

AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS DE PRÉ-TRATAMENTOS DE ÁGUAS SALOBRAS PARA FINS DE DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE INVERSA

Juliana de Melo Cartaxo¹; Weruska Brasileiro Ferreira¹; Sidinei Kleber da Silva¹; Márcia Liana Freire Pereira¹; José Nilton da Silva¹; Giovanne de Sousa Monteiro¹; Kepler Borges França¹.

1 - Universidade Federal de Campina Grande, UAEQ, LABDES, (83) 3310-1116, weruska@labdes.ufcg.edu.br.

Resumo:

As operações com membranas via osmose inversa para dessalinização de águas salobras provenientes de poços tubulares requerem alguma medida de pré-tratamento para obter o controle de incrustações nas membranas. Este trabalho visa estudar determinados tipos de pré-tratamentos com a finalidade de reduzir as incrustações provocadas por sais inorgânicos. Foram avaliados a performance de um antincrustante (Floco-100) e do ácido clorídrico em várias concentrações. Com os resultados obtidos, verificou-se a redução dos índices ISL e IDS, promovendo assim um maior aumento na vida útil das membranas utilizadas, além de possibilitar uma maior segurança de operação no processo de osmose inversa para dessalinização em campo garantindo com isso uma maior produção de água potável.

Abstract

The use of membranes to desalinate brackish waters by reverse osmosis requires some measure of pre-treatment to control the build-up of incrustations on the surfaces of the membranes. This study compared the effects of different concentrations of the anti-incrustation compound *Flocon 100* with the addition of different concentrations of hydrochloric acid to prevent incrustation by inorganic salts. In terms of the ISL and IDS indices dosing with hydrochloric acid was more effective and cheaper at preventing membrane incrustation than *Flocon 100*.

Palavras chaves:

Osmose Inversa, Dessalinização e Pré- Tratamento

1.0 Introdução

O problema da escassez de água no mundo já foi bem diagnosticado, configurando-se como um dos grandes desafios para o século 21. No Brasil, também é um problema que envolve há décadas vários setores da sociedade e reveste-se de características dramáticas em algumas regiões do país, como é o caso do semi-árido.

As características químicas das águas subterrâneas refletem os meios por onde percolam, guardando uma estreita relação com os tipos de rochas drenados e com os produtos das atividades humanas adquiridos ao longo de seu trajeto, e é devido a essa particularidade que a maioria dos poços perfurados no semi-árido do Nordeste brasileiro encontram-se com alto teor de sais.

O uso da tecnologia de osmose inversa para dessalinização de águas salobras e marinhas remonta ao final da década de 1960 e se consolida nos anos 70. Concorrendo com técnicas evaporativas, de troca iônica e de eletrodialise, conquista um apreciável nicho de mercado em função de aspectos econômicos e práticos (instalação e operação facilitadas). Enquanto a indústria de equipamentos se consolida em alguns países, a sua expansão para o tratamento de pequenos volumes demora para vigorar no Brasil (em parte por causa de dependência de importações, escala de mercado, falta de investimentos). Estima-se que no Nordeste tenham sido já instalados umas 2.000 unidades de osmose inversa. Infelizmente, boa parte está hoje inoperante, por falta de operação adequada ou de manutenção.

O impacto positivo que traz a disponibilidade de água potável numa região castigada por problemas crônicos de falta de água não pode ser deixar de ser realçado, tanto em termos de saúde pública, quanto em termos da economia local. É evidente que todos os esforços no sentido de aumentar a oferta de água potável e de criar condições permanentes para manter o acesso das populações afetadas são urgentes.

Tendo em vista a carência de água potável nestas regiões, o Laboratório de Referência em Dessalinização (Labdes) do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande, com o apoio da Secretaria de Recursos Hídricos do Ministério do Meio Ambiente e CNPq, vem desenvolvendo pesquisas e projetos sobre processos de dessalinização de águas salinas e salobras desde o final da década de 80.

O pré-tratamento da água *in natura* protege os elementos de membranas contra vários fenômenos de incrustações de ordem inorgânicas e orgânicas. Esses tipos de incrustações denominados como “fouling”, consistem na formação de depósitos indesejáveis na superfície da membrana. O “fouling” pode ser proveniente de sais dissolvidos, sólidos suspensos e microorganismos na superfície da membrana, através dos seguintes processos: Depósitos

inorgânicos (“scaling”); Adsorção de moléculas orgânicas (“fouling” orgânico); Deposição de substâncias coloidais; Desenvolvimento e adesão de microorganismos (“biofouling”).

Os efeitos acumulativos de membranas “bio-incrustadas” são os seguintes: aumento nos custos de limpeza e manutenção dos sistemas de dessalinização; notável queda de qualidade do permeado produzido (a necessidade de pós-tratamento) e significativa redução da vida útil dos elementos de membranas.

Os depósitos inorgânicos são oriundos de sais dissolvidos na superfície da membrana, diminuindo o fluxo do permeado durante o processo de osmose inversa. Em geral são praticados os usos de produtos antincrustantes a base de hexametáfosfato de sódio (SHMP) para inibir a formação de sais na superfície da membrana. Além dos filtros de cartuchos, os pré-tratamentos podem ser através da adição de soluções ácidas ou básicas, isso depende da composição físico-química da água bruta. A determinação do pré-tratamento da água parte da análise físico-química que também inclui o índice de densidade de sedimentos SDI e a qualidade do concentrado.

2.0 Objetivo

Estudar os tipos de pré-tratamentos adequados a cada amostra de água coletada no campo, através de análises físico-químicas destas águas, monitoração do sistema de dessalinização do Campo (SDC) e manutenção preventiva deste sistema.

3.0 Fundamentação Teórico

3.1 Processo de Separação com Membranas

O desenvolvimento dos processos de separação por membranas e suas aplicações industriais podem ser considerados relativamente recentes, principalmente levando-se em conta que fenômenos envolvendo membranas vêm sendo estudados a mais de um século (Habert et al., 1997).

Membranas filtrantes constituem, atualmente, a principal inovação 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 (Schneider & Tsutiya, 2001).

Os processos que utilizam tecnologia de membranas e gradiente de pressão como força motriz são conhecidos como: microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose inversa (OI).

Embora recentes, os processos de separação com membranas têm encontrado um rápido desenvolvimento. A principal característica desses processos está relacionada ao fato da maioria das separações ocorrerem sem mudança de fase, sendo, portanto, energeticamente mais vantajosos, quando comparadas com os processos térmicos tradicionais. Além disso, são processos que apresentam um baixo custo energético e um produto final de alta qualidade (Habert et al., 1997).

Na Figura 1 são apresentadas as principais características dos processos com membranas que utilizam a diferença de pressão como força motriz.

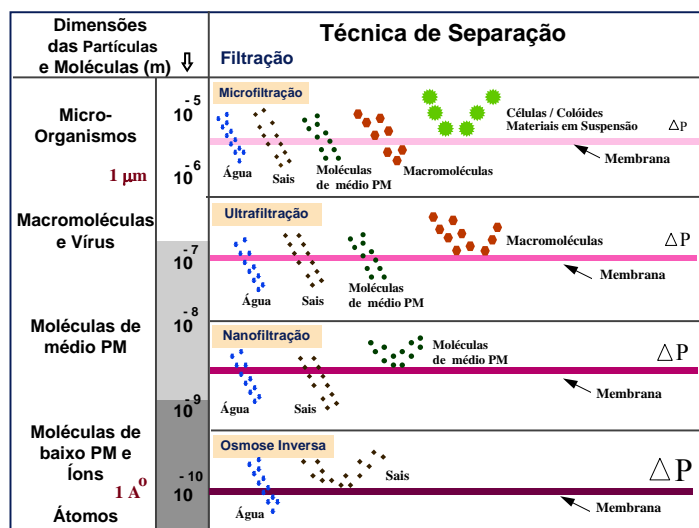


Figura 1: Principais características das técnicas de separação com membranas que utilizam diferença de pressão como força motriz (Habert et al., 1997).

3.2 Osmose Inversa

A OI é o nível final de processos de filtração disponíveis. A membrana de OI atua como uma barreira a todos os sais dissolvidos e moléculas inorgânicas com peso molecular acima de 100. As moléculas de água, por outro lado, passam livremente através da membrana (Dow Latin America, 1996).

Este processo pode remover sais, dureza, microorganismos em geral e patogênicos em particular, turbidez, compostos orgânicos, pesticidas e a maioria dos contaminantes presentes na água. Mas muitos dos gases dissolvidos tais como hidrogênio sulfídrico e dióxido de carbono, irão passar através da membrana de osmose inversa (Taylor & Jacobs, 1996).

O processo de osmose inversa apresenta vantagens em relação aos processos tradicionais de dessalinização, tais como: baixo consumo de energia, baixo custo de investimento, pode alcançar até 75% de rendimento de água purificada, possui 99% de redução de sais minerais, bactérias e

partículas, é um processo contínuo que necessita de pequenos espaços e possui facilidade na construção, operação e manutenção, devido à natureza modular do processo.

3.3 Princípio Operacional da Osmose Inversa

Quando dois compartimentos, cada um contendo águas com salinidades diferentes, são separados por uma membrana semipermeável, uma quantidade de água relativamente pura sairá da solução diluída através da membrana para a solução mais concentrada, até que ocorra a formação de uma pressão no compartimento onde a concentração é mais elevada para este fluxo. Este fenômeno é denominado de *Osmose*. Quanto maior for a diferença da concentração inicial entre os dois compartimentos, maior será a pressão criada que interromperá o transporte osmótico da água através da membrana. Esta é a *Pressão Osmótica*.

Numa osmose normal a solução menos concentrada perde o seu volume, enquanto a mais concentrada ganha. Aplicando uma pressão superior à pressão osmótica, é possível reverter a direção do fluxo. A solução mais concentrada perde então seu volume, aumentando sua concentração. Simultaneamente, a solução diluída aumenta o seu volume, pois ela recebe água pura através da membrana. Este processo é chamado de *Osmose Inversa* (Manual de Dessalinização para Planejadores, 1972).

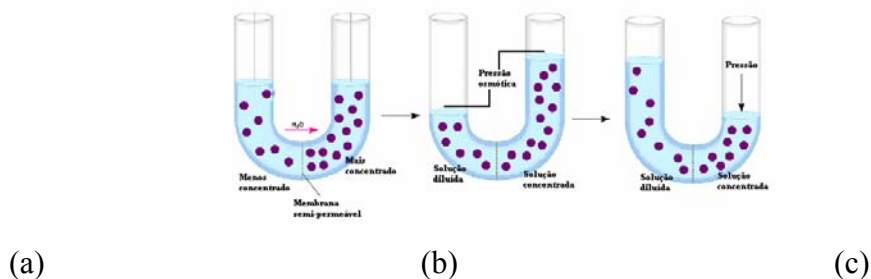


Figura 2: Representação do processo de osmose inversa

Onde:

- (a) São duas soluções uma salina e outra sem sal, separadas por uma membrana semipermeável.
- (b) A água pura dilui a salgada até que seja atingindo o equilíbrio osmótico.
- (c) A aplicação de uma pressão superior à diferença de pressão hidrostática inverte o processo (Kerr et al., 2001).

3.4 Precipitação de Solutos em Superfícies de Membranas

A precipitação de sais em superfícies de membranas é um problema que ocorre com frequência na OI e NF, onde fatores como altos índices de rejeição de sais (até 99%), a concentração-polarização e a remoção de até 90% da água da solução aumentam a concentração de sais no concentrado e na superfície da membrana. Se a quantidade de sais na zona de concentração-polarização ultrapassar o limite de solubilidade os sais poderão precipitar na membrana. O controle dos processos de precipitação de sais é um dos principais condicionantes de projetos em sistemas de osmose inversa. Todo projeto de OI e NF deve ser precedido de uma análise dos componentes da água de alimentação que podem precipitar na superfície da membrana. A forma mais eficaz, para evitar a precipitação de sais, é a operação da membrana dentro de limites, que impedem que as concentrações de sais retidos atinjam valores próximos aos limites de solubilidade.

Na prática, os compostos mais críticos para membranas são: sílica, sulfato de cálcio, sulfato de estrôncio e sulfato de bário. Um sal precipita quando a concentração dos seus componentes ultrapassa o valor limite correspondente ao produto de solubilidade (K_s). Em unidades de OI e NF, o maior risco de precipitação de sais ocorre nos elementos de membranas instalados na saída dos vasos de pressão localizados no último banco do sistema.

3.5 Incrustações (*Fouling*)

A formação indesejável de depósitos nas superfícies de membranas é chamada de *Fouling*. Isto ocorre quando os sólidos rejeitados não são transportados da superfície da membrana para a corrente do fluxo de alimentação. Em consequência, os sais dissolvidos, os sólidos suspensos e os microorganismos acumulam na superfície da membrana. Em operações de OI, este processo tende a diminuir o desempenho dos elementos de membranas. Podem ser classificadas por quatro categorias: depósitos inorgânicos (*scaling*), colóides (*fouling* coloidal), sólidos em suspensão e material biológico (*biofouling*) (Amjad, 1992).

O *fouling* é consequência de um conjunto de fenômenos, capaz de provocar uma queda no fluxo do permeado e/ou o aumento da passagem de sais com o tempo, quando se trabalha com uma solução ou suspensão (Ghafour, 2002; Habert et al., 1997). A extensão do fenômeno do *fouling* depende da natureza da solução problema como também, e de maneira acentuada, das condições de operação do sistema de membrana (Habert et al., 1997).

A concentração de polarização também é um outro fator que causa a diminuição do fluxo com o aumento da pressão osmótica da superfície da membrana e efeitos adicionais ao *fouling*. A concentração de polarização se refere ao desenvolvimento do gradiente de concentração

que se agrega à superfície da membrana. Este fato induz uma diferente taxa de transporte dos vários componentes dissolvidos na água através da membrana.

3.6 Depósitos Inorgânicos (*Scalings*)

Os depósitos inorgânicos (*scalings*) são sais normalmente solúveis em água, que precipitam e se cristalizam na superfície e dentro dos poros das membranas (Gwon et al., 2003). Isso é facilmente entendido quando verificamos que na área externa próxima à membrana a concentração de sais é bem superior à concentração do sal na água de entrada, podendo atingir o limite de solubilidade e assim precipitando (Sousa, 2003; Ghafour, 2002).

As incrustações podem aumentar os custos de operação da planta e comprometer a produção de água. Pode levar a uma troca prematura dos elementos de membrana. Incrustações inorgânicas são controladas geralmente com uso de um inibidor de incrustação, incrustação de material coloidal pode ser controlada com pré-tratamento, como por exemplo o uso de membranas de UF (Vrouwenvelder & Kooij, 2002).

3.7 Pré-tratamento

As operações com membranas requerem alguma medida de pré-tratamento da água de alimentação do processo. O pré-tratamento mais simples envolve uma micro-filtragem e nenhuma adição química. Entretanto, quando uma água de superfície é tratada, o procedimento de pré-tratamento pode ser complexo incluindo o ajuste do pH, cloração, adição de coagulantes, sedimentação, clareamento, absorção em carvão ativado, adição de complexantes, filtração e uma avaliação final (Taylor & Jacobs, 1996).

Para uma maior vida útil dos elementos de membranas, é preciso conhecer as qualidades físico-químicas e bacteriológicas da água, dependendo apenas da primeira quando se refere a poços tubulares. Obtendo-se os valores dos indicadores de incrustações, é possível determinar qual o melhor tratamento da água de alimentação.

O projeto apropriado para tratamento da água de alimentação dependerá da fonte de água de alimentação, composição da água de alimentação e aplicação. O tipo e a extensão do pré-tratamento dependerá da fonte de água de alimentação. Uma fonte de água é considerada boa quando o índice de densidade de sedimentos (IDS) baixo (tipicamente <2), e uma baixa contagem de bactérias. Estas águas requerem tipicamente um sistema de pré-tratamento simples como a adição de ácido, adição de inibidor e um filtro de cartucho de 5µm. Águas superficiais são caracterizadas por um IDS elevado e por ter uma contagem de microrganismos elevada. O pré-

tratamento para este tipo de água é mais elaborado e requer etapas adicionais que incluem frequentemente a adição de polímeros, clarificação e filtração em filtros multimeios. Uma vez que a fonte de água de alimentação foi determinada, uma análise completa e exata da água de ser feita, sendo de grande importância para o projeto do pré-tratamento apropriado e do sistema de osmose inversa (FilmTec, 1995).

Um pré-tratamento ideal é projetado para causar um mínimo ou nenhum fouling na membrana a um menor custo possível; aumentando, assim, a taxa de produção de água potável, bem como a diminuição da passagem de sais e um aumento na vida útil da membrana [Alawadhi, 1997]. Os principais fatores que devem ser considerados para implantar um sistema de pré-tratamento são: Configuração do módulo; material no qual é constituída a membrana, qualidade da água de alimentação, taxa de recuperação e qualidade da água do permeado

3.8 Controle de incrustação

A incrustação (*Scaling*) de uma membrana de OI pode ocorrer quando os sais solúveis são concentrados dentro do elemento acima do seu limite de solubilidade. Por exemplo, se um sistema de OI operar com uma recuperação de 50%, a concentração do concentrado será o dobro da concentração na corrente da alimentação. Assim, com o aumento da recuperação, o risco de incrustação aumenta. Portanto, deve-se ter o cuidado para não exceder os limites de solubilidade dos sais poucos solúveis, pois a precipitação e a incrustação podem ocorrer.

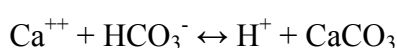
Em um sistema de OI os sais solúveis mais comumente encontrados são CaSO_4 , CaCO_3 e a sílica. Outros sais que geram um problema potencial de incrustação são CaF_2 , BaSO_4 e SrSO_4 .

Para evitar a incrustação do carbonato de cálcio, CaCO_3 , este deve se dissolver na corrente do concentrado preferivelmente do que precipitar. Esta tendência pode ser expressa pelo índice de saturação de Langelier (ISL) para águas salobras. No pH de saturação (pH_s), a água está em equilíbrio com o CaCO_3 (FilmTec, 1995).

3.9 Pré-tratamento convencional

3.9.1 Adição de Ácido

A maior parte das águas naturais de superfície e as águas terrestres são saturadas com relação ao CaCO_3 . A solubilidade do CaCO_3 depende do pH, como pode ser visto na equação seguinte:



Por adição do H^+ do ácido, o equilíbrio pode ser deslocado para o lado esquerdo a fim de manter o carbonato do cálcio dissolvido. O ácido sulfúrico é mais fácil de ser controlado e em muitos países mais disponível do que o ácido clorídrico, mas por outro lado, é adicionado sulfato na alimentação. Isto pode ser crítico com relação à incrustação do sulfato (FilmTec, 1995).

3.9.2 Adição de Inibidor de Incrustação

Os antincrustantes podem ser usados para controlar a incrustação do carbonato, do sulfato e do fluoreto de cálcio. O inibidor mais usado é o hexametáfosfato de sódio (SHMP). Deve-se ter o cuidado de se evitar a hidrólise de SHMP no tanque de dosagem da alimentação. A hidrólise diminui não somente a eficiência da inibição de incrustantes, mas cria também um risco de incrustação do fosfato de cálcio.

Os inibidores orgânicos poliméricos de incrustação são mais eficazes do que o SHMP. Entretanto, reações de precipitação podem ocorrer com polieletrólitos catiônico ou cátions multivalentes, por exemplo, alumínio ou ferro. Os produtos resultantes da resina são muito difíceis de remover dos elementos da membrana.

As taxas de dosagem devem satisfazer a recomendação dos fabricantes de anti-incrustantes, uma superdosagem deve ser evitada. Em plantas de OI operando com água do mar com STD na faixa de 35.000 mg/l, a incrustação não é um problema como em plantas de águas de poço, pois a recuperação das plantas da água do mar é limitada pela pressão osmótica do concentrado a 30-45%.

3.9.3 Filtração Multimeios (Filtro de Leito)

A remoção de partículas em suspensão e colóides (*Fouling*) em filtros multimeios está baseada na deposição na superfície dos grãos do filtro, quando a água passa através das camadas dos grãos do filtro. A qualidade do filtrado depende do tamanho dos grãos e da geometria dos sólidos suspensos e dos grãos do filtro, da análise da água e dos parâmetros operacionais.

3.9.4 Filtro de Cartucho

Um pré-tratamento mínimo requerido para sistemas de OI é um filtro de cartucho com um tamanho de poro menor que $10\mu m$. É um dispositivo de segurança para proteger as membranas e a bomba de alta pressão das partículas em suspensão. Geralmente é a última etapa de uma seqüência de pré-tratamento. É recomendado usar filtros com $5\mu m$ de porosidade ou menor. O filtro

deve ser construído sob medida para uma taxa de fluxo de acordo com a recomendada pelo fabricante e ser substituído antes que a pressão aumente além limite permitido, a leitura da variação de pressão é um indicio da extensão de sujeira na água.

3.10 Indicadores de Incrustações

3.10.1 Índice de Saturação de Langelier (ISL)

O Índice de Saturação de Langelier (ISL; também chamado de Índice de Estabilidade de Langelier) é um número usado para prever a estabilidade do carbonato de cálcio da água, isto é, se uma água irá precipitar, dissolver ou ficar em equilíbrio com o carbonato de cálcio (Edstrom, 2003).

A avaliação do risco de formação de precipitados de carbonato de cálcio em águas salobras com STD até 10.000 mg/L é avaliado através do valor do ISL, enquanto que, o Índice de Estabilidade de Stiff e Davis (S&DSI) é utilizado em água de salinidades altas (FilmTec, 1995; Schneider & Tsutiya, 2001). Os dois índices são calculados pela mesma fórmula (Equação 1), mas diferem no fator de correção da salinidade, que no ISL é baseado no STD da solução e no S&DSI, no poder iônico da solução (Schneider & Tsutiya, 2001).

$$ISL, S \text{ \& } DSI = pH_c - pH_s \quad (1)$$

onde ISL: Índice de Saturação de Langelier; S&DSI: Índice de Estabilidade de Stiff e Davis; pH_c : pH do concentrado; pH_s : pH no qual o concentrado fica saturado com $CaCO_3$.

O pH_s é calculado pelas seguintes equações (Schneider & Tsutiya, 2001):

$$ISL: pH_s = pCa + palc + C(STD) \quad (2)$$

$$S \text{ \& } DSI: pH_s = pCa + palc + K(I) \quad (3)$$

onde pCa e $palc$ são os logaritmos negativos da concentração de Ca^{+2} e da alcalinidade (na forma de $CaCO_3$), respectivamente. O fator de correção C é calculado a partir da concentração de sólidos totais dissolvidos (STD), enquanto que o fator de correção K é determinado a partir da força iônica I da solução. Os fatores de correção C e K podem ser obtidos a partir de gráficos com base no cálculo das concentrações dos componentes no concentrado ou na superfície da membrana.

Valores de ISL negativos indicam que não há potencial de precipitação de carbonato de cálcio. Se o ISL for positivo, indica que a precipitação do carbonato de cálcio poderá ocorrer, para

valores de índice cada vez mais positivos, o potencial de precipitação aumenta (Ning & Netwig, 2002; Edstrom, 2003).

Para valores de ISL iguais à zero, não haverá potencial de precipitação do carbonato de cálcio, mas pequenas variações de concentração e temperatura podem mudar o índice (Edstrom, 2003).

Para evitar a precipitação de carbonato de cálcio, os índices ISL e S&DSI da água de alimentação devem ser negativos. Quando é feita correção de pH ou adição de anti-incrustante, os valores de ISL e S&DSI devem ficar abaixo dos valores estipulados para esses tratamentos, geralmente entre 1 e 1,5 (Schneider & Tsutiya, 2001). O ISL e o S&DSI são usados por alguns fabricantes de membranas de OI para auxiliar o uso de produtos químicos no pré-tratamento da água de alimentação (Ning & Netwig, 2002).

3.10.2 Índices de Incrustações

Uma consideração importante no projeto e na operação de sistemas de membranas é a tendência da água de alimentação de bloquear as membranas, sendo um dos parâmetros de projeto mais importantes. O desempenho dos sistemas de membranas, custo de operação, exigências de pré-tratamento, frequência de limpezas são afetados por estes bloqueios na membrana (Taylor & Jacobs, 1996).

O IDS é calculado a partir de três intervalos de tempo: o primeiro intervalo (t_i) é o tempo necessário para a coleta dos primeiros 500 ml de permeado, o segundo intervalo (t_f) é o tempo necessário para a coleta dos últimos 500 ml de permeado. O terceiro intervalo de tempo (t_t) varia de 5, 10 ou 15 minutos e é o intervalo de tempo entre o término da coleta dos primeiros 500 ml de permeado e o início da coleta dos segundos 500 ml de permeado. O tempo padrão para o t_t é 15 minutos. O IDS é determinado através da Equação 9 (Taylor & Jacobs, 1996):

$$IDS = \frac{100 \left[1 - \left(\frac{t_i}{t_f} \right) \right]}{t_t} \quad (4)$$

O teste de IDS é um teste de *fouling* por filtração frontal. Esse teste não reflete com exatidão as condições de acúmulo de material em sistemas operados por filtração tangencial, ou em sistemas de filtração frontal com retrolavagem periódica da membrana. (Schneider & Tsutiya, 2001).

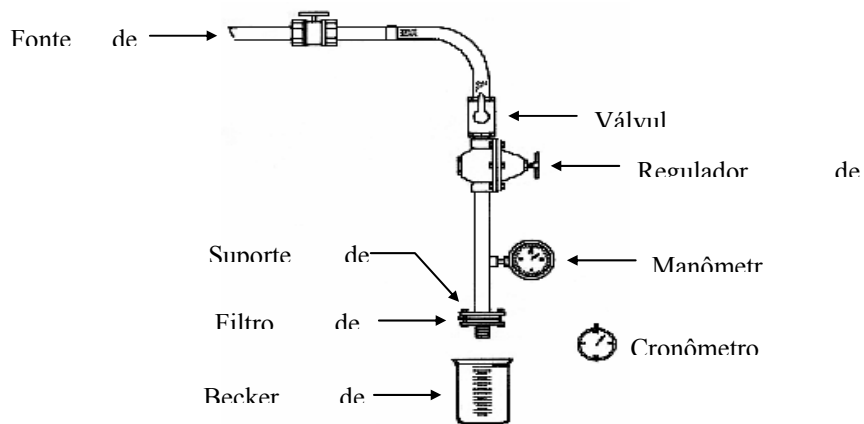


Figura 3: Equipamento básico para medição do IDS (Amjad, 1992).

Em geral, os sistemas de OI que operam com fontes de água de alimentação com valores de IDS menores que 1 funcionado por anos sem problemas, aqueles que operam com fontes que tem valores de IDS menores que 3 funcionam por meses sem necessidade da limpeza da membrana. Entretanto, os sistemas que operam em fontes de água com valores de IDS entre 3 e 5 são limpos regularmente e considerados sistemas problemáticos. Valores de IDS acima de 5 não são aceitáveis (Amjad, 1992).

3.11 Principais Parâmetros do Processo de Osmose Inversa

3.11.1 Fluxo do Permeado

O fluxo do permeado através de uma membrana de osmose inversa é proporcional à variação de pressão osmótica e hidráulica e pode ser representado pela Equação 19 (Taylor & Jacobs, 1996; Dow Latin America, 1996):

$$J_p = K_a (\Delta P - \Delta \pi) = \frac{Q_p}{A} \quad (5)$$

onde: J_p : fluxo do permeado ($l/m^2 h$); K_a : coeficiente de permeação de água ($l/m^2 h \text{ kgf/cm}^2$); ΔP : gradiente de pressão hidráulica (kgf/cm^2); $\Delta \pi$: gradiente de pressão osmótica (kgf/cm^2); Q_p : vazão de permeado e A : área ativa da membrana (m^2).

3.11.2 Pressão Osmótica

A pressão osmótica depende da concentração de solutos, temperatura da solução e do tipo de íons presentes. Quanto maior for a concentração da solução, maior será o valor da pressão osmótica dessa solução. Para soluções diluídas, a pressão osmótica pode ser calculada pela equação de Van't Hoff (Equação 6) (Brandt et al., 1993).

$$\pi = \sum v_i c_i RT \quad (6)$$

onde: π : pressão osmótica da solução iônica (kgf/cm²); v_i : n° de íons formados na dissociação do soluto; c_i : concentração molar do soluto (mol/l); R: constante dos gases ideais (kgf.l/cm²mol.K) e T: temperatura absoluta (K).

3.11.3 Recuperação

A recuperação do sistema refere-se à percentagem da água de alimentação convertida em água permeada e depende de vários fatores, como a formação de incrustação na superfície das membranas, a pressão osmótica e a qualidade da água de alimentação do sistema.

A recuperação de um sistema pode ser definida de acordo com a Equação 7 (Taylor & Jacobs, 1996).

$$r(\%) = \frac{Q_p}{Q_a} \times 100 = \frac{Q_p}{Q_p + Q_c} \times 100 \quad (7)$$

onde: r: recuperação do sistema (%); Q_p : vazão de permeado (m³/h); Q_a : vazão de alimentação (m³/h) e Q_c : vazão do concentrado (m³/h).

Combinando as Equações 6 e 7, obtém-se a seguinte equação:

$$r = \frac{K_a A (\Delta P - \Delta \pi)}{Q_a} \quad (8)$$

A equação acima mostra a relação da recuperação do sistema de membrana em função dos gradientes de pressão (osmótica e hidráulica).

3.11.4 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 (Silveira, 1999) e pode ser definida como:

$$TRS(\%) = \frac{C_a - C_p}{C_a} \times 100 = \left(1 - \frac{C_p}{C_a}\right) \times 100 \quad (9)$$

onde: TRS: taxa de rejeição de sais (%), C_a : concentração de alimentação (mg/l) e C_p : concentração do permeado (mg/l).

4.0 Materiais e Métodos

O sistema de dessalinização estudado encontra-se localizado no Sítio do Marinho no município de Campina Grande na Paraíba. A batelada foi realizada com a utilização de dois tipos diferentes de pré-tratamento, *Flocon 100* e *Ácido Clorídrico com pH=3*, antes de realizar os estudos foi efetuado a limpeza das membranas e troca dos filtros multimeios. A batelada foi prosseguida com o monitoramento do equipamento de OI, onde coletou-se amostras de água de alimentação, do permeado e concentrado, para futuras análises físico-químicas.

4.1 Sistema de Dessalinização Estudado

O sistema de dessalinização, representado pela Figura 4.1, estudado é composto por três elementos de membranas ligados em série, capaz de operar com água de alimentação de até 10.000 ppm (parte por milhão), com capacidade máxima de produção de 60L/min.



Figura 4 – Sistema de dessalinização estudado

4.2 Operação do sistema de dessalinização em campo

Com o objetivo de operar com uma água “*in natura*” de um poço tubular, foram coletadas várias amostras de águas do poço do Sítio do Marinho, localizado no município de Campina Grande do estado da Paraíba, objetivando em traçar ações para o pré-tratamento conforme os dados das análises físico-química, IDS e ILS.

O sistema de dessalinização operou sob as seguintes condições:

- Faixa de pressão de operação: 11 kgf/cm²;
- Sem e com pré-tratamento químico.

Os dados experimentais dos pré-tratamentos foram comparados com o propósito de avaliar os seus efeitos.

Durante 1 h de experimento, foram coletadas amostras de 200 ml do permeado e do concentrado em intervalos de tempo de 10 minutos. As variáveis de medidas monitoradas durante cada experimento foram as seguintes:

- Condutividade elétrica e pH da alimentação, do permeado e do concentrado;
- Pressões de entrada e saída dos filtros de cartucho e dos elementos de membranas; Vazões do permeado e do concentrado.

5.0 Resultados

Com os dados obtidos com o dessalinizador de campo, verifica-se que na água em estudo apresentava o índice de densidade de sedimentos de aproximadamente 4,68 min, que pode-se concluir que o sistema pode promover processos de incrustação nas membranas irreparáveis, sendo portanto necessário efetuar um pré-tratamento para reduzir as incrustações.

Através dos resultados obtidos em campo, percebe-se uma diferença considerável com relação aos dois diferentes tipos de pré-tratamentos utilizados que foram avaliados, o *flocon 100* e o *ácido clorídrico (pH=3)*, como observa-se nas Figura 5.1 e 5.2, onde mostra o desempenho dos pré-tratamentos utilizados com relação ao Índice de Saturação de Langelier (ISL), tanto para o permeado quanto para o concentrado, respectivamente, observa que com aplicação do ácido clorídrico obteve-se melhor resultado tanto para o permeado quanto para o concentrado, o que não obteve-se com o anti-incrustante *flocon 100*, salientando que o mesmo trata-se de um produto importado de elevado custo a base de hexafosfato de sódio e utilizando em dosagem elevadas pode promover futuras formações de biofiling diminuindo a vida útil das membranas, além de aumentar o teor de fosfato que podem promover incrustações, além de provocar danos ao meio ambiente por meio de proliferação de microorganismos tais como algas.

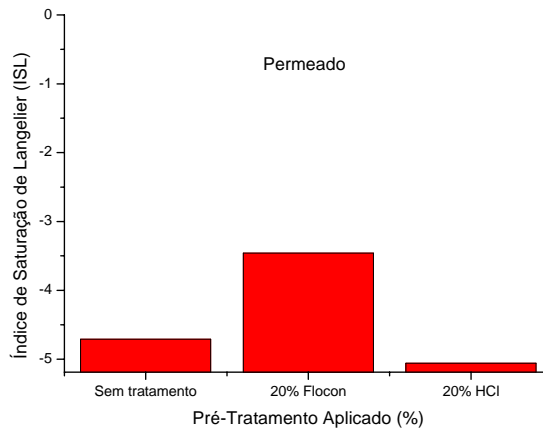


Figura 5.1 – Variação do ISL para o permeado

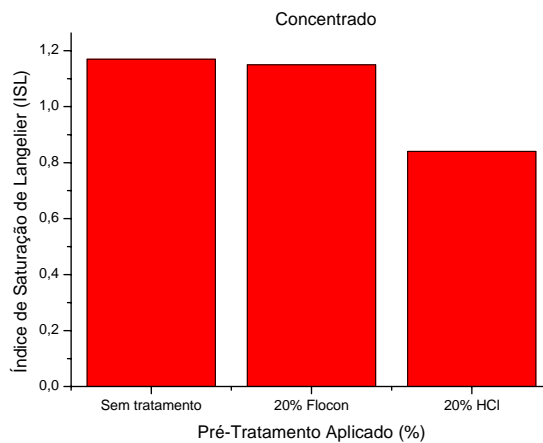


Figura 5.2 – Variação do ISL para o concentrado

Objetivando obter o melhor custo-benefício, continuou-se o estudo apenas com o ácido clorídrico, já que o mesmo apresentou uma melhor performance, logo foi aumentado a dosagem de ácido clorídrico de 20% para 30% a fim de analisar o comportamento do Índice de Saturação de Langelier (ISL).

As Figuras 5.3 e 5.4 mostram variação do ISL com diferentes dosagens de ácido clorídrico. observou-se uma redução nos valores do ISL do permeado e concentrado com o aumento da dosagem de HCl. Com isso, verifica-se na figura 5.3, que a água permeada não possui capacidade de precipitação de sais de carbonato de cálcio. No entanto, recomenda-se um pós tratamento no permeado para diminuir a acidez, minimizando sua capacidade corrosiva. Com relação a figura 5.4, verifica-se, mesmo com o aumento da dosagem de HCl poderá ocorrer precipitação de CaCO_3 nas superfícies das membranas, necessitando-se um aumento de dosagem de HCl na água de alimentação.

Salientando, que foram obtidos resultados satisfatórios na água do permeado sem efetuar o pré-tratamento. Porém, a intenção deste estudo é obter uma água dessalinizada de boa qualidade e aumentar a vida útil das membranas com um menor custo de pré-tratamento, e isso foi atingindo com a aplicação da dosagem de 30% de HCl.

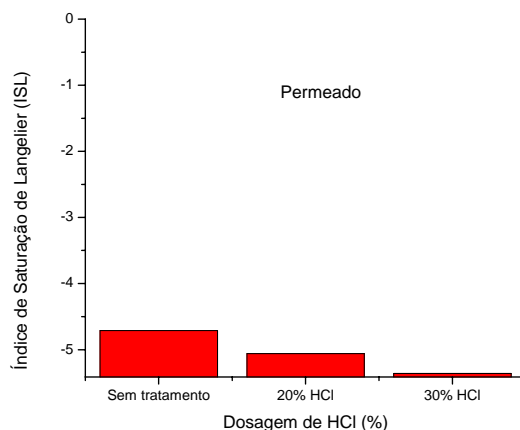


Figura 5.3 - Variação do ISL para o permeado

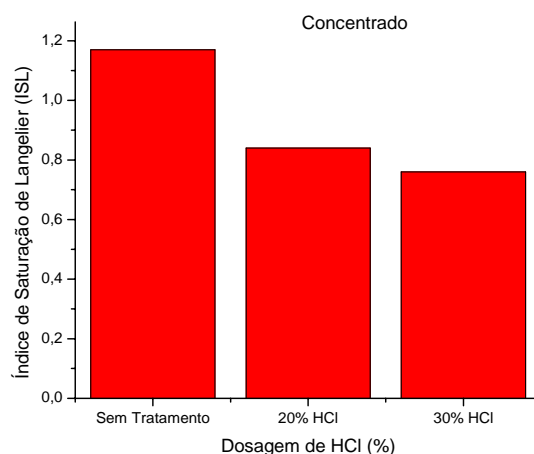


Figura 5.4 - Variação do ISL para o concentrado

Por meio das análises físico-químicas, verificou-se que com a implementação do pré-tratamento com HCl ocorreu uma pequena alteração nos valores dos sólidos totais dissolvidos (TDS), como é mostrado nas Figuras 5.5 e 5.6,

A Figura 5.5, trata-se dos resultados do permeado onde se percebe que o melhor rendimento na redução dos sais em questão foi com o pré-tratamento na dosagem de 30% de ácido clorídrico. Esclarecendo, que na dosagem de 20% não se obteve resultados semelhantes, em virtude de possíveis incrustações já existentes nas membranas havendo com isso uma competição dos íons presentes nas mesmas e na água, diminuindo assim o desempenho do HCl no acréscimo dos referidos sais no permeado.

A Figura 5.6 apresenta o desempenho dos sólidos totais dissolvidos no concentrado. Verificou-se pequena variação nas concentrações dos já citados sais, devido a água do concentrado ainda possuir capacidade de precipitações de sais, mesmo com o aumento da aplicação de HCl .

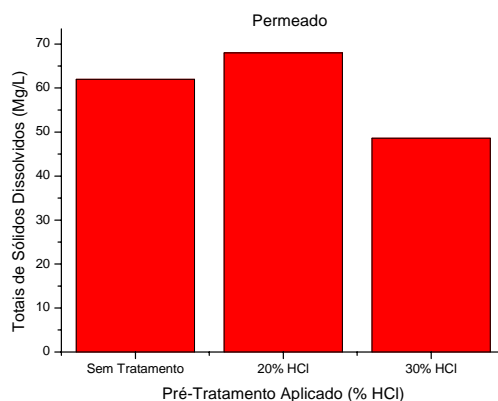


Figura 5.5 - Variação do TDS para o permeado

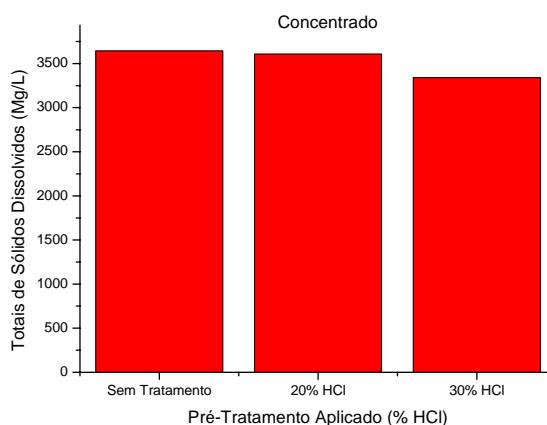


Figura 5.6 - Variação do TDS para o concentrado

6.0 Conclusões

- Para os sistemas que apresentam elevados teores de sais faz-se necessário utilizar o Pré-tratamento;
- Através do ISL de 4,8min confirmou-se a necessidade de pré-tratamento para um maior aumento da vida útil das membranas.
- Aplicação de *flocon 100* no Pré-tratamento promove uma redução razoável nos sais presente na água em estudo. No entanto, o seu elevado custo e sua composição química a base de fosfato, não o torna o mais adequado para o referido sistema.

- A utilização de HCl no pré-tratamento apresentou resultados satisfatórios na redução nos valores do ISL, como mostraram os gráficos. Podendo-se concluir que com a dosagem de 30% de Ácido Clorídrico (pH=3) foi a mais eficaz entre as dosagens estudadas obtendo assim água de boa qualidade e com um maior tempo de uso das membranas.
- Através deste estudo faz-se necessário realizar outros experimentos com dosagens maiores de HCl, com a finalidade de promover uma maior redução no valor do ISL do concentrado, o qual deverá atingir valores que impeçam possíveis precipitações nas superfícies da membranas.

7.0 Referências Bibliográficas

AMJAD, Z., Reverse Osmosis: Membrane Technology, Water Chemistry & Industrial Applications, Van Nostrand-Reinold, New York, 1993.

BRANDT, D. C., LEITNER, G. F. AND LEITNER, W. E., Reverse osmosis membrane states of the art. In Zahid Amjad (ed), Reverse Osmosis: Membrane Technology, Water Chemistry & Industrial Applications, Van Nostrand-Reinold, New York, 1993.

DOW LATIN AMERICA, A tecnologia de membrana de osmose reversa. Boletim Técnico, 1996. FILMTEC, Tech Manual, Dow Chemical Company, 1995.

GHAFOUR, E.E.A., Enhancing RO system performance utilizing antiscalants, Desalination vol.153, pp.149-153, 2002.

HABERT, A. C., BORGES, C. P. E NÓBREGA, R., Processos de separação com membranas. Escola Piloto em Engenharia Química, COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia Química, 1997.

KOO, T., LEE, Y.J., SHEIKHOLESLAMI, R. Silica Fouling and Cleaning of Reverse Osmosis Membranes, Desalination 139, p. 43-56, 2001.

KERR, T.J., and McHALE, B.B., Applications in general microbiology: A laboratory manual. 6th ed, Hunter Textbooks Inc., Winston-Salem, 2001.

MANUAL DE DESSALINIZAÇÃO PARA PLANEJADORES, Secretaria de Recuperação, Engenharia e Centro de Pesquisas de Denver, Colorado, EUA. Primeira Edição, 1972.

SCHNEIDER, R. P., & TSUTIYA, M. T., Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reuso. ABES, 1^a ed., São Paulo, 2001.

SILVEIRA, M. C., Avaliação de sistema híbrido para dessalinização de águas salinas pelo processo de osmose inversa. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFPB, Campina Grande – PB, 1999.

SOUSA, S.E.H., Monitoramento de desempenho do sistema de dessalinização via osmose inversa da Cia. De Tecidos Norte de Minas – COTEMINAS – CG. Relatório de defesa de estágio do curso de Engenharia Química da UFPB, 2001.

TAYLOR, J. S. & JACOBS, E.P., Reverse osmosis and nanofiltration. In: Joel Mallevalle et al (eds), Water Treatment Membrane Processes, pp. 9.1-9.70. McGraw Hill, New York, 1996.