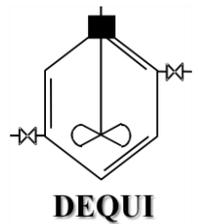




UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA



TRABALHO DE CONCLUSÃO EM
ENGENHARIA QUÍMICA

ESTUDO SOBRE SISTEMAS DE PRÉ-TRATAMENTO PARA PLANTAS
DE OSMOSE INVERSA

ALAN AMBROSI

Porto Alegre

Junho de 2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

ESTUDO SOBRE SISTEMAS DE PRÉ-TRATAMENTO PARA
PLANTAS DE OSMOSE INVERSA

Alan Ambrosi

00136209

Estudo apresentado como requisito parcial à
obtenção do grau de Engenheiro Químico na
Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientadora:
Prof^a. Dr^a. Isabel Cristina Tessaro

Porto Alegre

Junho de 2009

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me manter feliz e me dar força em todos os momentos de minha vida.

A minha família por acreditar em mim, em meu trabalho e me apoiar incansavelmente e a minha querida namorada pelo carinho e compreensão.

A minha orientadora Isabel Cristina Tessaro, pelo tempo, orientação e oportunidade de participar no projeto para a realização desse trabalho.

À empresa Braskem – Unib/RS e à profissional Andréa Sarmento pelo apoio prestado durante o trabalho.

Aos meus colegas e amigos da graduação, em especial a Fabiani Vitt e a Cecília Kraemer pelo companheirismo e participação no projeto.

A todos aqueles que de alguma forma me ajudaram na graduação e no desenvolvimento do trabalho de conclusão.

RESUMO

A Osmose Inversa (OI) caracteriza-se como um processo de separação por membranas (PSM) e atualmente é uma técnica muito utilizada para o tratamento de águas e correntes de processo visando o seu reúso. Por possuir uma série de vantagens em relação aos processos tradicionais (destilação multi-estágio e destilação flash), a OI tem sido amplamente desenvolvida e projetada para várias aplicações, como a dessalinização, a desmineralização e o reúso de correntes de processo. Contudo, os sistemas de pré-tratamento da corrente de alimentação da OI não apresentaram o mesmo desenvolvimento ao longo do tempo, prejudicando o desempenho e a confiabilidade operacional do processo. O estudo que este trabalho propõe deverá servir como base para se entender a importância de um adequado sistema de pré-tratamento para a corrente de alimentação da OI. Com esta finalidade, serão estudadas algumas das principais técnicas de pré-tratamento da corrente de alimentação da OI, apresentando suas características e aplicações, além de trazer informações sobre a água de alimentação dos sistemas de OI e um exemplo de aplicação de sistema de pré-tratamento sobre uma planta piloto de OI. As técnicas mais utilizadas e tradicionais consistem no tratamento convencional da água através de clarificação, filtração e acondicionamento com produtos químicos. Novas técnicas têm sido pesquisadas, como a microfiltração (MF) e a ultrafiltração (UF) que são também processos de separação por membranas. Alguns resultados indicam que estas últimas possibilitam obter uma maior recuperação sobre o sistema de OI e permitem maiores oscilações nas características da água captada, produzindo uma corrente de alimentação para a OI de melhor qualidade do que a dos processos tradicionais. A escolha de uma ou mais técnicas dependerá de cada caso, ou seja, das características da água captada, da possibilidade de investimentos e também da qualidade e usos do produto que se deseja obter.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 OSMOSE INVERSA	3
2.1.1 Membranas utilizadas na OI.....	4
2.1.2 Configurações dos módulos das membranas de OI.....	7
2.1.3 Dessalinização de águas marinhas e salobras	8
2.1.4 Desmineralização de águas.....	10
2.1.5 Reúso de correntes de processo e tratamento de efluentes.....	11
2.2 ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO DA OI	12
2.2.1 Principais análises da água.....	12
2.2.1.1 Cálcio.....	13
2.2.1.2 Magnésio.....	13
2.2.1.3 Sódio	13
2.2.1.4 Alumínio	13
2.2.1.5 Manganês.....	14
2.2.1.6 Ferro.....	14
2.2.1.7 Sílica	14
2.2.1.8 Sulfato.....	14
2.2.1.9 Cloro livre.....	14
2.2.1.10 pH	15
2.2.1.11 Temperatura.....	15
2.2.1.12 Turbidez.....	15
2.2.1.13 SDI – Silt Density Index	15
2.3 SISTEMAS DE PRÉ-TRATAMENTO DA CORRENTE DE ALIMENTAÇÃO DA OI	17
2.3.1 Filtros de areia	18
2.3.2 Dosagem de produtos químicos.....	19
2.3.3 Filtros de cartucho	20
2.3.4 Microfiltração (MF) e Ultrafiltração (UF)	20
2.4 REVISÃO SOBRE CASOS DE PRÉ-TRATAMENTO EM SISTEMAS DE OI.....	21
2.4.1 Considerações sobre os sistemas de pré-tratamento.....	25
IMPLANTAÇÃO DE SISTEMA DE PRÉ-TRATAMENTO EM UNIDADE PILOTO DE OI	27
3.1 UNIDADE PILOTO DE OI.....	27
3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ÁGUAS DA TORRE DE RESFRIAMENTO.....	29
3.3 ESTUDO DO SISTEMA DE PRÉ-TRATAMENTO	30
CONCLUSÕES E SUGESTÕES	32
4.1 CONCLUSÕES	32
4.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Representação esquemática do processo de Osmose e de OI.....	4
Figura 2.2: Representação esquemática da seção transversal dos diferentes tipos de membranas.	5
Figura 3.1: Unidade piloto de OI. Fonte: Vitt (2007).	28
Figura 3.2: Fluxograma para a unidade piloto de OI incluindo o sistema de pré-tratamento.	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Principais características de membranas de OI a base de poliamida e acetato de celulose. Adaptado de Bates (1998).....	7
Tabela 2.2: Relação de alguns países que utilizam a dessalinização de águas, a produção em m ³ por dia, o percentual em relação à produção mundial e os principais processos utilizados para o ano de 1998. Adaptado de Miller (2003).	9
Tabela 2.3: Faixa de SDI para os determinados tempos de coleta.....	17
Tabela 2.4: Análise de cor da membrana após o teste de SDI.....	17
Tabela 3.1: Qualidade do permeado obtido no experimento comparado com a água clarificada e com os parâmetros de controle da torre de resfriamento.....	28
Tabela 3.2: Principais parâmetros monitorados da água de resfriamento (AR) e da água clarificada de reposição (AC) da torre de resfriamento.....	29

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O processo de Osmose Inversa (OI) está atualmente consolidado em uma ampla faixa de aplicações, desde a produção de água pura para uso na indústria até projetos de irrigação e produção de água potável. No entanto, as indústrias que utilizam o processo têm dado pouca atenção às características da água de alimentação da OI e, geralmente, os sistemas de pré-tratamento acabam em uma tecnologia convencional que foi desenvolvida para diferentes necessidades, como por exemplo, no tratamento de água potável a partir de fontes não salinas ou na desmineralização de águas para caldeiras. O máximo aproveitamento dos novos sistemas de membranas somente será obtido com o fornecimento de uma água de alimentação de melhor qualidade, pré-tratada adequadamente, garantindo a confiabilidade do processo de OI. Para fontes de água subterrâneas, por exemplo, o uso de filtros cartucho é um pré-tratamento suficiente, mas águas originadas de fontes superficiais requerem um pré-tratamento mais intensivo como, por exemplo, floculação seguida de filtração por filtros de areia e após, filtros cartucho.

Da mesma forma que houve evolução no processo de OI nas últimas décadas, as águas que costumam alimentar os sistemas têm sido obtidas das fontes mais diversas como rios, fontes subterrâneas, salinas e do mar. Se essas correntes não forem devidamente tratadas, podem provocar *fouling* nas membranas, um dos principais inconvenientes da OI. A formação de incrustações acarreta em maior demanda de energia, pois se aumenta a pressão de operação para obter o mesmo fluxo permeado, diminui os intervalos entre as limpezas químicas e, portanto, reduz o tempo de vida útil das membranas. A ocorrência de incrustações é praticamente inevitável, mas pode ser minimizada pela escolha dos pré-tratamentos adequados, pelo correto dimensionamento da planta e pela melhor seleção das condições de operação do sistema de OI.

Na indústria, a qualidade da água que alimenta o processo de OI é determinada, na maioria dos casos, em termos da concentração de partículas suspensas utilizando-se como indicadores a turbidez e o SDI (*Silt Density Index*). Ambos indicadores possuem valores considerados máximos para que a operação dos sistemas de OI seja confiável e, portanto, o pré-tratamento deve garantir que esses limites não sejam ultrapassados.

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a necessidade e a importância dos sistemas de pré-tratamento da água de alimentação de sistemas de OI. Uma pequena introdução sobre o processo de OI foi feita, demonstrando suas características e principais aplicações. Também foram abordadas as características da água de alimentação da OI e os usuais testes de caracterização que são necessários para uma correta definição de um sistema de pré-tratamento. Alguns exemplos encontrados na literatura que tratam da utilização da OI para tratamento de diferentes tipos de águas foram apresentados para enfatizar a importância do correto pré-tratamento. Finalmente, foi apresentado, para exemplificar, um caso de aplicação de um sistema de pré-tratamento em uma planta piloto de OI.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos sobre o processo de OI e as características necessárias da corrente de alimentação do sistema para se obter um bom desempenho do processo. Em vista das características encontradas nas águas que alimentam o sistema de OI são apresentados os pré-tratamentos necessários para que a corrente de alimentação apresente as características desejadas, além de alguns exemplos de sistemas de pré-tratamentos encontrados na literatura.

2.1 OSMOSE INVERSA

A Osmose Inversa (OI) é um processo de separação por membranas (PSM) utilizado na separação de solutos de baixa massa molar como sais inorgânicos ou pequenas moléculas orgânicas. Como o próprio nome sugere, o processo ocorre no sentido inverso ao natural da osmose devido à aplicação de pressão na solução concentrada em contato com uma membrana semipermeável e seletiva a certos componentes da solução (Figura 2.1). Essa pressão deve ser maior que a pressão osmótica da solução concentrada para promover a difusão do solvente para o lado de menor concentração.

Atualmente, a OI é amplamente utilizada nos processos de desmineralização, dessalinização, tratamento de efluentes e reúso de águas. Esta técnica apresentou um grande desenvolvimento nas últimas décadas e passou a ser competitiva com outros processos de separação, pois houve aumento do desempenho das membranas, diminuição nos preços e conseqüente aumento de projetos envolvendo a OI.

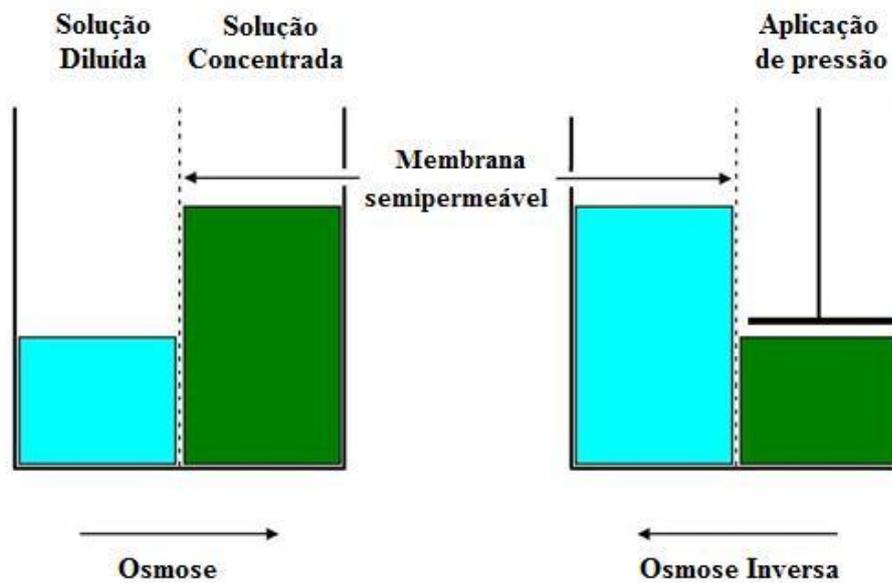


Figura 2.1: Representação esquemática do processo de Osmose e de OI.

Os fatores limitantes dos processos de OI são a polarização por concentração e o *fouling*. O primeiro é resultado da formação de uma camada mais concentrada de soluto próximo à superfície da membrana que causa redução no fluxo de água e aumento da passagem de sais pela membrana. O segundo é resultado da presença de material coloidal e suspenso, elevada concentração de sais e ainda microrganismos e algas na água de alimentação da OI que se depositam sobre a membrana, reduzindo o fluxo de água, aumentando a passagem de sais e também podendo danificar a superfície da membrana.

2.1.1 Membranas utilizadas na OI

Do ponto de vista morfológico, conforme apresentado na Figura 2.2, as membranas são divididas em duas grandes categorias: as densas e as porosas. As membranas são consideradas densas quando o transporte dos componentes envolve uma etapa de dissolução e difusão através do material que constitui a membrana. A membrana é denominada porosa quando o transporte através da mesma ocorre devido à diferença de tamanhos entre as substâncias e os poros da membrana. Além disso, ambas as categorias podem ser consideradas simétricas ou assimétricas. Membranas simétricas apresentam as mesmas características morfológicas ao longo de sua espessura, enquanto que as assimétricas apresentam variação na morfologia ao longo da seção transversal, apresentando uma camada mais fina chamada de

pele que ainda pode ser suportada em uma estrutura porosa. Se ambas as estruturas são constituídas de um único material são chamadas de integrais, caso contrário, são chamadas de compostas.

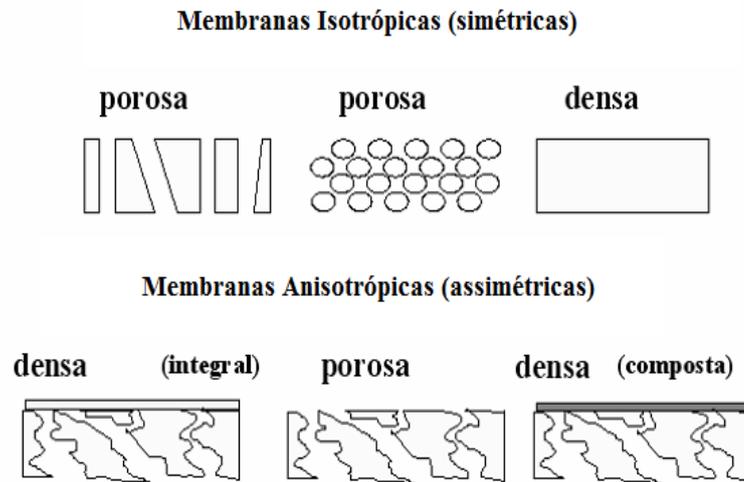


Figura 2.2: Representação esquemática da seção transversal dos diferentes tipos de membranas.

As membranas de OI são densas e o mecanismo de transporte é denominado de solução/difusão. Considerada uma barreira seletiva em relação a uma ou mais espécies, a membrana é de fundamental importância na OI e, assim como em outros processos de separação por membranas, apresenta variações quanto aos materiais empregados na sua elaboração. Os materiais mais utilizados para a OI são os polímeros de celulose, poliamidas aromáticas, poliéterurea e também outros tipos de filmes para membranas compostas.

Segundo Byrne (1995) *apud* Kipper (2005) para aplicações de purificação de água, as duas famílias de membranas de OI mais utilizadas são constituídas por polímeros de acetato de celulose (AC) e poliamida (PA). Um terceiro tipo utiliza polissulfona carregada (PS).

Membranas de AC possuem baixa estabilidade química e, de acordo com El-Sayed *et. al* (2003), são relativamente mais baratas, mas a água de alimentação deve ser pré-clorada para prevenir a sua biodegradação e ainda devem ser utilizadas em uma estreita faixa de pH, pois tendem a hidrolisar com o tempo a uma taxa dependente da combinação das condições de temperatura e pH. A membrana de AC possui estrutura assimétrica com uma densa camada superficial de 0,1 a 0,2 μm , a qual é responsável pela rejeição salina; o suporte da membrana

geralmente é poroso e possui alta permeabilidade à água (Hydranautics, 2001). Devido à superfície neutra e a elevada tolerância ao cloro as membranas de AC são usualmente mais estáveis quanto ao seu desempenho em aplicações onde a água possui elevado potencial de *fouling*.

As membranas de PA são caracterizadas pela sua excelente estabilidade química e resistência ao ataque biológico. São capazes de operar em uma ampla faixa de pH (4 a 11) e temperatura (0 °C a 35 °C) mas são muito sensíveis a agentes oxidantes, tal como o cloro livre (Amjad, 1992). Do mesmo modo que a membrana de AC, uma densa camada de 0,1 a 1 µm é suportada por uma estrutura porosa, de aproximadamente 26 µm de espessura, mas em relação ao fluxo permeado e à retenção salina, eles são maiores para a PA.

Embora a PA não sofra ataque biológico, ela é suscetível a depósitos. Isto ocorre principalmente devido a duas características de superfície (Scott, 1997 *apud* Kipper, 2005), que são:

1. a carga - as membranas de PA apresentam carga aniônica na superfície, por isso, a superfície das membranas apresenta uma forte afinidade com compostos orgânicos e bactérias;
2. a morfologia - as membranas de PA têm uma superfície extremamente irregular com fissuras, anzóis e depressões e portanto, bactérias e substratos orgânicos são capturadas na superfície irregular do filme de PA e são difíceis de serem removidos ou requerem limpezas mais freqüentes.

Membranas de PS são carregadas negativamente, possuem alta resistência a agentes oxidantes e podem operar numa ampla faixa de pH, mas devido as suas características de carga, atraem e retêm cátions em sua superfície, reduzindo o seu desempenho.

As membranas mais utilizadas na OI são assimétricas, constituídas por uma pele de poliamida suportada em uma camada de polissulfona, o que confere alta retenção de sais e alto fluxo de permeado. As características de um exemplo de membrana composta denominada LFC (*Low Fouling Composite*), podem ser vistas na Tabela 2.1, que apresenta também, as principais características e condições de operação para membranas de poliamida e de acetato de celulose.

Tabela 2.1: Principais características de membranas de OI a base de poliamida e acetato de celulose. Adaptado de Bates (1998).

Tipo de membrana	LFC	PA	AC
Material da membrana	Poliamida	Poliamida	Acetato de celulose
Carga superficial	Neutra	Negativa	Neutra
Rejeição ao NaCl	99%	99 a 99,7%	95 a 98%
Rejeição orgânica	Similar	Similar	Abaixo
Pressão de teste	225 psi	225 psi	420 psi
Fluxo Específico (g.ft ⁻² .d ⁻¹ por 100 psi)	13	13	5 a 6
Faixa de pH	3 a 10	3 a 10	4 a 6
Limite de temperatura	45°C	45°C	40°C
Tolerância ao cloro	1000 ppm-hr	1000 ppm-hr	26.280 ppm-hr
Hidrofilicidade	47 graus	62 graus	50 graus

A membrana LFC possui praticamente as mesmas características que a PA, diferenciando-se pela carga superficial neutra, que dá a membrana maior resistência ao *fouling* e pela hidrofilicidade maior que minimiza a adsorção de compostos hidrofóbicos à superfície da membrana. É importante salientar que este é apenas um exemplo de membrana composta, pois há no mercado atual uma infinidade de tipos de membranas que são projetadas para as mais diversas aplicações. A limitação da membrana LFC reside no fato dela ser também de PA, o que confere menor tolerância ao cloro livre e a agentes oxidantes em geral presentes na água de alimentação. Portanto, é importante existir no sistema de pré-tratamento da água de alimentação da OI uma etapa de remoção dos agentes oxidantes a fim de evitar a degradação da membrana.

2.1.2 Configurações dos módulos das membranas de OI

As configurações mais utilizadas na OI são módulos de fibra oca e módulos em espiral.

As fibras ocas possuem estrutura assimétrica e milhares delas são dispostas paralelamente a um tubo de alimentação central de forma que suas pontas fiquem isoladas da água de alimentação. O produto é conduzido para fora do módulo pelo interior das fibras que possuem as pontas conectadas a um espelho que separa o produto da água de alimentação. A unidade de fibra oca permite uma elevada área de membrana por volume ocupado o que resulta em sistemas compactos e fáceis de operar. Tem como desvantagem a sensibilidade ao *fouling* devido ao material suspenso e coloidal presente na água de alimentação.

O módulo em espiral consiste em um envelope de membranas enrolado em torno de um tubo perfurado para coletar o permeado resultando em um conjunto formado por membranas, espaçadores de alimentação e de permeado. Vários envelopes podem ser enrolados e separados por folhas espaçadoras que servem como canais de escoamento da alimentação e como promotores de turbulência para reduzir a polarização por concentração. A alimentação percorre a membrana tangencialmente enquanto o permeado percorre o caminho em espiral em direção ao coletor central. Os módulos em espiral são disponíveis em diversas variedades de materiais o que confere vasta aplicação. Possuem área superficial moderada em relação ao volume permeado e geralmente necessitam de sistemas com vários módulos para se obter uma elevada recuperação. Por possuírem o canal de alimentação de espessura muito pequena (0,66 a 0,86 mm) é necessário que a água de alimentação não possua sólidos em suspensão, pois além de causarem *fouling*, podem danificar a superfície da membrana.

2.1.3 Dessalinização de águas marinhas e salobras

Dessalinização é o processo de obtenção de água fresca ou potável de baixa salinidade a partir de uma fonte de água salgada (mar ou fonte salobra) através de processos com membranas ou de evaporação, por exemplo.

A dessalinização da água do mar não é recente e data da década de 70 quando os primeiros sistemas de OI foram instalados em alguns países com escassez de recursos hídricos. Na ocasião, os sistemas de OI competiam diretamente com o processo de destilação *flash* multi-estágio e apresentavam baixa eficiência devida principalmente à baixa recuperação obtida e à elevada tendência ao *fouling*. Com o desenvolvimento de novas técnicas na fabricação das membranas e as melhorias nos sistemas de pré-tratamento da água de alimentação a utilização da OI tornou-se economicamente viável e competitiva por uma série de vantagens:

- requerimento de menor quantidade de energia;
- operação a temperatura ambiente, sem troca de fases;
- construção modular que permite fácil *scale-up* e trocas de membranas;
- facilidade de operação;
- possibilidade de trabalhar em conjunto com outras técnicas clássicas de separação.

Atualmente, o processo de dessalinização de águas é utilizado também em plataformas petrolíferas, navios e poços artesianos de regiões áridas. De acordo com dados de 1998 mostrados na Tabela 2.2, os processos de OI e de destilação *flash* são os mais utilizados na dessalinização, seguidos pela eletrodialise, que também é um processo de separação com membranas (Miller, 2003). Os onze países citados representam mais de 75% da capacidade mundial e seis deles estão localizados no Oriente Médio, onde há escassez de água potável. Estima-se que em 2005, a capacidade de desalinização atingia os 32 milhões de m³/dia (The World's Water, 2005).

Tabela 2.2: Relação de alguns países que utilizam a dessalinização de águas, a produção em m³ por dia, o percentual em relação à produção mundial e os principais processos utilizados para o ano de 1998. Adaptado de Miller (2003).

País	Capacidade (m ³ /dia)	Produção Mundial (%)	Destilação "flash" (%)	OI (%)	Eletrodialise (%)
Arábia Saudita	5.253.200	25,9	65,7	31	1,9
Estados Unidos	3.092.500	15,2	1,7	78	11,4
Emirados Árabes	2.164.500	10,7	89,8	6,5	0,2
Kuwait	1.538.400	7,6	95,5	3,4	0,3
Japão	745.300	3,7	4,7	86,4	6,8
Líbia	683.300	3,4	67,7	19,6	9,8
Quatar	566.900	2,8	94,4	0,0	0,0
Espanha	526.900	2,6	10,6	68,9	10,9
Itália	518.700	2,6	43,2	20,4	19,2
Bahrain	309.200	1,5	52,0	41,7	4,5
Oman	192.000	0,9	84,1	11,7	0,0
Total	15.594.500	76,9	54,8	36,1	4,8

Para Xu *et. al* (2007), a OI é hoje um dos métodos predominantes na dessalinização da água do mar. No entanto, um grande inconveniente das membranas de OI é a sua susceptibilidade ao *fouling* devido à presença de colóides, particulados, material orgânico e inorgânico na água de alimentação, assim como o desenvolvimento de microrganismos nos sistemas. Desse modo, o ponto chave da OI para o tratamento da água do mar é o pré-tratamento, que pode reduzir o potencial de *fouling* da água e prover às membranas uma água de melhor qualidade.

Nos sistemas de dessalinização de água do mar ou salobras, é necessário aplicar elevadas pressões para vencer a alta pressão osmótica da água (375-500 psi) e assegurar elevada produtividade. Com este objetivo e para assegurar a qualidade da água, as membranas devem suportar pressões entre 800-1200 psig e ter rejeição salina maior que 99%.

Geralmente, plantas de dessalinização de água usando fontes salobras podem ter de 65 a 85% de recuperação, enquanto que as plantas de dessalinização de água do mar podem tornar apenas de 40% a 60% da fonte em água potável, pois a água do mar possui salinidade muito maior que a água salobra (Voutchkov, 2005).

A salinidade das águas varia de acordo com sua classificação. No Brasil, segundo o artigo 2º da Resolução nº 357 de 17 de março de 2005 as águas salobras apresentam salinidade entre 0,5 e 30‰ enquanto que em águas salinas é igual ou superior a 30‰. Para obter água potável, esse valor deve ficar abaixo dos 0,5‰ ou 500 mg/L o que corresponde uma eficiência de remoção de sais acima de 95%; esse valor é alcançado facilmente pelos sistemas de OI.

De acordo com a classificação das águas no Brasil (Resolução 375), das águas salgadas, apenas as salobras podem ser utilizadas para o consumo humano após tratamento convencional ou avançado. Esse fato mostra que, no país, a tecnologia de dessalinização de águas para consumo humano é quase ausente e carece de pesquisas. Estudos recentes entre o Laboratório de Referência em Dessalinização (Labdes) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), na Paraíba, e a Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia (Coppe) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) desenvolveram uma membrana, na configuração de fibras ocas, para dessalinizar a água retirada de poços artesianos em regiões semi-áridas do Brasil, como o nordeste, que sofrem com a falta de água potável. Anteriormente, apenas alguns sistemas de OI haviam sido implantados nessas regiões com a intenção de produzir água potável, porém, a incapacitação das pessoas para a manutenção e o elevado custo das membranas importadas inviabilizou a continuidade dos projetos (ARRAIS, 2008; FONTE DE ÁGUA, 2007).

2.1.4 Desmineralização de águas

O processo de desmineralização de águas se projeta na remoção quase total de espécies iônicas ou ionizáveis. Nesse campo, a OI compete diretamente com a troca iônica, pois ambas produzem a chamada água “ultrapura” que é amplamente utilizada nas caldeiras para conversão a vapor para produção de energia elétrica ou em processos de transferência de calor. Para que a água seja de elevada pureza nesses processos, há um motivo básico que é a eficiência do ciclo de geração de energia, que aumenta com o aumento da temperatura e a pressão da corrente de vapor. Aumentar a temperatura e a pressão na caldeira ou na turbina é

mais dispendioso. Pequenas quantidades de contaminantes como sódio, cloretos ou sílica no vapor podem causar erosão, corrosão e/ou deposição sobre as superfícies dos equipamentos, o que pode levar a uma diminuição da eficiência como também à destruição dos mesmos.

Do mesmo modo, nos trocadores de calor, a deposição de sais ao longo do tempo causa o entupimento e a formação de áreas de baixa transferência de calor que podem enfraquecer e romper os tubos. Segundo Piplani (1996), os íons cálcio, magnésio e as formas carbonato e bicarbonato são os principais causadores de depósitos e também podem dissociar-se, formando gás carbônico que provoca corrosão nos equipamentos.

Cûda *et al.* (2006) mostraram em seu trabalho que a utilização da OI é mais vantajosa para plantas de alta produção e cuja água de alimentação possui quantidades elevadas de minerais, enquanto que a troca iônica seria economicamente mais vantajosa para produções menores, menor requerimento de condutividade da água produzida e ainda para águas de alimentação com baixa concentração de sais.

2.1.5 Reúso de correntes de processo e tratamento de efluentes

Inúmeras estratégias têm sido adotadas no tratamento de águas para o consumo nos centros urbanos e industriais e no tratamento de efluentes com o objetivo de reaproveitar correntes de processo e minimizar a captação de água bruta. Em muitos países, o reúso de efluentes constitui uma fonte alternativa adicional de água e como tal, considera-se como parte integrante do gerenciamento dos recursos hídricos. Devido principalmente à escassez de recursos hídricos e às atuais exigências dos órgãos ambientais para que as empresas se adéquem às normas de tratamento e reúso de efluentes, as empresas buscam novas técnicas para o aproveitamento da água na indústria. Além disso, o reúso da água reduz o volume de efluente enviado às estações de tratamento ou diretamente em corpos d'água, diminuindo os custos envolvidos com esta atividade.

De acordo com Nascimento (2004), nas indústrias existem diversas possibilidades para o aproveitamento de águas de reúso, já que as características físico-químicas e biológicas exigidas para a água são marcadamente distintas em diferentes processos industriais, como, por exemplo, em caldeiras, torres de resfriamento e geração de energia. No caso de sistemas de resfriamento, a qualidade exigida não é tão restrita, mas, mesmo assim, busca-se atingir

uma qualidade satisfatória em função dos equipamentos ou da unidade a que se destina, permitindo protegê-los e economizando recursos.

Para Pearce (2008), o reúso da água é um novo mercado para a OI e que ainda fornece apenas 0,2% do total da água captada. Com previsão de taxa de crescimento de 14% ao ano é previsto que o reúso ultrapasse a dessalinização de água em 2020.

2.2 ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO DA OI

A água de alimentação de um sistema de OI, dependendo da fonte de captação, pode apresentar diferentes concentrações de sólidos em suspensão (orgânicos ou inorgânicos) ou material dissolvido. Durante o processo de OI ocorre aumento da concentração das partículas suspensas e dos íons dissolvidos que podem assentar-se sobre a membrana bloqueando os canais de escoamento da alimentação (tendo como consequência o aumento da pressão) ou ainda, precipitar na superfície da membrana, reduzindo a permeabilidade de água, ou seja, diminuindo o fluxo. Este processo de redução do fluxo permeado, denominado *fouling*, resulta em declínio do desempenho do sistema de OI. Os principais efeitos do *fouling* são o aumento no número de paradas do processo, o aumento no consumo de produtos químicos para a limpeza das membranas, diminuição da produtividade da membrana e da qualidade do produto, além de reduzir o ciclo de vida das membranas.

Enquanto a aplicação da tecnologia de membranas aumenta nos processos de tratamento de águas, a ocorrência de *fouling* continua a limitar a eficiência de operação dos processos, elevando tanto os custos de capital como operacionais (Jarusutthirak *et al.*, 2002 *apud* Kim, 2008).

Neste contexto, o objetivo de um sistema de pré-tratamento é o de melhorar a qualidade da água de alimentação fornecendo uma operação confiável e consistente às membranas de OI.

2.2.1 Principais análises da água

O primeiro passo ao dimensionar um sistema de pré-tratamento é a obtenção de uma completa e real análise da água de alimentação. A análise da água serve para caracterizar possíveis contaminantes presentes na água de alimentação do sistema de OI, especialmente

quando a fonte de água está apta a variações sazonais ou flutuações de processo. Os requerimentos de pureza de qualquer água de alimentação dependem da quantidade de água a ser usada assim como os parâmetros que os equipamentos (taxa de transferência de calor, pressão, etc.) podem tolerar.

Os custos de uma rotina de análises sobre a água de alimentação são geralmente insignificantes quando comparados aos custos de uma parada, manutenção, limpeza ou troca de membranas de um sistema de OI. Portanto, as análises devem ser empregadas e desenvolvidas especificamente para os sistemas de OI, pois o seu planejamento e execução devem garantir a máxima eficiência.

Uma breve discussão sobre os principais constituintes que a rotina de análise deve considerar será apresentada a seguir.

2.2.1.1 Cálcio

O cálcio está sempre presente na forma de íon bivalente formando sais pouco ou não solúveis com carbonatos e sulfatos. É um importante determinante da dureza da água e funciona como um estabilizador do pH devido a sua propriedade de tamponamento. A água do mar contém cerca de 400 ppm de cálcio. Uma das principais razões para a abundância de cálcio na água é a sua ocorrência natural na crosta terrestre. Rios geralmente contêm 1,2 ppm de cálcio, mas em algumas áreas as concentrações alcançam 100 ppm.

2.2.1.2 Magnésio

Junto com o cálcio, o magnésio é o responsável pela dureza da água. Forma sais de solubilidade moderada com silicatos e hidróxidos. Na água do mar está presente em quantidades de cerca de 1300 ppm e em rios, de aproximadamente 4 ppm.

2.2.1.3 Sódio

O sódio forma sais relativamente solúveis com a maioria dos ânions, não representando problemas para a OI. A água do mar contém cerca de 11000 ppm de sódio e os rios contêm apenas cerca de 9 ppm. A água potável geralmente contém cerca de 50 mg/L de sódio.

2.2.1.4 Alumínio

Geralmente os compostos de alumínio são utilizados como coagulantes no tratamento da água. Sob circunstâncias normais, os precipitados de alumínio formados são completamente filtrados e então não estarão mais presentes na água final. Na água do mar, a

sua concentração varia de 0,013 a 5 ppb enquanto que em rios fica ao redor de 400 ppb. Na forma de hidróxido, pode causar *fouling* sobre a membrana.

2.2.1.5 Manganês

O manganês pode ser encontrado em complexos orgânicos em águas superficiais. Em concentrações acima de 0,05 ppm, a sua forma dissolvida pode reagir com o oxigênio causando precipitação. Para manter o manganês solúvel, é preciso tratar a água para removê-lo ou eliminar o contato com ar ou oxidantes.

2.2.1.6 Ferro

O Ferro, geralmente está presente na forma dissolvida, mas pode oxidar-se ao estado férrico e precipitar como hidróxido. A fonte de água deve ser tratada para remover o ferro ou deve-se eliminar o contato com agentes oxidantes ou ar para evitar a precipitação. A sua quantidade nos corpos de água varia fortemente. Rios contêm aproximadamente 0,5 a 1 ppm de ferro e as águas subterrâneas contêm 100 ppm. A água potável não pode conter mais que 200 ppb de ferro.

2.2.1.7 Sílica

A sílica geralmente limita a extensão do tratamento da água pela OI, ou seja, limita a recuperação do sistema. Apesar da solubilidade da sílica ser afetada por diversos fatores como temperatura e pH, a concentração máxima de sílica é dada em 150 ppm. As fontes naturais de água possuem de 1 a 100 ppm de sílica e, portanto, é extremamente necessário impedir a sua precipitação, uma vez que será impossível remover a sílica precipitada sobre a membrana.

2.2.1.8 Sulfato

O ânion sulfato forma sais moderadamente solúveis com cálcio, estrôncio ou bário. O sulfato é um dos principais componentes dissolvidos nas chuvas. Elevadas concentrações de sulfato na água que bebemos pode ter um efeito laxativo quando combinada com cálcio e magnésio, os dois componentes mais comuns da dureza da água. Os sulfatos não limitam o ciclo de concentração da OI, a não ser que exista elevada concentração dos cátions apresentados.

2.2.1.9 Cloro livre

O cloro livre provém da etapa de desinfecção da água e, por ser um oxidante natural, pode oxidar vários materiais na água ou a própria membrana, mais precisamente as de

poliamida. A concentração de cloro livre no sistema de OI com membranas de poliamida deve ser a mínima possível para manter as características das membranas.

2.2.1.10 pH

A medida de pH determina a porcentagem de carbono inorgânico que está na forma de dióxido de carbono, bicarbonato ou carbonato. Dessa forma, é possível prever se o carbonato de cálcio é susceptível de precipitar.

2.2.1.11 Temperatura

A temperatura é importante na determinação da queda de pressão através das membranas assim como o fluxo de água. Também é importante para prever a taxa de precipitação de sais sobre as membranas e a extensão na qual os sais poderiam ocasionar sérios problemas de *fouling*.

2.2.1.12 Turbidez

A turbidez é a medida do grau no qual a água perde a sua transparência devido à presença de material particulado suspenso. A turbidez máxima de uma água para beber deve ser de no máximo 5 NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez) sendo aconselhável abaixo de 1 NTU. Geralmente, os sistemas de OI devem receber água com turbidez máxima de 1 NTU. A medida de turbidez pode ser utilizada para estimar a concentração de sólidos totais suspensos e águas com valores elevados devem ser devidamente tratadas para evitar excessivo *fouling* particulado.

2.2.1.13 SDI – Silt Density Index

O SDI é uma medida da tendência de deposição de material particulado sobre a membrana. O material particulado (*silt*) é composto por partículas em suspensão de todos os tipos que se acumulam na superfície da membrana, como colóides orgânicos, produtos da corrosão de ferro, hidróxido de ferro precipitado, algas e materiais finos suspensos.

O SDI é um método bem aceito para determinar a tendência de deposição de material suspenso e coloidal nos sistemas de tratamento de água, especialmente na OI e nanofiltração (Mosset *et al.*, 2008). Chakravorty e Layson (1997) mostram que não há relação entre o SDI e a turbidez e sugere que o SDI é o método mais confiável para se determinar a qualidade da água. Apesar de não ser uma medida absoluta, existe uma excelente correlação entre o valor de SDI e o depósito coloidal nas membranas. Esta medida consiste basicamente em controlar

o tempo requerido para filtrar um volume padrão de água (500 mL) através de uma membrana de 0,45 µm a uma pressão constante de 30 psig.

O procedimento de medição deve seguir a norma ASTM Standard D4189 e consiste em:

- 1) regular a pressão na válvula reguladora para 30 psig;
- 2) antes de instalar a folha do filtro, deixar correr um pouco de água;
- 3) abrir a câmara do suporte e instalar a folha do filtro de 0,45 µm;
- 4) fechar o suporte;
- 5) purgar o ar;
- 6) abrir a válvula de tomada de amostra que alimenta o aparelho e medir o tempo requerido para coletar 500 mL, o qual é chamado de tempo inicial t_1 ;
- 7) manter a água circulando pelo filtro durante 15 minutos, chamado de t_f ;
- 8) após 15 minutos, medir novamente o tempo requerido para coletar 500 mL, o qual é chamado de tempo final t_2 .

O cálculo é realizado da seguinte maneira:

$$SDI = \frac{\left(100 * \left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right)\right)}{t_f}$$

Caso o tempo final t_2 seja maior que 4 vezes o tempo inicial t_1 , a determinação deve ser descartada e efetuado um novo teste, realizando a segunda medição após 10 minutos ($t_f=10$). Se mesmo assim o valor de t_2 for maior que 4 vezes t_1 , novos testes deverão ser realizados diminuindo o tempo de início da segunda medição para valores de 8, 6 ou 5 minutos, e utilizando estes divisores na fórmula de cálculo.

A Tabela 2.3 mostra as faixas de SDI que podem ser encontradas de acordo com o tempo de coleta. Para a água de alimentação da OI os valores de SDI devem ficar preferencialmente abaixo de 5 (Mosset *et al.*, 2007), indicando a necessidade de um pré-tratamento eficiente, mas que conduzirá a limpezas menos frequentes nas membranas de OI. Teng *et al.* (2003) sugere que o valor de SDI seja abaixo de 3 ou 4.

Tabela 2.3: Faixa de SDI para os determinados tempos de coleta.

t_f	Faixa de SDI
5 minutos	0 - 20
10 minutos	0 - 10
15 minutos	0 - 6.67

Ainda, como pode ser visto na Tabela 2.4, é importante salientar que é possível analisar a cor da membrana após a filtração, podendo identificar um tipo particular de material depositado ou diferenciar onde há apenas sólidos suspensos ou material orgânico na água (Mosset *et al.*, 2007).

Tabela 2.4: Análise de cor da membrana após o teste de SDI.

Coloração	Indicativo
Amarelo / Marrom	Material orgânico
Vermelho / Marrom	Ferro
Escuro / Cinza	Carvão ativado
Particulado	Sólidos suspensos

A análise de cor é qualitativa e deve ser usada apenas como uma ferramenta extra na determinação dos possíveis compostos que estão presentes na água.

2.3 SISTEMAS DE PRÉ-TRATAMENTO DA CORRENTE DE ALIMENTAÇÃO DA OI

Os sistemas de pré-tratamento para OI podem ser relativamente simples ou complexos, dependendo diretamente da qualidade física, química e microbiológica da água que é captada e que de acordo com o tipo e quantidade, pode acelerar o processo de *fouling* das membranas. Quanto menor a qualidade da água, maior será a necessidade ou mais intensivo será o pré-tratamento (Elguera e Baez, 2005). Do mesmo modo, a qualidade da água que se deseja obter como produto deverá influenciar na escolha do sistema mais apropriado, pois para uma mesma recuperação, quanto melhores as características da água de alimentação, melhor a qualidade do produto obtido.

Para plantas de dessalinização de água do mar que utilizam OI, por exemplo, os sistemas captam água de má qualidade, principalmente devido à alta poluição biológica e elevados valores de turbidez. Nesses casos, os sistemas de pré-tratamento são complexos e geralmente possuem uma série de etapas como dosagem de ácidos, bases e coagulantes em elevadas quantidades e filtração com filtros de areia atmosféricos, pressurizados e de cartucho (Elguera e Baez, 2005).

Um sistema de pré-tratamento deve controlar o fluxo de cada poluente presente na água e deve ser desenvolvido face à pior qualidade de água que poderia ser encontrada, provendo constantemente uma alimentação de boa qualidade ao sistema de OI (Bonnélye *et al.*, 2003).

Todo sistema de OI possui algum nível de pré-tratamento da água a fim de:

- aumentar o tempo de vida útil das membranas;
- prevenir a formação de *fouling* nas membranas;
- manter o desempenho em relação à recuperação e retenção do sistema.

Os sistemas de pré-tratamento mais utilizados e suas principais características estão citados a seguir.

2.3.1 Filtros de areia

Os filtros de areia são freqüentemente usados para a remoção de sólidos suspensos da água com partículas a partir de 40-50 μm . O sistema de filtração consiste em múltiplas camadas de areia ou outro material com uma variedade de tamanhos de grãos e finalidades:

- areia fina classificada é utilizada para retenção de sólidos em suspensão, flocos, entre outros;
- areia e carvão antracito mineral são usados para se trabalhar com taxas de filtração maiores, utilizando menor volume de material filtrante e menor consumo de água de lavagem; sua elevada eficiência na remoção de cor, turbidez e microorganismos patogênicos (coliformes, vírus, protozoários) se deve principalmente à uniformidade do leito, à forma geométrica dos grãos e ao tamanho das partículas. Os filtros de carvão ativado são eficientes para a remoção de compostos orgânicos dissolvidos na água;
- carvão ativo vegetal é utilizado para a eliminação de cloro residual, gostos e odores, fenóis, etc.;
- dolomita é utilizada para a correção do pH.

Quando a água flui através do filtro, os sólidos suspensos precipitam sobre as camadas do material possibilitando a água sair do filtro com o conteúdo de sólidos reduzido. Partículas de menor tamanho suspensas na água geralmente não são contidas e, portanto, deve-se utilizar

uma filtração secundária no processo. A limpeza dos filtros de areia é geralmente feita quando o diferencial de pressão a montante e a jusante do equipamento atinge a faixa de 0,2 a 0,3 kgf/cm². Através da contra-lavagem, o filtro é limpo das impurezas retidas durante a filtração ao mesmo tempo em que se reorganizam as partículas que compõe o leito.

2.3.2 Dosagem de produtos químicos

A dosagem de produtos está diretamente associada à qualidade da água captada. Diversos autores citam a razão para a adição dos produtos químicos listados a seguir.

- Hipoclorito de sódio (NaClO): utilizado para controlar a atividade biológica e conseqüentemente, o processo de formação de *biofouling* nas membranas. Também podem ser utilizados outros biocidas oxidantes, como o Cl₂, KMnO₄, O₃, etc. Em alguns casos, a cloração é usada para oxidar o Ferro e o Manganês antes da filtração da água (Choo *et al.*, 2005 e Hafsi *et al.*, 2004).
- Ácido sulfúrico (H₂SO₄): aumenta o poder de ação do biocida NaClO, regula o pH da água do processo e ajuda na ação dos inibidores de *scaling*, como o Hexametáfosfato de Sódio (Elguera e Baez, 2005 e Hafsi *et al.*, 2004).
- Coagulantes / floculantes (Cl₃Fe, Fe₂(SO₄)₃, Al₂(SO₄)₃) e outros tipos de polieletrólitos: a adição desses sais resulta na formação de seus correspondentes hidróxidos que por sua vez, neutralizam as cargas das partículas coloidais agregando-as e permitindo a deposição e clarificação da água. Assim, controlam o processo *fouling* das membranas retirando os materiais particulados da água de alimentação da OI (Elguera e Baez, 2005, Ramirez *et al.*, 2002 e Bonnélye *et al.*, 2008).
- Antiincrustantes: inibem a incrustação do ferro e sais de sulfatos sobre a superfície da membrana (Hafsi *et al.*, 2004).
- Metabissulfito ou bissulfito de sódio (NaHSO₃): agente redutor capaz de neutralizar completamente o cloro residual ativo (processo de descloração) que poderia prejudicar sistemas com membranas de poliamida (Elguera e Baez, 2005 e Hafsi *et al.*, 2004).
- Outros produtos particulares como algicidas, fungicidas, etc.

2.3.3 Filtros de cartucho

Os filtros cartucho são universalmente utilizados nos sistemas de OI antes das bombas de alta pressão, servindo como uma barreira final às partículas remanescentes na água após todo o pré-tratamento. O diâmetro nominal geralmente usado nas aplicações de OI fica na faixa de 5 a 15 μm , mas alguns sistemas contam com diâmetros de até 0,1 μm . A frequência de troca dos filtros está diretamente associada à qualidade da água bruta, assim como ao desempenho do pré-tratamento anterior (Wolf *et al.*, 2005).

Os filtros de areia, a dosagem de produtos químicos e os filtros cartucho citados compõem o que chamamos de pré-tratamento convencional. Esse sistema descrito pode produzir uma água de alimentação de OI de qualidade aceitável (SDI_{15} abaixo de 3), desde que seja conduzido corretamente e a água bruta captada tenha qualidade relativamente boa e constante. Contudo, na maioria das vezes, as flutuações na qualidade da água dificultam o seu pré-tratamento e o sistema convencional deixa de ser eficiente, pois ele passa a fornecer água com valor de SDI acima do requerido e indicado pelos fabricantes de membranas de OI, resultando em um aumento da formação de *fouling*, elevação da frequência de limpezas e diminuição da expectativa de vida útil das membranas.

2.3.4 Microfiltração (MF) e Ultrafiltração (UF)

A microfiltração e a ultrafiltração são processos que têm ganhado popularidade no pré-tratamento da água de alimentação dos sistemas de OI. São chamados de sistemas de clarificação da água e são bastante conhecidos na produção de água potável.

A MF é a técnica que mais se aproxima da filtração convencional e utiliza membranas porosas com poros de 0,1 a 10 μm , sendo, portanto indicada para retenção de materiais em suspensão e emulsões. A pressão aplicada como força motriz é baixa, geralmente em torno de 3 bar.

A UF é geralmente utilizada quando se deseja purificar e fracionar soluções contendo macromoléculas. As membranas possuem poros de 1 a 100 nm e, portanto a força matriz a ser aplicada é maior, em torno de 2 a 10 bar.

Segundo Wolf *et al.* (2005) as membranas de ultrafiltração são capazes de prover uma barreira aos particulados e patogênicos protegendo a membrana de OI pela remoção física dos

sólidos. Isso assegura uma consistente e excelente qualidade da água de alimentação da OI mesmo quando o valor de turbidez da água bruta for elevado. Do mesmo modo, Pearce (2007) indica que a MF e a UF provêm uma excelente qualidade de água no caso de querer utilizar a OI para o tratamento adicional de correntes de processo (reúso de efluentes), uma vez que o uso da OI nesse caso é restrito devido ao problema de *fouling*. Ainda, Vedavyasan (2007) lembra que em locais onde o espaço é limitado e caro, a escolha de um sistema de pré-tratamento por membranas deveria ser feita considerando apenas pelo benefício do sistema ser compacto.

Para Bonnélye *et al.* (2008), a UF e a MF são teoricamente as melhores técnicas de pré-tratamento antes da OI, removendo da água a maior parte dos elementos potenciais causadores de *fouling* sobre as membranas, porém as tecnologias têm limitações. Se forem utilizadas no tratamento de uma água com qualidade muito ruim, sem nenhum outro tipo de pré-tratamento, a frequência de limpezas químicas aumenta consideravelmente, pois se estaria movendo o problema do *fouling* da OI para o pré-tratamento. Do mesmo modo, as membranas geralmente não removem moléculas orgânicas de menor tamanho, e que podem favorecer o desenvolvimento de *biofouling* sobre as membranas de OI. Nestes casos, deve-se avaliar a possibilidade de integrar o sistema de membranas com outro, como a floculação/coagulação para remoção de compostos orgânicos. Ma *et al.* (2007) mostraram que o uso da coagulação em conjunto com a UF trás bons resultados no tratamento da água para a OI, removendo mais de 98% dos microrganismos e algas, além de reduzir a turbidez abaixo de 0,5 NTU.

2.4 REVISÃO SOBRE CASOS DE PRÉ-TRATAMENTO EM SISTEMAS DE OI

Neste item, é apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre alguns sistemas de pré-tratamento utilizados em plantas de tratamento de água por OI.

A planta de desmineralização Tan Tan, citada por Hafsi *et al.* (2004), é utilizada para prover água potável às vizinhanças da cidade de Khang Lahmam no Marrocos. A planta possui como sistema de pré-tratamento da OI a seguinte seqüência de operações: cloração da água subterrânea captada, injeção de ácido sulfúrico, dois filtros de areia de alta pressão verticais, injeção de antiincrustante, descloração com bissulfito de sódio e microfiltração.

O principal problema da planta, segundo os autores, consistiu da contínua elevação da pressão entre as membranas do sistema de OI, provocando a necessidade de limpezas

químicas frequentes. Para identificar a razão do problema, foi analisada a qualidade da água captada, do pré-tratamento e também parâmetros físicos de operação, como queda de pressão nas membranas e fluxo permeado. Nos testes, os autores observaram que a queda de pressão foi causada por *biofouling* originado pelo alto desenvolvimento de bactérias nos microfiltros, antes da OI. Esse desenvolvimento acentuado ocorreu porque a água passava pelo processo de descloração com bissulfito de sódio logo antes do sistema de microfiltração, favorecendo a proliferação bacteriana no sistema. O problema foi contornado com a adoção de um novo ponto de injeção do bissulfito, logo após os microfiltros. Essa decisão possibilitou um efeito imediato na queda de pressão ainda na microfiltração, que passou de 1 bar para aproximadamente 0,6 bar. Os bons resultados foram comprovados com testes da concentração de Carbono Orgânico Total (TOC) antes e após a troca do ponto de descloração, mostrando que a quantidade de matéria orgânica foi bem menor no caso em que se fez a injeção do bissulfito após os microfiltros.

Elguera e Baez (2005) citam em seu trabalho a planta de dessalinização de água do mar Anfi Tauro. Localizada na cidade de Mogan, ao sul da Ilha de Grande Canária a planta fornece água para consumo em lagoas artificiais, irrigação de campos e parques, entre outros usos, que não o consumo humano. A água é captada em uma plataforma a 200 m da costa e é enviada para a planta, cujo pré-tratamento da OI conta com dois filtros de areia atmosféricos que recebem a água do mar e operam somente pela força da gravidade, dois filtros do tipo “*bag filters*” com diâmetro nominal de 1 μm e dosagem de ácido sulfúrico para regular o pH da água de alimentação das membranas de OI. A planta possui ainda, um sistema de recuperação de energia, uma vez que a pressão de operação da OI é de 60 bar.

Os dados coletados por Elguera e Baez (2005) envolvem a temperatura, condutividade elétrica, pH e turbidez da água captada e da água que alimenta a OI, além de queda de pressão, vazão de água de alimentação e fluxo de permeado, recuperação e condutividade elétrica do permeado do sistema de OI. Nos seus resultados, o autor mostra que mesmo com um sistema de pré-tratamento convencional, é possível controlar eficientemente a OI, pois num período de aproximadamente sete meses, mantendo a vazão de alimentação constante, o fluxo permeado foi mantido constante ao mesmo tempo em que a qualidade da água permaneceu em níveis aceitáveis (condutividade elétrica entre 700 e 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$). A queda de pressão na OI variou de 1,5 a 3,5 bar ao longo do experimento, quando então o fluxo permeado diminuiu e indicou que seria necessário fazer limpeza química nas membranas.

Outro fato interessante é o de que o *fouling* foi controlado sem a adição de hipoclorito ou biocidas, e o ajuste do pH somente com ácido sulfúrico, permitiu também o adequado controle do *scaling* sobre as membranas.

Voutchkov (2005) menciona a planta piloto de dessalinização de água do mar em Carlsbad, Califórnia (USA) empregada para testar paralelamente dois tipos de pré-tratamento da OI: um sistema de filtros de areia com contra lavagem contínua e outro de microfiltração com membranas do tipo fibra oca de 0,2 μm . Ainda, para ambos os casos, antes da corrente de alimentação entrar no sistema de OI, passa por filtros cartucho de 5 μm . A planta piloto serve como base de estudos à implantação de um sistema de dessalinização por OI em uma planta de geração de energia. O objetivo do projeto é a reutilização da água de resfriamento proveniente dos condensadores da planta geradora, que atualmente é direcionada diretamente para o oceano, e produzir água potável de elevada qualidade. Basicamente, os dois sistemas de pré-tratamento foram testados em relação à taxa de alimentação, turbidez e SDI em períodos de tempo secos (mais comum na região) e sob condições extremas (maré vermelha, chuvas e dragagem do mar).

Normalmente, a água de alimentação do sistema granular necessitou de condicionamento com sulfato férrico e com cloro para permitir maior floculação das partículas em suspensão antes de entrar nos filtros. O sistema de microfiltração, por sua vez, precisou que a água fosse pré-filtrada para a remoção de crustáceos que atrapalham o desempenho do restante do pré-tratamento. No período de tempo seco, os resultados de turbidez e SDI de ambos os sistemas foram de 0,05 NTU e 1,8, respectivamente. Apesar do sistema de MF produzir água com SDI menor que o sistema granular no período de maré vermelha, houve um acelerado *biofouling* sobre as membranas da OI. No período de dragagem no mar, enquanto o sistema granular produziu água de SDI e turbidez aceitáveis para a OI, a MF teve seu fluxo reduzido, devido ao freqüente entupimento nos microfiltros. Entretanto, a MF não necessitou de condicionamento da água de alimentação com agentes químicos e precisou de menor atenção operacional. Segundo Voutchkov (2005), os dois sistemas possibilitaram obter bons resultados no pré-tratamento da água para o sistema de OI promovendo uma efetiva remoção de particulados e principalmente, de SDI menor que 3.

Singapura é um local do sudeste asiático que sofre com a escassez de água potável e por este motivo, teve alto progresso na área da dessalinização de águas. Teng *et al.* (2003)

estudaram a MF e a UF como pré-tratamento da corrente de alimentação da OI para plantas de dessalinização em Singapura. O principal monitoramento da qualidade da água foi realizado utilizando o SDI durante os testes com os sistemas de pré-tratamento. O desempenho da UF foi avaliado de acordo com a relação fluxo – recuperação, enquanto que a MF foi avaliada em relação ao fluxo permeado e à pressão transmembrana. As membranas de UF e MF, ambas do tipo fibra oca, possuíam tamanho de poro nominal de 0,01 μm e 0,1 μm respectivamente. A manutenção da UF consistiu em contra lavagens periódicas juntamente com desinfecção com hidróxido de sódio, que dependiam da qualidade da água de alimentação. Ainda, hipoclorito de sódio foi dosado para prevenir o *fouling* biológico sobre as membranas de UF; para o sistema de MF foram realizadas injeções de ar e contra lavagens para a prevenção do *fouling* sobre as membranas. Quando a queda de pressão aumentava, limpezas com ácido cítrico e hipoclorito de sódio foram feitas.

Ambos os métodos forneceram água de boa qualidade para a OI (SDI<3,0). Ao testar a UF com uma corrente de alimentação (água do mar) sem filtração, o fluxo foi reduzido em 10%, comparando-se com fluxo obtido com água filtrada por um filtro de areia; houve ainda, um gradual aumento da pressão transmembrana durante o experimento. Na aplicação direta com água do mar, a condição de operação baixo fluxo – alta recuperação teve melhores resultados que a alto fluxo – baixa recuperação, pois a qualidade da água obtida foi melhor. A MF, mesmo com o sistema de contra-lavagem e a injeção de ar, apresentou a formação de *fouling*, aumentando a resistência ao fluxo devendo se elevar a pressão de operação para manter o fluxo de permeado. A MF apresentou fluxo de operação maior do que o da UF, mas à custa de um aumento da pressão transmembrana e da necessidade de um sistema mais robusto de manutenção.

Shah *et al.* (2004) mostraram um estudo de caso sobre a operação de um sistema de OI sem a aplicação de nenhum tipo de agente químico. A planta de dessalinização de água salobra por OI foi instalada em Mocha – Gorsar, na Índia, para a produção de água potável para suprir as necessidades do vilarejo e das redondezas. A água, captada de um poço, depois de filtrada em filtro de areia passava para dois sistemas de filtros cartucho, de 10 e 5 μm , antes de entrar no processo de OI. A escolha de um pré-tratamento sem uso de agentes químicos foi devido ao fato de que outra planta de dessalinização da região apresentava no pré-tratamento a injeção de ácido sulfúrico para equilibrar o pH, e posteriormente a carbonatação da água produzida para a neutralização e envio ao centro consumidor. Os

habitantes dos vilarejos, ao saberem do processo, passaram a evitar o consumo da água o que levou os pesquisadores a desenvolverem um processo sem o uso de agentes químicos.

Sem a utilização de qualquer tipo de tratamento químico, os filtros de cartucho foram trocados frequentemente e a recuperação do sistema não passou de 50% com o objetivo de evitar a formação de *scaling* sobre as membranas de OI. Após oito meses de operação, uma limpeza ácida e uma alcalina foram feitas para recuperar o desempenho da planta, assim como reduzir a formação de *scaling*. Essas limpezas foram mantidas a cada 4 ou 6 meses com o objetivo de controlar a deposição de sais e o *fouling* biológico. Em dois anos de operação, a planta apresentou uma queda total na retenção salina de 5,0% e no fluxo de 3,6%, apresentando um produto de qualidade dentro dos padrões locais e com raras flutuações de salinidade.

2.4.1 Considerações sobre os sistemas de pré-tratamento

Os eventos mostrados possuem praticamente os mesmos objetivos, isto é, estudar os sistemas de pré-tratamento mais eficientes para a OI, levando em consideração as características da água captada em cada região, fatores econômicos e sociais. Os inúmeros estudos enfocando o pré-tratamento para a OI mostra que esse processo é atualmente uma técnica em expansão e desenvolvimento. A produção de água de elevada qualidade através dessa tecnologia permite obter água estável, livre de microrganismos, compostos orgânicos e inorgânicos. Entretanto, somente um pré-tratamento adequado pode fornecer para a OI uma corrente de alimentação de qualidade aceitável e possibilitar uma operação confiável do sistema.

A qualidade da água captada é o fator que mais influencia na escolha do pré-tratamento; este fato indica que não existe um sistema de pré-tratamento único que satisfaça a todos os requisitos e a todos os casos. Geralmente, se a água captada for subterrânea (poços), não possui elevadas concentrações de sólidos em suspensão e então o pré-tratamento pode ser feito utilizando-se filtro de areia, inibidor de *scaling* e filtros de cartucho para proteção das membranas de OI. Este sistema será praticamente suficiente para produzir uma corrente de alimentação para a OI de qualidade aceitável. Para águas captadas superficialmente, que possuem na maioria das vezes elevadas concentrações de sólidos em suspensão de origem inorgânica e orgânica, os sistemas devem ser mais robustos, contando com desinfecção, filtração com filtros de carvão ativado, filtros de areia, além de acidificação e inibidor de

scaling. Este sistema deverá permitir oscilações na qualidade da água, sem prejudicar o produto que entrará no sistema de OI. Os sistemas de clarificação como a MF e a UF devem ser utilizados principalmente quando se deseja obter uma recuperação maior do sistema e em locais com grandes variações nas características da água captada, pois se permite obter um produto com qualidade constante, praticamente independente da corrente de alimentação. Convém salientar que além de produzir uma corrente de alimentação para a OI de qualidade aceitável, se conduzido corretamente, o sistema convencional é significativamente mais barato e a escolha por um sistema com membranas seria justificado apenas nas situações acima descritas.

Quando um sistema convencional de pré-tratamento é utilizado, independente das técnicas que o compõe, é imprescindível fazer o uso de filtros cartucho logo antes do sistema de OI. Os filtros serão a última barreira contra particulados e materiais em suspensão que possam ter passado pelas outras etapas do tratamento, ou até mesmo vindo delas, como por exemplo, o arraste de areia ou de carvão ativado dos filtros granulares. Estes materiais, de forma alguma devem entrar em contato com as membranas da OI, pois poderiam danificá-las e provocar um descontrole do processo. Ao utilizar os sistemas de MF/UF, os filtros cartucho não são mais necessários, uma vez que esses processos removem particulados ainda menores e sofrem menos com as oscilações de qualidade da água.

Pode-se afirmar que o principal problema encontrado nos sistemas de OI é o controle do *fouling*, uma vez que o desempenho geral da planta é afetado quando há a deposição de material sobre as membranas; há redução de fluxo de produto e aumento da pressão transmembrana tendo como conseqüências o aumento no número de limpezas químicas e a troca de membranas mais freqüente. Entre os tipos de *fouling*, a deposição de material coloidal e suspenso é maior do que a presença de *biofouling*, porém isso ocorre porque a adição de produtos químicos para o controle de microrganismos é muito utilizado. A adição descontrolada ou errada de produtos químicos nas etapas de tratamento da água muitas vezes provoca *scaling* sobre as membranas, tornando o que seria uma solução a causa de outro problema. Assim, nota-se que é conveniente reduzir as etapas de pré-tratamento para o mínimo possível, pois além de minimizar os custos de implantação, os custos operacionais e com o emprego de produtos químicos também são reduzidos.

CAPÍTULO 3

IMPLANTAÇÃO DE SISTEMA DE PRÉ-TRATAMENTO EM UNIDADE PILOTO DE OI

O Departamento de Engenharia Química da UFRGS, juntamente com a indústria, vem desenvolvendo pesquisas no sentido de reutilizar as membranas de OI, descartadas do processo de desmineralização de águas, para o tratamento da água de purga das torres de resfriamento, com o objetivo de reusar esta água tratada no processo. Esta etapa do trabalho consiste na aplicação prática do estudo de pré-tratamento para o sistema piloto de OI no tratamento da purga de torres de resfriamento.

3.1 UNIDADE PILOTO DE OI

Devido à necessidade de se dar um destino para as membranas descartadas do sistema de OI e com o objetivo de reduzir os efluentes gerados pelo processo de resfriamento, Vitt (2007) estudou o tratamento da purga de torres de resfriamento através da OI, com o seqüente reaproveitamento da água tratada como reposição nas torres e também o reúso das membranas. O trabalho desenvolveu-se em uma unidade piloto de OI conforme mostra a Figura 3.1. A unidade piloto de OI conta com um vaso de pressão para um módulo de membrana de 8 in, válvulas para controle de vazão, rotâmetros, manômetros, amostradores e tubulações e conexões.

As membranas do sistema de OI para desmineralização de águas para caldeira são descartadas quando a retenção atinge 96%, mas ainda poderiam ser utilizadas para produzir uma água de qualidade inferior; são estas membranas que foram testadas na unidade piloto de OI.



Figura 3.1: Unidade piloto de OI. Fonte: Vitt (2007).

Os testes ocorreram junto à descarga da bomba que conduz a purga da torre de resfriamento ao sistema de tratamento de efluentes. Sem nenhum tipo de pré-tratamento, a água da purga foi enviada diretamente para a membrana de OI com pressão transmembrana de aproximadamente 6 bar, produzindo uma corrente de concentrado, que retornou para a bacia da torre, e uma de permeado, que foi descartado na rede pluvial, visto que a sua qualidade não afetaria o meio ambiente. A recuperação do sistema foi de aproximadamente 15%.

A Tabela 3.1 mostra os parâmetros controlados durante o experimento para a água permeada do processo de OI, comparados com a água clarificada (utilizada como reposição nas torres de resfriamento) e com os valores de controle para as torres de resfriamento.

Tabela 3.1: Qualidade do permeado obtido no experimento comparado com a água clarificada e com os parâmetros de controle da torre de resfriamento.

Parâmetros	Permeado	Água clarificada	Controle da torre
Turbidez (NTU)	< 1	< 1	< 20
pH (25°C)	8,8	7,3	< 8,5
Dureza Ca (ppm CaCO ₃)	2	32	200 - 400
Cloreto (ppm Cl ⁻)	16	23	< 300
Sulfato (ppm SO ₄)	1	32	< 400
Sílica (ppm SiO ₂)	23	25	< 220
Ferro total (ppm Fe)	< 0,1	< 10	< 5,0
DQO (ppm)	0,6	2,4	< 20
Cloro (ppm)	0,9	< 0,1	0,5 - 1,0

Os resultados mostraram que o sistema garantiu água com a maioria dos parâmetros com qualidade superior à da água clarificada, mas a duração do processo foi relativamente curta, apenas 12 dias. Nos últimos dias desse período, a condutividade elétrica da água permeada aumentou significativamente e a recuperação foi reduzida. Esses resultados indicaram que a membrana sofreu um severo *fouling* devido à qualidade da água de purga da torre.

De qualquer modo, as características da água obtida no tratamento indicaram a possibilidade de utilização das membranas descartadas da OI no tratamento da água da purga da torre de resfriamento, mas o sistema deveria incluir um pré-tratamento para que fossem removidos os sólidos em suspensão e outros contaminantes de modo a obter uma água de melhor qualidade para alimentar o sistema de OI.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ÁGUAS DA TORRE DE RESFRIAMENTO

A caracterização da água da torre de resfriamento é extremamente importante, pois a partir dela são determinados os parâmetros de controle e o pré-tratamento necessário para esta água. A água de resfriamento (AR), água que circula pela torre, segue um ciclo de concentração devido à evaporação e outras perdas do sistema e, portanto, devem ser feitas constantes purgas e reposições (*make up*) de modo a manter a qualidade da água o mais estável possível e dentro dos parâmetros especificados para a água de resfriamento. A Tabela 3.2 mostra os principais parâmetros monitorados na água de resfriamento e compara estes com as características da água de reposição (água clarificada). Os parâmetros analisados geralmente compreendem turbidez, pH, condutividade elétrica, cloretos, DQO, dureza, sílica, ferro e outros.

Tabela 3.2: Principais parâmetros monitorados da água de resfriamento (AR) e da água clarificada de reposição (AC) da torre de resfriamento.

Parâmetros	AR	AC	Parâmetros	AR	AC
Turbidez (NTU)	9	<1	DQO (ppm DQO)	14,5	2,4
pH	8,1	7,3	Sólidos Suspensos (ppm)	10,5	1,4
Condutividade elétrica (us/cm)	1212,9	177,5	Cloretos (ppm Cl ⁻)	37,6	23
Alc-M (ppm CaCO ₃)	103,4	23	Cloro (ppm Cl ₂)	0,8	<0,1
Ca-H (ppm CaCO ₃)	274	32	Sulfatos (ppm SO ₄ ⁻²)	332	32
Ferro (ppm Fe)	0,4	0,1	Dureza-T (ppm CaCO ₃)	302,6	38,3
Sílica (ppm SiO ₂)	147	25	-	-	-

Pode-se verificar que os parâmetros da água de resfriamento possuem valores superiores aos da água de reposição. A turbidez, por exemplo, é elevada para a água de resfriamento, indicando que possivelmente haveria *fouling* sobre as membranas se um sistema de OI fosse alimentado diretamente com este tipo de água. Do mesmo modo, a elevada quantidade de cloretos poderia causar oxidação sobre as membranas. Estes fatos podem explicar porque o experimento descrito anteriormente obteve um baixo tempo de campanha.

3.3 ESTUDO DO SISTEMA DE PRÉ-TRATAMENTO

Com base nos resultados obtidos pelo experimento com a planta piloto de OI, e a partir de estudos realizados direcionados ao reúso de correntes de processo, decidiu-se que seria interessante conduzir novas pesquisas em relação ao tratamento da purga das torres de resfriamento e implantar um sistema de pré-tratamento na planta piloto de OI. Os estudos levaram à implantação de um sistema convencional de pré-tratamento, pois seria o mais parecido com as condições existentes na empresa, que utiliza técnicas convencionais no tratamento da água, e, portanto, facilitaria o seu controle. Ainda, foi baseado na diferença de qualidade existente entre a água de purga e a de *make up*, resultando no sistema apresentado na Figura 3.2 que compõe um filtro de areia (E1), dimensionado de acordo com a vazão e taxa de filtração desejada no sistema; sistema de dosagem de agente redutor para reduzir o teor de cloro livre da água e anti-incrustante para minimizar a formação de depósitos sobre a membrana (E3 e E7); um vaso para filtros cartucho para proteção da membrana e dimensionado de acordo com a vazão do sistema (E2); bomba centrífuga (E5); vaso de pressão da membrana em módulo espiral de 8 in (E6); um tanque para mistura de agentes de limpeza química do sistema (E4); válvulas, manômetros, rotâmetros e pontos de amostragem para SDI.

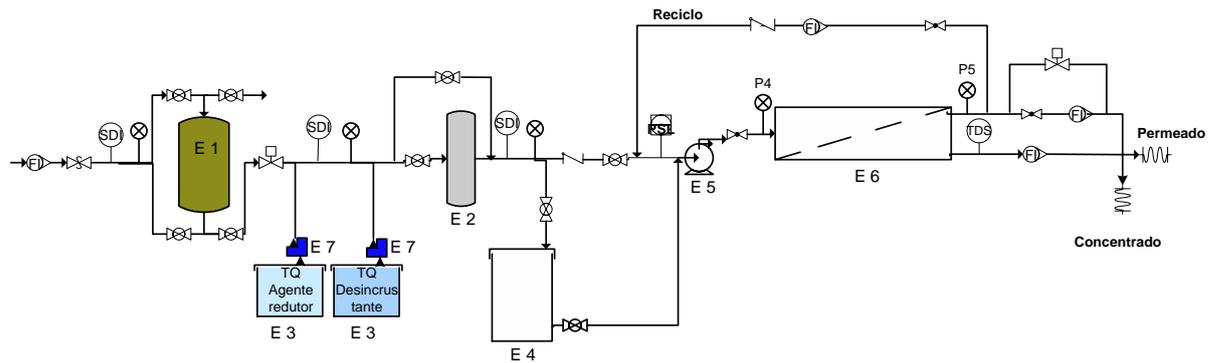


Figura 3.2: Fluxograma para a unidade piloto de OI incluindo o sistema de pré-tratamento.

O sistema de pré-tratamento adotado, possibilitará reduzir a turbidez da água de resfriamento, através da filtração, de 9 NTU para valores abaixo de 1NTU. O agente redutor permitirá minimizar o teor de cloro livre da água, enquanto o antiincrustante ajudará a diminuir a formação de sais insolúveis que precipitariam sobre a membrana. A partir dessa nova planta piloto, espera-se obter como produto uma água de qualidade igual ou melhor do que a água clarificada, fato provado ainda no teste com o sistema piloto sem o pré-tratamento.

O novo sistema permitirá realizar vários estudos, como por exemplo:

- caracterização das membranas usadas com relação ao fluxo permeado e à retenção salina;
- tempo de uso das membranas, pois não seria viável reutilizá-las caso o tempo de troca fosse muito curto, demandando elevada mão de obra para as trocas;
- importância do filtro de areia, dos filtros cartucho e da dosagem de produtos químicos no pré-tratamento;
- concentrações de dosagem dos agentes químicos;
- frequência das limpezas químicas sobre as membranas;
- possibilidade de tratamentos químicos ou rejuvenescimento sobre as membranas a fim de obter maior fluxo permeado ou novas características;
- utilização de membranas novas de OI no tratamento de várias correntes de processo.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo estão apresentadas as conclusões obtidas durante o desenvolvimento do trabalho, além de algumas sugestões para futuras pesquisas.

4.1 CONCLUSÕES

Na maioria das vezes, o desenvolvimento de uma ou mais técnicas está associado à necessidade de se obter um produto aliando maior economia e maior produção ou até mesmo a preocupações ambientais. A OI tem demonstrado ser um processo de separação de grande versatilidade, permitindo a sua utilização em várias áreas, como a dessalinização, a desmineralização e o reúso de correntes de processo. Entretanto, deve-se saber claramente que a técnica requer atenção especial quando for submetida a uma água de alimentação com características ruins, ou seja, com sólidos em suspensão, elevadas concentrações de particulados, matéria orgânica ou inorgânica, etc. Nesses casos, é imprescindível que a OI seja precedida por um bom sistema de pré-tratamento para garantir uma corrente de alimentação com qualidade aceitável, que segundo os fabricantes de membranas e muitos autores, deve possuir SDI menor que 3,0 e turbidez menor que 1,0 NTU. Além dessas considerações, é importante que a corrente de alimentação não possua cloro livre (residual) elevado, pois pode acarretar em oxidação e desgaste da membrana, diminuindo a sua vida útil.

Um sistema de pré-tratamento bem dimensionado deve proporcionar um produto com boa qualidade, garantindo uma operação confiável para o sistema de OI. Nota-se que na maioria dos casos, os sistemas são dimensionados de modo semelhante aos já existentes, necessitando de modificações ao longo do tempo para que o processo se adéque a determinadas características da água captada ou ainda a flutuações sazonais. Para evitar essas modificações, antes de implantar uma planta industrial, seria interessante avaliar um histórico

das características da água captada, bem como fazer testes com plantas piloto envolvendo diferentes técnicas de pré-tratamento e também diferentes tipos de membranas.

Das técnicas de pré-tratamento apresentadas, conclui-se que efetivamente não existe apenas uma delas que garanta um adequado tratamento, pois cada caso apresentará um determinado tipo de água captada ou uma diferente necessidade; a microfiltração e a ultrafiltração têm se mostrado excelentes, uma vez que permitem obter um produto de qualidade quase que independente das características da água captada, porém, são técnicas recentemente estudadas e, portanto ainda possuem valor elevado comparadas com o tratamento convencional.

A OI é uma técnica em desenvolvimento e com ela, devem evoluir também as técnicas de pré-tratamento para que se possa garantir uma operação confiável e um máximo aproveitamento dos sistemas.

4.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o trabalho, surgiram novas idéias que poderiam ser estudadas para o melhoramento das técnicas de pré-tratamento e também para o sistema de OI. Aqui, elas serão apresentadas como sugestões ao desenvolvimento de novas pesquisas.

- Avaliar as condições de operação mais eficazes para o sistema de pré-tratamento e para o sistema de OI. A determinação correta da pressão e temperatura de operação é essencial para o bom funcionamento dos sistemas com o menor gasto de energia.
- Estudar as condições de aplicação de químicos no pré-tratamento, de forma a utilizar menor quantidade de produtos, assim como estudar diferentes tipos de antiincrustantes, biocidas, agentes redutores, etc;
- Estudar novas técnicas de síntese de membranas mais resistentes ao cloro livre, como por exemplo, poliamidas obtidas a partir de diaminas aromáticas, cicloalifáticas ou alifáticas;
- Avaliar a possibilidade de aplicar tratamentos químicos ou técnicas de rejuvenescimento sobre as membranas, de forma a obter determinadas características específicas.

CAPÍTULO 5

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMJAD, Z., *Reverse Osmosis – Membrane Technology, Water Chemistry and Industrial Applications*, Chapman & Hall, Capítulos 1, 2, 4, 9 e 11, 1992;

ARRAIS, A., *Brasil substitui tecnologia importada para dessalinização de água*, Inovação Tecnológica, <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=tecnologia-importada-para-dessalinizacao-de-agua>, 2008, acessado em 05/04/2009;

ASTM D 4189-95, *Método padrão para o teste de SDI da água*; <http://www.siltdensityindex.es/doc/D4189.pdf>, acessado em 05/04/2009;

BATES, W.T., *Reducing the fouling rate of surface and waste water RO systems*, International Water Conference Pittsburgh, PA, USA, Oct. 18–21, 1998;

BONNÉLYE, V., SANZ, M.A., DURAND, J., PLASSE, L., GUEGUEN, F., MAZOUNIE, *Reverse osmosis on open intake seawater: pre-treatment strategy*, Desalination v. 167 p. 191-200, 2003;

BONNÉLYE, V., GUEY, L., DEL CASTILLO, J., *UF/MF as RO pretreatment: the real benefit*, Desalination v. 222 p. 59-65, 2008;

BYRNE, W., *Reverse Osmosis – A practical guide for Industrial Users*, Tall Oaks Publishing Inc., 1995 em KIPPER, M. S., *Estudo da Influência das Monocloraminas Sobre as Membranas de Poliamida na OI*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Química - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005;

CÛDA, P., POSPÍSIL, P., JAROSLAVA, T., *Reverse Osmosis in water treatment for boilers*, Desalination v. 198 p. 41-46, 2005;

CHAKRAVORTY, B., LAYSON, A., *Ideal feed pretreatment for reverse osmosis by continuous microfiltration*, Desalination v. 110 p. 143-150, 1997;

CHOO, K.H., LEE, H., CHOI, S.J., *Iron and manganese removal and membrane fouling during UF in conjunction with prechlorination for drinking water treatment*, Journal of Membrane Science v. 267 p. 18-26, 2005;

ELGUERA, A.M., BAEZ, S.O.P., *Development of the most adequate pre-treatment for high capacity seawater desalination plants with open intake*, Desalination v. 184 p. 173–183, 2005;

EL-SAIED, H., BASTA, A.H., BARSOUM, N.B., ELBERRY, M.M., *Cellulose membranes for reverse osmosis - Part I. RO cellulose acetate membranes including a composite with polypropylene*, Desalination v. 159 p. 171-181, 2003;

FONTE DE ÁGUA, *Pesquisadores desenvolvem membrana nacional para dessalinização de água salobra*, Fundação CERTI, http://fontedagua.certi.org.br/noticias_do_projeto/pesquisadores_desenvolvem_membrana_nacional_para_dessalinizac_o_de_agua_salobra.html, 2007, acessado em 05/04/2009;

HAFSI, M., KHAOUA, A., ABDELLAH, S.B., TABIB, M.E., *Effects of the chemical injection points in pre-treatment on reverse osmosis (RO) plant performance*, Desalination v. 167 p. 20-216, 2004;

HYDRANAUTICS, *Comercial RO Technology*, Artigo técnico, p. 1-6, 2001;

JARUSUTTHIRAK, C., AMY, G., *Membrane filtration of waste-water effluents for reuse: effluent organic matter rejection and fouling*. Water Sci. Technol. v. 43 p. 225–232, 2002 em KIM, J., DIGIANO, F. A., REARDON, R. D., *Autopsy of high-pressure membranes to compare effectiveness of MF and UF pretreatment in water reclamation*, Elsevier, Water Research, v. 42 p. 697-706, 2008;

MA, W., ZHAO, Y., WANG, L., *The pre treatment with enhanced coagulation and a UF membrane for seawater desalination with reverse osmosis*, Desalination v. 203 p. 256–259, 2007;

MILER, J., *Review of Water Resources and Desalination Technologies*, Sandia National Laboratories, p. 1-54, 2003;

MOSSET, A., BONNELYE, V., PETRY, M., SANZ, M.A., *The sensitivity of SDI analysis: from RO feed water to raw water*, Desalination v. 222 p. 17-23, 2008;

NASCIMENTO, J. F. *Avaliação de membranas de OI no tratamento de águas de purga de torres de refrigeração de indústria petrolífera com finalidade de reuso*. Dissertação de Mestrado em Química – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2004;

PEARCE, G., *Water and wastewater - RO pre treatment*, Filtration and Separation, p. 1-4, 2007.

PEARCE, G. K., *UF/MF pre-treatment to RO in seawater and wastewater reuse applications: a comparison of energy costs*, Desalination v. 222 p. 66–73, 2008;

PIPLANI, P., JOHNSON, G. S., *Improved Pretreatment Performance Through Low Solids Water: An Examination of Highly Efficient Partial Demineralization*, Elsevier, p. 20-23, 1996;

RAMIREZ, J.A., MÁRQUEZ, D.S., ALONSO, J.M.Q., *Comparison studies of feedwater pre-treatment in a reverse osmosis pilot plant*, Desalination v.144 p. 347-352, 2002;

RESOLUÇÃO Nº 357 DE 17 DE MARÇO DE 2005, Conselho Nacional do Meio ambiente, <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>, 2005;

SCOTT, K., *Handbook of Industrial Membranes*. Oxford: Elsevier, 1997 em KIPPER, M. S., *Estudo da Influência das Monocloraminas Sobre as Membranas de Poliamida na OI*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Química - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005;

SHA, V.J., DEVMURARI, C.V., JOSHI, S.V., TRIVEDI, J.J., PRAKASH RAO, A., GHOSH, P.K., *A case study of long term RO plant operation without chemical pretreatment*, *Desalination* v. 161 p. 137-144, 2004;

TENG, C.K., HAWLADER, M.N.A., MALEK, A., *An experiment with different pretreatment methods*, *Desalination* v. 156 p. 51-58, 2003;

THE WORLD'S WATER, *Global Desalination Capacity and Plants*, Pacific Institute, p. 308-309, 2005, <http://www.worldwater.org/data20062007/Table20.pdf>, acessado em 12/05/2009;

VEDAVYASAN, C.V., *Pretreatment – an overview*, *Desalination* v. 203 p. 296 – 299, 2007;

VITT, F.P., *Estudo para a minimização da geração de efluente inorgânico com reúso em cascata e de efluentes tratados com membranas usadas de OI*, Trabalho de Conclusão em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, apresentado em dezembro de 2007;

VOUTCHKOV, N., *Desalination – Water for the next generation*, *Filtration and Separation* v. 42 p. 14-25, 2005;

WOLF, P.H., SIVERNS, S., MONTI, S., *UF membranes for RO desalination pretreatment*, *Desalination* v. 182 p. 293–300, 2005;

XU, J., RUAN, G., CHU, X., YAO, Y., SU, B., GAO, C., *A pilot study of UF pretreatment without any chemicals for SWRO desalination in China*, *Desalination* v. 207 p. 216–226, 2007;