

Tratamento de Água e Esgoto Através de Membranas Filtrantes

1. INTRODUÇÃO

Dentre todas as inovações tecnológicas para o tratamento de água e esgoto que estão sendo desenvolvidas nos mais importantes centros de pesquisa a nível mundial, destacam-se as membranas filtrantes, cuja aplicação em larga escala poderá alterar radicalmente os paradigmas econômicos e filosóficos da operação das companhias de saneamento básico.

Os fundamentos desta tecnologia foram estabelecidos há cerca de 50 anos. As primeiras aplicações comerciais desta tecnologia ocorreram na dessalinização de águas marinhas e salobras por meio de eletrodialise (primeiras unidades comercializadas no início da década de 50) e osmose reversa (primeiras unidades comerciais no final da década de 60).

O grande salto nesta tecnologia ocorreu no início da década de 80, quando foram lançados os primeiros sistemas confiáveis de grande porte de microfiltração e ultrafiltração que viabilizaram a penetração da tecnologia de membranas filtrantes na área de tratamento de água e esgotos em áreas urbanas. Devido à diminuição vertiginosa e rápida dos custos de operação esta tecnologia vem-se difundindo rapidamente nos países industrializados. No Brasil, porém, ainda é pouco conhecida.

A tecnologia de membrana filtrante possibilita o fornecimento de água potável mais segura, livre de microorganismos patogênicos, de precursores e de trihalometanos. O impacto desta tecnologia no tratamento de esgoto, é a possibilidade de descentralizar o tratamento, devido às estações compactas de membranas submersas que produzem pequena quantidade de lodos. O tratamento descentralizado de esgoto teria a vantagem de diminuir as extensões dos coletores tronco, interceptores, emissários e estações elevatórias, e com o aumento do número de pontos de lançamento do efluente das estações nos corpos receptores, diminuem o impacto ambiental sobre a bacia hidrográfica.

2. DEFINIÇÃO DE MEMBRANA

Uma membrana pode ser definida como um filme fino que separa duas soluções e atuam como barreiras seletivas para o transporte de componentes destas soluções, conforme se observa na figura 1.

MILTON TOMOYUKI TSUTIYA

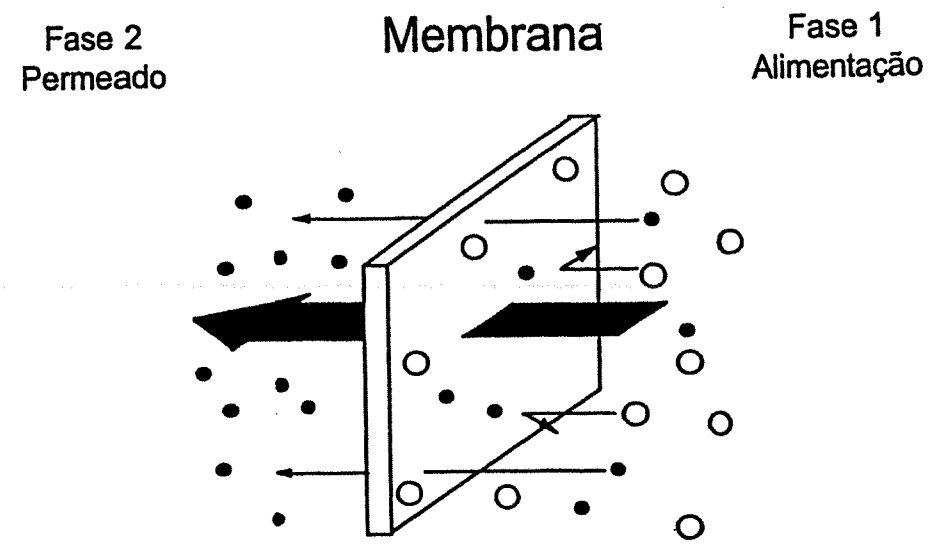
Engenheiro Civil pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (1975). Mestre em Engenharia pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (1983). Doutor em Engenharia pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (1989). Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Coordenador de Pesquisa da Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico — Diretoria Técnica e Meio Ambiente da SABESP.

RENÉ PETER SCHNEIDER

Graduado em Biotecnologia pelo Departamento de Ciências Naturais do Politécnico Federal de Zurique (ETHZ), na Suíça. Doutorado pelo Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology — EAWAG do Politécnico Federal de Zurique (ETHZ). Pós-doutorado na University of New South Wales, Sydney, NSW, Australia onde atuou junto ao Cooperative Research Center (CRC) for Waste Management and Pollution Control (CRC WMPC) e o UNESCO Center for Membrane Science and Technology em projetos de desenvolvimento de tecnologias de membranas filtrantes para tratamento de águas residuárias e esgotos. Orientou três teses de doutorado sobre tecnologia de membranas e publicou 13 trabalhos internacionais sobre o assunto. Professor no Laboratório de Microbiologia Ambiental do Instituto de Ciências Biomédicas da Universidade de São Paulo.

FIGURA 1: DEFINIÇÃO DE MEMBRANA

fonte: Mallevalle et al, 1996

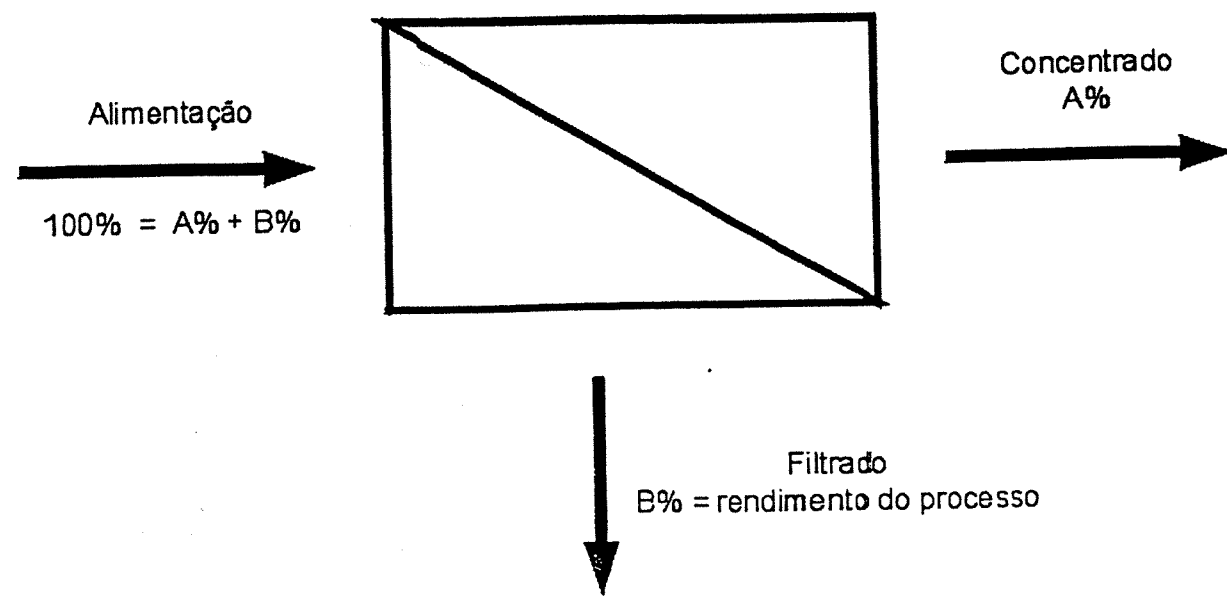


A seletividade de membranas pode ser alterada por meio da modificação do tamanho dos poros ou pela alteração das propriedades físico-químicas dos polímeros componentes da membrana, principalmente das propriedades da superfície. Convém ressaltar que as membranas não representam meramente um elemento passivo no sistema, mas um elemento funcional cujo desempenho depende da composição química dos solutos,

da quantidade de materiais particulados existentes na água a ser tratada e da energia aplicada.

Conforme mostra a figura 2, as membranas podem ser definidas como operações unitárias que permitem dividir um volume de líquido em um volume de produto e um volume de rejeito. A conversão do processo, expressa em porcentagem, é o volume de produto recuperado relativo ao volume total de água bruta aplicado.

FIGURA 2: PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO DE MEMBRANA



TRATAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO ATRAVÉS DE MEMBRANAS...

Além das operações de separação, as membranas oferecem as seguintes vantagens:

- operam a temperatura ambiente sem mudança de fase, o que resulta em considerável economia de energia em relação a processos de destilação, por exemplo;
- não há acumulação de produtos dentro da membrana o que viabiliza a operação contínua do sistema sem redução da eficiência de separação;
- não há necessidade de aditivos químicos, o processo de membranas filtrantes produz menos quantidades de rejeitos do que os processos convencionais, e por ser um processo menos poluente, é ambientalmente mais limpo.

3. CLASSIFICAÇÃO DE MEMBRANAS

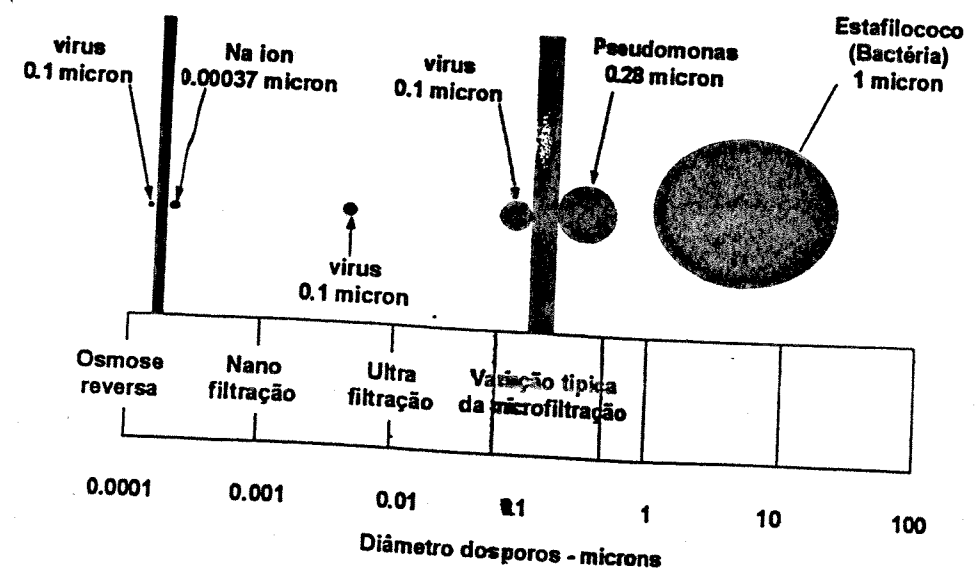
As águas naturais e os esgotos sanitários contêm uma grande variedade de partículas, moléculas e íons. A figura 3 apresenta os materiais encontrados na água bruta, suas dimensões e o campo de aplicação dos diversos processos de separação utilizados no tratamento de água.

O tratamento de água e esgoto consiste essencialmente na separação e/ou degradação dos componentes indesejáveis em relação à saúde humana ou à integridade do meio-ambiente. A escala de tamanho do material particulado a ser removido nesses processos varia de material macroscópico que pode ser separado com auxílio de grades, material particulado microscópico (bactérias, algas, vírus, material coloidal), moléculas orgânicas (pesticidas, componentes de combustíveis, solventes etc) e íons (metais pesados, salinidade excessiva, dureza). As membranas podem ser utilizadas para remover todos esses materiais relacionados.

A classificação de membranas mais utilizada é apresentada na tabela 1. As membranas de microfiltração (MF), com porosidade nominal de até 0.1 μm e as membranas de ultrafiltração (UF), com porosidades de até 1.000D são utilizadas para a separação de partículas. As membranas de separação molecular são as membranas de nanofiltração (NF, porosidade nominal entre 200D e 1.000D) e as membranas de osmose reversa (RO), com porosidade menor que 200D.

FIGURA 3: DIMENSÕES DOS PRINCIPAIS COMPONENTES MICROSCÓPIOS E MOLECULARES PRESENTES EM ÁGUAS NATURAIS E TIPOS DE MEMBRANAS UTILIZÁVEIS PARA A SUA SEPARAÇÃO

Fonte: McCormick, 1995



TRATAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO ATRAVÉS DE MEMBRANAS...

TABELA 1: MEMBRANAS UTILIZADAS PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO

Membrana	Porosidade	Material retido
Microfiltração	0,1 a 10 > 0,1 μm	Protozoários, bactérias, vírus (maioria), partículas > 0,1 μm
Ultrafiltração	1.000 a 100.000D	Material removido na MF + colóides + totalidade de vírus
Nanofiltração	200 – 1.000D	Íons divalentes e trivalentes, moléculas orgânicas com tamanho maior do que a porosidade média da membrana.
Osmose reversa	> 200D	Íons, praticamente toda a matéria orgânica

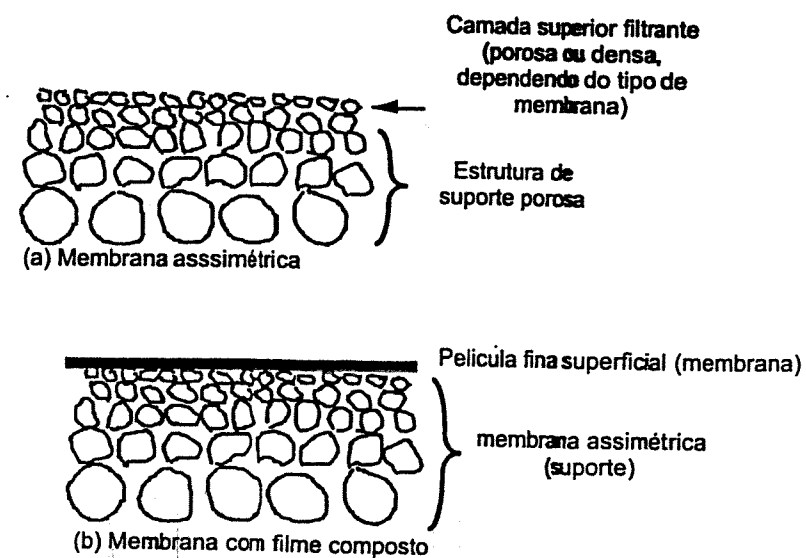
4. ASPECTOS FUNDAMENTAIS DA TECNOLOGIA DE MEMBRANAS

A viabilização da tecnologia de membranas em larga escala só ocorreu com o advento das membranas anisotrópicas, onde uma fina camada superficial responsável pelas propriedades de filtração é conectada a uma estrutura mais grossa e

bem mais porosa responsável pela estabilidade mecânica do sistema (Mallevalle, 1996). A resistência à filtração e a seletividade são determinadas inteiramente pela fina camada superficial. A sua espessura varia entre 0,1 μm e 0,5 μm e corresponde a cerca de 1% da espessura do suporte poroso. Há duas classes de membranas anisotrópicas (figura 4):

FIGURA 4: MEMBRANAS ANISOTRÓPICAS

Fonte: Mallevalle et al, 1996



TRATAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO ATRAVÉS DE MEMBRANAS...

- membranas assimétricas: são produzidas com um mesmo tipo de material e constituem a maioria das membranas de microfiltração e ultrafiltração utilizadas no tratamento de água e esgoto;

- membranas compostas (thin film composites, TFC): a película fina superficial é constituída de um material diferente da estrutura de suporte, que geralmente é uma membrana assimétrica. A maioria das membranas modernas de baixa pressão utilizadas em osmose reversa e na nanofiltração pertence a este grupo.

As membranas podem ser produzidas com polímeros orgânicos ou com materiais inorgânicos. Devido ao alto custo das membranas de materiais inorgânicos, o setor de saneamento básico utiliza em escala industrial somente membranas produzidas com polímeros orgânicos, cujas principais variedades são apresentadas a seguir:

- Acetato de celulose (Aquasource, UF);
- Polissulfona (Koch PM-100, UF);
- Polietersulfona (X-flow, UF);
- Polyvinilpirrolidona (X-flow, UF);
- Polipropileno (Memcor, MF);
- Poliacrilonitrila (Pall LGV 3010, UF);
- Poliamida (DuPont RO);
- Poliacrilamida (Fluid Systems FILMTEC RO);
- Polivinylidene fluoride (Stork Friesland, UF).

As membranas podem ser produzidas em duas configurações geométricas:

- no formato de folhas planas (flat sheets, membranas de osmose reversa e nanofiltração);
- formato cilíndrico (principalmente membranas de microfiltração e ultrafiltração):
 - membranas tubulares (diâmetro maior que 3mm);
 - membranas de fibra oca (diâmetro menor que 3mm).

As folhas, os tubos ou as fibras necessitam de uma estrutura de suporte, denominada módulo, para se tornarem funcionais em um processo industrial. Existem quatro tipos fundamentais de módulos: pilhas, spiral wound, tubular e fibra oca. A função

do módulo é maximizar a área exposta de membrana e permitir a remoção eficiente do material retido no processo de lavagem. O desenho diferenciado dos módulos se deve à variabilidade da quantidade de sólidos suspensos a ser removida na filtração, e também, às diferentes necessidades de pressão de operação das membranas.

O módulo mais utilizado para aplicações que demandam pressões altas e intermediárias (acima de 5 atmosferas) é o spiral wound, cujos detalhes estão apresentados na figura 5.

Conforme mostra a figura 5, no módulo do tipo spiral wound, uma tela de espaçamento (spacer) com fibras entrelaçadas de polímeros similar a uma tela de mosquitos é colocada entre duas folhas de membrana, sendo que a parte da folha que contém o filme fino responsável pela seletividade da membrana é orientada para a tela. O canal formado pela tela é o canal por onde circula a água bruta. A superfície oposta das folhas de membrana que contém a estrutura porosa de suporte do filme fino é colocada em contato com um tecido fino poroso, cuja função é manter aberto o canal de água filtrada. Esta estrutura forma uma unidade de filtração.

Unidades paralelas são montadas progressivamente dos dois lados desta unidade de filtração central, sempre respeitando a estrutura lamelar do módulo. Assim sendo, os canais de filtração vizinhos ao canal descrito acima serão constituídos colocando-se a estrutura porosa das respectivas folhas de membrana em contato com o tecido do canal de permeado, sendo que esta estrutura é então repetida regularmente até atingir a quantidade de canais de filtração estipulada para o módulo.

Os canais de permeado, ou seja aqueles por onde circula a água filtrada, são vedados em três lados. O lado aberto é inserido dentro do tubo coletor localizado no centro do módulo, ao redor do qual a estrutura será enrolada. Os canais de água bruta permanecem abertos nas laterais do cilindro formado pelas membranas e permitem a circulação desta água através do módulo em sentido paralelo ao tubo de coleta (figura 6). Estes módulos são utilizados principalmente com membranas de osmose reversa e nanofiltração, que operam a pressões acima de 5 atmosferas.

T R A T A M E N T O D E Á G U A E S G O T O A T R A V É S D E M E M B R A N A S . . .

FIGURA 5: MÓDULO DE OSMOSE REVERSA, TIPO SPIRAL WOUND

Fonte: Macneil, 1988

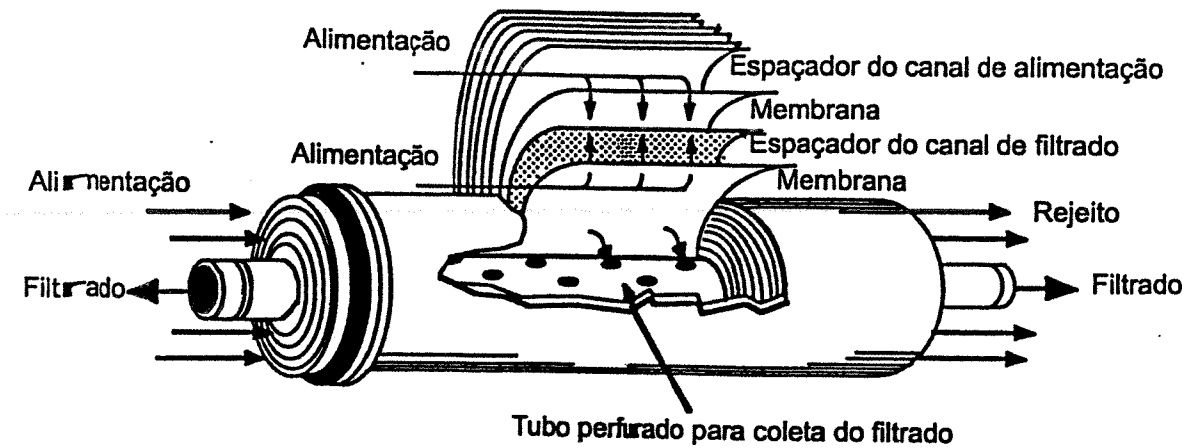
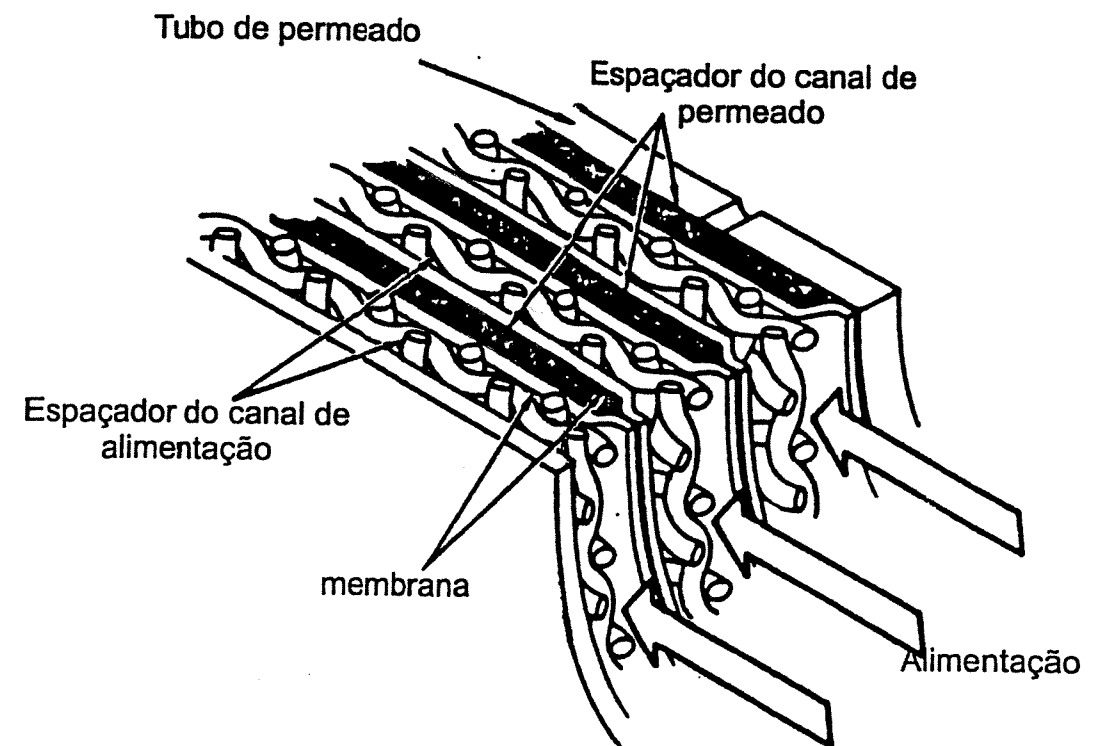


FIGURA 6: CIRCULAÇÃO DE ÁGUA ATRAVÉS DAS DIFERENTES CAMADAS DE MATERIAIS EM MÓDULOS SPIRAL WOUND

Fonte: Ridgway, 1988



Os módulos são fabricados com material polimérico que sozinho não resistiria às altas pressões aplicadas principalmente na osmose reversa. Este problema é contornado pela inserção dos módulos em série dentro de tubos de pressão de aço. A parte externa do primeiro módulo localizada na entrada do tubo de pressão contém uma camada de vedação, que evita a passagem de água pelo exterior dos módulos. Em escala industrial, até 7 módulos podem ser colocados em série dentro de tubos de pressão. Esses módulos permitem construir sistemas com altas densidades volumétricas de membranas, da ordem de 700 a 1.000 m²/m³.

Módulos com fibras ocas são utilizados principalmente para a produção de água em escala industrial por microfiltração ou ultrafiltração. Nestes casos, uma quantidade muito grande de fibras, que varia de várias centenas a cerca de 22.500 são instaladas dentro de um tubo equipado com duas entradas laterais para líquidos.

As fibras são fixadas nas duas extremidades do tubo por meio de uma resina que também serve para a vedação do tubo, de maneira que o líquido em contato com a parede externa das fibras não possa se misturar com o líquido no interior do lúmen. Estes sistemas podem ser operados de duas maneiras distintas. A água bruta pode ser bombeada pelo interior da fibra, sendo o filtrado coletado do interior do cilindro.

Na segunda alternativa, a água bruta é bombeada para dentro do tubo sendo o

permeado recolhido nas extremidades depois de percolação pelo lúmen (interior) das fibras ocas. A densidade volumétrica de membranas nos sistemas de fibra oca é similar à densidade volumétrica de membranas em módulos spiral wound. Os módulos com pilhas de membrana são equipamentos especiais desenvolvidos para tratamento de águas com alto teor de sólidos e de material orgânico dissolvido, como por exemplo, chorume. Nestes sistemas, as membranas são montadas em pilhas de maneira similar ao sistema spiral wound, mas os canais de água bruta são bem mais espaçosos do que nos módulos spiral wound e a densidade volumétrica de membranas é bem menor do que nos módulos de spiral wound, pois o tubo coletor fica em posição perpendicular à membrana no centro do pacote. Módulos tubulares também são sistemas com baixa densidade de membrana. No sistema mais simples, o tubo é construído dentro da estrutura de suporte porosa e a membrana depositada na parede interna do tubo.

O líquido pode ser bombeado através do módulo em direção paralela à membrana (fluxo paralelo) ou em direção perpendicular à membrana (fluxo perpendicular), conforme mostra a figura 7. A pressão de operação aumenta com a diminuição da porosidade da membrana. A conversão dos diferentes processos de membrana depende do tipo de módulo utilizado e das características da água, conforme apresentado na tabela 2.

FIGURA 7: OPERAÇÃO DAS MEMBRANAS: FLUXO PARALELO E FLUXO PERPENDICULAR

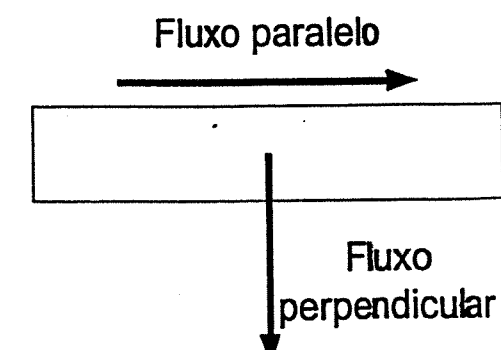


TABELA 2: RELAÇÃO ENTRE POROSIDADE DE MEMBRANAS, PRESSÃO DE OPERAÇÃO E PRODUTIVIDADE DOS SISTEMAS

Membrana	Porosidade	Pressão (bar)	Conversão
Microfiltração	> 0,1m	< 2	90% a 100%
Ultrafiltração	1.000 a 100.000D	2 – 10	90%
Nanofiltração	200 – 1.000D	5 – 40	80% a 90%
Osmose reversa	> 200D	8 – 200	Dessalinização de água do mar: 25% a 50% Água de reuso de efluente secundário: 65% a 85%.

A operação de um módulo é simples. A água bruta é bombeada para dentro do módulo sob pressão e uma válvula instalada na saída do módulo, na canalização do rejeito, controla a pressão dos canais de água bruta dentro do módulo. Isto permite manter a pressão através da membrana em valores pré-determinados, sendo que geralmente o circuito de produto opera a pressão ambiental. Recentemente foram lançados no mercado sistemas de microfiltração que operam por sucção (Mourato et al., 1997). Neste caso, uma bomba centrífuga cria um vácuo no canal de permeado e a filtração se dá de forma passiva pelo diferencial de pressão do líquido dentro do reator e o vácuo no interior da fibra oca.

Todos os sistemas de membrana são sistemas modulares, sendo o módulo a unidade mínima de filtração. Os fabricantes geralmente produzem módulos com diferentes capacidades de filtração. Esses módulos individuais são combinados em série ou em paralelo formando blocos compactos para filtração de grandes volumes. Na micro e nanofiltração, a conversão por módulo é normalmente alta (entre 90 e 100%) e os módulos são combinados em skids de até 90 unidades, sendo que cada skid poderá ter capacidade de filtração de até 5.000m³/dia (figura 8). Vazões maiores são realizadas pela combinação de vários skids em paralelo, conforme mostra a figura 9.

FIGURA 8: BLOCO DE MÓDULOS DE MEMBRANA DE MICROFILTRAÇÃO

Fonte: Mallevialle et al, 1996

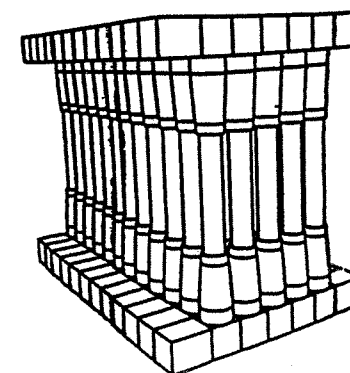
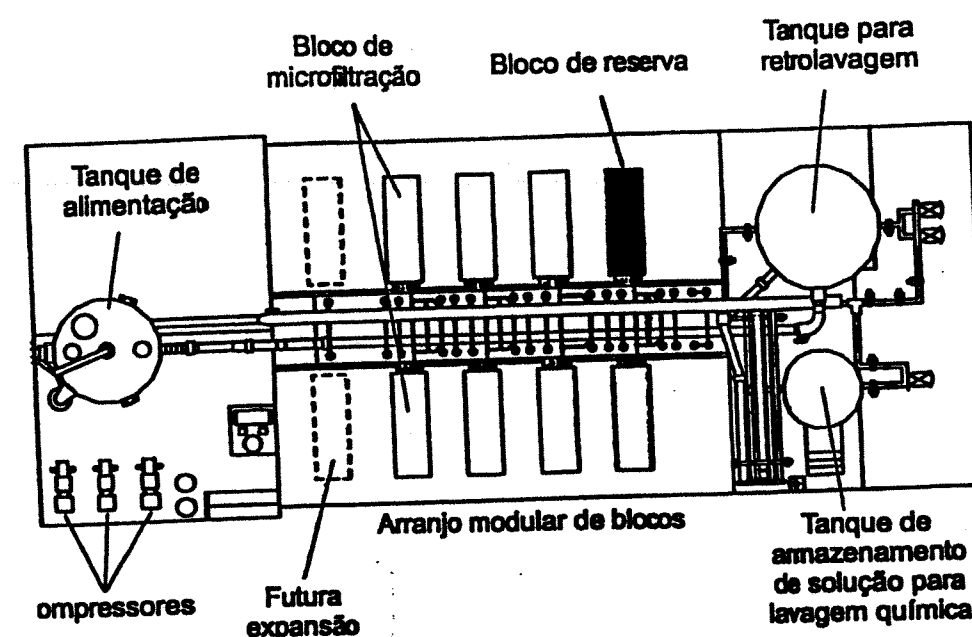


FIGURA 9: ESQUEMA GERAL DE UMA INSTALAÇÃO DE MICROFILTRAÇÃO COM CAPACIDADE VARIANDO DE 19.000 A 26.000 M³/DIA

Fonte: Mallevalle et al, 1996



Na osmose reversa e na nanofiltração, a conversão por módulo é bem mais baixa, variando entre 10 e 25%. Os módulos são instalados em série, dentro de tubos de pressão, sendo que em sistemas de grande escala operados com módulos de diâmetro de 8" são inseridos até 7 módulos dentro de um tubo. A conversão de um tubo de pressão é de cerca de 50%. Para atingir taxas de conversão maiores é necessário instalar vários tubos em série. Como o fluxo por tubo é limitado, fluxos grandes são obtidos com a instalação paralela de tubos, que formam uma bancada. Conversões acima de 50% necessitam de bancadas instaladas em série, sendo que o número de tubos paralelos diminui em cada estágio (bancada) da série devido à redução do volume de água bruta a ser filtrado.

5. FOULING

Durante a filtração, o material retido se acumula na superfície da membrana formando uma

estrutura semelhante a uma torta de filtro, conforme se observa na figura 10.

A acumulação desse material reduz o rendimento da filtração, principalmente nos sistemas de remoção de material particulado (microfiltração e nanofiltração). Para minimizar as perdas de produtividade que ocorrem devido ao acúmulo desse material, a indústria desenvolveu dois modos distintos de operação. Os produtores que optaram por sistemas de filtração paralela, operam esses sistemas com grandes velocidades de transporte dentro dos canais de água bruta (~1 m/s). A turbulência gerada limita a acumulação de material na superfície das membranas. Esses sistemas dependem da recirculação da água bruta, pois para cada volume de água filtrada são recirculadas aproximadamente vinte volumes de água bruta.

A alternativa consiste na operação das membranas em um ciclo "dead-end", onde a água bruta é bombeada continuamente para dentro do módulo. A redução da taxa de filtração pelo mate-

T RATAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO ATRAVÉS DE MEMBRANAS...

rial acumulado na superfície da membrana se traduz em um aumento da pressão de operação do sistema, operado com fluxo de alimentação constante. Assim que esta pressão atingir um valor limite é desencadeado um processo de retrolavagem da membrana (backwash).

Há duas tecnologias distintas de retrolavagem. Na retrolavagem convencional, a água filtrada é bombeada durante períodos entre 30 e 45 segundos nos canais de água bruta em sentido contrário ao da filtração, removendo o material depositado na superfície da membrana. Esta água é descartada. Na retrolavagem com ar comprimido desenvolvida pela Memcor, cujo sistema de microfiltração opera no sistema outside-in com a água filtrada escoando pelo interior da fibra, o ar comprimido é injetado a alta pressão pelo interior da fibra. Os módulos são montados na vertical e o material retido pelas fibras, é removido do módulo nos primeiros momentos de filtração, com a válvula inferior aberta. O fechamento desta válvula inicia o próximo ciclo de filtração. A frequência de retrolavagens varia muito e depende da quantidade de sólidos suspensos na água bruta.

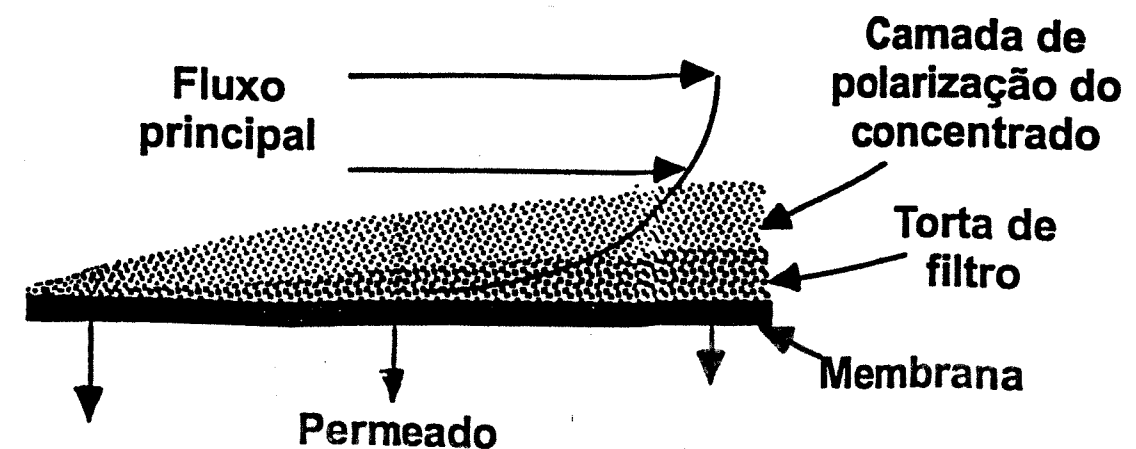
A retrolavagem porém, não remove todos os materiais aderidos na superfície da membrana. Uma pequena quantidade de moléculas e de microorganismos continua imobilizado na superfície da membrana e a quantidade desse material aumenta após cada ciclo de retrolavagem, conforme se observa na figura 11, onde é apresentado o perfil de operação de um sistema de microfiltração.

A maior parte da camada de biofouling é formada por bactérias que formam um biofilme microbiano. O crescimento descontrolado desses organismos pode levar ao comprometimento irreversível da membrana. A remoção dos biofilmes e de materiais orgânicos e inorgânicos resistentes à retrolavagem ocorre periodicamente (intervalos de semanas a meses) por meio de ciclos de lavagem química, onde são injetadas soluções contendo detergentes e outros componentes de limpeza e desinfecção. Esses ciclos (CIP: clean in place) são mais demorados, duram entre 15 minutos e 2 horas, dependendo da gravidade do problema e normalmente restauram as propriedades iniciais de operação das membranas.

A operação de membranas de separação molecular (nanofiltração e osmose reversa) deve conter, além do problema da deposição de

FIGURA 10: ACUMULAÇÃO DE MATERIAL RETIDO PELA MEMBRANA NO CANAL DE ALIMENTAÇÃO

Fonte: Mallevialle et al, 1996



materiais particulados, a acumulação de solutos retidos, pois ocorre uma polarização na distribuição dessas moléculas ou íons, sendo que a concentração na área vizinha à superfície da membrana é de aproximadamente duas vezes maior do que a concentração na água bruta.

Uma das funções das telas de separação instalada nos canais de água bruta dos módulos de nanofiltração e osmose reversa, é diminuir a espessura dessa zona de concentração mais elevada de solutos, pelo aumento da turbulência no canal. Um segundo problema específico de membranas de separação molecular, é o aumento da concentração de íons no rejeito que pode levar a cristalização de sais menos solúveis na superfície das membranas.

A água bruta deve ser tratada até níveis aceitáveis de um dos indicadores de fouling. O indicador mais utilizado é o SDI (silt density index), que é determinado pela filtração da água bruta através de membranas de 0,45m sob condições padronizadas. Água com valores de SDI entre 0 e 2 é apropriada para tratamento por osmose reversa, enquanto que a nanofiltração é viável com valores de SDI entre 0 e 3.

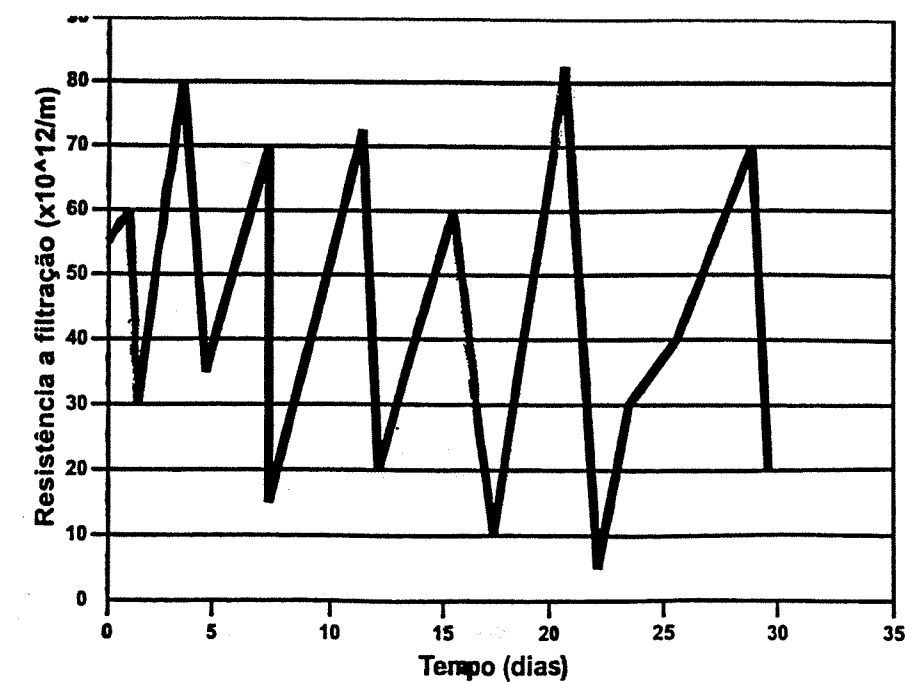
Além da determinação do SDI, a viabilização de um processo de osmose reversa ou de nanofiltração depende de uma análise química mais minuciosa da água bruta. Dependendo da conversão almejada, far-se-á necessário a adição de compostos antiscalants, que evitam a precipitação de sais insolúveis ou a acidificação para evitar o acúmulo de carbonatos.

A grande maioria dos sistemas de nanofiltração e de osmose reversa são construídas com módulos de spiral wound, onde ocorre o bombeamento contínuo de água bruta. As retrolavagens não são possíveis nesses sistemas, devido às dimensões reduzidas dos canais. A limpeza periódica dessas membranas, ocorre por injeção de produtos químicos de maneira semelhante ao CIP das membranas de micro e nanofiltração.

6. CONTROLE DA INTEGRIDADE

Sistemas de membrana são sistemas de barreira e há necessidade de monitorar o seu desempenho de modo a garantir a integridade da membra-

FIGURA 11: PERFIL DA PRESSÃO DE OPERAÇÃO DE MICROFILTRAÇÃO DE FIBRA OCA PRESSURIZADO OPERADO POR FILTRAÇÃO TRANSVERSAL



na. Esse monitoramento pode ser feito de maneira direta, ou seja, por meio de métodos que permitam averiguar a integridade de cada membrana individualmente, ou por meio de métodos indiretos, através da medição de propriedades no permeado.

Os métodos diretos mais empregados são:

- testes de manutenção da pressão de ar comprimido a uma pressão menor do que o "bubble point" da membrana;

- medição do "bubble-point" (a pressão de gás necessária para romper as forças capilares que retêm a água dentro dos poros da membrana);

- monitoramento de vazamentos em fibras individuais durante um teste de pressurização por meio de microfones.

Testes de integridade indiretos incluem:

- contagem de partículas no permeado;

- monitoramento da turbidez do permeado;

- monitoramento da condutividade do permeado (nanofiltração e osmose reversa).

A técnica direta mais eficiente para determinação da integridade de membranas é o teste de manutenção da pressão de ar comprimido no módulo, que é um teste descontínuo. A metodologia contínua de monitoramento mais sensível é a contagem de partículas. Sua sensibilidade, porém, é muito inferior à do teste de manutenção da pressão de ar comprimido, que permite detectar um furo de uma agulha com diâmetro de 0,6 mm em 22.400 fibras de membrana de microfiltração (Adham *et al.*, 1995). Vários fornecedores fornecem a opção de instalar testes de pressurização em seus sistemas de membrana.

7. APLICAÇÕES DE MEMBRANAS EM TRATAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO

7.1. Sistemas de Membranas para Tratamento de Água

A penetração da tecnologia de membranas filtrantes no mercado de equipamentos de produção de água potável é relativamente recente. As

primeiras unidades em escala acima de 2.000 m³/dia foram instaladas há cerca de 10 anos, observando-se nos anos recentes, o crescimento exponencial dos equipamentos de membranas. Para um dos maiores fornecedores de equipamentos de microfiltração em grande escala, a capacidade instalada de microfiltração para a produção de água potável, até o ano de 1997, foi de 500.000 m³/dia. Somente esse fabricante instalou mais de 300.000 m³/dia no ano de 1998.

Para a produção de água potável, a tecnologia de membranas é utilizada em escala industrial nos seguintes processos:

- dessalinização de água do mar ou de águas salobras (osmose reversa, electrodialysis e electrodialysis reversal);

- remoção de dureza (nanofiltração);

- remoção de poluentes químicos orgânicos como pesticidas, THM e precursores de THM etc. (nanofiltração, osmose reversa);

- remoção de partículas (bactérias, vírus, *Cryptosporidium*, *Giardia* etc.: microfiltração e ultrafiltração).

Os fluxogramas utilizados nos mais variados processos de membranas estão apresentados na figura 12.

Nos itens 7.1.1 a 7.1.4 serão apresentados alguns exemplos da utilização de membranas em tratamento de água. Quanto a dessalinização, pela sua pequena importância para o Estado de São Paulo, não será discutida.

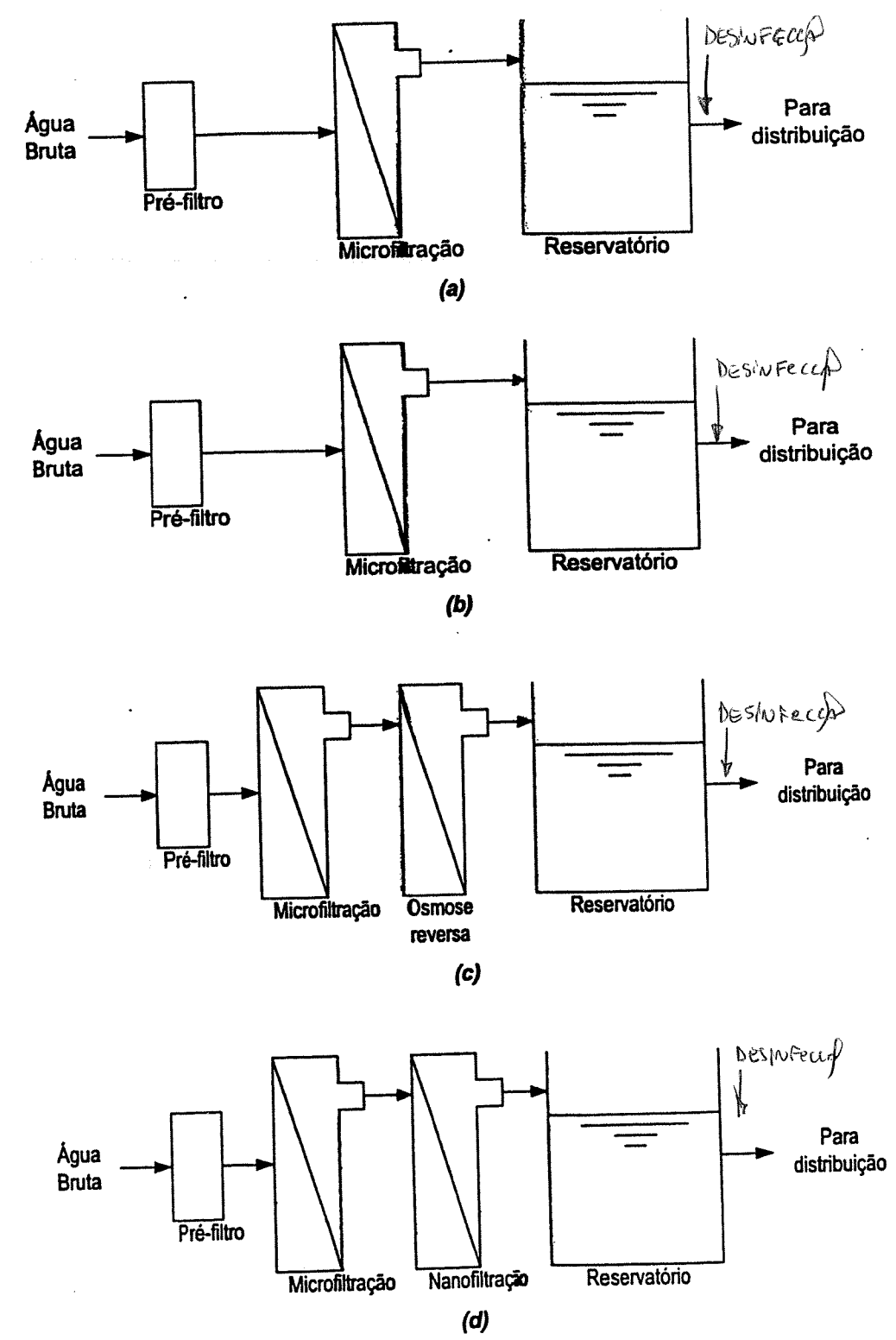
7.1.1. Tratamento de água por microfiltração: ETA Saratoga, Estados Unidos

Em 1994, foi implantada o maior sistema de microfiltração nos Estados Unidos, decorrente da reforma e ampliação da estação de tratamento de água de Saratoga (Yoo *et al.*, 1995). Essa estação foi projetada para atender as seguintes exigências:

- produzir água potável dentro dos parâmetros determinados pela nova legislação (SWTR e ESTWR) principalmente no que se refere à remoção de *Giardia* e *Cryptosporidium*;

FIGURA 12: APLICAÇÃO DA MICROFILTRAÇÃO (MF)

Fonte: Mallevalle et al, 1996



- (a) somente MF;
- (b) remoção de orgânicos pela MF com pré-tratamento com coagulantes ou carvão ativado;
- (c) MF como pré-tratamento para a osmose reversa;
- (d) MF como pré-tratamento para a nanofiltração

TRATAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO ATRAVÉS DE MEMBRANAS...

- lidar com as grandes variações da turbidez da água bruta, que varia entre valores de <1 UT a >250 UT após temporais;
- capacidade limitada da clearwell com tempos de contato com cloro abaixo de 15 min;
- operação automatizada da planta;
- falta de espaço para armazenar e tratar o lodo;
- prazo pequeno para projetar e construir a planta (12 meses);
- necessidade de acomodar a planta dentro das instalações existentes.

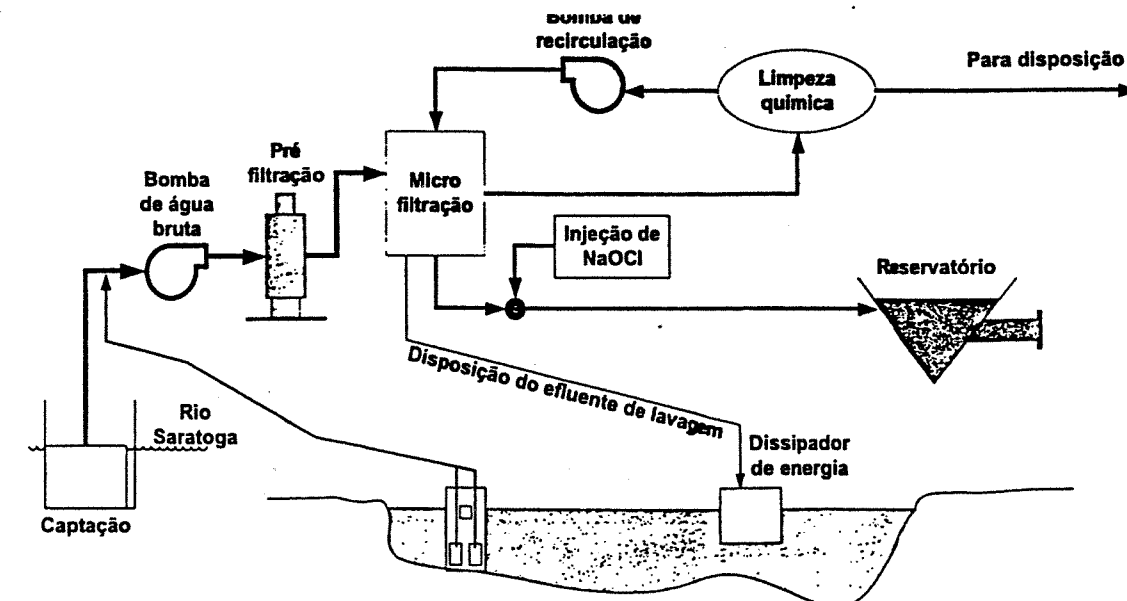
Quatro tecnologias foram consideradas em uma análise preliminar: filtração com terra diatomácea (FD), filtração com dois estágios (F), microfiltração (MF) e ultrafiltração (UF). Os custos da instalação de MF eram ligeiramente superiores aos custos da instalação das duas tecnologias convencionais, enquanto que, a instalação de um sistema de ultrafiltração custaria quase o dobro dos sistemas convencionais. A previsão dos custos anuais de operação indicaram que a microfiltração era a tecnologia de operação mais

econômica, com custos sensivelmente inferiores aos sistemas alternativos. A figura 13 apresenta o fluxograma do processo adotado para o sistema de captação e tratamento de água de Saratoga com capacidade de $19.000\text{m}^3/\text{dia}$.

Conforme se observa na figura 13, após a captação e préfiltração através de um filtro de $380\ \mu\text{m}$, a água é processada em seis skids, sendo que cada skid está equipada com 90 módulos de membrana de microfiltração. Cada módulo contém cerca de 22.500 fibras ocas de polipropileno com porosidade nominal de $0,2\ \mu\text{m}$. Devido à limitação do espaço disponível, os skids foram instalados em dois andares, quatro skids no primeiro andar e dois no térreo. A água filtrada é clorada antes da transferência para a elevatória. O efluente da retrolavagem é lançado em uma lagoa com capacidade para cerca de 1.000m^3 o que corresponde a um tempo de permanência mínima de 24h para a sedimentação dos sólidos dispersos no efluente da retrolavagem, após o qual a água é reciclada para a unidade de microfiltração. O efluente de lavagem química é lançado na canalização de esgoto.

FIGURA 13: DESENHO ESQUEMÁTICO DA CAPTAÇÃO E TRATAMENTO DE ÁGUA, COM UTILIZAÇÃO DE MICROFILTRAÇÃO DE SARATOGA, USA

Fonte: Yoo et al, 1995



A eficiência dessa estação durante quatro anos de funcionamento e a estrutura dos custos de operação, foi analisado por Gere (1997). A distribuição aproximada dos componentes dos custos de operação foi a seguinte: mão de obra (31,6%), energia elétrica (28,6%), manutenção (10,2%), produtos químicos (6,9%), manejo de lodos (0,2%) e troca de membranas (22,5%). Os dois componentes de custo que são significativamente maiores em unidades de microfiltração em comparação com sistemas convencionais são os custos de reposição de membranas e os gastos com energia elétrica. O custo médio de operação da unidade de microfiltração de Saratoga foi de US\$c 8,2/m³.

7.1.2. Remoção de poluentes orgânicos e precursores de THM por nanofiltração: ETA Méry-sur-Oise, Paris, França

A planta de nanofiltração com capacidade de 140.000 m³/dia instalada em Méry-sur-Oise, um subúrbio de Paris, operada pela companhia francesa CGE converte água do rio Oise, poluída com efluentes domésticos, agrícolas e industriais, em água potável para consumo (Ventresque et al., 1997). O pré-tratamento da água do rio visa a redução da carga orgânica e de alguns dos poluentes a valores compatíveis com a operação do sistema de nanofiltração, ou seja:

- SDI da água de alimentação < 3;
- concentração de sólidos suspensos com diâmetro superior a 1 μ m < 200/ml;
- concentração de alumínio e ferro abaixo de 50g/l.

O esquema de pré-tratamento inclui a seguinte sequência: coagulação, decantação, ozonização e filtração dual. O teste em planta piloto de membranas disponíveis no mercado revelou que era possível atingir a qualidade de água almejada com o sistema. Entretanto, os custos de operação seriam bastante elevados, devido aos seguintes fatores:

- a necessidade de adicionar ácido clorídrico para prevenir a precipitação de carbonatos na superfície da membrana;
- a forte rejeição de alcalinidade pela membrana exigiu a remineralização da água filtrada;
- a presença de cloretos no permeado tornou-se muito corrosivo para as tubulações de aço e de ferro fundido da estação e do sistema de reticulação.

Para diminuir os custos de operação, foi estabelecido um programa de modificação das propriedades da membrana em conjunto com o fornecedor, com os seguintes objetivos:

- manter a alta taxa de produção da membrana original;
- manter a sua excelente rejeição a pesticidas e carbono orgânico;
- aumentar a passagem de dureza, preferencialmente utilizando-se ácido sulfúrico em vez de ácido clorídrico.

A membrana composta original consistia de um filme de poliamida com espessura entre 1.500 e 2.000 Å depositado sobre um suporte de macroporoso (membrana assimétrica de ultrafiltração de poliamida). Na membrana modificada, a espessura do filme foi reduzida para 200 Å e o material do filme substituído por polipiperazina. A alcalinidade média no produto subiu de 26 mg HCO₃/l para 134 mg HCO₃/l. Os custos de produção desse processo foi avaliado em cerca de US\$c30/m³, incluindo-se a amortização do equipamento.

7.1.3. Redução da alcalinidade de água de poços profundos, com o uso de nanofiltração

No estado da Flórida, Estados Unidos, grande parte da água potável é proveniente de poços profundos com altos teores de alcalinidade. A partir de 1990, a maioria das ETAs instaladas nesse estado, utiliza membranas de nanofiltração para

TRATAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO ATRAVÉS DE MEMBRANAS...

remoção da alcalinidade. Devido à qualidade geralmente boa da água subterrânea, os fluxogramas dessas ETAs são bem mais simples do que o processo de Méry-sur-Oise já apresentado. Na figura 14 é apresentado um esquema de instalação do tipo utilizado na Flórida, Estados Unidos. O custo de operação e manutenção desses sistemas, incluindo amortização, varia entre US\$0,54 a 0,91/m³ para unidades de 3.800 m³/dia a US\$ 0,15 a 0,25/m³ para unidades de 56.800 m³/dia (Bergman 1995).

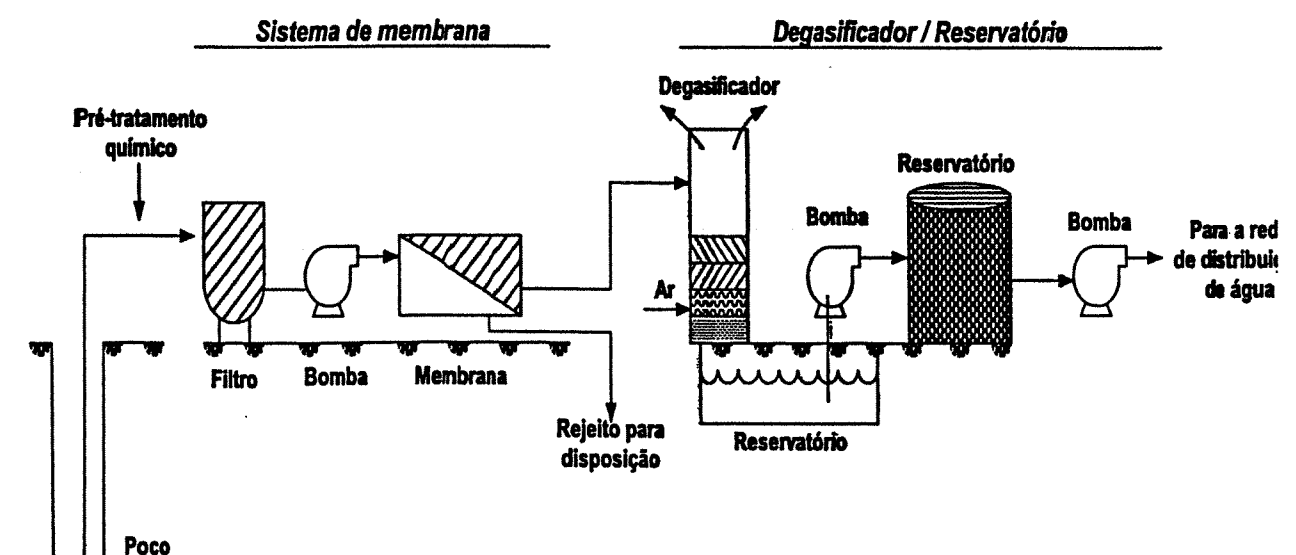
ção, serão retidas na etapa seguinte. Os custos totais de produção de água (operação + manutenção + amortização) em estações pequenas (150 e 908 l/min) foram estimados em US\$ 2,4 e 0,8/m³.

7.2. Sistemas de Membranas para a Produção de Águas de Reuso

Água de reuso é um termo utilizado para definir águas residuárias tratadas, geralmen-

FIGURA 14: ESQUEMA TÍPICO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA UTILIZADO NA FLÓRIDA, EUA, COM ÁGUA EXTRAÍDA DE POÇO PROFUNDO

Fonte: Bergman, 1995



7.1.4. Sistemas duais para a produção de água potável

Sistemas duais para o tratamento de água consiste na combinação de processos de microfiltração ou ultrafiltração com osmose reversa ou nanofiltração (Lozier *et al.*, 1997). Microfiltração e principalmente ultrafiltração, são as melhores tecnologias de pré-tratamento de água para RO ou NF. Um processo dual oferece a vantagem adicional da existência de uma barreira dupla para a passagem de patógenos, pois os organismos que porventura atravessarem a primeira etapa de filtra-

te efluentes de ETEs, que são incorporadas em algum sistema de uso. A tecnologia convencional de produção de água de reuso, requer tratamento complementar do efluente secundário por processo de floculação, decantação e filtração.

O processo desenvolvido pelo Orange County Water District, para produção de água de reuso derivada do efluente secundário, considerado referência na indústria, é complexo e caro, conforme se observa na figura 15 (Butler & Maccormick, 1996).

TRATAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO ATRAVÉS DE MEMBRANAS...

A substituição das etapas de pré-tratamento pela microfiltração (figura 15), melhora significativamente a eficiência e diminui o custo do processo. A comparação do sistema convencional com a microfiltração indica que o fluxo através da membrana de osmose reversa subiu de 3,5 l/m²/dia para 4,2 l/m²/dia (MF), a produtividade por área aumentou de 176 l/m²/dia para 844 l/m²/dia (MF), a frequência de limpeza química das membranas de osmose reversa diminuiu de 1 a cada 4 semanas para 1 a cada 22 semanas (MF) e o custo de produção de água de reuso (operação e manutenção) foram reduzidos de US\$ 0,3/m³ para US\$ 0,2/m³ (MF).

Avanços recentes na tecnologia de membranas filtrantes permite vislumbrar soluções mais diretas na produção da água de reuso (Johnson et al., 1997). A tecnologia de sewer mining, por exemplo, permite a produção de água de reuso diretamente da rede de esgoto, sem tratamento. Esse processo é patenteado e utiliza a filtração dual, onde uma unidade de microfiltração é utilizada como sistema de pré-tratamento de esgoto a ser filtrado por osmose reversa, cujos detalhes são apresentados na figura 16.

FIGURA 15: REUSO INDIRETO DE ÁGUA POTÁVEL. FLUXOGRAMA DO SISTEMA DE REFERÊNCIA COM TECNOLOGIA CONVENCIONAL EM OPERAÇÃO NA WATER FACTORY 21 EM ORANGE COUNTRY, USA
Fonte: Butler & McCormick, 1996

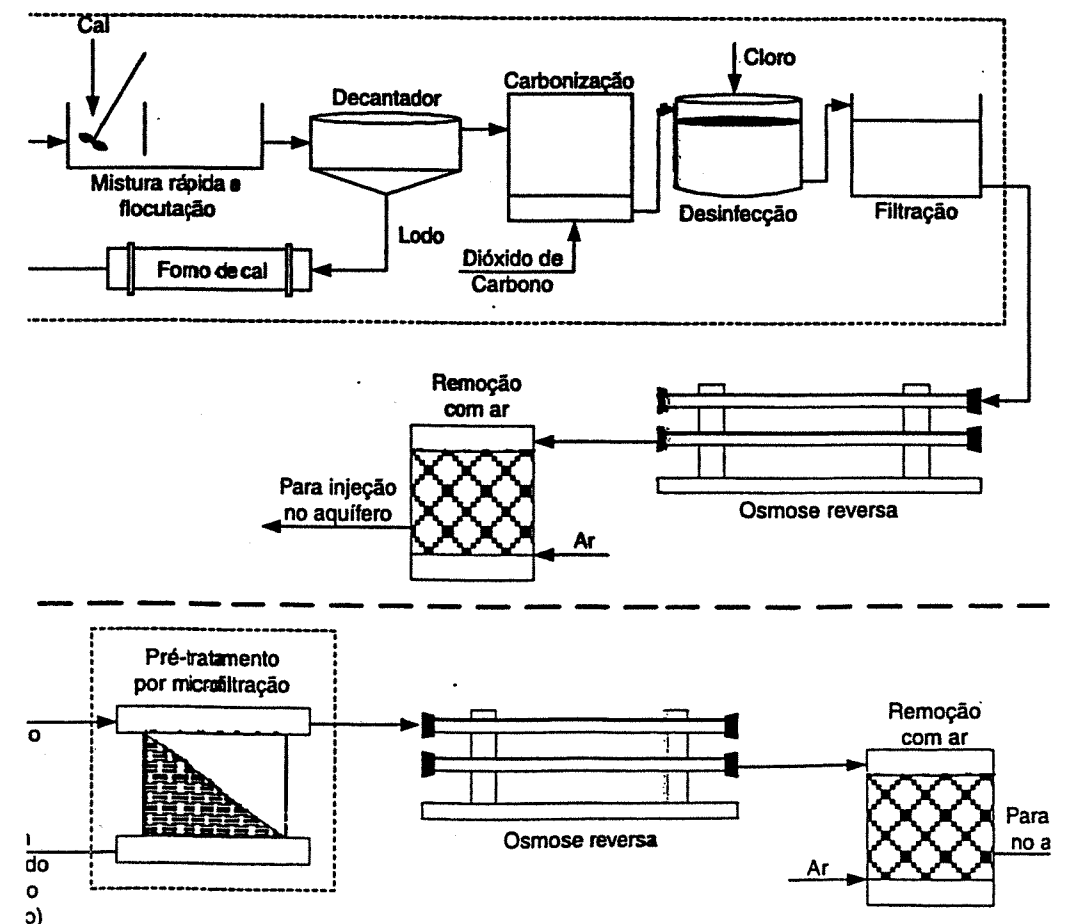
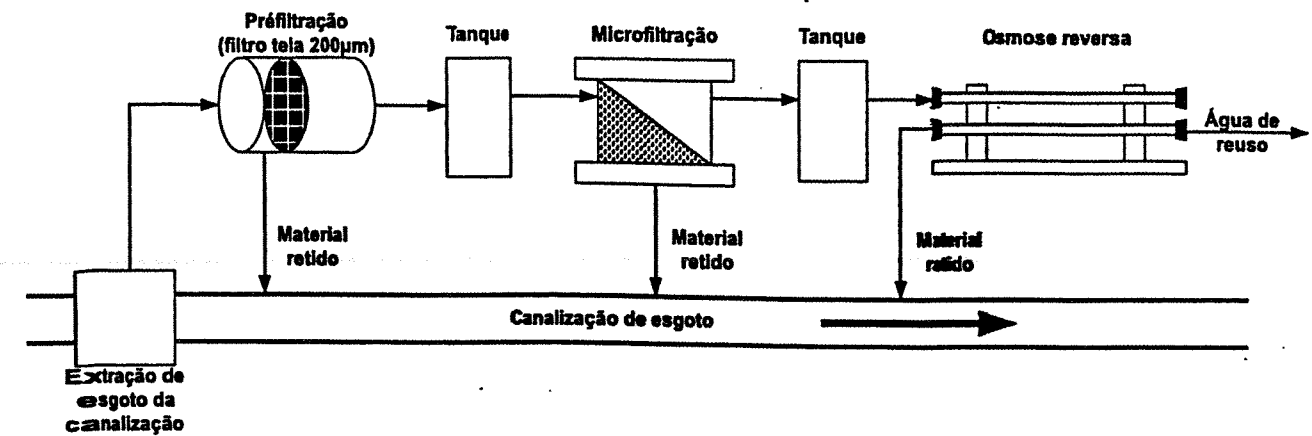


FIGURA 16: FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE SEWER MINING

Fonte: Johnson, et al, 1997



A água de reuso produzida pelo processo de sewer mining é de altíssima qualidade, conforme se observa na tabela 3.

Observação: DBO: demanda bioquímica de oxigênio, DQO: demanda química de oxigênio, COT: carbono orgânico total, SS: sólidos suspensos, SDT: sólidos dissolvidos totais, TKN: nitrogênio Kjeldahl total, CT: contagem total direta, CH: contagem heterotrófica, MS-2: vírus capaz de proliferação em águas ambientais, CP: vírus colifago, infecta coliformes fecais e não prolifera no meio-ambiente.

A tabela 3 demonstra claramente a eficiência do processo de sewer mining. Os sólidos suspensos foram totalmente eliminados na etapa de microfiltração (porosidade nominal 0,2 mm), enquanto que, a maior parte dos sólidos dissolvidos (sais minerais) incluindo nutrientes (fosfato, nitrogênio) e compostos orgânicos dissolvidos foi retido na etapa de osmose reversa. Os números de coliformes fecais encontrados no efluente de microfiltração, demonstram a eficiência desse processo na retenção de microorganismos oriundos de esgoto, com uma redução de 6 log na quantidade dessas bactérias. Provavelmente, o baixo número de coliformes fecais encontrado no microfiltrado tenha originado dos aerossóis presentes na estação de tratamento de esgoto onde estava instalada a planta piloto. Em águas residuárias, a maioria dos vírus está associada ao material particulado. Contagens de colifagos, que

são vírus que não se reproduzem no meio-ambiente, confirmam a eficácia da microfiltração na eliminação desses agentes potencialmente patogênicos.

6.4. Sistemas de Membranas para o Tratamento de Esgotos

Nas estações de tratamento de esgotos, os decantadores secundários podem ser substituídos por membranas de microfiltração ou ultrafiltração, resultando em uma produção de um efluente de altíssima qualidade no que se refere ao conteúdo de microrganismos, alterando radicalmente os parâmetros de operação dos reatores, conforme mostra figura 17, onde se pode observar a evolução dos processos de tratamento de esgotos com a utilização de membranas.

Fundamentalmente, a retenção da biomassa no sistema se torna independente das propriedades de decantação dessa biomassa e de sua concentração, o que permite aumentar a quantidade de biomassa ativa para 15 a 30 g/l, comparado com 4 g/l em lodos ativados convencionais. Como consequência, o volume dos reatores em sistemas de membrana pode ser reduzido em um fator equivalente ao aumento da biomassa, mantendo-se inalterado o tempo de retenção hidráulica do efluente. As dimensões da estação será ainda menor com a incorporação do processo de separação da biomassa no reator.

TABELA 3: DESEMPENHO DO SISTEMA SEWER MINING EM RELAÇÃO A ALGUNS PARÂMETROS FUNDAMENTAIS DA QUALIDADE DA ÁGUA

Parâmetro	Esgoto	Após Microfiltração	Após Osmose Reversa
A) Físico-químico			
DBO (ppm)	230	89	< 2
DQO (ppm)	—	133	7,5
Óleos e graxas (ppm)	39	7,3	< 5
COT (ppm)	103	46	1,2
SS (ppm)	144	< 2	—
SDT (ppm)	—	403	16,1
NKT (ppm)	50	51	3,9
Amônia (ppm)	40	39	2,5
P total (ppm)	11,2	9	0,09
PO ₄ (ppm)	8,2	7,4	0,06
Cor (PCU)	—	89	< 3
B) Microbiológico			
CT/100ml	2,7·10 ¹⁰	8,7·10 ⁵	1,7·10 ⁶
CH/100ml	1,9·10 ⁹	2,9·10 ⁴	3,0·10 ³
CF/100ml	5,1·10 ⁶	1,3	0
MS-2/100ml	2,2·10 ⁵	1,7·10 ³	0,5
CP/100ml	1,4·10 ⁴	1,8	0

Fonte: Johnson et al., 1997.

Uma outra grande vantagem desse processo em relação aos reatores convencionais, é o fato de que, a alta concentração de biomassa viabiliza processos de digestão aeróbia e anaeróbia no interior dos flocos, o que diminui a produção de lodo em cerca de 50%, se comparado com o processo de lodos ativados convencionais. É possível, com efluentes adequados, operar esses sistemas com tempo de retenção de biomassa infinitos, ou seja, sem produção de biomassa excedente. A retenção

prolongada de biomassa nesses reatores, facilita também, o estabelecimento de organismos de crescimento lento, aumentando assim a biodiversidade de organismos e, por consequência, a diversidade de reações de biodegradação que podem ser catalizadas no reator.

Há duas configurações possíveis de reatores de membrana (figura 18). A configuração com sistemas pressurizados consiste na substituição do decantador secundário por um

sistema de microfiltração ou ultrafiltração convencional, sendo o rejeito reciclado para o reator (Mallevalle et al., 1996). A alternativa baseada em membranas submersas, poderá realmente revolucionar o projeto das ETEs. Nesse caso, módulos com grande quantidade de fibras ocas de microfiltração ou ultrafiltração são imersas no reator, e um vácuo gerado por bombas centrífugas conectadas com o lúmen das Fibras puxa a água através das membranas (Coté et al., 1997).

A remoção do material retido na superfície dessas membranas, requer a injeção de grandes quantidades de ar na água bruta. Esse gasto de energia, se reverte em benefício no caso

de esgoto dentro do reator de lodo ativado, pois o oxigênio contido no ar injetado no reator, é utilizado pelos microrganismos para a biodegradação da matéria orgânica. A grande concentração do material suspenso, que dificulta a operação das membranas pressurizadas, auxilia na remoção do material aderido às membranas. Esses sistemas submersos, também dependem da retrolavagem periódica das membranas, com permeado pressurizado injetado pelo lúmen. Apesar da grande concentração de material particulado, os ciclos de limpeza química dessas membranas são pouco frequentes, ocorrendo em intervalos de vários meses ou de seis em seis meses.

FIGURA 17: EVOLUÇÃO DOS PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ESGOTO, UTILIZANDO-SE AS MEMBRANAS

Fonte: Coté et al, 1997

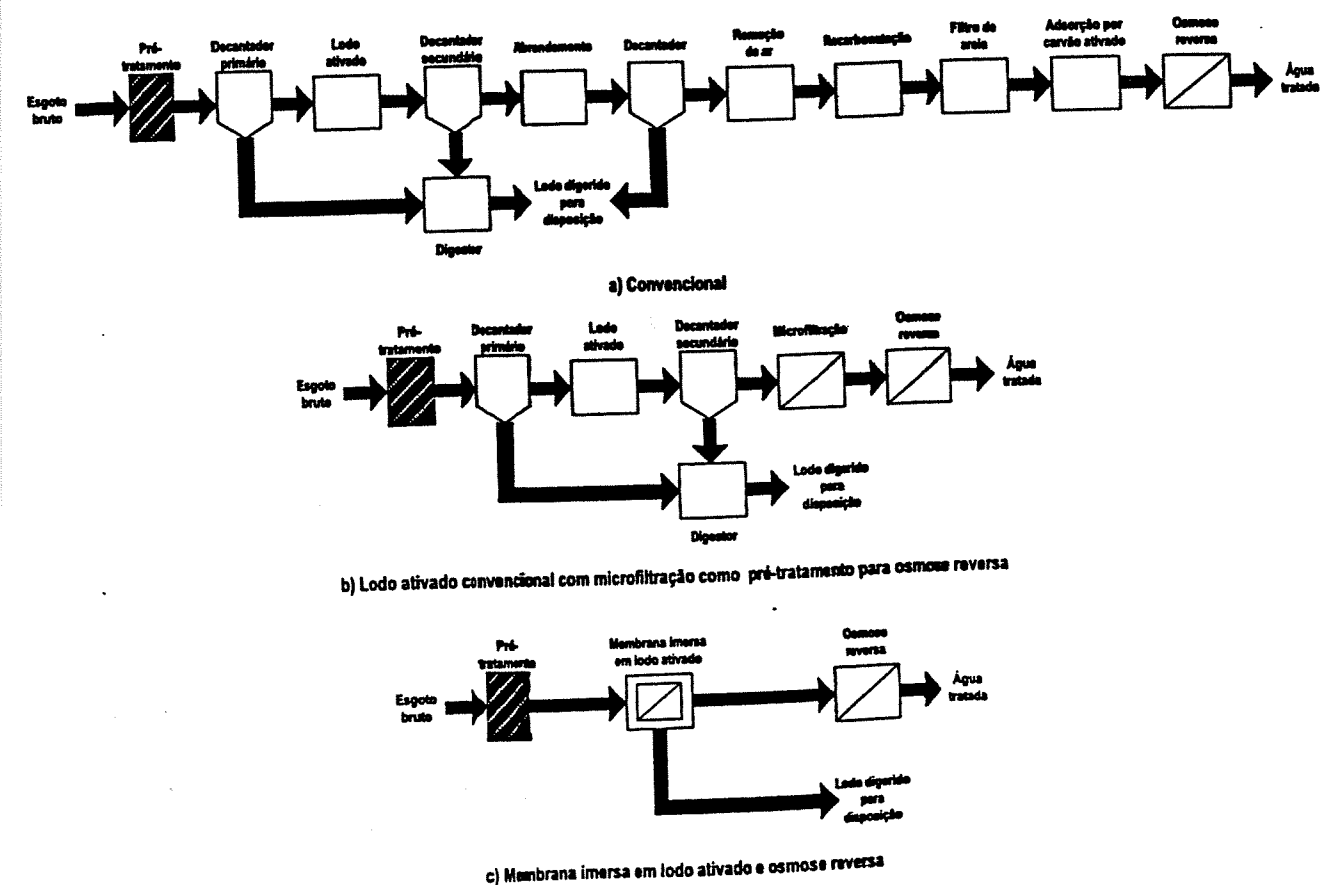
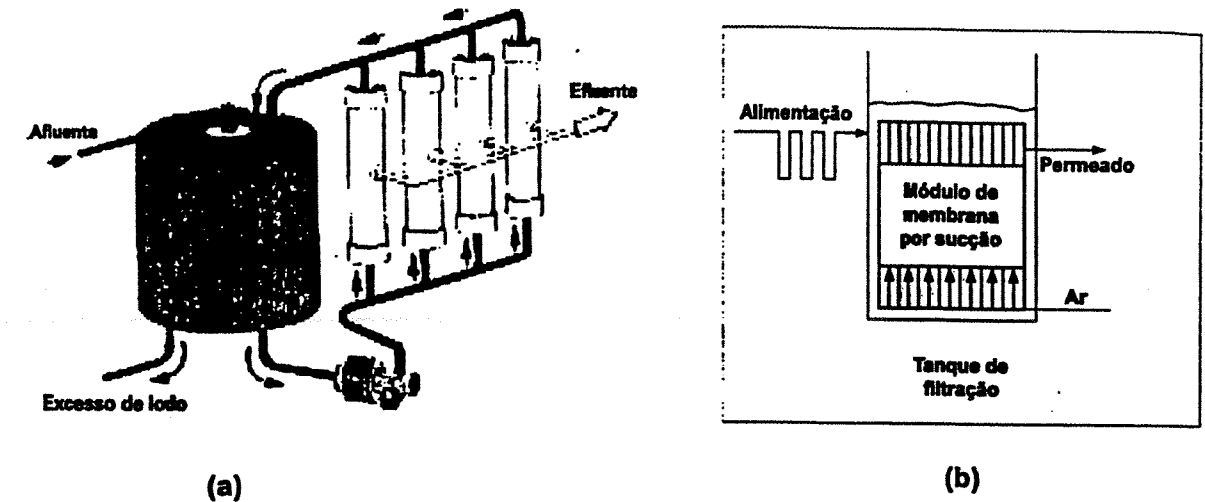


FIGURA 18: CONFIGURAÇÕES DE REATORES DE MEMBRANA

Fonte: Mallevalle et al, 1996

Zenca, 1997



(a) recirculação do conteúdo do reator através de unidade de microfiltração ou ultrafiltração pressurizada externa;
 (b) reator integrado onde módulos de microfiltração ou ultrafiltração operadas por sucção são imersos no reator.

8. CONCLUSÃO

Na área de saneamento básico, a tecnologia de membranas filtrantes é muito mais do que uma alternativa de processo. Atualmente, com o desenvolvimento tecnológico e uma grande diminuição de custos, a tecnologia de membranas é viável economicamente em grande escala, para a remoção de praticamente a totalidade dos componentes particulados, moleculares e iônicos em água e, principalmente, em esgotos.

Vislumbra-se, portanto, a possibilidade real de implementar sistemas de descarga zero de poluentes na água e de produção bastante reduzida de poluentes sólidos. Essa tecnologia oferece a possibilidade da reciclagem direta do esgoto para o sistema de água, o que reduziria, ou postergaria a construção de novos sistemas produtores de água potável.

A grande mudança do paradigma se dará a nível da descentralização do tratamento de esgoto e da produção de água, o que diminuirá sensivelmente o custo de construção dos sistemas de água e de esgotos sanitários. Poderá ser implementado o gerenciamento da produção de água por microbacia em grandes centros urbanos, incluindo o tratamento e reciclagem de águas pluviais.

A realização desses benefícios potenciais com a utilização da tecnologia de membranas filtrantes, depende de análise técnica, econômica e financeira das alternativas de projetos, e de um planejamento pormenorizado de implantação de soluções com diferentes níveis de complexidade. Por exemplo, pode-se iniciar a conversão de uma ETE em ETA, primeiro pela implantação de reatores de membrana. Etapas de osmose reversa ou nanofiltração seriam instaladas posteriormente, com o aumento do consumo de água.

Apesar da redução considerável, nos últimos cinco anos, do custo de implantação, operação e manutenção de sistemas de membranas filtrantes, a tecnologia ainda está muito distante de se ter esgotado todo o potencial de melhoramento de eficiência e redução de custo. Na realidade, essa tecnologia ainda se encontra nos estágios iniciais de desenvolvimento, sendo grande, a probabilidade de ocorrência de incrementos consideráveis nesse processo, nos próximos anos.

No Brasil, essa tecnologia ainda é muito pouco conhecida na área de saneamento básico. O potencial de aplicação de membranas filtrantes é considerável nos grandes centros urbanos e nas

áreas sujeitas a secas intermitentes. É extremamente importante para o país, a realização de pesquisas que objetivem melhorar o rendimento dos processos de membrana nas diferentes aplicações em saneamento, pois será necessário adaptar a tecnologia de membranas às necessidades nacionais. Para reduzir os custos das membranas é necessário que o país possa produzi-lo, desenvolvendo-se uma tecnologia própria. Também, será indispensável o desenvolvimento da competência técnica nacional nessa tecnologia, para o julgamento adequado das propostas de fabricantes internacionais para projetos específicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Adham, S. S.; Jacangelo, J. G. and Lainé, J.-M. Low-pressure membranes: assessing integrity. *J. AWWA*, 62-75, março 1995.

2. Bergman, R. A. Cost of membrane softening in Florida. *J. AWWA*, 32-43, maio 1996.

3. Bergman, R. A. Membrane Softening Versus Lime Softening in Florida: A Cost Comparison Update. *Desalination* 1023, 11-24, 1995.

4. Butler, R. and MacCormick, T. Opportunities for Decentralized Treatment, Sewer Mining and Effluent Reuse. *Desalination*, 106, 273-283, 1996.

5. Côté, P.; Buisson, H.; Pound, C. and Arakaki, G. Immersed membrane Activated Sludge for the Reuse of Municipal Wastewater. *Desalination* 113, 189-196, 1997.

6. Gere, A. R. Microfiltration operating costs. *J. AWWA*, 89, 40-49, 1997.

7. Johnson, W. T.; Phelps, R. W. and Beatson, P. J. Water reuse using membranes. *IDA World Congress*, Oct. 6-9, Madrid, Spain, Vol 2., p. 611, 1997.

8. Leslie, G. L.; Dunivin, W. R.; Gabillet, P.; Conklin, S. R.; Milla, W. R. and Sudak, R. G. Pilot testing of microfiltration and ultrafiltration upstream of reverse osmosis during reclamation of municipal wastewater. *Proc. American Desalting Association Biennial Conference*, Monterey, California, pp. 1-11, 1996.

9. Lozier, J. C.; Jones, G. and Bellamy, W. Integrated membrane treatment in Alaska. *J. AWWA*, 89, 50-64, 1997.

10. MacCormick, A. B. Economic Reuse of Municipal Wastewater in an Urban Environment, in "Drinking Water from Sewage using Membranes" *Symp. Proc. UNSW*, 9pp., 1995.

11. MacNeil, J. C. Membrane Separation Technologies for Treatment of Hazardous Wastes. *CRC Critical Rev. Environmental Control*, 18, 91-131, 1988.

12. Mallevalle, J.; Odendaal, P. E.; Wiesner, M. R. Water treatment membrane processes. *American Water Works Association. Lyonnaise des Eaux. Water Research Commission of South Africa. McGraw Hill. New York*. 1996.

13. Maccormick, A. B. Economic use of municipal wastewater in urban environment in drinking water from sewage using membranes. *Symp. Proc. UNESCO*, 9pp, 1995.

14. Mourato, D.; Smith, C.; Newcombe, T. and Leslie, G. Applications of reverse osmosis membranes in the drinking water field. *AWWA Membrane Technol. Conf. Proc.*, 703-714, 1997.

15. Ridgway, H. F. Microbial Adhesion and Biofouling of Reverse Osmosis Membranes. In *Reverse Osmosis Technology* (Parekh, B. S., ed.), chapter 10, pp. 429-481, 1988.

16. Sadr Ghayeni S. B., Beatson, P. J., Schneider, R. P., and Fane, A. G. Water reclamation from municipal wastewater using combined microfiltration-reverse osmosis (MF-RO): Preliminary performance data and microbiological aspects of system operation. *Journal of Membrane Science*, 116, 65, 1998.

17. Tonelli, T. and Kroll, S. Microfiltration Technology — the Next Generation. *Proc. 58th Annual Meeting Int. Water Conf. Pittsburgh, Penn.*, 8pp, 1997.

18. Ventresque, C. and Bablon, G. The Integrated nanofiltration System of the Méry-sur-Oise Surface Water Treatment Plant (37 mgd). *Desalination*, 113, 263-266, 1997.

19. Yoo, R. S.; Brown, D. R.; Pardini, R. J. and Bentson, G. D. Microfiltration: a case study. *J. AWWA*, 38-49, 1995.