

APLICAÇÕES DO PROCESSO DE OSMOSE REVERSA PARA O APROVEITAMENTO DE ÁGUA SALOBRA DO SEMI-ÁRIDO NORDESTINO

Moura, J.P.; Monteiro, G.S.; Silva, J.N.; Pinto, F.A.; França, K.P.

Universidade Federal de Campina Grande-UFCG-LABDES-Laboratório de Dessalinização

Email para correspondência: jsolar07@gmail.com

1 – Introdução

A água que vemos hoje nos rios, lagos e mares é a mesma em que os dinossauros se banhavam e matavam sua sede, é a mesma água que esta sobre o planeta a bilhões de anos desde a origem da terra. A quantidade total de água sobre o planeta é de 1,384 sextilhão (10^6) de litros, que se distribuem da seguinte forma: 97,5% nos oceanos, 1,8% na forma de gelo, 0,6% nas camadas subterrâneas, 0,015% nos lagos e rios, 0,005% de umidade do solo, 0,0009% em forma de vapor na atmosfera e 0,00004% na matéria viva.

Segundo os números acima citados tem-se que existe menos de 1% de água doce que pode ser explorada. Outro problema é que a água se encontra na superfície apresenta uma distribuição extremamente desigual, ou seja, enquanto ela é abundante em algumas regiões do mundo, como no sul do Brasil, onde durante quase todo o ano proporciona um espetáculo de tirar o fôlego nas cataratas da Foz do Iguaçu, em outros sua ausência é sinônimo de pobreza e fome.

A ciência e a Indústria já estão se mobilizando para combater este problema através de programas extensivos de combate ao desperdício, preservação da natureza, das fontes hídricas, transposição de vazões e exploração do subsolo.

Estudos apontam que existe no Nordeste, uma disponibilidade atual de 300.000 m³ de água salinizada em poços e açudes inativos, que potencialmente poderiam abastecer mais de 12 milhões de habitantes no semi-árido, região esta muito castigada pela seca.

Uma das soluções para combater esta falta de água e aproveitar as que se encontram inadequadas para o consumo humano, são os Sistemas de Dessalinização Via Osmose Inversa, onde se faz uso de membranas semipermeáveis com a finalidade de diminuir a quantidade de sais presentes na mesma.

2 – Fundamentos Teóricos

2.1 – Dessalinização

O objetivo dos processos de dessalinização até hoje desenvolvidos é o de remover os sais diluídos nas águas de um modo geral, tornando-as desta forma, uma água de boa qualidade para o consumo humano.

O que diferencia os vários dessalinizadores disponíveis no mercado são as qualidades dos materiais neles empregados, a tecnologia de produção, o grau e automação incorporado, a experiência do fabricante e o tipo de membrana utilizada.

Com o avanço das pesquisas, a primeira membrana sintética foi desenvolvida em 1867 por Moritz Traube. Este por sua vez, foi o ponto de partida para o desenvolvimento de membranas que pudessem dessalinizar água. Surgiram então as membranas de acetato de celulose em 1953 criadas por Reid e Breton possuindo um bom desempenho como membranas permeáveis, mas por sua vez, apresentavam baixa taxa de rejeição de sais e baixo fluxo de permeado. Logo em seguida surgiram as membranas de poliamida aromática com melhores taxas de rejeição de sais e que não sofrem biodegradação.

O avanço na tecnologia de membranas não para por aí, a crescente demanda e aplicação industrial tem sugerido investimentos contínuos no desenvolvimento de novas membranas com maiores taxas de rejeição de sais, para a obtenção de água com um maior grau de potabilidade.

Existem diversos processos de purificação de água, mas só podemos retirar sais dissolvidos através dos processos térmicos e de membranas, os processos mais utilizados estão listados logo abaixo:

- Processos Térmicos:

Destilação Flash com Múltiplos Estágios (MSF)

Destilação Múltiplos Efeitos (MED)

Destilação por Compressão de Vapor (CV)

- Processos de Membranas

Osmose Inversa (OI)

Eletrodiálise (ED)

Todos os métodos citados apresentam vantagens e desvantagens em suas aplicações e em relação aos seus custos de instalação, consumo de energia, manutenção, operação,

volume de água tratada, volume de rejeito, qualidade da água produzida, tempo e espaço físico utilizado.

De uma maneira geral cada processo ou variação tecnológica, opera melhor dentro de uma determinada faixa de salinidade, onde esses números estão representados a seguir:

Tabela 2.1.1 – Processos de Dessalinização com Relação à Concentração.

Processo	Concentração
Destilação	10.000 a 50.000 mg/L
Congelamento	5.000 a 50.000 mg/L
Eletodialise	1.000 a 5.000 mg/L
Troca Iônica	10 a 2.000 mg/ L
Osmose Inversa	1.000 a 15.000 mg/ L

2.2 – Considerações Básicas Sobre Processos Com Membranas.

As membranas constituem, atualmente, a principal inovação tecnológica nos processos de tratamento de água, sendo a primeira grande inovação, desde o desenvolvimento das tecnologias convencionais de tratamento de água no início do século passado.

A filtração define-se como a separação de dois ou mais componentes de uma corrente fluida baseada, primeiramente, na diferença de tamanhos. Convencionalmente, a filtração refere-se à separação de partículas sólidas de correntes líquidas ou gasosas. A filtração por membranas estende esta aplicação à separação de solutos dissolvidos em correntes líquidas e a separação de misturas gasosas.

Uma membrana é uma barreira que separa duas fases e que seletivamente transfere massa entre essas fases. A membrana tem assim a capacidade de transportar determinados componentes mais eficazmente, retendo outros que fazem parte da mistura de alimentação. É, portanto uma barreira permeável e seletiva ou uma interface entre duas fases. A Figura 2.2.1 apresenta um esquema da separação por membranas.

O que distingue o processo de separação de membranas de outras técnicas de separação é a utilização de uma outra fase, a membrana. Esta fase, sólida, líquida ou gasosa, introduz uma interface entre o volume das duas fases envolvidas na separação e pode originar vantagens de eficiência e seletividades.

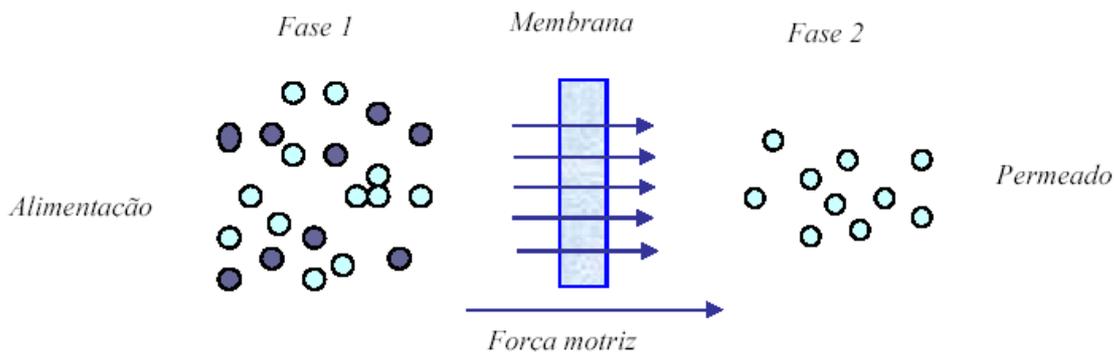


Figura 2.2.1 – Representação Esquemática do Processo de Separação por Membranas.

2.3 – Membranas Semipermeáveis

Membranas semipermeáveis são membranas existentes na natureza que tem a capacidade de deixar passar somente um líquido, ou solvente, mas não deixa passar sais nela dissolvidos.

As membranas são um dos elementos mais importantes para que ocorra o processo de osmose inversa, podendo apresentar-se em vários tipos:

As membranas assimétricas são feitas na forma de uma estrutura composta, consistente de uma película fina de densidade alta e um substrato poroso do mesmo polímero, que oferece um suporte e apresentam a mesma composição química. A película fina superficial possui a capacidade de rejeitar os sais dissolvidos da solução durante a dessalinização da água, enquanto que o substrato poroso tem o objetivo de oferecer a resistência física à membrana, tornando assim inerte ao desenvolvimento do fluxo do permeado (fluxo de água potável).

As membranas de acetato de celulose também são do grupo de membranas assimétricas, esse tipo de membrana era muito utilizado, mais com o avanço das pesquisas, ela está sendo trocada pelas membranas de poliamida aromáticas, suas vantagens são: baixo custo de produção, resistência ao ataque por cloro, entre outras. Suas desvantagens são as seguintes: taxas de rejeição de sais mais baixas, baixo fluxo do permeado o que requer elevadas pressões de operação.

As membranas de poliamida aromática apresentam maiores vantagens em relação às membranas de acetato de celulose, assim como seguem: taxas de rejeição superiores, taxas de rejeição de moléculas orgânicas superiores, elevada taxa de rejeição de sílica (98%).

Os elementos de membranas utilizadas em escala industrial para dessalinização são do tipo espiral. No módulo espiral apresentado na figura abaixo, utiliza-se a membrana entre dois espaçadores, um destes serve como um canal coletor para o permeado, enquanto o outro fornece espaço para escoar a solução de alimentação. As membranas conjuntamente com os espaçadores são enroladas em torno de um duto perfurado, para o qual o permeado escoar, o conjunto é selado externamente com resina epóxi.

Elemento de Membrana Espiral

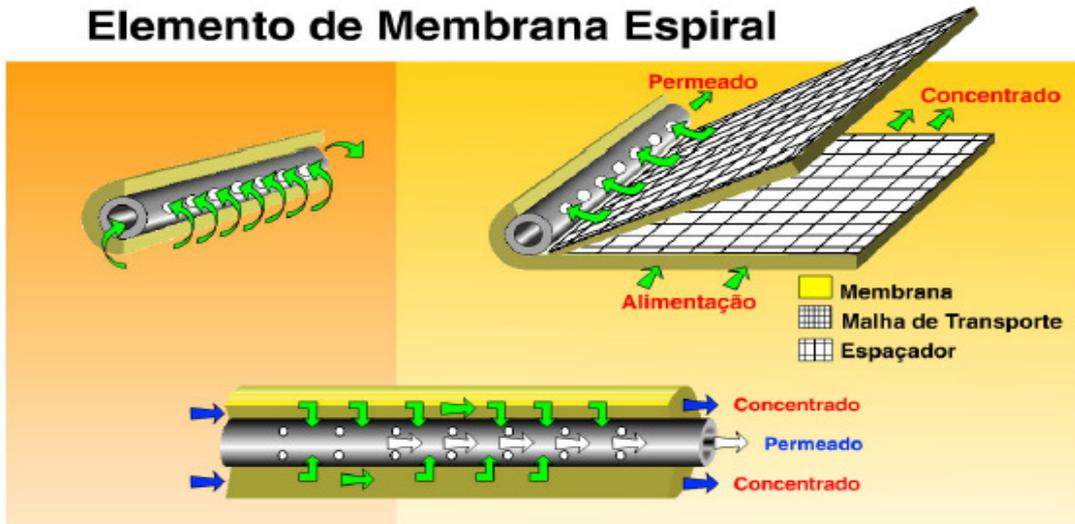


Figura 2.3.1 – Elemento de membrana em espiral para o processo de osmose inversa.
2.4 – Membranas de Poliamida Aromáticas.

As Membranas Aromáticas de Poliamida são membranas de películas finas composta, e são exemplos de membranas simétricas.

As membranas simétricas ou isotópicas ou ainda membranas orgânicas de primeira geração são membranas com poros regulares, quase cilíndricos que atravessam toda a espessura da membrana, podem ser porosas, não-porosas ou densas. Apresentam uma espessura entre 10 a 200 μm . A porosidade e a produtividade dessas membranas são muito pequenas pela necessidade de limitar o volume ocupado pelos poros, para evitar o colapso das membranas quando pressurizadas. As membranas densas simétricas não apresentam nenhum interesse do ponto de vista comercial. São filmes poliméricos de espessura relativamente elevada e, por este motivo, apresentam um fluxo do permeado muito baixo, fora da faixa de interesse comercial.

2.5 – Membranas de Acetato de Celulose

As membranas de Acetato de Celulose, são exemplos de membranas assimétricas. As membranas assimétricas ou anisotrópicas ou membranas de segunda geração são caracterizadas por um gradiente de porosidade interno, gerado pelo controle das condições de polimerização da membrana, onde estas são constituídas por uma camada densa homogênea, muito fina (camada ativa ou "pele"), cuja espessura pode variar entre 0.1 a 0.5 μm , suportada por uma camada porosa com uma espessura entre 50 a 150 μm . A reduzida espessura da película filtrante, diminui consideravelmente a resistência à filtração, que é proporcional à espessura da membrana. As membranas assimétricas são constituídas de um único tipo de polímero.

Este tipo de membrana possui custos de fabricação mais baixos por ser fabricada em apenas uma etapa de produção. Por este método de fabricação, torna-se muito difícil à obtenção de um produto de elevada qualidade, devido à existência de pequenos poros formados na superfície da membrana.

Este problema só pode ser resolvido com a utilização de práticas que acabam por determinar o aumento da espessura da película fina, reduzindo, conseqüentemente, o fluxo de água permeado.

Outro problema que ocorre durante a utilização de tal tipo de membrana é a sua tendência a compactar-se em uma estrutura cada vez mais densa sob a aplicação de elevadas pressões de modo contínuo durante o regime de operação. Este fenômeno é conhecido como compactação da membrana e seus efeitos durante a vida útil da mesma devem ser levados em conta na fase do projeto do sistema.

2.6 – Membranas de Compósito de Filme Fino (TFC)

As membranas compostas que veio com o aperfeiçoamento do processo de construção das membranas assimétricas são conhecidas também como membranas da terceira geração.

Os cartuchos de membranas espirais são os mais utilizados em aplicações de osmose inversa, normalmente são do tipo TFC fabricados em poliamida, com rejeição de sais superior a 99%.

As membranas em poliamida TFC (Thin Film Composite) consistem de uma camada suporte (porosa) e uma camada densa de um filme fino que é uma pele de membrana trançada, formada no local sobre a camada suporte, normalmente feita em polisulfona. Este processo de fabricação das membranas possibilita o aproveitamento das propriedades do suporte e da pele (rejeição de sais).

A membrana TFC é caracterizada pela grande vazão específica de água e maior rejeição de sais que as membranas de acetato de celulose. Cada elemento de membrana consiste de um envelope de filme e espaçador, enrolado ao redor de um tubo central que é o coletor da água permeada conforme mostra a Figura 2.6.1.



Figura 2.6.1 – Membranas em poliamida TFC.

A Figura 2.6.2, apresenta um esquema das estruturas das membranas, mostrando as três gerações de membranas orgânicas.

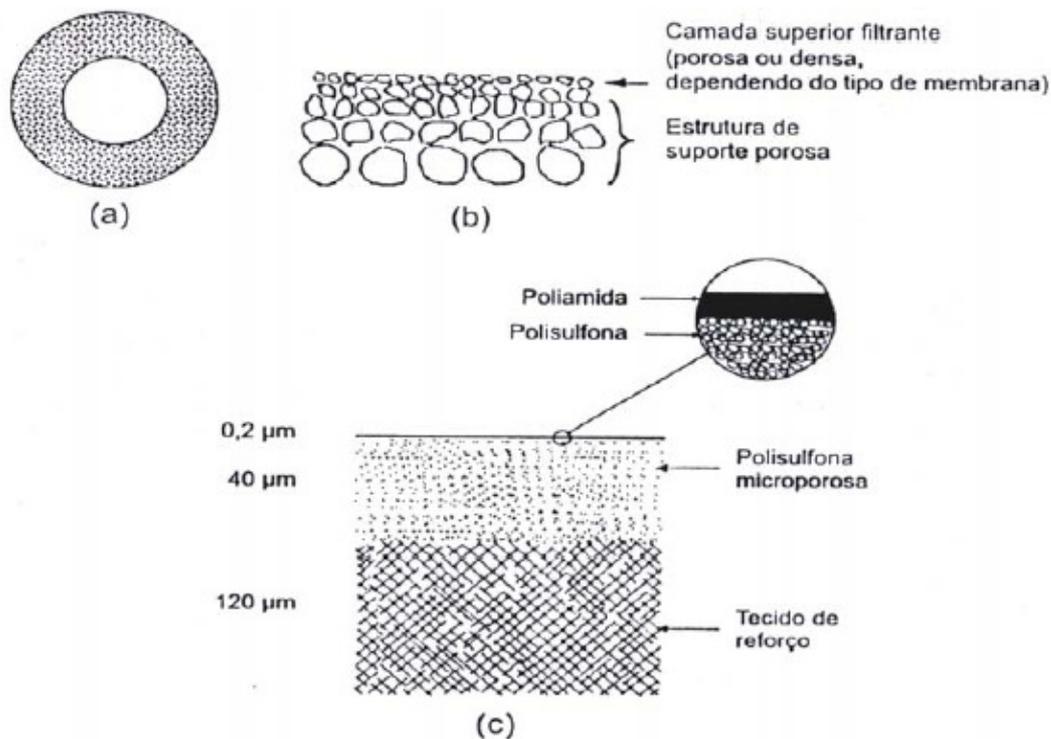


Figura 2.6.2: (a) Membrana simétrica; (b) membrana assimétrica; (c) membrana composta.

2.7 – Água de Alimentação

A água de alimentação é a matéria principal para produção de água potável em sistemas de osmose inversa e sua qualidade depende diretamente do tipo de fonte hídrica que alimenta o sistema. A composição físico-química da água subterrânea apresenta menor índice de variação, durante as estações climáticas, do que a água superficial. As águas superficiais (rios, lagos e do mar) são caracterizadas pelo nível de sólidos suspensos, atividades microbiológicas e variações climáticas. Em função destas observações, antes de projetar um sistema de dessalinização, se faz necessário obter uma boa análise da água de alimentação.

2.8 – Processos de Separação com Membranas

O processo de separação por membranas é caracterizado pelo fato da corrente de alimentação ser dividida em duas correntes, a de concentrado e a de permeado, o que implica que ou a corrente de concentrado ou a de permeado será o resultado da separação (produto). As partículas e os solutos retidos na superfície da membrana são continuamente removidos no concentrado que flui tangencialmente ao longo da superfície da membrana, denominado de fluxo cruzado. A solução purificada flui através da membrana como permeado conforme mostra a Figura 2.8.1.

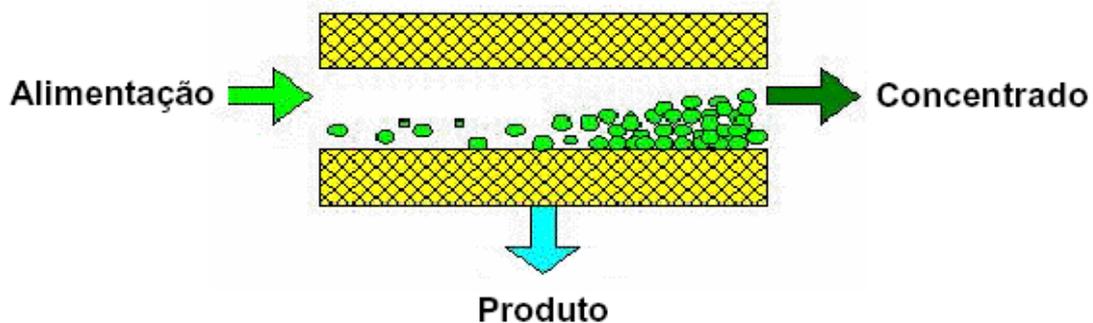


Figura 2.8.1 – Correntes no processo de separação por membranas.

2.9 – Osmose

O fenômeno de osmose foi descoberto por Abbè Nollet há mais de 200 anos quando ele observou o transporte da água através de uma bexiga de porco que tampava a boca de uma jarra contendo “espírito de vinho”.

Somente em 1855, mas de 100 anos após a experiência de Nollet, Fick publicou sua lei da difusão, que até hoje é utilizada para descrever muitos fenômenos que ocorrem em membranas. Alguns anos mais tarde, Graham estudou a permeação de gases através de borrachas e efetuou as primeiras medidas experimentais de diálise utilizando membranas sintéticas.

Os seres vivos deparam-se com a osmose desde sua origem, uma vez que tudo indica que eles surgiram em meio aquoso como sistemas isolados do ambiente por uma membrana semipermeável. Durante o processo evolutivo os seres vivos desenvolveram não só maneiras e evitar problemas causados pela osmose (inchação ou dessecamento), como também processos que aproveitam a dinâmica osmótica nos fenômenos biológicos.

Somente no final do século XIX a palavra osmose foi adicionada aos nossos dicionários. Derivada da palavra grega *osmós*, significando impulso, a palavra osmose tem sido difundida pelos grandes pensadores de toda a história como uma das menções da palavra vida.

A osmose é um fenômeno físico-químico natural, quando dois líquidos com diferentes concentrações de sais em solução são separados por uma membrana semipermeável, naturalmente o solvente da solução mais diluída passa pela membrana em direção da concentração mais concentrada. O processo continua até alcançar um ponto de equilíbrio, no qual a coluna da solução mais concentrada estará acima da mais diluída, esta diferença de altura entre as colunas se denomina pressão osmótica.

2.10 – Bomba de Alta Pressão

A bomba de alta pressão é o componente do sistema que gera a pressão necessária para as membranas produzirem uma vazão de água requerida com certa qualidade. Usualmente, as bombas são do tipo: estágio único, centrífuga de alta velocidade, pistão com deslocamento positivo, centrífuga com multi-estágios.



Figura 2.10.1 – Motor bomba de alta pressão.

2.11 – Processo de Osmose Inversa

A osmose inversa ou hiperfiltração acontece quando uma pressão mecânica superior a pressão osmótica é aplicada no lado da solução mais concentrada invertendo-se, desta maneira, o sentido do fluxo de soluto que atravessa a membrana, obtendo-se assim uma corrente de água purificada isenta de sais, vírus, bactérias e fungos.

A taxa de transporte de água através da membrana depende das propriedades da mesma, da temperatura da solução, da diferença de pressão aplicada na membrana, e a baixa diferença de pressão osmótica entre a solução mais concentrada e a de menor concentração, na figura 2.11.1, esta ilustrado um processo de osmose inversa:

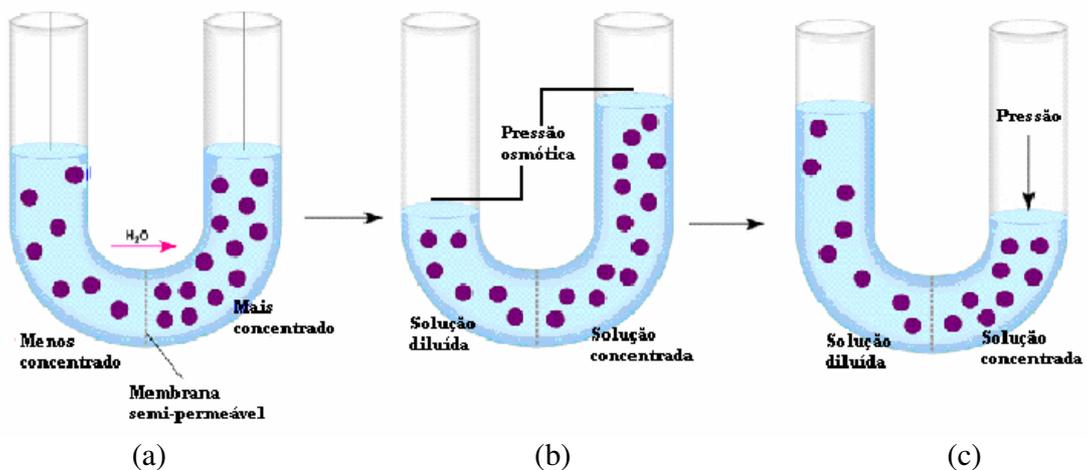


Figura 2.11.1 – Representação do processo de osmose e osmose inversa: (a) duas soluções, uma salina e outra sem sal, separadas por uma membrana semipermeável; (b) a água pura

dilui a salgada até que seja atingido o equilíbrio osmótico; (c) a aplicação de uma pressão superior à diferença de pressão hidrostática inverte o processo.

Na osmose inversa, as membranas são um dos elementos mais importantes, sua função características de seletividade induz ao desenvolvimento de membranas para a dessalinização em escala industrial.

Existe hoje, vários tipos de membranas seletivas para diferentes processos, onde as mais utilizadas são as membranas de poliamida aromáticas, estas por sua vez, possuem uma alta rejeição de sais e matérias orgânicas, não biodegradáveis, possuem baixa taxa de compactação e podem trabalhar com uma faixa de temperatura superior a 45°C e alta taxa de rejeição de sílica, sua desvantagem pode ser comentada apenas a sua sensibilidade ao cloro. A tabela 1.4.1 abaixo mostra alguns dos principais processos de separação em escala comercial.

Tabela – 2.11.1. Processo de separação por membranas comerciais.

PROCESSO	FORÇA MOTRIZ	METIAL RETIDO	MATERIAL QUE PERMEIA	APLICAÇÕES
MICROFILTRAÇÃO (MF)	ΔP (0,5 – 2 atm)	Material em Suspensão, Bactérias PM > 500.000 (0,01 μ m)	Água e Sólidos Dissolvidos	Esterilização Bacteriana, Clarificação de Vinhos e Cervejas, Oxigenação do Sangue.
ULTRAFILTRAÇÃO (UF)	ΔP (1 – 7 atm)	Colóides, Macromoléculas PM > 5000	Água (Solvente), Sais Solúveis de Baixo Peso Molecular	Fracionamento e concentração de Proteínas, Recuperação de Pigmentos.
NANOFILTRAÇÃO (NF)	ΔP (5 – 25 atm)	Moléculas de Peso Molecular Médio 500 < PM < 2000	Água, Sais e Moléculas de Baixo Peso Molecular	Purificação de Enzimas, Bioreatores a Membranas.
OSMOSE INVERSA (OI)	ΔP (15 – 80 atm)	Todo Material Solúvel ou em Suspensão	Água (Solvente)	Dessalinização de Águas, Concentração de suco de Frutas.
DIALISE (D)	ΔC	Moléculas de PM > 5000	Íons e Orgânicos de Baixo Peso Molecular	Hemodiálise (Rim Artificial), Recuperação de NaOH.
ELETRODIÁLISE (ED)	ΔV	Macromoléculas e Compostos não Iônicos.	Íons	Concentrações de Soluções Salinas, Purificação de Águas.
PERMEAÇÃO DE GASES (PG)	$\Delta P \Rightarrow \Delta C$	Gás Menos Permeável	Gás Mais Permeável	Recuperação de Hidrogênio, Separação CO ₂ /CH ₄
PERVAPORAÇÃO (PV)	Pressão de Vapor	Líquido Menos Permeável	Líquido Mais Permeável	Desidratação de Álcoois.

2.12 – Vantagens e Aplicações do Processo de Osmose Inversa

2.12.1 –Vantagens:

O processo de osmose inversa possui vantagens em relação aos processos tradicionais de dessalinização e apresenta-se como a melhor alternativa existente para certas regiões e ainda mostra ser mais econômica que caminhões pipa, as vantagens são:

- Possuir baixo custo de investimento;
- Baixo consumo energético;
- Ocupa área muito reduzida para instalação;
- Aproveitamento os efluentes;
- Qualidade constante da água produzida;
- Processo contínuo;
- Possui flexibilidade para futuras instalações;
- Sua taxa de rejeição chega a 99,4%.

2.12.2 – Aplicações:

A dessalinização de águas para produção de água potável é a maior aplicação da osmose inversa e já se encontra consolidada a nível mundial, representando cerca de 34% dos 15 bilhões de m³/dia de água que são dessalinizadas, abaixo estão citadas outras aplicações:

- Tratamento de águas;
- Recuperação e produtos em efluentes;
- Ultrafiltração de leite integral e desnatado para aumentar o rendimento na produção de queijo;
- Concentração de sucos: laranja, tomate, maçã;
- Separação e concentração de microsolutos tais como: antibióticos, vitaminas e ácidos orgânicos;
- Tratamento da água na produção de papel e celulose;
- Tratamento de água ultrapura para hemodiálise;
- Fracionamento e concentração de albumina de ovos, proteínas animais, peixes e vegetais;
- Remoção de contaminantes (Ex. purificação de uréia);
- Concentração e recuperação de corantes, lubrificantes, etc.

2.13 – Principais Cuidados com um Dessalinizador

Dessalinizadores são equipamentos que necessitam de cuidados pré-estabelecidos para que a operação se realize com qualidade freqüente.

Em se tratando de água salobra, podemos supor que a salinidade máxima seja de 3.000 ppm, pois na maioria dos casos a salinidade oscila entre 1.600 a 3.000 ppm, sendo 2.500 o valor mais comum.

Uma análise com o teor de cálcio ou dureza é recomendada, pois isto dirá a maior ou menor freqüência de limpeza química do equipamento, embora não influa nas variáveis

de operação, se a água apresentar sedimentos, isto é, se for suja, filtros de pré-tratamento deverão ser colocados.

A água produzida normalmente se exige uma salinidade menor que 250 ppm, pois este é o limite estabelecido pela OMS.

2.14 – Incrustações

Durante o processo de dessalinização podem surgir alguns problemas que afetam a produtividade do sistema, como as incrustações. Estes por sua vez são fenômenos capazes de provocar uma queda no fluxo do permeado e/ou o aumento da passagem de sais com o passar do tempo.

As incrustações podem ser entendidas como todo o material em suspensão na água e que se deposita na superfície da membrana. Podem ser classificadas por quatro categorias: depósitos inorgânicos (*scaling*), colóides (*fouling* coloidal), sólidos em suspensão e material biológico (*biofouling*).

Os colóides podem ser de origem mineral ou orgânica, e tendem a coalescer e se aglomerar na área próxima à superfície da membrana depositando-se nela. Os sólidos em suspensão são partículas maiores de origens diversas e que tem tendência a se depositar na superfície da membrana. O depósito orgânico de origem biológica é constituído por fungos e bactérias e apresenta maiores problemas porque estão presentes em praticamente todas as águas e normalmente se multiplicam em determinadas condições.

Na prática, os compostos mais críticos para membranas são: sílica, sulfato de cálcio, estrôncio e bário. Um sal precipita quando a concentração dos seus componentes ultrapassa o valor limite correspondente ao produto de solubilidade (K_{ps}) e geralmente a precipitação ocorre nos elementos de membranas instalados na saída dos vasos de pressão.

2.15 – Indicadores de Incrustações.

O primeiro passo para o desenvolvimento de um sistema de dessalinização é a obtenção de uma completa e atual análise da água, a análise mostrara todos os constituintes iônicos bem como turbidez, sólidos em suspensão e o total de carbônicos orgânicos.

Os índices mais utilizados para o teste de incrustação (tanto *scalants* quanto *foulantes*) são: Índice de Densidade de Sedimentos (IDS) e o Índice de Saturação de Langelier (ILS). O IDS é calculado a partir de três intervalos de tempo: o primeiro intervalo (t_1) é o tempo necessário para a coleta dos primeiros 500ml de permeado, o segundo intervalo (t_2) é o tempo necessário para coletar os últimos 500ml de permeado, o terceiro intervalo (t_3) varia de 5, 10 ou 15 minutos que é o intervalo entre o término da coleta dos primeiros 500ml de permeado e o início da coleta dos segundos 500ml. O tempo padrão para o terceiro intervalo de tempo é 15 minutos, mas se a taxa de filtração for bastante reduzida podem ser utilizados intervalos mais curtos, a equação utilizada para calcular o IDS é a seguinte:

$$IDS = 100. \left[\frac{1 - \frac{t_i}{t_f}}{t_i} \right]$$

O equipamento básico mostrado na Figura 2.15.1 consiste de um sistema de filtração pressurizada equipado com filtros de 0,45µm e diâmetro de 47mm. A amostra deve ser filtrada a uma pressão de 2,0 kgf/cm².

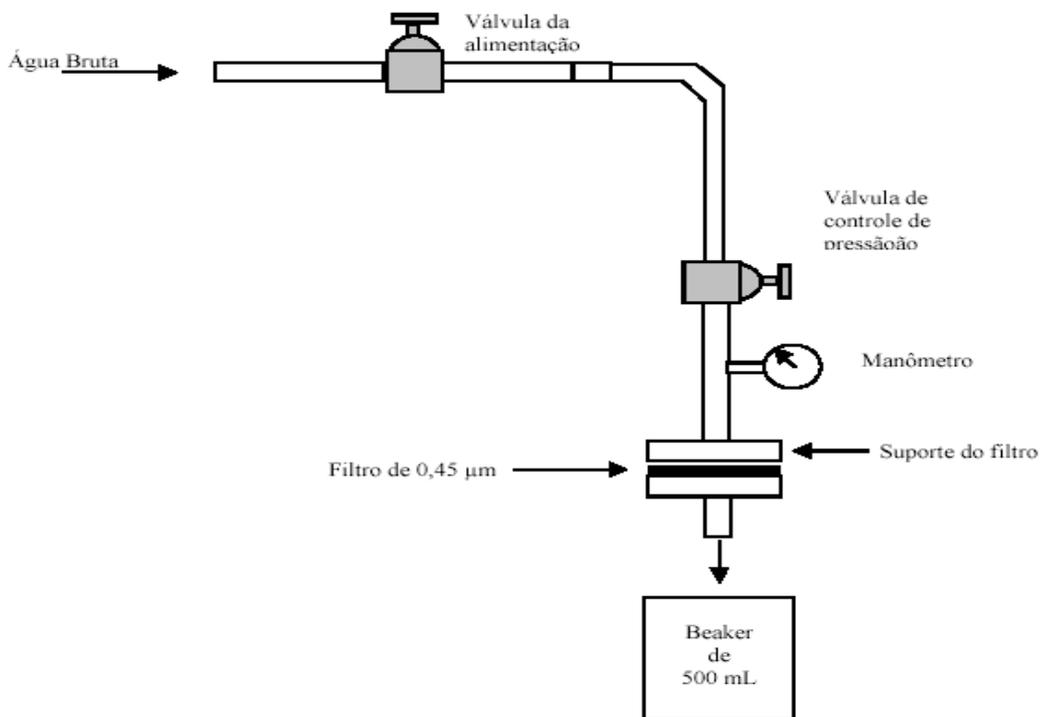


Figura 2.15.1 – Equipamento básico para medida de IDS.

O IDS é usado para prever a estabilidade de carbonato de cálcio na água, ou seja, se a água precipitara, dissolvera ou esta em equilíbrio com o carbonato de cálcio. Langelier desenvolveu um método a partir do pH, onde a água se encontra saturada em carbonato de cálcio (chamado pHs), o ISL é definido pela diferença entre o pH atual e o pH de saturação (pHs).

Se o pH atual da água se encontra abaixo do pHs, o ISL é negativo, isso implica que a água possui um potencial muito limitado de incrustação, se o pH exceder o pHs, o ISL é

positivo e a água se encontra supersaturada com CaCO_3 , a qual possui tendência de formação de incrustação, à medida que o índice aumenta positivamente, o potencial de formação de incrustação também aumenta, a equação utilizada para o cálculo do ISL é a seguinte:

$$\text{ISL} = \text{pH} - \text{pH}_s$$

$$\text{pH}_s = (9,3 + A + B) - (C + D)$$

Onde:

$$A = [\log(\text{TDS}) - 1]/10$$

$$B = -13,12 \times \log(^{\circ}\text{C} + 273) + 34,55$$

$$C = \log(\text{Ca}^{+2} \text{ como } \text{CaCO}_3) - 0,4$$

$$D = \log(\text{Alcalinidade como } \text{CaCO}_3)$$

2.16 – Operação e Manutenção

A operação e manutenção são as chaves do sucesso do desempenho do sistema de dessalinização. Recomenda-se a formação de um banco de dados, o qual deve ser regularmente analisado com objetivo de detectar os potenciais dos problemas, antes do sistema entrar em colapso.

Têm-se observado que o custo de troca de membranas se dá em função da falta de manutenção preventiva nos sistemas de dessalinização. Quando o sistema não apresenta um sistema de pré-tratamento adequado, as membranas passam sob um programa de limpeza química com mais frequência. E quando não são limpas, as impurezas tendem a se depositar na superfície das membranas causando uma gradual diminuição do fluxo e da rejeição de sais e muito das vezes uma degradação do material da membrana (por exemplo: membrana de acetato de celulose), tornando assim um processo de recuperação irreversível.

A técnica mais plausível é identificar a causa da incrustação e determinar um pré-tratamento adequado para evitar sucessivas limpezas químicas. A limpeza ocorre sob um processo de circulação contínua de uma solução de limpeza através dos elementos de membranas a baixa pressão até se perceber a remoção das impurezas.

Antes de fazer a limpeza química é importante identificar, através de análises na água de alimentação e do concentrado, os tipos de incrustações com a finalidade de determinar a solução de limpeza apropriada para manutenção do sistema.

2.17 – Pré-Tratamento

Para uma maior vida útil dos elementos de membranas, é preciso conhecer as qualidades físico-químicas e bacteriológicas da água, obtendo-se os valores dos indicadores de incrustações, é possível determinar qual o melhor tratamento da água de alimentação.

O pré-tratamento tem o objetivo de reduzir o potencial de incrustações na água de alimentação do sistema, devido à remoção de partículas micropoluentes e microrganismos, bem como a prevenção da formação de incrustação inorgânica, melhorando assim a

qualidade da água de alimentação num nível que resultara uma maior segurança de operação do sistema.

Geralmente utiliza-se soluções de ácido clorídrico com $\text{pH} \approx 3$, com a finalidade de combater as incrustações que se depositam sobre as membranas, (o tipo de ácido para a solução depende do grau e do tipo de incrustação), principalmente as formadas a partir de sílica (compostos de dióxido de silício SiO_2).

Águas de subsolo estão geralmente biologicamente estabilizadas, ou seja, possuem poucas cargas de microrganismos e baixa disponibilidade de compostos orgânicos utilizados por estes microrganismos. Estas águas podem ser bombeadas para o sistema de OI sem pré-tratamento, mas para garantir a operação segura do sistema pode-se fazer adição de anti-incrustantes, correção de pH e pré-filtração através de filtros cartucho de $5\mu\text{m}$.

A dessalinização de águas de superfície por OI depende do pré-tratamento da água de alimentação para remover microrganismos e reduzir a quantidade de matéria orgânica disponível para o crescimento destes organismos nos canais de alimentação no interior dos módulos de membranas. O ideal seria que a água bruta tivesse valores de IDS o mais baixo possível (<1).

2.18 – Limpeza Química nas Membranas.

No Nordeste, existe aproximadamente 550 dessalinizadores, mas apenas cerca de 30% funcionam, a causa principal deste fato é a manutenção inadequada, feita por técnicos que nem sempre são treinados para operar os equipamentos.

As membranas que garantem o tratamento da água, são muito delicadas, requerem cuidados e limpezas especiais, determinados produtos químicos são necessários para limpar as membranas periodicamente, os quais promovem a dissolução de incrustantes na superfície da membrana.

Os principais produtos químicos utilizados são a base de ácido fosfórico ou ácido cítrico, o ideal é utilizar o produto fornecido pelo fabricante do dessalinizador, pois vem com uma formulação adequada ao manuseio seguro e é constituído com formulas testadas e comprovadas.

A sujeira ou depósito deve ser evitado com um pré-tratamento adequado a água a ser tratada, para o caso de águas com depósito orgânico, a limpeza química recomendada é a limpeza alcalina, geralmente utiliza-se hidróxido de sódio, porém é melhor verificar a formulação indicada pelo fabricante.

O problema é que na falta desses produtos, a manutenção é feita com ácido sulfúrico ou até produtos de limpeza como água sanitária, causando a inutilização do equipamento, as conseqüências são danos irreversíveis à membrana, uma peça importada e de custo elevado.

É necessário que estes equipamentos tenham uma boa manutenção para que a água obtida seja de boa qualidade e para que a vida útil desses equipamentos seja maximizada, conseqüentemente reduzindo o custo da água dessalinizada.

2.19 – Processo de Limpeza Química.

Para dar início a limpeza química, é necessário o preparo da solução específica para cada tipo de incrustação que se deseja combater, onde esta solução é colocada em um tanque com uma capacidade volumétrica de 50 litros, em seguida, o equipamento é ajustado para não mais produzir água dessalinizada, este procedimento é feito para que a baixa pressão o ácido aplicado não danifique as membranas. Liga-se o equipamento fazendo com que a solução passe pelas superfícies das membranas e seja descartada por um período de cinco minutos, após este procedimento completa-se o tanque de limpeza com a solução ácida e em seguida deixa-se o dessalinizador funcionando por um período de duas horas ou mais, depois desse tempo de funcionamento, os elementos de membranas ficaram embebidos na mesma solução durante mais duas horas. Descarta-se novamente a solução, e durante um período de tempo de três horas lava-se os elementos de membranas com reciclo constante da solução ácida.

Em alguns casos, não é necessário o procedimento de limpeza acima citado, devido ao grau de manutenção do equipamento realizado pelo próprio operador, nestes casos, a lavagem dos elementos de membranas é feita com água dessalinizada do próprio equipamento, com o objetivo de expulsar todos os resíduos remanescentes em cada membrana e deixar o pH neutro.

No primeiro caso, a limpeza das membranas não sofre o efeito da pressão, enquanto que no segundo, com a água dessalinizada geralmente é aplicada uma pressão que varia de 8.0 a 12 Kgf/cm² para uma maior segurança na expulsão dos resquícios ácidos e também para não haver contaminação da água dessalinizada.

2.20 – Período Necessário para a Limpeza Química.

Uma regra básica de todos os fabricantes de membranas de dessalinizadores é que as lavagens químicas devem ser realizadas quando a produção de água diminui 10% ou a pressão de operação tiver de ser aumentada em 10% para manter a mesma produção anterior.

Isto em equipamentos de pequeno porte é muito difícil de monitorar porque a precisão dos instrumentos indicadores de pressão e principalmente vazão é muito pobre, ou seja, quando se detecta uma diminuição significativa na produção de água doce é porque a membrana já está seriamente comprometida.

Então, deve-se adotar umas posturas preventivas, que é um programa de lavagens com água doce e produtos químicos, onde a limpeza química deve ser realizada a cada três meses.

2.21 – Pós-Tratamento

O processo utilizando membranas remove essencialmente todos os microorganismos, dentre eles os patogênicos, a maioria dos sais e outros solutos presentes na água de alimentação, porém, todos os gases dissolvidos, incluindo dióxido de carbono e hidrogênio sulfídrico passa através da membrana. Com a finalidade de remover esses gases

do permeado, o processo de osmose inversa necessita de alguns pos-tratamentos antes de ser utilizado para o consumo humano.

O pós-tratamento tratamento pode ser separado em duas deferentes unidades operacionais, a primeira é a estabilização do permeado e a segunda é a desinfecção, a escolha e seqüência dessas unidades operacionais variam de acordo do sistema e da qualidade da água.

Os principais métodos utilizados no pos-tratamento são: ozonização, correção de pH, irradiação com luz ultravioleta, desinfecção e oxidação.

2.22 – Variáveis de Medidas.

Como em todos os equipamentos, um sistema de dessalinização utiliza algoritmos matemáticos para um melhor funcionamento do mesmo, sendo necessário uma breve revisão das variáveis de medidas que regem a dinâmica de execução do sistema.

Logo abaixo estão listadas as variáveis de medidas mais utilizadas nos sistemas de dessalinização:

Temperatura

A variação da temperatura afeta a pressão osmótica e o fluxo da água, o efeito da temperatura será visto na equação (2.23.5) que será vista posteriormente.

Pressão

Para uma dada condição de alimentação, os resultados do aumento da pressão mostram elevação do fluxo de permeado da água por unidade de área da membrana.

Vazão

Tanto para a água permeada quanto para a água rejeitada existe um valor numérico de produção e vazão, esta por sua vez é a quantidade de água produzida por temo de funcionamento, algumas conversões serão encontradas na tabela logo abaixo.

Tabela 2.4.1 – Conversões de Unidades de Pressão.

mmHg	In Hg	bar	atm	KPa
1	$3,937 \times 10^{-2}$	$1,333 \times 10^{-3}$	$1,316 \times 10^{-3}$	0,1333
25,40	1	$3,387 \times 10^1$	$3,342 \times 10^{-2}$	3,387
750,06	29,53	1	0,9869	100,0
760,0	29,92	1,013	1	101,3
75,02	0,2954	$1,000 \times 10^{-2}$	$9,872 \times 10^{-3}$	1

2.23 – Principais Equações que Regem o Processo de Osmose Inversa.

O fluxo do permeado através de uma membrana de osmose inversa é proporcional à área da membrana e a variação de pressão osmótica e hidráulica, e é dado pela seguinte equação:

$$Q = A \cdot S \cdot (P_a - \Delta\pi - \Delta P - P_p) \quad (2.23.1)$$

Onde: Q é a taxa de fluxo permeado (g/s), A é o coeficiente de permeação de água ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{atm}$), S é a área da membrana (cm^2), P_a é a Pressão aplicada (atm), $\Delta\pi$ é a Pressão osmótica diferencial (atm), ΔP é a perda e Pressão hidráulica (atm), P_p é a Pressão do permeado (atm).

Taxa de Rejeição de Sais

A taxa de rejeição de sais (TRS) fornece a capacidade da membrana de rejeitar os sais dissolvidos durante a permeação da água.

$$TRS(\%) = \frac{C_a - C_p}{C_a} \times 100 \quad (2.23.2)$$

Onde: TRS é a taxa de rejeição de sais, C_a é concentração de alimentação (mg/l), C_p é a concentração do permeado (mg/l).

Recuperação do Sistema.

A recuperação do sistema refere-se a vazão da água de alimentação convertida em água purificada e depende de vários fatores, como a formação de scalling na superfície das membranas, a pressão osmótica e a qualidade do permeado.

$$r = \frac{Q_p}{Q_a} = \frac{Q_p}{Q_p + Q_r} \quad (2.23.3)$$

Onde: R é ao nível de recuperação do sistema, Q_p é a vazão da água produzida, Q_a é a vazão da água de alimentação e Q_r é a vazão da água de rejeito.

Com o aumento do nível de recuperação do sistema, mais água é convertida em produto, isto reduz o volume da água a ser rejeitada e conseqüentemente aumenta o valor da concentração de sais dissolvidos na corrente de rejeito, assim como a possibilidade de sua precipitação na superfície da membrana.

Concentração de Sais Dissolvidos.

Quanto à concentração de sais dissolvidos na corrente do rejeito pode ser calculada com auxílio da seguinte equação:

$$C_r = \frac{C_a}{1-r} \quad (2.23.4)$$

Onde: C_r é a concentração de sais dissolvidos na corrente do rejeito (mg/l), C_a é a concentração de sais dissolvidos na corrente de alimentação (mg/l), R é o nível de recuperação do sistema (%).

Pressão Osmótica.

A pressão osmótica é função da concentração de sais e do tipo das moléculas orgânicas contidas na água de alimentação, quanto maior for a concentração da solução, maior será o valor da pressão osmótica dessa solução.

$$\pi = \sum v_i c_i RT \quad (2.23.5)$$

Onde: π é a pressão osmótica da solução iônica (kgf/cm²), v é o n^o de íons formados na dissociação do soluto, c é a concentração molar do soluto (mol/L), R é a constante dos gases (kgf L / cm² mol K), T é a temperatura (K).

Fluxo de Permeado e de Solute.

Na osmose inversa, os sais dissolvidos e moléculas orgânicas retidas na superfície da membrana causam o aumento da concentração próxima a superfície da mesma, este aumento de concentração causa um acréscimo no valor da diferença de pressão osmótica da solução, o que tende a diminuir o fluxo de permeado e de soluto, são dados respectivamente, por:

$$J_w = K_w (\Delta P - \Delta \pi) = \frac{Q_p}{A} \quad (2.23.6)$$

Onde: J_w é a taxa de fluxo de permeado, K_w o coeficiente de transferência de massa do solvente, ΔP é o gradiente de pressão aplicado, $\Delta \pi$ é o gradiente de pressão osmótica, Q_p é a vazão do permeado e A é a área de permeação da membrana.

$$J_i = K_i \Delta C = \frac{Q_p C_p}{A} \quad (2.23.7)$$

Onde: J_i é o fluxo mássico do soluto, K_i é o coeficiente de transferência de massa o soluto, ΔC é o gradiente de concentração e C_p é a concentração do permeado, neste caso ΔP , $\Delta \pi$, e ΔC são dados por:

$$\Delta P = \frac{(P_a + P_c)}{(2 - P_p)} \quad (2.23.8)$$

$$\Delta \pi = \frac{(\pi_a + \pi_c)}{(2 - \pi_p)} \quad (2.23.9)$$

$$\Delta C = \frac{(C_a + C_c)}{(2 - C_p)} \quad (2.23.10)$$

Onde: P_a , P_c , P_p são a pressão de alimentação, do concentrado e do permeado, respectivamente, π_a , π_c , π_p são a pressão osmótica da alimentação, do concentrado e do permeado, respectivamente, C_a , C_c , C_p são a concentração de alimentação, do concentrado e do permeado respectivamente.

$\Delta \pi$ pode ser dado ainda por

$$\Delta \pi = \left[\frac{(STD_a + STD_c)}{2} - STD_p \right] \times 7,033.10^{-4} \quad (2.23.11)$$

Onde: TDS_a é o total de sais dissolvidos na corrente de alimentação, TDS_c é o total de sais dissolvidos na corrente do concentrado e TDS_p é o total de sais dissolvidos na corrente do permeado.

O TDS é dado em $mg.L^{-1}$ e $\Delta \pi$ é dado em $Kgf.cm^{-2}$. O fator $7,033.10^{-4}$ converte a concentração para pressão.

2.24 – Características Físicas das Águas.

O tratamento de águas se dá pela determinação das características físicas e químicas as quais indica se a mesma se encontra em um estado que possa ser consumido ou se necessita de um tratamento prévio. Na região do semi-árido Nordeste, como boa parte da água consumida é de procedência de poços artesianos, as características físicas mais usadas são as seguintes:

Cor

A aparência da água pode ser um fator significativo na satisfação de seu consumo, a água pura é eventualmente ausente de cor, a presença de substâncias dissolvidas ou em suspensão altera a cor da água, dependendo da quantidade e da natureza do material presente.

Turbidez

A turbidez é uma característica da água devida a presença de partículas suspensas na água com tamanho variando desde suspensões grosseiras aos colóides, dependendo do grau de turbulência, a presença dessas partículas provoca a dispersão e a absorção da luz, dando a água uma aparência nebulosa, esteticamente indesejável e potencialmente perigosa, a turbidez pode ser causada por uma variedade de materiais: partículas de argila ou lodo, descargas de esgotos domésticos ou a presença acentuada de microrganismos.

Potencial Hidrogeniônico (pH)

O termo pH é usado universalmente para expressar a intensidade de uma condição ácida ou alcalina de uma solução, mede-se a concentração de íon hidrogênio ou sua atividade, importante em cada fase do tratamento, sendo referida freqüentemente na dessalinização.

Sabor e Odor

As características de sabor e odor são consideradas em conjunto, pois geralmente a sensação de sabor origina-se do odor, são de difícil avaliação, por serem sensações subjetivas, causadas por impurezas dissolvidas, geralmente de natureza orgânica como fenóis e clorofenóis resíduos industriais, gases dissolvidos entre outros.

Temperatura

A temperatura da água tem importância por sua influência sobre outras propriedades: acelera reações químicas, reduz a solubilidade dos gases, acentua a sensação de sabor e odor entre vários outros fatores.

Condutividade Elétrica.

A condutividade elétrica depende das quantidades de sais dissolvidos na água e é aproximadamente proporcional a sua quantidade, sua determinação permite obter uma estimativa rápida do conteúdo de sólidos dissolvidos na amostra.

Alcalinidade

A alcalinidade é devida à presença de bicarbonatos (HCO_3^-), carbonatos (CO_3^{2-}) ou hidróxidos (OH^-). Com maior frequência, a alcalinidade das águas é devida a bicarbonatos, produzidos pela ação do gás carbônico dissolvido na água sobre as rochas calcárias. Em função do pH, podem estar presentes na água os seguintes tipos de alcalinidade:

pH 11,0 – 9,4 Alcalinidade de Hidróxidos e Carbonatos

pH 9,4 – 8,3 Carbonatos e Bicarbonatos

pH 8,3 – 4,6 Somente Bicarbonatos

pH 4,6 – 3,0 Ácidos Minerais

Dureza

É uma característica conferida à água pela presença de alguns íons metálicos, principalmente os de cálcio (Ca^{++}) e magnésio (Mg^{++}), e em menor grau, os íons ferrosos (Fe^{++}) e do estrôncio (S^{++}), a dureza conhecida por sua propriedade de impedir a formação de espumas como sabão.

Ferro e Manganês

O ferro, muitas vezes associado ao manganês, confere à água um sabor amargo e coloração amarelada e turva decorrente da precipitação do mesmo quando oxidado. O manganês é semelhante ao ferro, porém menos comum, e a sua coloração característica é o marrom.

Cloretos, Sulfatos e Sólidos Totais

O conjunto de sais normalmente dissolvidos na água, formados pelos bicarbonatos, cloretos, sulfatos e em menor concentração outros sais, pode conferir à água sabor salino e uma propriedade laxativa, o teor de cloretos é um indicador de poluição por esgotos domésticos nas águas naturais.

O íon sulfato quando presente na água, dependendo da concentração além de outras propriedades laxativas mais acentuadas que outros sais, associados a íons de cálcio e magnésio, promove dureza permanente e pode ser um indicador de poluição de uma das fases de decomposição da matéria orgânica, no ciclo do enxofre.

Impurezas Orgânicas e Nitratos

A quantidade de nitrogênio na água pode ser uma poluição recente ou remota, inclui-se nesse item o nitrogênio, sob as suas diversas formas compostas, orgânico, amoniacal, nitritos, e nitratos, águas com concentração de nitratos predominantes indicam uma poluição remota os nitritos são o produto final de oxidação do nitrogênio.

2.25 – Reaproveitamento do Concentrado

Um problema que envolve a dessalinização é o que fazer com a produção dos resíduos da filtração (concentrado), já que eles não podem ser depositados diretamente na natureza, pois este procedimento provoca a salinização do solo, que é prejudicial às culturas que nele crescem.

Atualmente, o manejo do concentrado passou a ser fonte de estudo em função da qualidade da água a ser tratada, normalmente para águas de oceano, concentrado vem sendo retornado para o próprio oceano, de forma segura sem perturbar a vida marinha. Quando se trata de águas subterrâneas, rios ou lagos, existem varias formas de evitar o contato do concentrado com o solo. O concentrado das unidades de osmose inversa para produção de água potável vem sendo utilizado para diversos fins como:

- Tem-se reciclado uma parte do concentrado para alimentação de gados, quando se trata de uma água de alimentação de baixo teor de sais dissolvidos;
- Em algumas vilas, a descarga do concentrado é diluída com águas residuais de efluentes;
- Em alguns casos, vem-se retornando o concentrado para a própria fonte;
- Na área agrícola, o concentrado vem sendo utilizado irrigação tipo “spray”, dependendo da concentração de sais dissolvidos no concentrado, essa técnica dificulta a ocorrência de pontos de concentração localizadas no solo;
- Pode ser utilizado a obtenção de soda caustica, acido clorídrico ou acido sulfúrico a partir do concentrado da dessalinização;
- Outro processo utilizado é a evaporação, que geralmente necessita de grande áreas e seu desempenho depende da taxa de irradiação solar da região, tornando-se, em alguns casos, um método improdutivo e caro.

Uma pesquisa vem se destacando, como uma fonte de recurso alimentar é a produção de tilápias vermelhas e plantas do gênero *Atriplex*, essa planta se tornou uma fonte de nutrientes para ruminantes, por conter aproximadamente 16% de proteínas, 0,12% de fósforo e 59% de matéria orgânica, esse tipo de estudo vem sendo desenvolvido no laboratório da Embrapa no Estado de Pernambuco.

REFERÊNCIAS

AHMED, S. P., ALANSARI, M. S., *Biological fouling and control at Ras Abu Jarbus RO plant* – a new approach, Desalination vol. 74, p 69 – 84, 1989.

ALMEIDA, ALEX M. DE, **A Resina de Troca Iônica Como Extrator Multielementar em Análise de Solos Para Fins de Fertilidade**. 1999. Dissertação (Mestrado no Instituto de Química, Departamento de Química Analítica), Universidade Estadual de Campinas, São Paulo. 122p.

AMORIM, EFIGÊNIA, **Adsorção de Tensoativos em Resina Trocadora de Cátions**, 1995. Dissertação de Doutorado, Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo. 143p.

CIENFUEGOS, F., VAITSMAN, D., **Análise Instrumental**, Editora Interciência Ltda., Rio de Janeiro, 2000.

FILMTEC, Membranes. **Basics of RO and NF: Principle of Reverse Osmosis and Nanofiltration**. Form No. 609-02003-1004. 2003.

MUCCIATO, J. C..**Tratamento com Resinas Trocadoras de íons**. Disponível em: <http://www.meiofiltrante.com.br/materias.asp?action=detalhe&id=290>. Acessado em: 07 de Junho de 2008.