

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA

SANITÁRIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL

Área de concentração: Tecnologia ambiental

**BIORREATORES DE MEMBRANA (BRM): UM
LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO ENFOCANDO A
AERAÇÃO DO SISTEMA**

Larissa Marques Diniz

Belo Horizonte

2011

Larissa Marques Diniz

**BIORREATORES DE MEMBRANA (BRM): UM
LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO ENFOCANDO A
AERAÇÃO DO SISTEMA**

Monografia apresentada ao curso de Especialização em Engenharia Sanitária e ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do certificado de Especialista em **Tecnologia Ambiental**.

Orientador: Profa. Dr. Miriam Cristina Santos Amaral

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

2011

RESUMO

Embora o Brasil seja o primeiro país em disponibilidade hídrica do mundo, o uso inadequado e a poluição vêm comprometendo significativamente este recurso. O elevado crescimento urbano e industrial contribui para a geração de grandes impactos ambientais, afetando principalmente a qualidade e/ou quantidade dos recursos hídricos

Um dos sistemas considerados como promissores no tratamento de efluentes objetivando o reuso é o biorreator com membrana (BRM). A associação de reatores biológicos aeróbios e/ou anaeróbios juntamente com o processo de separação por membrana surge em destaque no cenário mundial. Os BRM fornecem um efluente tratado de alta qualidade físico-química e microbiológica. Um dos grandes entraves para a utilização desta tecnologia é a propensão das membranas se incrustarem. A difusão dos BRM requer esforços que visem contribuir para a eliminação dos entraves econômicos, tecnológicos e sociais. Para solucionar tais problemas é fundamental compreender melhor o comportamento da aeração nos BRM. O presente trabalho tem como objetivo avaliar o efeito da aeração na minimização da incrustação baseando-se nos dados da literatura. Uma análise literária acerca deste tema foi realizada e as principais considerações foram levantadas. Gráficos e tabelas foram elaborados visando à visualização esquemática das informações obtidas. Como constatado, a aeração desempenha um importante papel no desempenho do sistema e apresenta finalidades biológicas. É também responsável pelo aumento dos custos operacionais, devido ao aumento do consumo energético. No entanto, não há um consenso acerca da aeração ideal. Desta forma, o presente trabalho se faz pertinente, uma vez que fornece uma compreensão abrangente acerca dos BRM bem como as interferências da aeração neste sistema.

PALAVRAS-CHAVE: Biorreator de membrana (BRM), Aeração, Incrustações.

ABSTRACT

Although Brazil is the first country in the world in water availability, misuse and pollution have significantly compromising this feature. The high urban and industrial growth contributes to the generation of large environmental impacts, particularly affecting the quality and/or quantity of water resources.

One of the systems considered promising in the treatment of wastewater reuse is aimed with the membrane bioreactor (MBR). The combination of aerobic biological reactors and/or anaerobic process with membrane separation spotlighted on the world stage. The MBR provides a high quality physicochemical and microbiological treated effluent. One major barrier to the use of this technology is the propensity of membranes to embedded. The distribution of MBR requires efforts aimed to contributing to the elimination of economic, technological and social barriers. To solve such problems is essential to better understand the behavior of the aeration in the MBR. This study aims to evaluate the effect of aeration on minimizing fouling based on literature data. A literary analysis on this subject was performed and the main considerations were raised. Graphs and tables were designed to the schematic view of the information. As shown, the aeration rate plays an important role in system performance and presents biological purposes. It is also responsible for the increased operating costs due to increased energy consumption. However, there is no consensus about the optimal aeration. Thus, this work becomes relevant, since it provides a comprehensive understanding about the BRM as well as the interference of the aeration in the system.

KEY-WORDS: Membrane bioreactor (MBR), aeration, fouling.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	Iv
LISTA DE TABELAS	V
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	Vi
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo geral	3
2.2 Objetivos específicos	3
3. RELEVÂNCIA DO TRABALHO	4
4. REVISÃO DA LITERATURA	5
4.1 Processo de Separação por Membranas (PSM)	5
4.2 Incrustação de membranas	11
4.3 Membranas e Biorreatores	12
4.4 Biorreatores com membrana (BRM)- vantagens, desvantagens e desafios	14
5. METODOLOGIA	19
6. RESULTADOS	23
6.1 Levantamento bibliográfico	23
6.1.1 Importância da aeração no sistema BRM	23
6.1.2 Benefícios da aeração	24
6.1.3 Desvantagens da aeração	24
6.1.4 Impacto da aeração na membrana e no material biológico	25
6.1.5 Tipos de aeração e Tipos de bolhas	28
6.1.6 Aeração e demanda energética	31
6.1.7 Discussão a respeito das condições ótimas de aeração	33
6.1.8 Entraves para a utilização da aeração	34
6.2. Considerações referentes aos artigos	34
7. CONCLUSÃO	36
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Representação esquemática do sistema de filtração frontal e tangencial	7
FIGURA 2: Módulo tipo placa e quadro	9
FIGURA 3: Módulo espiral utilizando membranas planas	10
FIGURA 4: Módulos de membranas tubulares	10
FIGURA 5: Módulos de membranas fibras ocas	10
FIGURA 6: Mecanismo de incrustação de membrana	11
FIGURA 7: Tipos de biorreator com membrana	13
FIGURA 8: Esquema envolvendo os estágios da incrustação	18
FIGURA 9: Nuvem de palavras produzida através dos títulos dos trabalhos	20
FIGURA 10: Nuvem de palavras produzida através das palavras-chaves dos trabalhos	21
FIGURA 11: Distribuição das publicações ao longo do ano	21
FIGURA 12: Distribuição geográfica das publicações	22

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Considerações referentes as configurações de membrana	9
TABELA 2: Termos usados para pesquisa	19
TABELA 3: Impactos da aeração no material biológico e na membrana	27
TABELA 4: Aeração cíclica e contínua	29

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

BRM - Biorreatores de membrana

DBO- Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO- Demanda Química de Oxigênio

EPS- Substâncias Poliméricas Extracelulares

MF - Microfiltração

NF - Nanofiltração

OI - Osmose inversa

PMS- Processo de Separação por Membranas

PTM- Pressão transmembrana

SMP- Produtos microbiano solúveis

UF - Ultrafiltração

1 INTRODUÇÃO

No planeta, a água encontra-se disponível sob várias formas e é uma das substâncias mais comuns existente na natureza, cobrindo cerca de 75% da superfície do planeta. Todos os organismos necessitam dela para sua sobrevivência, sendo também um bem valioso requerido nas mais diversas atividades humanas (LÍBANO, 2008).

Embora o Brasil seja o primeiro país em disponibilidade hídrica do mundo, o uso inadequado e a poluição vêm comprometendo significativamente este recurso. O elevado crescimento urbano e industrial contribui para a geração de grandes impactos ambientais, afetando principalmente a qualidade e/ou quantidade dos recursos hídricos. Juntamente com esta situação tem-se a introdução de padrões de lançamento cada vez mais restritivos. Dessa forma, alternativas que proporcionem o tratamento do efluente de maneira mais eficiente e que possibilitem atingir padrões de qualidade compatíveis ao reuso, é fundamental (LÍBANO, 2008 & PROVENZI, 2005).

Nesse contexto, é inserido como processo híbrido a associação do tratamento biológico com processos de separação por membrana. Um dos sistemas considerados como promissores no tratamento de efluentes objetivando o reuso é o biorreator com membrana. A associação de reatores biológicos aeróbios e/ou anaeróbios juntamente com o processo de separação por membrana surge em destaque no cenário mundial. A seletividade da membrana possibilita a boa qualidade físico-química do efluente, a facilidade de instalação e ampliação da área filtrante e a economia de área torna esta ferramenta ainda mais atrativa.

Os BRM são uma alternativa tecnológica viável levando em conta o custo-benefício e a eficiência do sistema. O efluente tratado tem alta qualidade tornando-o livre da contaminação fecal e de sólidos suspensos (VIANA, 2004). Apresentam também vantagens na obtenção de um permeado com boa qualidade físico-química e microbiológica. É um sistema compacto quando comparado a outras tecnologias podendo ser adotado no domínio industrial, ambiental e/ou doméstico (PROVENZI, 2005).

Os BRM apresentam uma forma de tratamento biológico intensivo, de efluentes com elevadas DQO e DBO, mas, como outros processos de separação por membranas, são afetados pela tendência de incrustações. A incrustação é responsável pelo aumento da resistência hidráulica resultando num maior gasto energético além de requerimento de maior frequência de limpeza.

Esse problema pode ser amenizado por estratégias tais como manutenção das condições de turbulência, operações com fluxo abaixo do limite crítico e/ou através da seleção de materiais de membrana adequados e resistentes a esta tendência (GANDER *et al.*, 2000).

Uma das alternativas para o controle da incrustação em BRM é o uso da aeração ao longo da superfície da membrana usando ar ou oxigênio puro para sistemas aeróbios ou a própria recirculação do biogás para os sistemas anaeróbios. No sistema de biorreatores de membrana aeróbio, a aeração desempenha um importante papel com finalidades biológicas e operacionais. Ela fornece oxigênio para a comunidade microbiana realizar a biodegradação da matéria orgânica, mantém a dispersão da biomassa do reator e auxilia na limpeza da superfície da membrana, mantendo a sustentabilidade do fluxo e retardando o processo de incrustação (RAHMI *et al.*, 2011; IVANOVIC *et al.*, 2008).

Os biorreatores com membrana começaram a ser usados ao final dos anos de 1960, a partir de um conceito simples de filtração de biomassa. (JUDD, 2006; VIERO, 2006; LORAIN *et al.*, 2010). No entanto, ainda existem entraves culturais e tecnológicos quanto ao uso desta tecnologia. O processo de operação com biorreatores ainda necessita de muitos estudos em busca da compreensão da influência de cada parâmetro operacional no comportamento das membranas e na eficiência do sistema. A falta de domínio por parte de projetistas e operadores pode ter como consequência uma subutilização da operação interferindo, portanto, no desempenho. Desta maneira, há uma redução da vida útil das membranas e alterações no fluxo do permeado acarretando aumento do custo operacional do sistema, tornando-o economicamente inviável.

Não obstante as inúmeras vantagens dessa tecnologia existem alguns desafios para sua adoção em larga escala. Dentre esses, poderemos citar a otimização dos custos de instalação/operação e a minimização dos efeitos negativos causados pela incrustação nas membranas e pela concentração de polarização. A difusão dos BRM requer esforços que visem contribuir para a eliminação dos entraves econômicos, tecnológicos e sociais. Para solucionar tais problemas é fundamental compreender melhor o comportamento da membrana.

2 OBJETIVOS

2.1 *Objetivo geral*

Avaliar o efeito da aeração na minimização da incrustação baseando-se nos dados da literatura.

2.2 *Objetivos específicos*

- Compreender a importância da aeração no sistema BRM do ponto de vista da minimização da incrustação;
- Discutir a aeração do ponto de vista de consumo energético;
- Levantar vantagens e desvantagens sobre o processo da utilização da aeração;
- Destacar os tipos de aeração e tipos de bolhas que podem ser usados no BRM;
- Discutir a respeito das condições ótimas de aeração;

3 RELEVÂNCIA DO TRABALHO

O acelerado crescimento populacional tem aumentado a demanda por água, fator que interfere na disponibilidade deste recurso. Os problemas de escassez hídrica decorrem principalmente da combinação entre o crescimento demográfico e a degradação da qualidade das águas impulsionadas pelos processos desordenados de urbanização, industrialização e expansão agrícola.

Visto com uma alternativa para o tratamento de águas residuárias, os BRM fornecem suporte ao reuso e asseguram a sustentabilidade dos recursos hídricos. Essa tecnologia fornece vantagens em relação aos sistemas convencionais de tratamento tais como: produção de um efluente com uma elevada qualidade, menor requerimento de área, produção menor de lodo e maior tolerância a choques operacionais.

BRM é uma tecnologia em potencial crescimento devido à influência de legislações cada vez mais restritivas quanto à qualidade e a escassez de água local, a introdução de incentivos para promoção da melhoria das águas residuárias, incentivo ao reuso, redução dos custos de investimento, confiança e aceitação da tecnologia.

Entretanto, como qualquer processo que utiliza membrana, os BRM estão sujeitos as conseqüências de incrustações. Visando a minimização dos efeitos negativos desse fenômeno é introduzida a aeração. A aeração em sistemas aeróbios é sem dúvida, um dos parâmetros importante no projeto e operação do BRM. Ela é necessária ao tratamento biológico, na suspensão dos sólidos e cisalhamento da membrana. Muitos trabalhos abordam os assuntos de forma isolada não apresentando uma análise crítica dos diversos fatores que envolvem o uso desta tecnologia. Desta forma, a tentativa de reunir as informações, considerações e a consolidação de resultados são de fundamental importância para a aceitação desta tecnologia. Pesquisas direcionadas a uma maior compreensão do assunto bem como a divulgação de informações de interesse comum são de extrema importância. Torna-se, portanto, pertinente para o presente trabalho, uma compreensão abrangente a cerca dos BRM bem como as interferências da aeração neste sistema de tratamento.

4 REVISÃO DA LITERATURA

4.1 Processo de Separação por Membranas (PSM)

Membrana é uma barreira semipermeável e seletiva entre duas fases (MULDER, 1996). Os processos de separação por membrana utilizam uma barreira seletiva, a membrana, que sob a ação de uma força motriz é capaz de promover a separação de determinados componentes de uma solução ou suspensão (MULDER, 1996; SCHNEIDER, 2001). A principal força motriz é o gradiente de potencial químico entre os dois lados. Este gradiente pode ser o gradiente de concentração, pressão e/ou temperatura ou potencial elétrico (no caso de espécies iônicas) (VIANA, 2004).

O processo de separação por membranas (PSM) é adotado nos mais diversos procedimentos industriais: biotecnologia, indústria química, alimentícia, farmacêutica e na medicina. Nos processos industriais, as membranas devem ser acomodadas em módulos capazes de suportarem a pressão aplicada ao sistema. Estas estruturas devem conter canais para alimentação do módulo e para a remoção do concentrado e do permeado. Devem ainda: impedir o contato do permeado com a solução a ser tratada, visando à eliminação da contaminação do permeado; favorecer a circulação da solução a ser tratada, para evitar o acúmulo de substâncias na superfície da membrana; apresentar preferencialmente uma elevada área superficial e baixo consumo energético além de facilitar a promoção da turbulência, potencializando a qualidade da filtração.

A escolha da configuração do módulo de membranas mais apropriado a uma determinada aplicação é um processo de extrema importância. Os principais fatores que norteiam esta escolha são: a disponibilidade de membrana, reduzidos níveis de incrustação, facilidade de limpeza, flexibilidade e durabilidade, manutenção, baixo custo de produção e custo de substituição.

Na escolha do módulo é importante que seja garantido o nível de separação exigido e que o grau de incrustação não alcance níveis intoleráveis, o que pode interferir no empacotamento do módulo de membrana, dificultando assim a sua aplicação em larga escala além de tornar o processo ineficiente (AMARAL, 2009).

A seletividade da membrana dependerá da distribuição dos tamanhos dos poros e a permeabilidade permite a quantificação do material que permeia através da membrana. Vale

ressaltar que não se encontra uma membrana com diâmetros de poros únicos e sim um valor médio entre os poros (PROVENZI, 2005).

Em função da composição da solução problema a ser filtrada, são desenvolvidos os processos com membranas de microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose inversa (OI). A remoção parcial ou completa das espécies químicas depende da escolha da membrana. Nestes processos a força motriz é o gradiente de pressão. As membranas são diferenciadas pelo tamanho dos poros e a pressão necessária para a operação (BAKER, 2004, HABERT *et al.* 2003) .

O processo de filtração pode ser operado de duas formas distintas: filtração frontal (“*dead-end filtration*”) ou filtração com escoamento paralelo à superfície da membrana (“*cross-flow filtration*”). Na MF frontal, a alimentação é forçada perpendicularmente em relação à membrana. Há uma direção única para as correntes, sendo que a alimentação e o permeado possuem o mesmo sentido. Nesse tipo sistema, existe uma grande tendência de concentração de partículas na superfície da membrana o que desencadeia a formação de uma torta. Como consequência tem-se o aumento da resistência e a redução do fluxo permeado (AMARAL, 2009).

Na microfiltração (MF), o sistema de filtração é operado com pressões variando de 0,2 a 2,0 bar. Esse processo promove uma elevada remoção de sólidos suspensos, bactérias e uma remoção parcial de vírus e macrosolutos (VIANA, 2004). A separação dos sólidos suspensos se dá por peneiramento através dos poros (JUDD, 2006).

Na MF com escoamento paralelo à superfície da membrana há separação da alimentação em permeado e retido. Esse sistema permite diminuir a concentração de partículas que se depositam sobre a membrana, proporcionando uma filtração mais eficiente (KOROS *et.al.*, 1996).

A figura 1 apresenta esquematicamente a filtração frontal e tangencial.

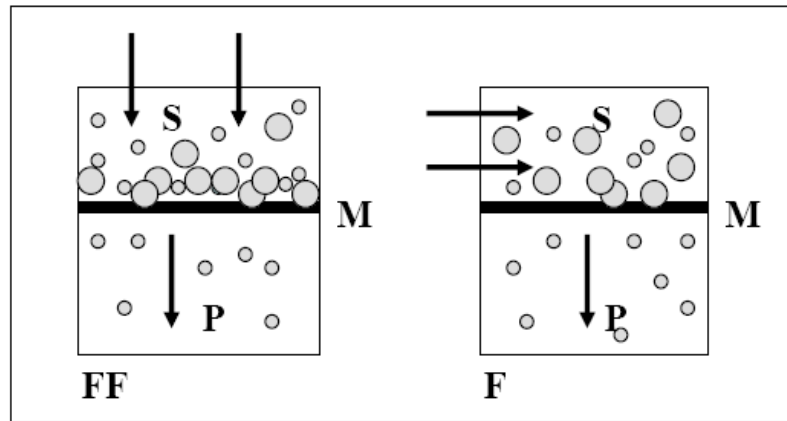


FIGURA 1: Representação esquemática do sistema de filtração frontal e tangencial.

Legenda: filtração frontal (FF), filtração tangencial (F), suspensão (S), membrana (M), permeado(P)

Fonte: KOROS *et.al.*, 2006

Os sistemas com membrana de ultrafiltração (UF) são operados com pressões variando entre 2,0 a 7,0 bar. Possui poros variando entre 0,1micrômetros a 5 nanômetros. Essas membranas promovem uma elevada remoção de vírus e uma razoável remoção de EPS (substâncias poliméricas extracelulares) e auxiliam na retenção de DBO (demanda bioquímica de oxigênio), que poderá ser mantida no biorreator (FANE & CHANG, 2002). A separação se dá por peneiramento através dos poros (JUDD, 2006).

As membranas de nanofiltração (NF) são operadas com pressões entre 7,0 e 20 bar. Possuem poros de aproximadamente 2nm e retêm a maior parte das espécies químicas, excetuando alguns íons monovalentes e compostos orgânicos de baixo peso molecular. São raramente adotadas nos BRM por causa da elevada resistência hidráulica, no entanto, são de interesse em outras aplicações (FANE & CHANG, 2002). O processo se dá através da combinação da rejeição de carga, difusão, solubilidade através dos microporos (JUDD, 2006).

No processo de osmose inversa (OI), o fluxo permeado tem sentido contrário ao sentido do fluxo osmótico natural, e o solvente escoá do lado da solução mais concentrada para o lado mais diluído. São aplicadas pressões elevadas, variando de 20,0 a 80,0 bar no lado da solução concentrada. Dessa forma, o potencial químico do solvente na solução concentrada torna-se mais elevado do que na solução diluída resultando na inversão do sentido do fluxo osmótico.

A membrana de OI pode ser considerada como densa, não apresentando poros discretos (VIANA, 2004). Processo de separação é alcançado em virtude de diferentes taxas de difusão e solubilidade entre o solvente e o soluto (JUDD, 2006).

Alguns exemplos de aplicação desses processos são:

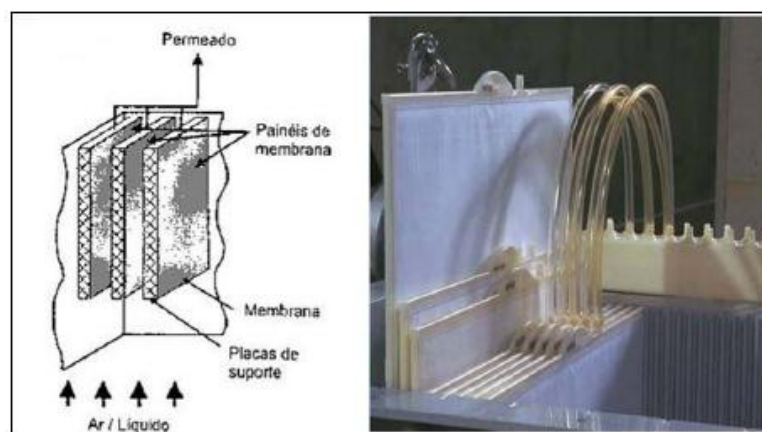
- MF: empregado para concentração de células de esterilização bacteriana.
- UF: utilizado para o fracionamento de proteínas; Pode ser usado no tratamento terciário de efluentes, proporcionando a obtenção de um efluente clarificado e desinfetado;
- NF: usado para redução da dureza e remoção da cor;
- OI: aplicado na dessalinização e desmineralização de águas.

As membranas são usadas em diversas configurações tipo placa e quadro, tubular, fibras ocas e espiral, sendo esta não usada nos BRM. As membranas placa-quadro são membranas planas, apresentam estruturas simples sendo dispostas paralelamente, intermediadas por espaçadores e suportes porosos. A configuração tubular é constituída por tubos poliméricos ou cerâmicos inseridos dentro de módulos. O número de tubos (membranas) inseridos pode variar. São geralmente empregados na indústria alimentícia por ter uma maior facilidade de limpeza. No entanto, tem um custo maior devido à necessidade do uso de energia durante a operação para a manutenção da velocidade tangencial sobre a superfície da membrana que evita redução rápida do fluxo. As fibras ocas são usadas na forma de cartucho contendo um número grande de fibras empacotadas dentro do módulo. Esta é muito utilizada em MF e UF. A alimentação pode ser aplicada por dentro da membrana (fluxo de dentro para fora) ou por fora da membrana (fluxo de fora para dentro). A espiral é uma das mais comuns nas indústrias que operam com processo de separação por membrana, principalmente MF, UF e OI. É constituída por membranas planares, suportes e espaçadores, que são fixados e enrolados em redor de um tubo coletor central por onde flui o permeado (OLIVEIRA, 2010; SILVA, 2008; POLETTO, 2010). A tabela 1 abaixo reúne as considerações acerca de custo, promoção da turbulência, possibilidade de retrolavagem e aplicação das configurações relatadas acima.

TABELA 1: Considerações referentes às configurações de membrana

Configuração	Custo do sistema	Promoção da Turbulência	Retrolavagem?	Aplicação
Placa e Quadro (FS)	Elevado	Razoável	Não	UF, MF
Fibra Oca (HF)	Baixo	Pobre	Sim	MF, UF,
Espiral (SW)	Baixo	Pobre	Não	NF, UF, OI

Os principais módulos de membrana estão representados nas figuras 3 a 6 abaixo.

**FIGURA 2:** Módulo tipo placa e quadro.

Fonte: DECOL, 2003; CENTROPROJEKT DO BRASIL, 2004

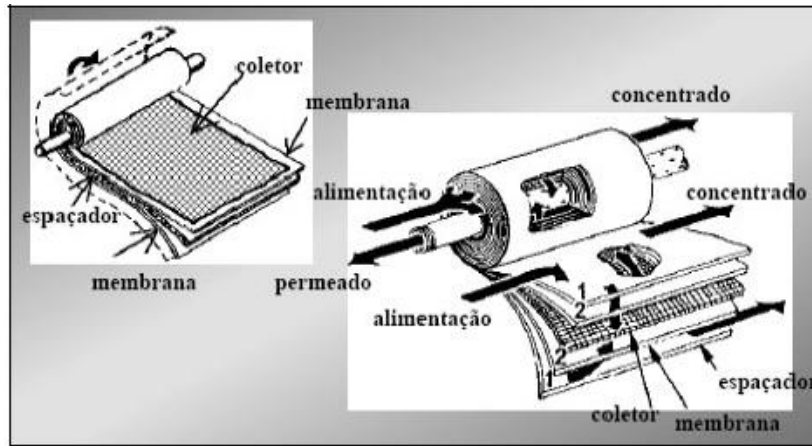


FIGURA 3: Módulo espiral utilizando membranas planas.

Fonte: HABERT *et.al.*, 2003

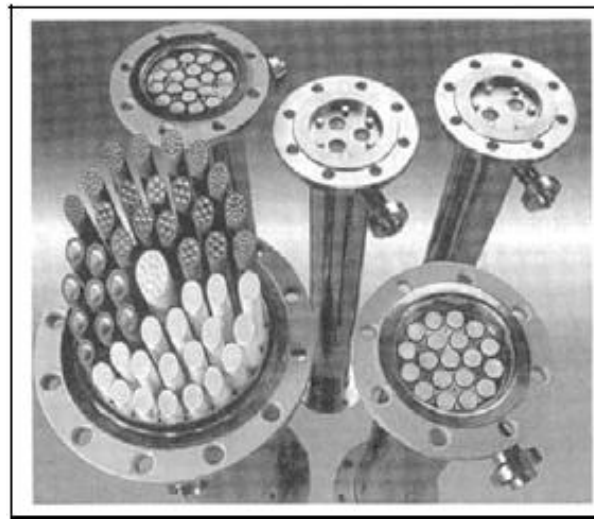


FIGURA 4: Módulos de membranas tubulares.

Fonte: DECOL, 2003

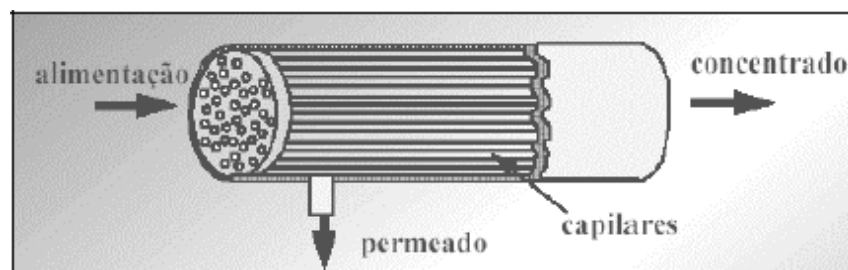


FIGURA 5: Módulos de membranas fibras ocas.

Fonte: HABERT *et.al.*, 2003

4.2 Incrustação de membranas

A incrustação de membranas é a principal limitação para a aplicação em grande escala das tecnologias com membranas. Esta ocasiona uma redução do desempenho, aumenta o consumo energético e a necessidade de limpezas freqüentes ou até mesmo a necessidade de substituição da membrana, o que acarreta em um aumento dos custos operacionais.

A incrustação pode ocorrer por mecanismos distintos: obstrução dos poros, formação da “torta” e estreitamento dos poros. Além destes mecanismos destacados também podemos verificar a formação da camada de gel, o scalling (precipitação de sais e coagulação de colóides) e a formação do biofilme (biofouling). Sendo que os três primeiros são os mais comuns em BRM.

No estreitamento dos poros, as partículas se acumulam na parede interna dos poros devido à adsorção das mesmas. Caso estas partículas se estabeleçam ao longo de toda área do poro, ocorrerá a obstrução. Nestas situações o processo de incrustação se deve a existência de partículas menores aos poros da membrana. A “torta” é originada quando as partículas da solução a ser filtrada possuem tamanho superior aos poros da membrana (AMARAL, 2009).

Os mecanismos de incrustação são demonstrados na figura 2.

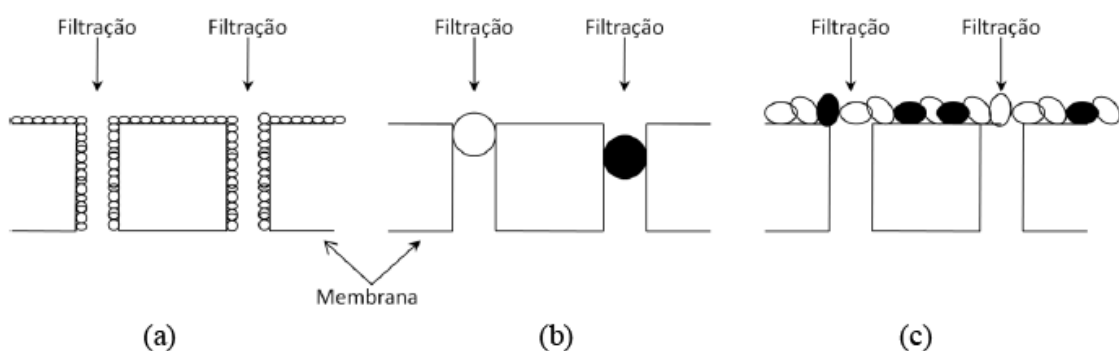


FIGURA 6: Mecanismo de incrustação de membrana.

estreitamento dos poros (a); obstrução dos poros (b); formação de torta (c)

Fonte: AMARAL, 2009

A retenção de partículas de tamanho superior ao tamanho dos poros da membrana da origem a formação da torta. Após o estabelecimento da primeira camada, a torta passa a atuar como uma segunda camada seletiva que pode incorporar à sua constituição colóides, partículas e moléculas incapazes de permear através dos interstícios da “torta”.

4.3 Membranas e Biorreatores

Os BRM consistem na conjugação de processos biológicos anaeróbios ou aeróbios associado a membranas, geralmente de micro (MF) ou ultrafiltração (UF).

A principal função da membrana no BRM é a promoção da retenção de sólidos suspensos e de outras espécies químicas que não foram eliminadas no processo de degradação biológica ou produzidas durante esta etapa. A remoção parcial ou completa destes materiais depende da escolha da membrana.

As membranas de microfiltração (MF) removem sólidos suspensos, incluindo bactérias, algumas espécies de vírus e outras macromoléculas com baixos requerimentos de pressão. Os principais macrosolutos presentes em um BRM são as substâncias poliméricas extracelulares (EPS) e os produtos microbianos solúveis (SMP). De modo geral, os chamados EPS consistem em uma mistura complexa de proteínas, carboidratos, polissacarídeos, DNA, lipídeos e substâncias húmicas que são constituintes da matriz de flocos e de biofilmes. As SMP são substâncias secretadas pelas células em resposta a uma situação de stress (condição operacional ou ambiental) e/ou durante a lise celular. As EPS são removidas apenas com membranas de MF através da adsorção no material da membrana ou pela retenção gradual, devido à formação de incrustação da membrana. As membranas de ultrafiltração (UF) retêm vírus e moléculas orgânicas, principalmente EPS, no entanto, requerem operações com diferenças de pressão através da membrana significativamente superiores as membranas de MF. As membranas de nanofiltração (NF) retêm a maior parte das espécies, com exceção de íons e de moléculas de baixo peso molar. Devido à elevada resistência hidráulica as membranas de NF são raramente empregadas em BRM (AMARAL, 2009; VIERO, 2006).

Quando nos referimos à localização dos módulos, os BRM podem apresentar duas configurações: a submersa, interna ou externa ao tanque biológico, e a pressurizada. No tipo

submerso interno, o módulo ou feixe de membrana é imerso no tanque aerado e o filtrado, geralmente, é succionado através das paredes da membrana. Este módulo geralmente utiliza membranas do tipo fibra oca ou placa e quadro. As membranas planas e as fibras ocas podem ser instaladas tanto verticalmente quanto horizontalmente, de modo que, o fluxo de bolhas ascendentes mova-se axial ou transversalmente às fibras. Usualmente o conteúdo do biorreator está em contato com a superfície externa das membranas (VIERO, 2006). O módulo externo ao reator é operado em fluxo cruzado, a solução em suspensão escoia paralelamente a superfície da membrana e o permeado é transportado transversalmente a ela. Nesta configuração, o permeado é geralmente recuperado por diferença de pressão por uma válvula reguladora de pressão (VIANA, 2004).

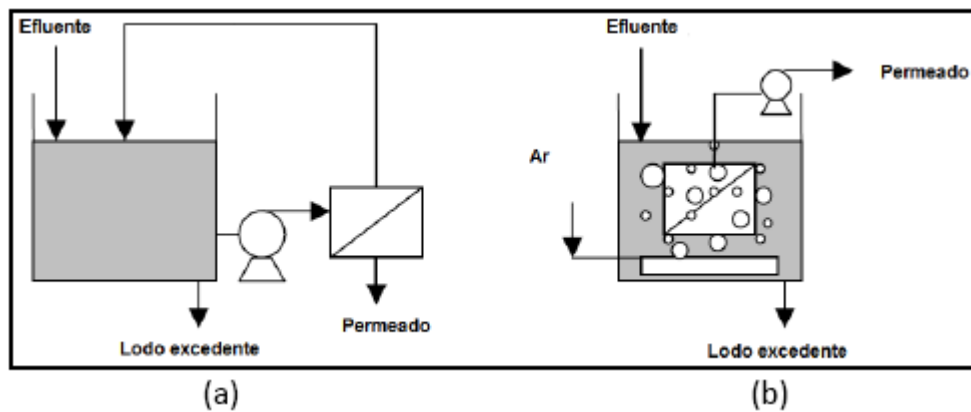


FIGURA 7: Tipos de biorreator com membrana

Legenda: membrana externa do biorreator (a), membrana submersa (b)

Fonte: **AMARAL, 2009**

Nos módulos submersos a força motriz ao longo da membrana é obtida através da criação da pressão negativa do lado permeado. A aeração nesta configuração pode ser aplicada para a obtenção de dois mecanismos distintos: através do uso de difusores é possível minimizar a deposição de materiais e as bolhas de ar também pode proporcionar a suspensão da biomassa.

No módulo pressurizado, o lodo junto com o efluente (líquido reacional) é bombeado para o módulo de membrana, geralmente do tipo fibra oca, placa e quadro e tubular. A força motriz é a pressão criada pela elevada velocidade tangencial ao longo da superfície da membrana (CICEK, 2003).

Cada configuração apresenta suas vantagens e desvantagens. Os BRM submersas possuem baixo consumo energético, baixo fluxo de permeado, que associado com a fricção das bolhas de ar contribuem para a amenização dos efeitos da incrustação. O BRM com membrana acoplada externamente é caracterizados pela elevada concentração de biomassa, que associada a valores relativamente mais elevados de fluxo permeado e com a diferença de pressão entre as membranas, apresenta maior possibilidade de incrustação. Apresenta também maior flexibilidade operacional, no entanto, possui um custo energético elevado (SCHNEIDER & TSUTIYA, 2000; JUDD, 2006; PROVENZI, 2005; VIERO, 2006; VIANA, 2004).

BRM de membrana imersos em um tanque contendo biomassa representa a configuração mais empregada, uma vez que requer um menor conteúdo energético, e desta forma, se torna viável para a aplicação em grande escala. Existem cinco elementos chaves para o projeto e operação destes BRM são eles: o design e a manutenção da permeabilidade da membrana, as características da alimentação e o pré- tratamento, aeração necessária à membrana e à biomassa, idade do lodo e a atividade e natureza da biomassa (JUDD, 2006).

4.4 Biorreatores com membrana (BRM)- vantagens e desvantagens e desafios

A legislação, cada vez mais restritiva com relação à descarga de efluentes, influenciou na necessidade de se estudar processos capazes de removerem uma maior porcentagem de DBO, de sólidos suspensos, nitrogênio, fósforo e patogênicos. No cenário mundial é observada uma grande tendência para o tratamento de efluentes através da combinação de processos. Uma das tecnologias mais promissoras é a do biorreator de membrana (BRM), processo este que envolve processos de separação por membranas associado a um tratamento biológico. No BRM a separação sólido/líquido é feita através da retenção pelas membranas (em um módulo submerso interno ou externo ao tanque biológico ou módulo pressurizado através da recirculação propiciada pela diferença de pressão gerada por uma carga hidráulica ou por ação de uma bomba). A membrana permite o aumento da concentração de microorganismos no biorreator e gera melhorias na qualidade do efluente. As membranas de ultrafiltração (UF) ou microfiltração (MF) separam os materiais rejeitados, principalmente sólidos e microorganismos (GANDER *et al.*, 2000).

Os BRM podem ser empregados no tratamento de efluentes industriais, esgoto e lixiviado de aterro sanitário. Vista como uma alternativa para o tratamento de águas residuárias, fornece suporte ao reuso e beneficia a sustentabilidade dos recursos hídricos. Oferece inúmeras vantagens sobre os processos convencionais de tratamento tais como produção de um efluente de elevada qualidade, menor área, uma menor produção do lodo, maior tolerância a choques operacionais e facilidade de remoção de micropoluentes. Os BRM permitem o tempo de detenção hidráulica (TDH) independente da idade do lodo o que possibilita um maior controle das reações biológicas. Além do mais permite uma maior concentração de microorganismos o que contribui para a diminuição do volume do reator (GONZÁLES *et al.*, 2008; RAHIMI *et al.*, 2011; LORAIN *et al.*, 2010). Devido à obtenção de um efluente com uma elevada qualidade, ausente de sólidos suspensos e turbidez, o BRM pode ser considerado uma ferramenta interessante quando há uma necessidade de um permeado com qualidade elevada (WISNIEWSKI, 2007).

Devido a essas vantagens o mercado de BRM cresce aceleradamente nos últimos anos. O crescimento mercadológico dessa tecnologia é em média de 11,6 a 12,6% ao ano, desde a virada do milênio. O mercado de BRM aumenta de forma ligeiramente maior do que as outras tecnologias com membrana. Como exemplo, temos a osmose inversa, cuja taxa de crescimento anual é de 9 a 10%. Essas análises não levam em conta possíveis crises econômicas que podem estagnar o mercado durante um período de 2 a 3 anos (SANTOS & JUDD, 2011). Espera-se que o desenvolvimento de pesquisas e estudos proporcione o aumento do interesse de aplicação desta tecnologia nos próximos anos.

Embora os BRM apresentem um tratamento efetivo estes enfrentam alguns desafios tais como a incrustação, elevado custo, medidas de manutenção (teste de integridade, reparos e limpezas) e alguns casos, a necessidade de um pré-tratamento visando o aumentando de sua vida útil. A incrustação das membranas é um dos mais notáveis desafios a ser evitado, uma vez que desencadeia a queda do fluxo permeado ao longo do tempo e a diminuição da vida útil da membrana, tendo como consequência a elevação do custo operacional (RAHIMI *et al.*, 2011; LORAIN *et al.*, 2010). Para superar este problema, vários estudos foram elaborados com o objetivo de aprimorar conhecimentos visando um entendimento e a minimização da obstrução das membranas.

A incrustação está intimamente ligada à fixação da camada da torta na superfície da membrana, mas também é dependente das propriedades da biomassa, dos parâmetros operacionais incluindo a pressão transmembrana (PTM), fluxo de filtração, concentração do lodo, concentração produtos microbianos solúveis e certamente a intensidade de aeração (MENNITI & MORGENROTH, 2010).

As diferentes frações de solutos presentes no líquido reacional dos BRM (lodo e efluente) contribuem para a ocorrência da incrustação. Os produtos microbianos solúveis, que contribuem para a incrustação de membranas, são principalmente constituídos de bactérias cuja concentração depende da idade do lodo, colóides (polímeros e fragmentos de células que sofreram lise) e moléculas dissolvidas. Em caso de efluentes oleosos, os elementos oleosos também desempenham um importante papel na incrustação (RAHMAN *et al.*, 2006).

De modo geral, objetivo da otimização do projeto do BRM é a obtenção de melhores condições hidrodinâmicas, para minimizar a incrustação. O projeto do reator e do módulo de membrana define a disposição da membrana, a densidade de empacotamento, o modo de filtração e a distribuição da alimentação (JUDD, 2006).

Os BRM são constantemente operados sob condições de fluxo constante e este determina a deposição de agentes incrustantes sobre a superfície da membrana. Como a taxa de incrustação aumenta exponencialmente em relação ao fluxo, uma operação sustentável implica em moderados fluxos sendo este preferencialmente operado abaixo do considerado fluxo crítico. Mesmo assim, estas condições não impediriam a incrustação (JUDD, 2006). De acordo com Field *et al.*, (1995), fluxo crítico é o fluxo abaixo do qual não ocorre decaimento do fluxo com o tempo e acima do qual não há deposição sobre a membrana. É caracterizado pela condição em que há um balanço entre as forças convectivas (migração das partículas ou moléculas para a superfície da membrana) e difusivas (retorno das partículas ou moléculas para o meio reacional). Acima do fluxo crítico a resistência não é mais estável e aumenta rapidamente. Marca também a transição entre um regime de polarização estável e o instável. No momento em que o fluxo crítico é ultrapassado o aumento de pressão não é somente relacionado ao aumento do fluxo, mas também necessário para sobrepor a resistência formada por incrustações. À medida que as incrustações aumentam, o fluxo tende a um valor limite com o aumento da diferença de pressão (FANE & CHANG, 2002).

São estipulados três estágios da incrustação em BRM: incrustação condicional, incrustação lenta e aumento da PTM.

O estágio inicial é desencadeado quando ocorrem interações fortes entre a superfície da membrana e as substâncias poliméricas extracelulares (EPS) e o produto microbiano solúvel (SMP) presente na alimentação. Ognier *et al.*, (2002), descreveu uma rápida incrustação irreversível neste estado inicial, e uma adsorção passiva de colóides e compostos orgânicos. A intensidade destes efeitos depende da distribuição dos poros da membrana, da característica química da superfície da membrana e especialmente da hidrofobicidade. O fenômeno desencadeado na fase inicial da incrustação foi considerado um processo de interação aleatório ao invés de ser um fenômeno convencional de formação da torta. Enquanto algumas partículas ultrapassaram as barreiras da membrana, os agregados biológicos de EPS e alguns flocos menores formaram uma camada residual na superfície da membrana. A biomassa acumulada foi capaz de agregar mais facilmente os agentes incrustantes favorecendo o início da fase de incrustação lenta (estágio dois) (JUDD, 2006).

Mesmo em condições de operação abaixo do fluxo crítico, a deposição temporária dos flocos e biomassa pode contribuir para o desencadeamento do segundo estágio da incrustação. Após o estágio inicial, a superfície da membrana está propensa a fixar o material coloidal e a biomassa. A adsorção e a deposição da matéria orgânica também podem ocorrer no segundo estágio. Uma vez que estes fenômenos podem ocorrer ao longo da superfície da membrana e não somente nos poros da mesma, há o desencadeamento da formação da torta, sem afetar diretamente o fluxo neste período inicial. Entretanto, com o passar do tempo ocorre o bloqueio parcial ou integral dos poros. Com o aumento da resistência espera-se que ocorra um aumento na pressão transmembrana (PTM) e na taxa de deposição levando a uma curta permanência no segundo estágio da incrustação (JUDD, 2006).

O estágio três é caracterizado pelo aumento da PTM. A existência de regiões da membrana com diferentes intensidades de incrustação implica em diferentes fluxos locais. A permeação é promovida em áreas da membrana tidas como menos incrustadas, e nestas regiões é ultrapassado o fluxo crítico. Sob tais condições, a taxa de incrustação aumenta rapidamente. O aumento súbito da PTM ou o salto é consequência da operação em fluxo constante, e vários argumentos podem ser usados para explicar este aumento. Assim como ocorre na filtração

clássica é provável que mais de uma variável interfira neste estágio (JUDD, 2006). Na figura 8 é apresentado um esquema envolvendo estas considerações.

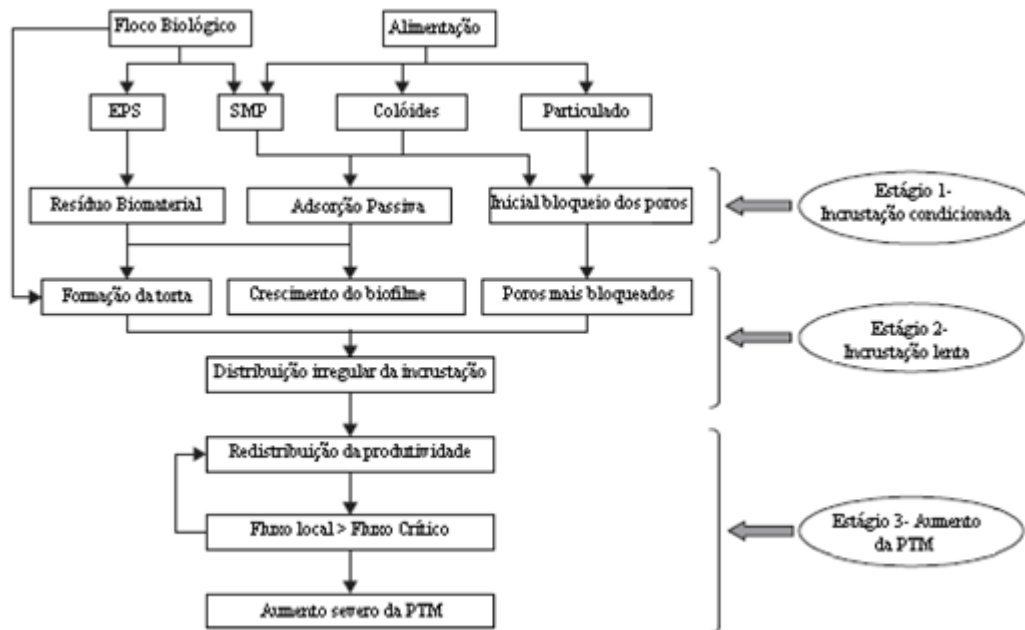


Figura 8: Esquema envolvendo os estágios da incrustação.

Adaptado de JUDD, 2006

Várias técnicas são usadas para reduzir a incrustação. Basicamente a minimização desse efeito pode ser feita por meio da redução do fluxo, promoção da turbulência para limitar a deposição de materiais e/ou aplicação periódica de medidas de limpeza para remover a “torta” formada (SCHOEBERL *et al.*, 2005).

Parâmetros operacionais tais como temperatura, fluxo, pressão, concentração da alimentação e projetos de operação, exercem uma grande influência na incrustação de membranas. A aeração é um parâmetro chave no BRM uma vez que o volume de fluxo permeado através da membrana está intimamente associado a esse fator. A aeração é necessária para o tratamento biológico, suspensão dos sólidos e em alguns casos usados para a limpeza da membrana (RAHIMI *et al.*, 2011; MENNITI & MORGENROTH, 2010). Portanto, a aeração é o ponto chave para a operação de um BRM.

5 METODOLOGIA

Esta breve revisão de literatura trata-se da tecnologia de biorreatores de membrana focando no efeito da aeração nesse sistema. O trabalho envolveu uma série de pesquisas realizadas entre Novembro de 2010 a Junho de 2011.

Foram tomados como ferramenta de pesquisa os seguintes sites:

- <http://www.mbr-network.eu/>
- <http://www.periodicos.capes.gov.br/>
- <http://www.engineeringvillage.com>
- <http://www.google.com.br/>

Os trabalhos publicados encontrados datavam de 1991 a 2011. A revisão de literatura foi diversificada envolvendo livros, teses, dissertações e artigos. Os termos chaves da pesquisa estão esquematizados na tabela 2 abaixo. Os termos primários foram usados como uma busca generalizada a respeito do tema e os secundários visaram uma abordagem mais específica.

TABELA 2: Termos usados para pesquisa

TERMOS PRIMÁRIOS	TERMOS SECUNDÁRIOS
Aeration membrane bioreactor;	Aeration
Aeration membrane bioreactor;	Membrane fouling;
MBR;	Wastewater treatment;
Aerobic bioreactor;	Intermittent aeration;
	Aeration on/off time

Os termos de pesquisa foram encontrados no título e/ou palavras-chaves. Para verificar se o material era pertinente à pesquisa o resumo foi considerado. Dos 70 artigos analisados durante a revisão, foram selecionados 58 para as diversas análises que se seguem. Estes foram escolhidos de acordo com a pertinência e relevância para o trabalho. Os artigos se

submeteram a uma análise mais profunda e seus títulos e palavras-chaves em inglês foram listados em uma planilha e uma espécie de nuvem de palavras foi elaborada através do site www.wordle.net. A nuvem de palavras consiste em um gráfico no qual a frequência em que as palavras ocorrem é proporcional ao tamanho da fonte, é de fácil visualização e imediata interpretação. Somente os termos relacionados aos BRM foram selecionados, desconsiderando artigos, preposições, palavras comuns e seus plurais. Também foram excluídos os termos genéricos como: atividade, análise, aplicação, comparação, efeito, avaliação, impacto, desempenho, investigação, tratamento, desempenho, influência, estudo, operação, funcionamento, plantas, tempo de transferência, processo, propriedade, tamanho, estrutura, remoção e sistema. Alguns artigos, devido à padronização das revistas não continham palavras-chaves.

Para a análise da nuvem de palavras apenas os artigos foram usados, deixando as teses, dissertações e livros para a discussão de resultados e para o levantamento bibliográfico. Dos artigos levantados para a análise do título foi considerado apenas 48 e esses continham 94 palavras. Dessas destacou-se as 30 mais frequentes. Devido à formatação diferenciada dos trabalhos do total (48) apenas 17 continham palavras-chaves totalizando 70 palavras. Desse total, novamente destacou-se as 30 mais frequentes. Os resultados estão apresentados nas figuras 9 e 10.

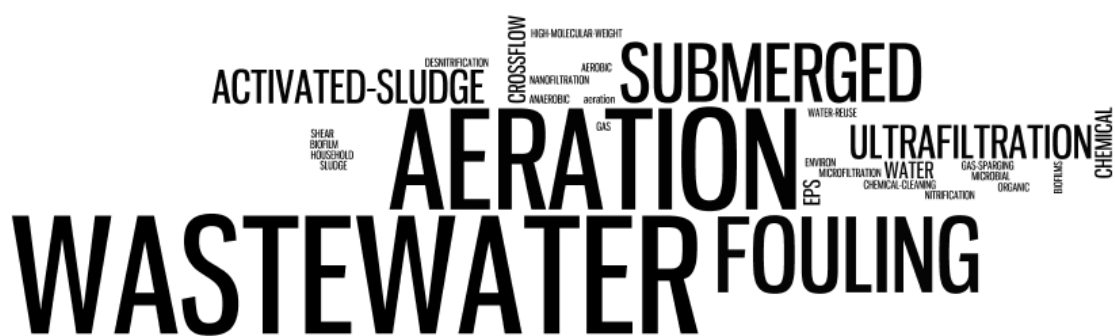


FIGURA 9: Nuvem de palavras produzida através dos títulos dos trabalhos



FIGURA 10: Nuvem de palavras produzida através das palavras-chaves dos trabalhos

Para verificar o perfil de publicação ao longo dos anos foi elaborado um gráfico (Figura 11) para representar o número de publicações durante o período de 1991 a 2011. Para essa etapa, todos os 58 trabalhos foram analisados.

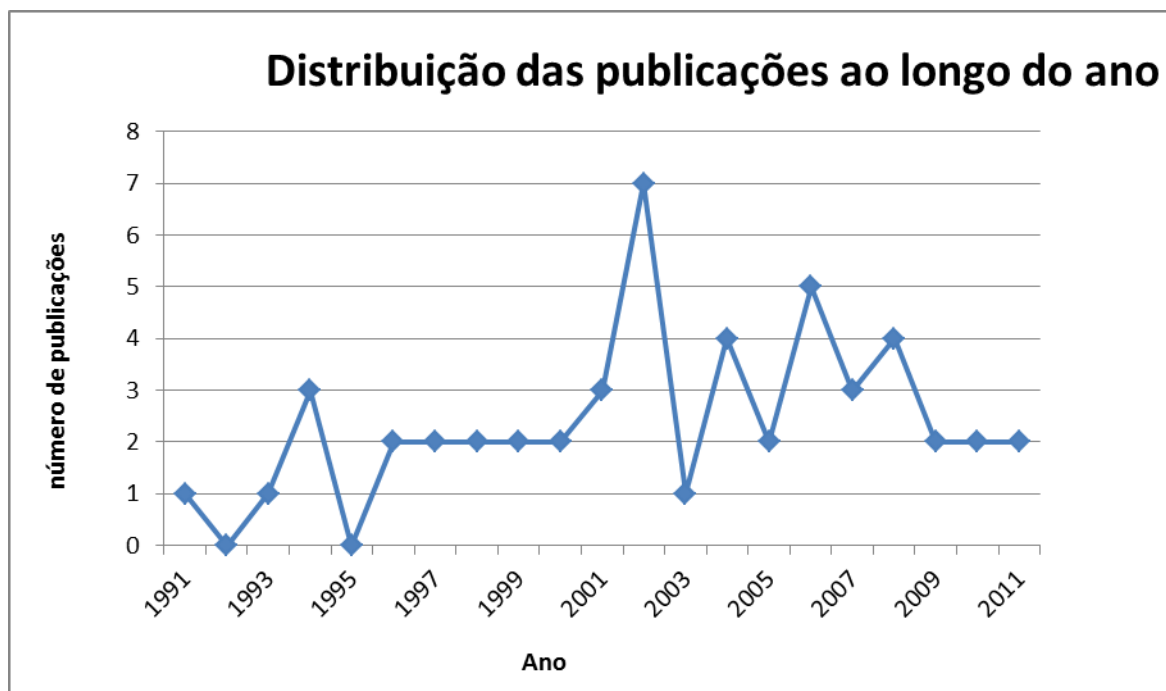


Figura 11: Distribuição das publicações ao longo do ano

Tentando analisar a distribuição geográfica dos artigos também foi elaborado um gráfico (Figura 12). No entanto, nesta etapa tivemos perdas, pois devido à padronização diferenciada

dos trabalhos nem todos continham a especificação do local de origem. Foram observados então apenas 28 trabalhos.

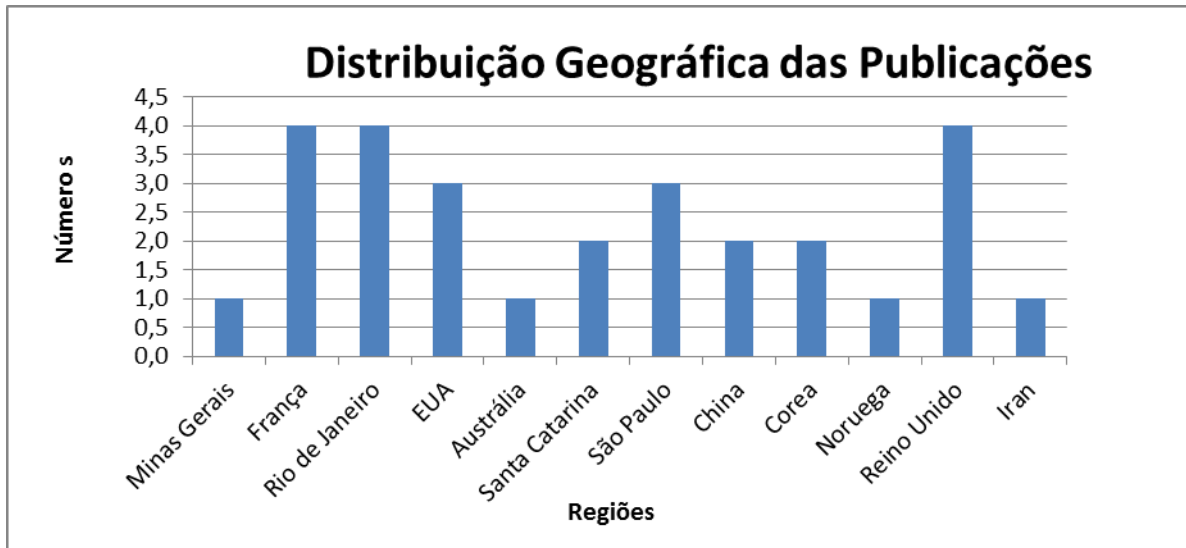


FIGURA 12: Distribuição geográfica das publicações

6 RESULTADOS

6.1 Levantamento bibliográfico

6.1.1 Importância da aeração no sistema BRM

No sistema de biorreatores de membrana a aeração desempenha um importante papel com finalidades biológicas e operacionais. Fornece oxigênio para a comunidade microbiana realizar a biodegradação da matéria orgânica, mantém a dispersão da biomassa do reator e auxilia na limpeza da superfície da membrana. É necessário também para manter a sustentabilidade do fluxo e retardar o processo de incrustação (RAHIMI *et al.*, 2011; IVANOVIC & LEIKNES, 2008). A aeração também é capaz de minimizar os efeitos da incrustação por diminuir a concentração de polarização na superfície da membrana bem como contribuir para a sua limpeza através da promoção da velocidade tangencial (GANDER *et al.*, 2000). Uma aeração adequada pode contribuir para a otimização da operação em BRM e na minimização dos efeitos da incrustação.

A turbulência gerada pela aeração promove uma velocidade tangencial sobre a membrana, resultando em uma remoção da torta que se deposita. De forma geral, quanto maior a intensidade de aeração maior será a velocidade tangencial e conseqüentemente maior a remoção. Desde que este aumento não tenha atingido o limite de melhoramento da incrustação. No entanto, vazões de ar muito elevadas podem trazer sérios problemas como o rompimento das fibras ou a quebra dos flocos (KIPPER, 2009).

A força de cisalhamento, gerada pela turbulência, e a agitação das fibras são provocadas por bolhas de ar no caso dos BRM aeróbios ou biogás no caso dos BRM anaeróbios que auxiliam na atenuação da deposição da torta na superfície da membrana durante a filtração. Os pesquisadores encontram dificuldades em alcançar uma compreensão abrangente dos fenômenos responsáveis pela incrustação bem como seu comportamento no BRM. Como conseqüência do elevado número de interações torna-se complicado prever o sistema de incrustações (GONZÁLES *et al.*, 2008). Neste trabalho o foco será a avaliação da importância da aeração em BRM aeróbio.

6.1.2 Benefícios da aeração

Uma aeração apropriada e uma atenção ao tamanho médio das partículas presentes dentro da solução podem contribuir para minimização dos efeitos da incrustação, potencializar os parâmetros operacionais (isto é produção, retrolavagem e recuperação) e também a atuação da membrana (AMARAL, 2009). Como vantagens da aeração podemos citar: redução do depósito de partículas sobre a superfície da membrana (tendência em diminuição da resistência da torta) e redução da pressão através da membrana.

O efeito benéfico da aeração também pode ser demonstrado através do aumento do fluxo permeado. Le Clech *et al.*, (2003), descobriram que a velocidade superficial das bolhas sempre tem um efeito positivo sobre o fluxo crítico. No seu estudo uma solução com 4g/L foi filtrada em uma membrana tubular. O fluxo crítico aumentou de 16 para 51 L m⁻² h⁻¹ para velocidades de 0,07 e 0,22 m s⁻¹ respectivamente. No entanto, existe um ponto em que o aumento da aeração não gera mais efeitos significativos na remoção da incrustação. Neste estudo foi possível detectar a diminuição da eficiência de remoção com o aumento aeração.

6.1.3 Desvantagens da aeração

Resultados de estudos com três biorreatores em paralelo operados sob diferentes intensidades de aeração (150, 400 e 800 L h⁻¹) mostraram que a tanto a intensidade alta quanto a baixa têm uma influência negativa na permeabilidade da membrana. A alta intensidade de aeração resulta em severas quebras dos flocos e a promoção da liberação de colóides e solutos vindos dos flocos microbiológicos para a solução. (IVANOVIC *et al.*, 2008; RAHIMI *et al.*, 2011). Além do mais, os custos da demanda energética para módulos que usam a aeração recebem uma particular atenção. Nos BRM, a aeração necessária tanto para otimização dos parâmetros operacionais quanto para finalidades biológicas é tida como o fator mais oneroso em termos de consumo energético (IVANOVICK & LEIKNES, 2008). Segundo Gander *et al.*, (2000) a aeração representa o componente principal do custo operacional). Entretanto, a relação entre aeração e fluxo ou pressão transmembrana (PTM) não é completamente compreendida. É observado também, que a taxa de aeração é influenciada pela configuração da membrana e do reator (IVANOVICK & LEIKNES, 2008).

Um estudo elaborado por Braak *et al.*, (2011), levantou os gastos energéticos em BRM submersos. Neste, foi destacada a importância da aeração na minimização da incrustação e o aumento do consumo energético desencadeado pelo uso deste parâmetro. A necessidade do uso de bolhas finas e grossas em sistemas submersos aumenta o consumo energético, o que implica em um aumento de 90% dos custos operacionais totais. Melin *et al.*, (2006) reuniu as principais considerações operacionais dos BRM submersos. Por unidade de volume de permeado foi encontrada uma média de consumo de 0.2 e 0.4 kWh m⁻³ sendo que 80-90% deste valor é de responsabilidade da aeração. De 10-20% deste valor é requerido pela bomba para a obtenção do permeado.

6.1.4 Impacto da aeração na membrana e no material biológico

A aeração é tida como um parâmetro chave na operação de BRM. Ela exerce impactos significativos na membrana e nos microorganismos. O cisalhamento, sob uma forma de aeração vigorosa, é usado para controlar a incrustação em BRM. Entretanto, o cisalhamento também influencia as propriedades físico-químicas e biológicas da biomassa do reator (MENNITI *et al.*, 2010).

A aeração é capaz de fornecer o oxigênio aos microorganismos para a biodegradação da matéria orgânica e também é capaz de manter a biomassa dispersa no biorreator. A turbulência induzida pela aeração promove uma velocidade tangencial na zona próxima ao módulo da membrana (AMARAL, 2009). Na maior parte dos casos, a aeração usada para a biomassa e para a minimização da incrustação é fornecida separadamente (BRAAK *et al.*, 2011).

Estudos elaborados por Ivanovick & Leiknes, (2008) discutiram a intensidade de aeração, o rompimento de flocos, o cisalhamento na superfície da membrana e o aumento da PTM em um biorreator submerso. As taxas de aerações testadas para o biorreator foram de: 0.84, 1.68, 3.37, 5.05, 6.74 Nm³/m²h. Neste estudo foi analisada a distribuição do tamanho de partículas e a PTM. Foi constatado que as diferentes taxas de aeração não interferiram na característica do efluente final. Entretanto, o desempenho da membrana, analisado em termos de PTM, mostrou respostas entre as diferentes taxas de aeração. Uma maior taxa de incrustação pôde ser observada nas menores aerações e as maiores minimizaram esta tendência. Entretanto, não houve uma grande diferença entre as três maiores intensidades. Observou-se que para as taxas

de aeração menores que $3,37 \text{ Nm}^3/\text{m}^2\text{h}$ a taxa de incrustação aumentou significativamente confirmando assim a importância da aeração na mitigação da incrustação. Entretanto, há um limite acima do qual o aumento da aeração não proporcionou benefícios ao sistema. Idéia também verificada nos estudos de Aptel *et al.*, (2002) & Ueda *et al.*, (1997) onde a minimização da incrustação não foi proporcional à intensidade de aeração. Estas considerações estão de acordo com os estudos de Le-Clech *et al.*, (2003) e Liu *et al.*, (2003). Como mitigador da incrustação tem-se o cisalhamento na superfície da membrana promovido pelas bolhas de ar. O cisalhamento também interfere no material particulado presente no reator. Um alto cisalhamento promove a quebra dos sólidos suspensos em partículas menores, o que potencializaria uma maior deposição destas na superfície da membrana. O estudo de Ivanovick & Leiknes, (2008) referente a distribuição do tamanho de partículas mostrou um aumento das partículas menores que $0.1 \mu\text{m}$ com o aumento da intensidade de aeração. Como constatado, a alta taxa de aeração tem duas conseqüências contraditórias: ao mesmo tempo em que é capaz de promover o cisalhamento da membrana promove a quebra de flocos. É fundamental a obtenção de uma aeração ideal que além de gerar o cisalhamento não contribua para o rompimento dos flocos. Neste estudo, o valor estimado foi maior que 1,68 e menor que $3,37 \text{ Nm}^3/\text{m}^2\text{h}$.

Uma das alternativas para o controle da incrustação em BRM é o uso de uma aeração apropriada ao longo da superfície da membrana, uma vez que os efeitos das bolhas de ar são essenciais para limitar a formação de depósito na superfície da membrana (UEDA *et al.*, 1997; CUI, CHANG & FANE 2003).

Abaixo estão esquematizadas as principais contribuições, positivas e negativas, acerca da aeração em BRM.

TABELA 3: Impactos da aeração no material biológico e na membrana.

Aspectos Positivos			
Impacto da aeração no material biológico	Referência	Impacto da aeração na membrana	Referência
Fornecimento de oxigênio necessário a biodegradação da matéria orgânica;	(AMARAL, 2009; RAHIMI <i>et al.</i> , 2011; IVANOVIC <i>et al.</i> , 2008);	Limitar a formação de depósitos na superfície da membrana;	(Ueda <i>et al.</i> , 1997; Cui, Chang & Fane 2003; (VIERO, 2006);
Manutenção da biomassa dispersa no reator;	(RAHIMI <i>et al.</i> , 2011; IVANOVIC <i>et al.</i> , 2008).	Promoção de uma velocidade tangencial na zona próxima ao módulo da membrana	(AMARAL, 2009; GANDER <i>et al.</i> , 2000);
		Potencializa parâmetros operacionais	(GANDER <i>et al.</i> , 2000; AMARAL, 2009).

Aspectos Negativos			
Impacto da aeração no material biológico	Referência	Impacto da aeração na membrana	Referência
Vazões de ar muito elevadas desencadeando o rompimento dos flocos;	(KIPPER, 2009)	Vazões de ar muito elevadas desencadeando o rompimento de fibras;	(KIPPER, 2009)
Alta intensidade de aeração promove a liberação de colóides e solutos vindo do floco microbiológicos para a solução.	(IVANOVIC <i>et al.</i> , 2008; RAHIMI <i>et al.</i> , 2011);	Aumento do custo energético	(IVANOVIC <i>et al.</i> , 2008; RAHIMI <i>et al.</i> , 2011)

Os microorganismos presentes no lodo residem em uma matriz complexa de proteínas, polissacarídeos, lipídeos e ácidos nucleicos conhecidos como substâncias poliméricas extracelulares, os EPS. Estas substâncias desempenham um importante papel na biodegradação da matéria orgânica (MENNITI *et al.*, 2010). Segundo Cicek *et al.*, (1999), uma alta intensidade de aeração, ou um alto cisalhamento, usado na operação em BRM, diminui o tamanho dos flocos através de suas quebras aumentando assim a possibilidade de deposição.

Alguns autores verificaram que o cisalhamento pode alterar a taxa de produção de EPS em BRM (JI AND ZHOU, 2006; MENG *et al.*, 2008 & MENNITI *et al.*, 2009), porém os resultados desses estudos são contraditórios. Ji and Zhou (2006) and Menniti *et al.*, (2009) encontraram que um elevado cisalhamento diminui a produção de EPS enquanto que Meng *et al.*, (2008) observaram um aumento de produção com o aumento do cisalhamento. Essas contradições sobre o cisalhamento sugerem que outros parâmetros procedimentais podem influenciar a produção de EPS. O entendimento da relação entre procedimentos operacionais e a produção de EPS fornece a oportunidade de potencializar a operação e a minimizar a produção de agentes incrustantes (MENNITI *et al.*, 2010) .

6.1.5 Tipos de aeração e Tipos de bolhas

A aeração pode ser considerada cíclica (intermitente) e contínua. A aeração cíclica é mais comum em biorreatores que trabalham com grandes vazões. Com a aeração intermitente objetiva-se a diminuição do consumo energético uma vez que a aeração é o principal fator responsável pelo aumento da demanda energética em BRM. Algumas vertentes defendem a idéia de que a aeração cíclica permite a formação de uma pequena camada de torta que pode ser facilmente removida através dos métodos convencionais de limpeza química, quando comparada a uma remoção contínua. A necessidade de limpezas químicas contínuas pode aumentar o custo de operação, uma vez que requerem o uso de produtos químicos e o emprego de estratégias de limpeza. Em relação à redução do consumo energético total da operação há questionamentos. Enquanto que a não aeração constante pode reduzir o gasto energético específico demandado pela aeração, o sistema como um todo necessitará de trabalhar com uma maior pressão logo, o gasto energético para o emprego de bombas pode equivaler à economia gerada pela aeração intermitente (Lim *et al.*, 2007). A aeração intermitente pode ser usada também para promover a remoção de nitrogênio e fósforo através da criação de condições aeróbicas e anóxicas que favorecem a nitrificação e desnitrificação respectivamente (Chang & Liu, 2001; Yeom *et al.*, 1999) .

Em processos biológicos convencionais, o oxigênio necessário ao tratamento biológico do efluente é, geralmente, fornecido em forma de ar atmosférico através de difusores de bolhas ou através da aeração de superfície. As bolhas de ar difundidas são adicionadas a suspensão (lodo e efluente), como em um filtro biológico aerado, ou a transferência de oxigênio ocorre através da interface ar/ líquido.

A tabela 4 a reúne as principais considerações acerca da aeração contínua e intermitente baseada nas exposições de Lim *et al.*, 2007; Chang & Liu, 2001; Yeom *et al.*, 1999).

TABELA 4: Aeração cíclica e contínua

AERAÇÃO CÍCLICA / INTERMITENTE	AERAÇÃO CONTÍNUA
Comum em BRM que trabalham com grandes vazões;	Sistema precisa trabalhar como maior pressão;
Objetiva a diminuição do consumo energético requerido pela aeração;	Capaz de reduzir o consumo energético demandado especificamente pela aeração;
Pode ser usado para a remoção de nitrogênio e fósforo através da criação de condições anaeróbias e anóxicas;	Auxilia na remoção contínua de materiais que se depositam sobre a superfície da membrana

Existem três tipos de aeração adotados em BRM: aeração de bolhas grossas (ou grandes), aeração de bolhas finas (ou pequenas) e a aeração em jato, menos comum. As principais diferenças entre os dois tipos de aeradores se referem ao tamanho da bolha, percentual de transferência de oxigênio, tipo de difusor, velocidade de cisalhamento e custo dos difusores.

O efeito do tamanho das bolhas pode variar. O tamanho da bolha e a frequência deve ser otimizada para promoção das melhores condições hidrodinâmicas ao mesmo tempo demandar o menor consumo energético. O estudo elaborado por Braak *et al.*, (2011) destacou que bolhas maiores promovem a turbulência e o aumento da frequência destas promoveu uma distribuição mais homogênea da incrustação, mas em contrapartida aumentou os gastos energéticos. Bolhas pequenas forneceram o mesmo comportamento quanto à prevenção da incrustação, no entanto usaram um menor fluxo de ar, dez vezes menor do que requerido para bolhas grossas. Desta forma, o autor concluiu que as bolhas finas foram capazes de economizar mais energia e destacou que a turbulência gerada por bolhas grossas é um mecanismo importante na distribuição homogênea do fluxo.

Tradicionalmente, as bolhas finas são mais usadas para a aeração da biomassa e as bolhas mais grosseiras usadas para auxiliar na limpeza da membrana. A aeração com bolhas grossas auxilia na promoção da turbulência, e conseqüentemente a promoção de forças de cisalhamento (JUDD, 2006). Bolhas grossas promovem elevadas forças de cisalhamento, mas em contrapartida aumentam os gastos energéticos. São, no entanto, ferramentas mais interessantes no uso de membranas tubulares e de fibra, o mesmo ocorre para o módulo de placa-plana. Em contrapartida, as bolhas pequenas geram uma turbulência mais homogênea. Um número elevado de bolhas pequenas homogeneízam o efeito do cisalhamento e o borbulhamento de ar impedindo a criação de zonas mortas ao mesmo tempo em que limita o consumo energético (BRAAK *et al.*, 2011).

O oxigênio é necessário para manter a comunidade de microorganismos e degradar a matéria orgânica biodegradável. A aeração também fornece agitação para garantir altas taxas de transferência de massa e a mistura no reator. Para a realização da mistura são necessárias bolhas maiores e para a transferência e dissolução do oxigênio exigem bolhas de menores tamanhos.

O oxigênio é geralmente transferido para a biomassa através do borbulhamento de ar, e em algumas situações, onde se usa o oxigênio puro, a transferência é feita para o sistema através de difusores. Somente uma parte do ar, ou oxigênio, é transferida para a biomassa. A eficiência da transferência depende do difusor utilizado e do projeto de aeração específico (JUDD, 2006).

A transferência de oxigênio é um assunto complexo quando se trata da velocidade tangencial. O aumento da vazão de ar promove um aumento do tamanho das bolhas devido à coalescência, que reduz a área superficial da bolha e, portanto, a transferência de oxigênio. Por outro lado, o aumento da turbulência reduz a espessura da camada limite aumentando-se o coeficiente de transferência e a taxa de transferência de oxigênio. Geralmente, considera-se que o aumento da vazão de ar gera uma elevação da taxa de transferência de oxigênio.

Desta forma, quando o assunto é transferência de oxigênio, o tamanho das bolhas deve ser o menor possível. Entretanto, bolhas pequenas sofrem um menor empuxo, reduzindo a velocidade tangencial, a turbulência e a menor remoção da torta. Bolhas grandes também são importantes

para manter a biomassa em suspensão, o que acontece também com bolhas pequenas. Porém, com bolhas muito pequenas podem, até mesmo, levar a flotação da biomassa.

Segundo Cui, Chang & Fane (2003), bolhas com diâmetro de 2 a 5 mm de formato elipsoidal são preferidas no borbulhamento de ar em BRM, pois são capazes de ascender rapidamente e arrastar as partículas (KIPPER, 2009).

A caracterização da aeração envolve o tamanho das bolhas, a vazão de ar e a sua intensidade. Esses fatores interferem na biomassa e na operação da membrana. A característica das bolhas depende do tipo de aerador e da estabilidade das bolhas e esta é influenciada pela característica da biomassa e pela promoção da coalescência das bolhas (AMARAL, 2009).

6.1.6 Aeração e demanda energética

Os dois componentes que mais interferem no aumento do custo operacional em BRM é a necessidade de substituição das membranas e o consumo de energia. Estes fatores se tornam ainda mais significativos em situações de incrustação da membrana (VERRECHT *et al.*, 2008).

A aeração é tida como o fator mais oneroso, em termos de consumo energético, no BRM. Ela demanda quase que 50% do total energético da operação do sistema. Além do mais, a relação entre aeração e o fluxo ou a diminuição da pressão transmembrana (PTM) não está totalmente compreendido e se baseia em experiências anteriores e recomendações fornecidas pelos fabricantes da membrana (IVANOVIC *et al.*, 2008; RAHIMI *et al.*, 2011). Esta incompreensão completa do funcionamento da aeração associada a um aumento dos custos operacionais pode ser considerado um entrave da utilização nos BRM.

Verrecht *et al.*, (2008) considera que para módulos submersos a demanda energética por aeração é de 30-40% podendo aumentar de 10-50% dependendo da vazão da alimentação necessária ao tratamento.

A aeração, fator mais oneroso de operação, deve ser otimizada visando à maior competitividade desta tecnologia. A redução da demanda energética depende de uma compreensão da necessidade total de aeração, e da compreensão entre o balanço do ar necessário para a biodegradação da matéria orgânica e a necessária para o bom funcionamento da membrana.

Vale lembrar que a incrustação de membranas não é distribuída de forma regular. No entanto, a aeração difundida de forma uniforme ao longo da superfície da membrana, não leva em conta os locais e graus de incrustação. Isto pode ocasionar em uma eficiência de limpeza diferenciada e em um aumento do consumo energético do sistema como um todo (LEE *et al.*, 2009).

De forma geral, a configuração da distribuição da demanda por energia em BRM segundo Fenu *et al.*, (2010) é a seguinte: 30-50% requerido pela aeração, 15-20% demandado pela vazão de alimentação, 10-15% para a recirculação do lodo (quando necessário) e 5-15% para aparelhos tais como misturadores.

Um estudo elaborado por Zhang *et al.*, (2011), objetivou avaliar o efeito de bolhas finas e grossas na demanda energética e na prevenção da incrustação em um BRM de placa plana. Para os experimentos, as membranas foram mergulhadas em um tanque e o nível do líquido foi mantido constante. Foi adotada uma pressão de 7 kPa. Durante o experimento não foi usada nenhuma retrolavagem para avaliar exclusivamente o desempenho da membrana. A concentração de oxigênio dissolvido fornecido por um difusor foi mantida constante em 5 mg/L. Neste experimento a taxa de ar usada foi 25% da sugerida pelos fornecedores da membrana. Partiu-se da hipótese de que possa existir um regime de bolhas que gere economia, aumente o coeficiente de transferência de massa ao mesmo tempo em que promova o cisalhamento da membrana usando baixas intensidades de ar. O trabalho pesquisou o efeito de dois regimes de bolhas na prevenção da incrustação usando BRM para o tratamento de um efluente. Foi observado que bolhas grossas apresentaram melhor desempenho na prevenção da incrustação em curtos e longos períodos de operação. As bolhas grossas, mesmo com uma baixa intensidade de ar (2,5L/min), apresentaram resultados positivos na limitação da formação da incrustação irreversível e na remoção a torta formada durante os testes. Em contrapartida, a incrustação acumulada com o uso de bolhas finas foi maior. Levando em conta a possibilidade de redução de consumo energético, o uso de bolhas grossas se torna uma ferramenta interessante. Foi possível concluir que para a mesma intensidade de ar (2,5 L/min) as bolhas grossas são eficientes no controle da incrustação irreversível, em um estágio inicial, sendo capaz também de reduzir a incrustação reversível durante períodos longos de operação. De forma geral, os experimentos com uma aeração usando bolhas finas demonstraram uma maior variação na PTM. Nas primeiras 4 horas de operação não houve diferença entre os dois tipos de bolhas. Entretanto, após este período houve um aumento brusco na PTM para o

sistema operado com bolhas finas. A incrustação aumentou e o fluxo de permeado não se manteve constante devido ao aumento da resistência a filtração desencadeada pela formação da torta.

Nos experimentos de Zhang *et al.*, (2011), a demanda energética média requerida durante a operação pelas bolhas finas foi em média $2.07 \text{ Kw}^{-\text{h}} \text{ m}^3$ enquanto que as bolhas grossas foi de $1.41 \text{ Kw}^{-\text{h}} \text{ m}^3$. Entretanto as bolhas grossas são menos eficiente na transferência de oxigênio para a biomassa, mas mais eficazes no controle da incrustação. Para o tratamento de efluentes é comum a associação de bolhas finas, que possuem uma elevada área superficial promovendo uma maior disponibilização de oxigênio, com bolhas grossas, mais eficientes no cisalhamento da membrana. Para a maior parte dos efluentes tratados pelos BRM é mais fácil a disponibilização de oxigênio para a biomassa do que a necessária ao cisalhamento da membrana (ZHANG *et al.*, 2011).

6.1.7 Discussão a respeito das condições ótimas de aeração

Na prática a vazão de aeração ótima não está bem definida, uma vez que a relação entre a aeração e a diminuição do fluxo não é completamente compreendido. Os valores de aeração da membrana são baseados em experiências e em muitos casos os fornecedores são responsáveis pela determinação desses valores (JUDD, 2006).

A aeração no reator de membrana tem duas conseqüências contraditórias no que diz respeito à minimização dos efeitos da incrustação. Elevadas taxas de aeração removem de forma mais eficiente a deposição de agentes incrustantes na superfície da membrana e simultaneamente aumenta a concentração dos componentes identificados como principais contribuintes da incrustação. Portanto, condições ótimas de operação para a manutenção da membrana pode ser obtidas quando estes dois efeitos estão balanceados, fornecendo assim um limite superior de aeração para um específico modo de operação (IVANOVIC *et al.*, 2008).

Como podemos perceber é extremamente importante determinar taxas de aeração que favoreçam a redução da incrustação, evitando a formação de partículas coloidais devido a excessivas forças de cisalhamento. Ao mesmo tempo, a aeração deve ser suficiente para a realização das atividades biológicas e manter a suspensão dos sólidos, o que dificultaria a deposição desses e conseqüentemente minimizaria a propensão a incrustação da membrana.

No entanto, de acordo com Judd (2006), ainda não existem correlações suficientes entre o fluxo permeado e a taxa de aeração que permita o cálculo teórico do valor adequado para a aeração. Os valores evidenciados na literatura são resultado de experiências ou são fornecidos pelos próprios fabricantes

6.1.8 Entraves para a utilização da aeração

O maior entrave para a utilização da aeração dos BRM é o aumento dos custos operacionais desencadeados pela necessidade de aumento da demanda energética. Associado a este fator tem-se a incompreensão dos valores adequados de aeração. Uma alta intensidade de aeração apresenta efeitos contraditórios, ao mesmo em tempo que é capaz de promover o cisalhamento na superfície pode desencadear o rompimento de flocos potencializando a incrustação. A falta de dados exatos pode dificultar a implantação dessa ferramenta operacional. Estudos são necessários objetivando uma maior compreensão desse fator bem como sua interação com os diversos elementos operacionais.

Vale lembrar que a influência da aeração no desempenho da filtração depende de diversos fatores, tais como, configuração do módulo, diâmetro, espessura, comprimento e densidade das fibras e do tipo de aeração. A aeração pode tanto promover forças de cisalhamento capazes de arrastar as partículas depositadas nas superfícies das membranas quanto, em caso de elevadas aerações, promover a quebra de flocos, o que aumenta a quantidade de partículas pequenas e conseqüentemente contribui para o entupimento dos poros (UEDA *et al.*, 1997; VIANA, 2004; DELGADO *et al.*, 2004).

6.2. Considerações referentes aos artigos

A nuvem de palavras representa de forma esquemática, os assuntos mais abordados ao longo das pesquisas. Embora os termos mais usados apresentassem tamanhos diferenciados entre os dois conjuntos analisados (títulos e palavras-chave) verifica-se que a maior parte dos trabalhos fornece destaque à incrustação de membranas, a aeração, módulos submersos de membranas e o tratamento de águas residuárias. Alguns termos presentes são mais específicos como, por exemplo: ultrafiltração, fibras ocas, fluxo crítico, fluxo paralelo entre outros. As nuvens também apresentam termos mais focados nos objetivos específicos do artigo tais como, lodo ativado, oxigenação, limpeza química e permeabilidade. A presença dos termos aeração e incrustação em maior intensidade são devido a seleção prévia dos artigos afim de

que estes sejam usados dentro da pesquisa, onde se prioriza os efeitos da aeração no sistema de BRM. Quanto ao número de publicações ao longo do ano, percebemos uma distribuição uniforme, há ausência de publicação apenas no ano de 1992. O pico de publicações se restringiu ao ano de 2002 e foi possível encontrar publicações recentes, em 2011. Devido à diferente forma de padronização das publicações, o critério distribuição geográfica ficou prejudicado. As ausências de informações mais precisas puderam mascarar o verdadeiro resultado. A tecnologia de BRM tem um crescimento potencial vinculado a uma maior aceitação impulsionado principalmente pela divulgação do conhecimento científico, pela redução dos custos operacionais e pela influencia de legislações cada vez mais restritivas.

7 CONCLUSÃO

Como constatado na revisão de literatura a aeração dentro do sistema de BRM ainda é um assunto pouco abordado. Não há um consenso sobre este parâmetro que exerce impactos na membrana e nos microorganismos. Sabe-se que é um dos parâmetros chaves dos BRM, sendo essencial para a manutenção da suspensão da biomassa e necessário ao tratamento biológico. Embora seja conhecida a alta demanda energética requerida na aeração, ainda há dúvidas quanto ao valor ideal para este parâmetro. Os valores adotados são baseados em relatos de experiência ou fornecidos pelos fabricantes da membrana. No entanto, devido à diversidade de característica do efluente não é certo de que o valor indicado ou testado fornecerá os resultados objetivados pela pesquisa ou tratamento do efluente.

Aeração apresenta impactos positivos e negativos dependendo da intensidade, frequência e velocidade. No entanto não há um consenso referente ao ponto onde a aeração passa a prejudicar o sistema biológico. Tendo a aeração como um minimizador da incrustação a determinação de taxa de aeração para potencialização deste efeito deve ser esclarecida.

Quando consideramos o tipo de bolha ainda não há um consenso em relação ao tamanho ideal. Enquanto bolhas pequenas são eficazes na transferência de oxigênio, não desempenham um papel significativo na limpeza da superfície das membranas. Bolhas grandes apesar de serem capazes de auxiliar na remoção de agentes incrustantes, não são eficazes na transferência de oxigênio para a biomassa e além do mais demandam um maior conteúdo energético. Por interferirem na biomassa e na operação da membrana deve ser feita uma escolha criteriosa em relação ao tamanho das bolhas.

Os tipos de aeração mais abordados nos artigos foram a aeração intermitente (cíclica) e contínua. A aeração cíclica é uma tentativa de diminuir o consumo energético, uma vez que a aeração é um dos fatores mais onerosos do BRM. Através de uma aeração intermitente é possível que a fina camada de torta formada durante a operação seja facilmente removida por procedimentos convencionais de limpeza química e/ou física. No entanto, apesar de limpezas periódicas minimizarem o consumo energético, requerem o uso de produtos químicos o que pode interferir no custo total de operação. A aeração contínua apesar de ser eficaz na diminuição da deposição da torta demanda uma elevada pressão para operação. Isto acarreta em aumento de gastos referentes ao consumo energético das bombas. Portanto, é necessário

que seja levado em conta o gasto durante toda a operação e não apenas em uma etapa o procedimento. As pesquisas envolvendo o tipo de aeração não têm esta análise crítica e não há um consenso sobre a melhor forma de aeração.

A nuvem de palavras, ferramenta usada nesta revisão, foi de extrema importância para a avaliação esquemática dos assuntos abordados pelo referencial teórico durante o período da pesquisa.

Muitas pesquisas estão sendo desenvolvidas buscando uma compreensão abrangente acerca desta tecnologia. Através do número de artigos analisados e a obtenção de informações atualizadas acerca dos BRM podemos deduzir uma maior aceitação e maior potencialidade de divulgação do conhecimento científico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, M. C. S. *Tratamento de efluente de branqueamento de polpa celulósica empregando sistema de microfiltração conjugado com biorreator com membrana*. 2009. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

APTEL, P.; MOULIN, P.; QUEMENEUR, F. *Micro et Ultrafiltration: Conduite des Essais Pilotes Traitements des Eaux et Effluents*. Les Cahiers du Club Français des Membranes n.2, p.102, 2002.

BAKER, R.W. *Membrane Technology and Applications*. Second Edition. ED. John Wiley & Sons Ltd, England, 2004.

CENTROPROJEKT DO BRASIL. *Reuso de Efluentes Industriais e Domésticos Tecnologias Avançadas*. Seminário O Estado da Arte dos Equipamentos para Reuso de Águas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Abril, 2004.

CHANG, I.S.; GANDER, M.; JEFFERSON, B.; JUDD, S. *Low-cost membranes for use in a submerged MBR, Process Safety Environ. Protection*, v.79, p.183–188, 2001.

CHANG, I.S.; LE-CLECH, P.; JEFFERSON, B.; JUDD S. *Membrane fouling in membrane bioreactors for wastewater treatment*. *Journal of Environmental engineering*, v.128, n.11, p.1018-1029, 2002

CHANG J., LIU B.; *Nitrification/desnitrification in intermittent aeration process for swine wastewater treatment*. *Journal of Environmental engineering*, p. 705, 2001.

CHERYAN, M., *Ultrafiltration and Microfiltration Handbook*. Technomic Publishing Company, Inc. USA (1998).

CHIEMCHAISRI, C.; YAMAMOTO, K.; VIGNESWARAN, S. *Household Membrane Bioreactor in Domestic Wastewater Treatment*. *Water Sci. Technol.*, v.27, n.1, p.171 – 178, 1993.

CHOI, J.G.; BAE, T.H.; KIM, J.H.; TAK, T.M.; RANDALL, A.A. *The behavior of membrane fouling initiation on the crossflow membrane bioreactor system*. *Journal of Membrane Science*, v.203, n.1-2, p.103-113, 2002

CICEK, N.; FRANCO, J.P.; SUIDAN, M.T.; URBAIN, V.; MANEM, J. *Characterization and comparison of a membrane bioreactor and a conventional activated-sludge system in the treatment of wastewater containing high-molecular-weight compounds*. *Water Environment Research* 71 (1), 64–70, 1999.

DELGADO, S.; DIAZ, F.; VERA, L.; DIAZ, R.; ELMALEH, S. *Modelling hollow-fibre ultrafiltration of biologically treated wastewater with and without gas sparging*. *Journal of Membrane Science*, v.228, n.1, p.55-63, 2004.

EBRAHIM, S. *Cleaning and regeneration of membranes in desalination and wastewater applications: state-of-the-art*. *Desalination*, v. 96, p.225-236, 1994.

ELMALEH, S. & ABDELMOUMNI, L. “*Experimental Test to Evaluate Performance of an Anaerobic Reactor Provided with an External Membrane Unit*”, *Water Science and Technology*, v. 38, n. 8-9, p. 385-392, 1998.

FANE, A.G & CHANG, S. *Membrane Bioreactors: Design & Operational Options*. UNESCO Center for Membrane Science & Technology. Australia, 2002.

GANDER, M.; JEFFERSON, B.; JUDD, S. *Aerobic MBRs for Domestic Wastewater Treatment: A Review with Cost Considerations*. *Separation and Purification Technology*, v.18, p. 119-130, 2000.

GONZÁLEZ, A.Z.; SCHETRITTE, S.; ALLIET, M.; HAZA, U.J.; ALBASI, C.; *Modelling of submerged membrane bioreactor: Conceptual study about link between activated sludge biokinetics, aeration and fouling process*. *Journal of Membrane Science* v.325 612-624, 2008.

HABERT, A. C.; BORGES, C. P.; NOBREGA, R. *Escola Piloto em Engenharia Química: Processos de Separação com Membranas*. Programa de Engenharia Química, COPPE/UFRJ, 2003.

HONG, S. P.; BAE, T. H.; TAK, T. M.; HONG, S.; RANDALL, A. *Fouling Control in Activated Sludge Submerged Hollow Fiber Membrane Bioreactors*. *Desalination* v.143 p.219-222, 2002.

IVANOVIC, I. & LEIKNES, T. *Impact of aeration rates on particle colloidal fraction in the biofilm membrane bioreactor (BF-MBR)*. *Science Direct. Desalination* v.231 p.182-190, 2008.

JI, L. & ZHOU, J. *Influence of aeration on microbial polymers and membrane fouling in submerged membrane bioreactors*. *Journal of Membrane Science* v.276 (1–2), p.168–177, 2006.

JUDD, S. *The MBR Book. Principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment*. Elsevier, 2006.

JULIANO, L.N. *Preparação e caracterização de membranas para clarificação de sucos de frutas*. Universidade Federal de Santa Catarina. Dissertação. 2000.

KAZEMIMOGHAD, A.M & TORAJ, M. *Chemical cleaning of ultrafiltration membranes in the milk industry*. *Desalination*, v.204, p.213–218, 2007.

KIPPER, M.S. *Biorreatores com membranas: uma alternativa para o tratamento de efluentes*. 2009. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/18994>.

KOROS, W.J.; MA, Y.H.; SHIMIDZU, T. *Terminology for membranes and membrane processes*. *Journal of Membrane Science*. v. 20, p.149-159, 1996.

LE-CLECH, P.; JEFFERSON, B.; JUDD, S. J. *Impact of aeration, solids concentration and membrane characteristics on the hydraulic performance of a membrane bioreactor*. *Journal of Membrane Science*, v. 218, p. 117–129, 2003 a.

LIN B.S; CHOI B.C; YU S.W; LEE C.G. *Effects of operational parameters on aeration on/off time in a intermittent aeration membrane bioreactor*. *ScienceDirect. Desalination* v.202 p.77-82, 2007.

LIAO, B. Q.; BAGLEY; D. M., KRAEMER; H. E.; LEPPARD, G. G.; LISS, S. N. *A Review of Biofouling and its Control in Membrane Separation Bioreactors*, *Water Environmental Research* v.75 p.425-436, 2004.

LÍBANO, Marcelo. *Fundamentos de qualidade e tratamento da água*. Campina, SP: Editora Átomo, 2008, 2ª edição.

LIU R.; HUANG X.; SUN Y.F.; QIAN Y. *Hydrodynamic effect on sludge accumulation over membrane surfaces in a submerged membrane bioreactor*. *P Process Biochem*, v.39 p.157–163, 2003.

LIVINGSTON, A.G. *Extractive membrane bioreactors: A new process technology for detoxifying chemical industry wastewaters*. *J. Chem. Tech. Biotech.*, v.60, p.117-124, 1994.

LORAIN, O.; DUFAYE, P.E.; BOSQ, W.; ESPENAN, J.M. *A new membrane bioreactor generation for wastewater treatment application: Strategy or membrane aeration management by sequencing aeration cycles*. Desalination v.250 p.639-643, 2010.

MENG, F.G., YANG, F.L., SHI, B.Q., ZHANG, H. M. . *A comprehensive study on membrane fouling in submerged membrane bioreactors operated under different aeration intensities*. Separation and Purification Technology 59 (1), p.91–100. 2008.

MENNITI, A., KANG, S., ELIMELCH, M., MORGENROTH, E. *Influence of shear on the production of extracellular polymeric substances in membrane bioreactors*. Water Research v.43 (17), 4305–4315, 2009.

MENNITI, A. & MORGENROTH, E. *The influence of aeration intensity on predation and EPS production in membrane bioreactors*. ScienceDirect. Water research v.44 2541-2553, 2010.

MULDER, M., *Basic Principles of Membrane Technology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holanda, 1996.

OGNIER S.; WISNIEWSKI C.; GRASMICK A. *Influence of macromolecule adsorption during filtration of a membrane bioreactor mixed liquor suspension*. Journal of Membrane Science v.209, 27–37, 2002

OLIVEIRA T.F. *Tratamento de água para abastecimento público por sistema de separação por membrana de ultrafiltração: estudo de caso na ETA Alto da Boa vista (São Paulo, SP)*. São Paulo, 2010.

POLETTI P. *Caracterização de Membranas de Poliamida 66 Preparadas pelo Método de inversão de fases*. Dissertação apresentada ao Programa Mestrado em Materiais da Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2010.

PETRUS, J.C.C. *Preparação, modificação e caracterização de membranas assimétricas para clarificação de suco de frutas*. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Tese. 139p. 1997.

PSOCH C. & SCHIEWER S. *Anti-fouling application of sparging and backflushing for MBR*. J. Membr. v.283, p. 273-280, 2006.

PROVENZI, Graziella. *Biorreator à membrana submersa para tratamento biológico de efluentes: estudos hidrodinâmicos e físico-químicos no controle da colmatação*. 154 p. Tese

de doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – Florianópolis – SC –2005.

RAHIMI Y.; TORABIAN, A.; REZAIIE, M. H.; PEZESHK, H.; BIDHENDI, G. R.N. *Optimizing aeration rates for minimizing membrane fouling and its effect on sludge characteristics in a moving bed membrane bioreactor*. Journal of Hazardous Materials v.186 p.1097-1102, 2011.

RAHMAN, M. M. & AL-MALACK, M. *Performance of a crossflow membrane bioreactor (CF-MBR) when treating refinery wastewater*. Desalination v.191 p.16–26, 2006.

ROTHEMUND, C.; CARMPER, A.; WILDERER, P.A. *Biofilms growing on gas permeable membranes*. Water Science Technology, v.29, n.10-11, p.447-454, 1994.

SANTOS, A.; MA W.; JUDD S. J. *Membrane bioreactors: Two decades of research and implementation*. ScienceDirect. Desalination v.273 p.148- 154, 2011.

SEIDEL, A.; ELIMELECH, M. *Coupling between chemical and physical interactions in natural organic matter (NOM) fouling of nanofiltration membranes: Implications for fouling control* Journal of Membrane Science, v.203, p.245-255, 2002.

SCHNEIDER, R.P.; TSUTIYA, M.T. *Membranas Filtrantes para o Tratamento de Água, Esgoto e Água de Reuso*. 1º Ed. – São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 234p, 2001.

SCHOEBERL P.; BRIK, M.; BERTON, M.; BRAUN, R.; FUCHS, W. *Optimization of operational parameters for a submerged membrane bioreactor treating dyehouse wastewater*. Separation and Purification Technology v.44 p.61–68, 2005.

SILVA A. B. *Avaliação do emprego da ultrafiltraçãoem membrana na remoção de células de Cianobactérias e microcistina para águas De abastecimento*. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.

TAKESHI, S. & YASUHIKO, I. *Effects of activated sludge properties on water flux of ultrafiltration membrane used for human excrement treatment*. Water Science Technology v.23, p.1601–8, 1991.

UEDA, T.; HATA, K.; KIKUOKA, Y.; SEINO, O. *Effects of Aeration on Suction Pressure in a Submerged Membrane Bioreactor*. Water Research., v.31, p.489- 494, 1997.

VAN DER ROEST, H. F.; LAWRENCE, D.P.; VAN BENTEM, A. G. N. *Membrane Bioreactors for Municipal Wastewater Treatment*. Water and Wastewater Practitioner Series: Stowa Report, IWA Publishing, London, 2002.

VIANA Priscilla Zuconi. *Biorreator com Membrana Aplicado ao Tratamento de Esgotos Domésticos: Avaliação do Desempenho de Módulos de Membranas com Circulação Externa*. Rio de Janeiro, 2004.

VIERO, A. F. *Avaliação do Desempenho de um Biorreator com Membranas Submersas para Tratamento de Efluente*. Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2006.

WISNIEWSKI, C. *Membrane bioreactor for water reuse*. Science Direct. Desalination v.203 p.15- 19, 2007.

YANG, W.; CICEK, N.; ILG, J. *State-of-the-Art of Membrane Bioreactors: Worldwide Research and Commercial Applications in North America*. Journal of Membrane Science, v.270, p.201 – 211, 2006.

YEOM, I.T, NAH Y.M, AHN K.H. *Treatment of household wastewater using an intermittently aerated membrane bioreactor*. Desalination v.124 193-204, 1999.

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*. Elsevier, v. 283, p. 221-226, 2001.