podem ser feitas:

Para a revisão da literatura:

- O aumento do mercado global, com a implantação de plantas de MBR cada vez maiores (ex: Suécia 860.000 m³/d) é o indicativo de maior confiabilidade nesta tecnologia. Caminha junto com ao aumento de capacidade, as sofisticações de otimizações energéticas, investimentos em tecnologia das membranas/difusores e sistemas de controle, de modo a garantir a viabilidade econômica desta tecnologia.
- O consumo energético é a principal desvantagem da tecnologia MBR em relação ao processo clássico LAC, havendo sempre a necessidade de se buscar estratégias otimizadoras para minimizar este consumo. Esta desvantagem tem sido reduzida (1960 1980: 3 a 6 kWh/m³, 1990-2000: 1 kWh/m³ e 2017: 0,4 a 0,8 kWh/m³) se aproximando do valor do LAC: 0,5 kWh/m³). O valores otimizados são difíceis de serem mantidos devido à sazonalidade e cargas diferentes diferentes das condições ótimas nos MBR.
- Para otimizar o uso da aeração existe uma série de estratégias como: trabalhar na vazão próxima a de projeto, utilização de variadores de velocidade nos equipamentos eletromecânicos, aspectos hidrodinâmicos, entre outras (dos grupamentos: operação/equipamento, aspectos hidrodinâmicos e ações de gerenciamento/diversas), que podem ser praticadas, objetivando a redução do consumo energético.
- A dinâmica de fluidos computacional (CFD) é uma estabelecida ferramenta que tem sido utilizada para se obter informações mais aprofundadas sobre a relação entre a dinâmica dos fluidos e a incrustação da membrana.

 Recomenda-se a estratégia do gerenciamento do consumo energético como rotina no acompanhamento da planta do MBR para validação e otimização dos valores encontrados no estudo de caso.

Para o estudo de caso:

- A aeração constitui a maior parcela de consumo de energia nos reatores biológicos com membranas (MBR), conforme reportado pela literatura, quantificado e comprovado no estudo de caso em que a aeração apresentou uma parcela de 85% de toda energia consumida no MBR (biológica - 67,5 %, membrana -17,5%).
- O consumo específico de energia do estudo de caso (2,82 e 2,84 kW h/m³) está dentro da faixa reportada pela literatura para efluentes municipais que é de 0,4 a 4,23 kW h/m³, mas muito maior que os valores otimizados da literatura que estão na faixa de 0,4 a 0,8 kW h/m³ de permeado. Para o consumo de energia por kg de carga orgânica removida para DBO, esta razão apresentou-se maior que a da literatura. Por kg de carga orgânica removida para DQO, esta razão apresentou-se maior que a da literatura no dia 3/01/2018 e dentro da faixa no dia 05/02/2018. Ver Tabela 15 (p. 101) e Tabela 29 (p. 160). Assim, a otimização energética desta planta deve ser investigada.
- As eficiências do MBR (BOD, 98,6 a 99,5%, COD, 96,1 a 99,2 %) na ETEI de efluentes de laticínios, foram suficientes para gerar efluente tratado com qualidade adequada até para lançamento em corpo hídrico classe 2; estando dentro das faixas reportadas pela literatura.
- Se faz necessária a otimização da aeração em MBRs para a redução do consumo energético
 e seus custos associados, para aumento da competitividade desta tecnologia, evidenciando
 que os desafios permanecem, mas não são insuperáveis.
- Recomenda-se efetuar comparações com outras unidades pares (MBR para efluentes de laticínios) visando melhorias do processo, pois a maioria da literatura é sobre efluentes municipais. Definir sempre o que está sendo comparado se a energia é apenas do MBR e se de toda ETEI, de modo a permitir comparações na mesma base.

REFERÊNCIAS

- [1] JUDD, S., The MBR Book, Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment, 2nd edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2011.
- [2] GABARRON, S.; FERRERO, G.; DALMAU, M.; COMAS, J.; RODRIGUEZ-RODA, I., Assessment of energy-saving strategies and operational costs in full-scale membrane bioreactors, J. Environ. Manag. 134, 8-14, 2014.
- [3] VIANA, P.Z., Biorreator com membrana aplicado ao tratmento de esgotos domésticos: avaliação do desempenho de módulos de membranas com circulação externa. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Rio de Janeiro, 2004.
- [4] TORRES, A. P., Avaliação de tecnologias visando o reuso de efluentes. Efluentes Hídricos: Resultados em P&D CENPES, 2004.
- [5] BREPOLS, C.; SCHAFER, H.; ENGELHARDT, N., Considerations on the design and financial feasibility of full-scale membrane bioreactors for municipal applications, Water Science and Technology, 500 61(10), 2461-2468, 2010.
- [6] JUDD, S.J., The status of industrial and municipal effluent treatment with membrane bioreactor technology, Chemical Engineering Journal, 305, p. 37-45, 2016.
- [7] JUDD, S., The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewaer Treatment, Oxford: Elsevier, 2006.
- [8] YAN, X.; XIAO, K.; LIANG, S.; LEI, T.; LIANG, P.; XUE, T.; YU, K.; GUAN, J.; HUANG, X., Hydraulic optimization of membrane bioreactor via baffle modification using computational fluid dynamics., Bioresource Technology, v. 175, p. 633-637, 2015.
- [9] SUN, J.; LIANG, P.; YAN, X.; ZUO, K.; XIAO, K.; XIA, J.; QIU, Y.; WU, Q.; WU, S.; HUANG, X.; QI, M.; WEN, X., Reducing aeration energy consumption in a large-scale membrane bioreactor: Process simulation and engineering application, Water Research, v.93, p. 205-213, 2016.
- [10] DREWS, A., Membrane fouling in membrane bioreactors characterisation, contradictions, cause and cures, Journal of Membrane Science, v. 363, n. 1-2, p. 1-28, 2010.
- [11] KUBOTA, *Soluções com membranas*, Disponível em: www.kubota.com/pt/products/solutions. Acesso em: maio de 2018.

- [12] TORRES, A.P. & SANTIAGO, V.M., Biorreatores a Membrana (MBR) Tratamento Avançado de Efluente de Refinaria, Petro & Química, n, 284, p. 56-64, 2006.
- [13] FLORIDO, Tratamento de efluente de refinaria pelo processo combinado de adsorção em carvão ativado e biorreator com membranas, Tese de doutorado, 2011.
- [14] LE-CLECH, P., *Membrane bioreactors and their uses in wastewater treatments.*, Applied Microbiology and Biotechnology, v.88, n. 6, p. 1253-1260, 2010.
- [15] STEPHENSON, T.; JUDD, S.; JEFFERSON, B.; BRINDLE, K., Membrane bioreactors for wastewater treatment, IWA Publishing, London, 2000.
- [16] YAMAMOTO, K.; HIASA, M.; MAHMOOD, T.; MATSUO, T., Direct solid-liquid separation using holoow fiber membrane in an activated-sludge aeration tank, Water Science and Technology, V. 21, p. 43-54, 1989.
- [17] LIN, H.; GAO, W.; MENG, F.; LIAO, B.; LEUNG, K.; ZHAO, L.; CHEN, J. & HONG, H., *Membrane Bioreactors for Industrial Wastewater Treatment: A Critical Review*, Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 42:7, 677-740, 2012.
- [18] MENG, F.; ZHANG, S.; OH, Y.; ZHOU, Z.; SHIN, H.S.; CHAE, S.R., Fouling in membrane bioreactors: An updated review water research 114, Water Research 114, p. 151-80, 2017.
- [19] JORDÃO, E.P.; PESSÔA, A.C., *Tratamento de Esgotos Doméstico*, ABES, Rio de Janeiro, 2014.
- [20] CUI, Z.F.; CHANG, S.; FANE, A.G., The use of gas bubbling to enhance membrane processes, Journal of Membrane Science, 221, 1-35, 2003.
- [21] VIERO, A.F., Avaliação do desempenho de um biorreator com membranas submersas para tratamento de efluente, Tese Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE Rio de Janeiro, 2006.
- [22] GABARRON, S.F., Diagnosis, assessment and optimisation of the design and operation of municipal MBRs (dissertação de doutorado), Universitat de Girona, 2014.
- [23] KRZEMINSKI, P.; LEVERETTE, L.; MAJAMIS, S.; KATSOU, E., Membrane bioreactors A review on recent developments in energy reduction, fouling control, novel configurations LCA and market prospects, Journal of Membrane Science, v. 527, December 2016, p. 207-227, 2017.
- [24] MENG, F.; CHAE, S.R.; DREWS, A.; KRAUME, M.; SHIN, H.S.; YANG, F., Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): membrane fouling and membrane material, Water Research, v. 43, p.1489-1512, 2009.

- [25] ZHANG, J.; CHUA, H.C.; ZHOU, J.; FANE, A.G., Factors affecting the membrane performance in submerged membrane bioreactors, Journal of Membrane Science 284, p. 54-56, 2006.
- [26] BREPOLS, C.; DRENSLA, K.; JANOT, A.; TRIMBORN, M.; ENGELHARDT, N., Strategies for chemical cleaning in large scale membrane bioreactors, Water Science and Technology, v. 57, n. 3, p. 457-463, 2008.
- [27] KOLA, A.; YE, Y.; CHEN, V., Fouling in Membrane Bioreactors, Sydney, Australia: The University of New South Wales Encyclopedia of Membrane Science and Technology, 2013.
- [28] BARILLON, B.; RUEL, S.M.; LANGLAIS, C.; LAZAROVA, V., Energy efficiency in membrane bioreactors, Water Science & Technology, v.67, p. 2685-2691, 2013.
- [29] ITOKAWA, H.; TSUJI, K.; YAMASHITA, K.; HASHIMOTO, T., Design and operating experiences of full-scale municipal membrane bioreactors in Japan, Water Science Technology, v. 69, p.1088-1093, 2014.
- [30] XIAO, K.; XU, Y.; LIANG, S.; LEI, T.; SUN, J.; WEN, X.; ZHANG, H.; CHEN, C.; HUANG, X., Engineering application of membrane bioreactor for wastewater treatment in China: current state and future prospect, Front. Environment Science Engeneering, v.8, p. 805-819, 2014.
- [31] KRZEMINSKI, P.; VAN DER GRAAF, J.H.J.M; VAN LIER, J.B., Specific energy consumption of membrane bioreactor (MBR) for sewage treatment, Water Science Technology, v.65, p. 380-394, 2012.
- [32] PALMOWSKI, L.; VELTMANN, K.; PINNEKAMP, J., Energy optimization of large-scale membrane bioreactors Importance of the design flux, IWA MTWR Conference, Istanbul, Turkey, 2010.
- [33] LESJEAN, A.; TAZI-PAIN, A.; THAURE, D.; MOESLANG, H.; BUISSON, H., Ten persistent myths and the realities of membrane bioreactor technology for municipal applications, Water Science Technology 63, 32-39, 2011.
- [34] FAISAL I. H.; KAZUO Y.; CHUNG H. L., Membrane Biological Reactors, IWA Publishing, p. 52, 2014.
- [35] DUARTE, G.N., Análise da Eficiência de Nitrificação em Reatores Biológicos de Leito Móvel (MBBR) em escala de bancada utilizando efluente de Refinaria de Petróleo, Dissertação de Mestrado Faculdade de Engenharia, 2015.
- [36] GIORDANO, G.; SUREUS, V., *Efluentes Industriais: Estudo tratabilidade*, PUBLIT, Rio de Janeiro, 2015.

- [37] DEZZOTI, M.; BASSIN, J.P.; BILA, D.M.; AZEVEDO, E.B.; VALENTIM, A.C.S., *Processos e Técnicas para o Controle Ambiental de Efluentes Líquidos*, E-papers Serviços Editoriais Ltda, Rio de Janeiro, 2008.
- [38] JORDÃO, E.P.; SANTOS, V.M.M.; CONCEIÇÃO, J.R.; SOBRINHO, P.A., Determinação do índice volumétrico de lodo numa concentração padrão, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - Departamento de Hidráulica e Saneamento, 1996.
- [39] SANT'ANNA, JR., *Tratamento biológico de efluentes Fundamentos e aplicações*, Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 2013.
- [40] PROVENZI, G., Biorreator à membrana submersa para tratamento biológico de efluentes: estudos hidrodinâmicos e físico-químicos no controle da colmatação. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental), Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina UFSC, Florianópolis, 2005.
- [41] ROZICH, F.A. & GAUDY JR, F.A., Design and operation of activated sludge processes using respirometry, 1992.
- [42] FENU, A.; ROELS, J.; WAMBECQ, T.; DE GUSSEM, K.; THOEYE, C.; DE GUELDRE, G.; VAN DE STEENE, B., *Energy audit of a full scale MBR system. Desalination*, v. 262, n. 1-3, p. 121-128, 2010.
- [43] VERRECHT, B.; JUDD, S.; GUGLIELMI, G.; BREPOLS, C.; MULDER, J.W., An aeration energy model for an immersed membrane bioreactor, Water Research 42, p. 4761-4770, 2008.
- [44] METCALF & EDDY, Waste Water Engineering treatment and reuse, McGRAW-HILL, Four edition, p. 683, 816, 858 791, 2003.
- [45] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 12.209: Elaboração de protejos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários, Rio de Janeiro, 2011, 53 p..
- [46] BORTOLI, M., Partida, operação e otimização de um sistema de nitrificação/desnitrificação visando a remoção de nitrogênio de efluente da suinocultura pelo processo Ludzack-Ettinger modificado, Programa de pós-graduação em Engenharia Química Universidade Federal de Santa Catarina Centro Tecnológico, 2010.
- [47] WIBISONO, Y.; CORNELISSEN, E.R.; KEMPERMAN, A.J.B.; VAN DER MEER, W.G.J.; NIJMEIJER, K., *Two-phase flow in membrane processes: A Technology with a future*, Journal of Membrane Science 453 (566-602), 2014.

- [48] BRAAK, E.; ALLIET, M.; SCHETRITE, S.; ALBASI, C., Aeration and hydrodynamics in submerged membrane biorreactors, Journal of Membrane Science 379, p. 1-18, 2011.
- [49] ZHANG, K.; WEI, P.; YAO, M.; FIELD, R.W.; CUI, Z., Effect of the bubbling regimes on the performance and energy cost of flat sheet MBRs, Desalination 283, p. 221-226, 2011.
- [50] PRIESKE, H.; BOHM, L.; DREWS, A.; KRAUME, M., Optimised hydrodynamics for membrane bioreactors with immersed flat sheet membrane modules, Desalination Water Treatment 18, 270-276, 2010.
- [51] BÖHM, L., DREWS, A., PRIESKE, H., BÉRUBÉ, P. R., & KRAUME, M., *The importance of fluid dynamics for MBR fouling mitigation*, Bioresource Technology, 122, 50–61, 2012.
- [52] FANE, A.G.; YEO, A.; PARAMESHWARAN, K.; WICAKSANA, F.; CHEN V., *Low pressure membrane processes doing more with less energy*, Desalination 185 (1-3) 159-165, 2005.
- [53] LE-CLECH, P.; ALVAREZ-VAZQUEZ, H; JEFFERSON, B.; JUDD, S., Fluid hydrodynamics in submerged and sidestream membrane bio-reactors, Water Science Technology 48 (3): 113-119, 2003.
- [54] ASLAM, M.; CHARFI, A.; LESAGE, G.; HERAN, M.; KIM, J., Membrane bioreactors for wastewater treatment: A review of mechanical cleaning by scouring agents to control membrane fouling, Chemical Engineering Journal 307, p. 897-913, 2017.
- [55] THEMBRSITE, Reducing process aeration energy consumption in MBRs, Disponível em: http://www.thembrsite.com/. Acesso em: jan. 2018.
- [56] ANDRADE, L., Tratamento de efluente de indústria de laticínios por duas configurações de biorreator com membranas e nanofiltração visando o reuso, Universidade Federal de Minas Gerais Programa de pós-graduação em saneamento, meio ambiente e recursos hídricos, 2011.
- [57] FRAGA, F.A.; GARCIA, H.A.; HOOIIMANS, C.M.; MIGUEZ, D.; BRDIANOVIC, D., Evaluation of a membrane bioreactor on dairy wastewater treatment and reuse in Uruguay, International Biodeterioration & Biodegradation, 2016.
- [58] LONGO, S.; D'ANTONI, B.; BONGARDS, M.; CHAPARRO, A.; CRONRATH, A.; FATONE, F.; LEMA, J. M.; MAURICIO-IGLESIAS, M.; SOARES, A.; HOSPIDO, A., Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement, Applied Energy 179, 1251-1268, 2016.

- [59] ANDRADE, L.H.; MENDES, F.D.S.; ESPINDOLA, J.C.; AMARAL, M.C.S., Reuse of dairy wastewater treated by membrane bioreactor and nanofiltration: technical and economical feasibility. 2017, Disponível em: www.thembrsite.com. Acesso em: mai. 2018.
- [60] LO, C.H.; MCADAM, E.; JUDD, S., *The cost of a small membrane bioreactor*, Water Science and Technology, 72 (10), 1739-1746, 2015.
- [61] PANEPINTO, D.; FIORE, S.; ZAPPONE, M.; GENON, G.; MEUCCI, L., Evaluation of the energy efficiency of a large wastewater treatment plant in Italy, Applied Energy 161, 404-411, 2016.
- [62] HENKEL, J.; CORNEL, P.; WAGNER, M., Oxygen transfer in activated sludge new insights and potentials for cost saving, Water Science & Technology |63.12|, 2011.
- [63] HENKEL, J.; CORNEL, P.; WAGNER, M., Free water contentand sludge retention time: impact on oxygen transfer in activated sludge, Environmental Science & Technology 43 (22), 8561-8565, 2009a.
- [64] HENKP.EL, J.; LEMAC, M.; WAGNER, M.; CORNEL, Oxygen transfer in membrane bioreactors treating synthetic greywater, Water Research 43 (6), 1711-1719, 2009b.
- [65] GERMAIN, E.; NELLES, F.; DREWS, A.; PEARCE, P.; KRAUME, M.; REID, E.; JUDD, S.J.; STEPHENSON, T., *Biomass effects on oxygen transfer in membrane bioreactors*, Water Research 41 (5), 1038-1044, 2007.
- [66] CORNEL, P.; WAGNER, M.; KRAUSE, S., *Investigation of oxygen transfer rates in full scale membrane bioreactoers*, Water Science and Technology 47 (11), 313-319, 2003.
- [67] ROSENBERGER, S., Characterization of Activated Sludge from Membrane Bioreactors Treating Wastewater "Charakterisierung von belebtern Schlamm in Membranbelebungsreaktoren zur Abwasserreinigung", VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2003.
- [68] KRAMPE, J., The Sequencing Membrane Bioreactor Process "Das SBR Membranbelebungsverfahren", Dissertation, Universitat Stuttgart, Stuttgart, 2001.
- [69] KITAGAWA, S.; ODA, Y.; SASAKAWA, M.; ITONAGA, T.; ADACHI, T.; RAJ, C.C.; KEKRE, K.A., Membrane Bioreactor (MBR) Performance for Reducing Energy Demand, 2012.
- [70] LEE, S.; PARK, S.K.; KWON, H.; LEE, S.H.; LEE, K.; NAHM, C.H.; JO, S.J.; OH, H.S.; PARK, P.K.; CHOO, K.H., Crossing the border between laboratory and field: bacterial quorum quenching for anti-biofouling strategy in an MBR, Environment Science Technology, 50, 1788-1795, 2016.

- [71] KURITA, T.; KIMURA, K.; WATANABE, Y., The influence of granular materials on the operation and membrane fouling characteristics of submerged MBRs, Journal of Membrane Science 469, p. 292-299, 2014.
- [72] SIEMBIDA, B., Effect of mechanical cleaning with granular material on the permeability of submerged membranes in the MBR process, Water Research 44 (14), 4037-4046, 2010.
- [73] ATHANASIA, T.; ANASTASIOS, Z.; PETROS, S., Energy Optimisation Practices for Sustainable Operation of MBR Wastewater Treatment Systems, 3rd International Exergy, Life Cycle Assessment, and Sustainability Workshop & Symposium, p. 1-10, 2013.
- [74] GIORDANO, G., Memorial descritivo da ETEI e módulos da membrana MBR, 2017.
- [75] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 10.004: Residuos sólidos classificação, Rio de Janeiro, 2004, 71 p..
- [76] TORAY, *Toray MBR Membrane*, Disponível em: http://www.toraywater.com/products/mbr/MEMBRAY Brochure.pdf. Acesso em: maio de 2018.
- [77] GIORDANO, G., Difusores de ar tubulares perfurados para os módulos das membranas, 2018.
- [78] GIORDANO, G., Difusor tipo membrana para o tanque de aeração, 2018.
- [79] GIORDANO, G., Malha de difusão, 2018.
- [80] APHA; AWWA; WEF, Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition, 2012.
- [81] RIO DE JANEIRO. INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE, *Norma técnica NT-202. R-10.Critérios e padrões para lançamento de efluentes líquidos*, Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 12 de dez. de 1986.
- [82] RIO DE JANEIRO. INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE, Diretriz DZ-205. R-6. Diretriz de controle de carga orgânica em efluentes líquidos de origem industrial, Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 08 de nov. de 2007.
- [83] RIO DE JANEIRO. INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE, Norma técnica NT-213. R-4. Critérios e padrões para controle da toxicidade em efluentes líquidos industriais, Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 18 de out. de 1990.
- [84] (Brasil), CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, Resolução CONAMA 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a resolução 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional

- do Meio Ambiente CONAMA., Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasíia, DF, no 92, 16 de mai. 2011, p. 81-89.
- [85] BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA 357, de 17 de março de 2005, Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências, Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, no 53, p. 58-63.
- [86] GIORDANO, G., Qualidade do permeado (efluente biológico), 2018.
- [87] LEE, J.; AHN, W.; LEE, C., Comparison of the filtration characteristics between attached and suspended growth microrganisms in submerged membrane bioreactor, Water Research, vol. 35, N 10, 2435-2445, 2001.

ANEXO 1 — Teor de saturação do oxigênio dissolvido na água destilada em função da temperatura (mg/L)

Tabela 30 - Teor de saturação do oxigênio dissolvido na água destilada em função da temperatura (mg/L)

Temperatura ° C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	14.65	14.61	14.57	14.53	14.49	14.45	14.41	14.37	14.33	14.29
1	14.25	14.21	14.17	14.13	14.09	14.05	14.02	13.98	13.94	13.90
2	13.86	13.82	13.79	13.75	13.71	13.68	13.64	13.60	13.58	13.53
3	13.49	13.46	13.42	13.38	13.35	13.31	13.28	13.24	13.20	13.17
4	13.13	13.10	13.06	13.03	13.00	12.96	12.93	12.89	12.86	12.82
5	12.79	12.76	12.72	12.69	12.66	12.62	12.59	12.56	12.53	12.49
6	12.46	12.43	12.40	12.36	12.33	12.30	12.27	12.24	12.21	12.18
7	12.14	12.11	12.08	12.05	12.02	11.99	11.96	11.93	11.90	11.87
8	11.84	11.81	11.78	11.75	11.72	11.70	11.67	11.64	11.61	11.58
9	11.55	11.52	11.49	11.47	11.44	11.41	11.38	11.36	11.33	11.30
10	11.27	11.24	11.22	11.19	11.16	11.14	11.11	11.08	11.06	11.03
11	11.00	10.98	10.95	11.93	10.90	10.87	10.85	10.82	10.80	10.77
12	10.75	10.72	10.70	10.67	10.65	10.62	10.60	10.57	10.55	10.5
13	10.50	10.48	10.45	10.43	10.40	10.38	10.36	10.33	10.31	10.2
14	10.26	10.24	10.22	10.19	10.17	10.15	10.12	10.10	10.08	10.0
15	10.03	10.01	9.99	9.97	9.95	9.92	9.90	9.88	9.86	9.84
16	9.82	9.79	9.77	9.75	9.73	9.71	9.69	9.67	9.65	9.63
17	9.61	9.58	9.56	9.54	9.52	9.50	9.48	9.46	9.44	9.42
18	9.40	9.38	9.36	9.34	9.32	9.30	9.29	9.27	9.25	9.23
19	9.21	9.19	9.17	9.15	9.13	9.12	9.10	9.08	9.06	9.04
20	9.02	9.00	8.98	8.97	8.95	8.93	8.91	8.90	8.88	8.86
21	8.84	8.82	8.81	8.79	8.77	8.75	8.74	8.72	8.70	8.68
22	8.67	8.65	8.63	8.62	8.60	8.58	8.56	8.55	8.53	8.52
23	8.50	8.48	8.46	8.45	8.43	8.42	8.40	8.38	8.37	8.36
24	8.33	8.32	8.30	8.29	8.27	8.25	8.24	8.22	8.21	8.19
25	8.18	8.16	8.14	8.13	8.11	8.10	8.08	8.07	8.06	8.04
26	8.02	8.01	7.99	7.98	7.96	7.95	7.93	7.92	7.90	7.89
27	7.87	7.86	7.84	7.83	7.81	7.80	7.78	7.77	7.75	7.74
28	7.72	7.71	7.69	7.68	7.66	7.65	7.64	7.62	7.61	7.59
29	7.58	7.56	7.55	7.54	7.52	7.51	7.49	7.48	7.47	7.45
30	7.44	7.42	7.41	7.40	7.38	7.37	7.35	7.34	7.32	7.31

Fonte: JORDÃO e PESSÔA, 2014, p. 1087.