

# DESSALINIZAÇÃO COMO FONTE ALTERNATIVA DE ÁGUA POTÁVEL

---

**Luiz Faustino Souza**

Licenciado em Física – UFPB; Mestre em Engenharia Mecânica – UFPB  
Professor da disciplina de Física do Ensino Médio do CEFET-RR.

## RESUMO

No presente artigo, ressaltamos a importância da utilização das técnicas de dessalinização nas localidades onde há escassez de água potável. Fazemos ainda um breve histórico do desenvolvimento da tecnologia de dessalinização e descrevemos os princípios básicos de funcionamento dos principais tipos de dessalinizadores.

## PALAVRAS-CHAVE

*Dessalinização. Processos de dessalinização. Água potável.*

## ABSTRACT

*In the present article, we emphasized the importance of the use of the desalination techniques in the places where there is shortage of drinking water. We still make a short historical of the development of the desalination technology and we described the basic beginnings of the main operation desalination types.*

## KEYWORDS

*Desalination. Desalination processes. Drinking water.*

## INTRODUÇÃO

A habilidade de tratar a água salgada, de forma a torná-la apta para o consumo, tem sido procurada pela humanidade por longo tempo. Mais de três quartos da superfície da terra são cobertos por água salgada. Embora essa água seja importante para alguns meios de transportes e para a pesca, ela é muito salgada para manter a vida humana ou para as atividades do campo.

Fatores tais como clima, características geológicas, tipos de solos e distância em relação ao mar vão determinar a salinidade das águas naturais.

Em regiões áridas ou semi-áridas é comum a salinização das águas, devido à própria constituição natural das mesmas. O manejo inadequado do solo também pode causar um aumento da salinidade. Áreas irrigadas tornam-se improdutivas, devido à má qualidade das águas de irrigação. Para água de irrigação, os limites de salinidade são determinados em função dos tipos de cultura, solo e clima. A irrigação com águas contendo sais dissolvidos em concentrações superiores a 2 kg/m<sup>3</sup> causam quedas consideráveis na produção agrícola.

Para as águas de uso industrial, a salinidade tolerada depende do tipo de produto fabricado. As águas usadas na fabricação de produtos têxteis, químicos, papel e alimentos, por exemplo, pedem baixa salinidade.

As águas contendo sais dissolvidos com concentração igual ou acima de 1 kg/m<sup>3</sup> são prejudiciais à saúde e inadequadas para o abastecimento humano.

Muitos países no Oriente Médio descobriram que a solução disponível para o problema da escassez de água doce era a dessalinização da água do mar ou salobra. No final de 1991, tinham sido instalados em todo o mundo, um total de 8.886 unidades de dessalinização com capacidade total de 15.562 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/dia. A proporção maior de capacidade está instalada na Arábia Saudita (24,4%), seguida dos EUA (15,2%), Os Emirados Árabes (10,6%) e Kuwait (9,1%).

No Brasil, o emprego da dessalinização de água ainda é pouco divulgado, embora no Nordeste seja aplicado o processo de osmose reversa para dessalinização de águas salobras oriundas de poços para o abastecimento de pequenas comunidades.

Hoje existem muitos métodos de dessalinização, cada um trabalhando em uma relação muito próxima com os outros para produzir água doce.

Os principais processos de dessalinização são:

### 1. Processos Térmicos

- Destilação Flash de Múltiplo Estágio (Multi-Stage Flash – MSF)
- Destilação de Múltiplo Efeito (Multi-effect distillation – MED)

- Destilação por Compressão de Vapor (Vapor Compression – VC)
  - Destilação Através de Energia Solar
  - Congelamento
2. Processos Através de Membranas
- Osmose Reversa
  - Eletrodíálise

## MARCO HISTÓRICO

A dessalinização é tão antiga quanto é o sistema solar. Parte da água salgada na terra é transformada em vapor através da energia solar, então se formam nuvens que se precipitam como água potável através das chuvas.

Os Gregos e Romanos utilizaram a dessalinização usando métodos primitivos. Desde o século XVI a dessalinização da água do mar começou a se tornar importante nas embarcações. A dessalinização em terra começou a partir do século XVIII e começou a desempenhar papel importante a partir do final dos anos 1940 e começo de 1950, especialmente em países onde a água potável é escassa como nos países do Golfo Árabe, USA, Ilhas do Caribe e algumas áreas da América do Norte.

Um marco no desenvolvimento da dessalinização ocorreu nos anos 40, durante a Segundo Guerra Mundial, quando vários estabelecimentos militares, em regiões áridas, necessitaram d'água para suprir suas tropas. A potencialidade que a dessalinização oferecia ficou evidenciada e trabalhos foram prosseguidos após a guerra em vários países. Um dos mais concentrados esforços foi levado a termo pelo Governo Americano, através da criação do Office of Saline Water (OSW), no princípio dos anos 50, e suas organizações sucessoras, como o Office of Water Research and Technology (OWRT). O Governo Americano financiou seu desenvolvimento por mais de 30 anos, despendendo cerca de 300 milhões de dólares no processo. Esse dinheiro ajudou a concretizar muito da investigação básica e desenvolvimento de diferentes tecnologias, para dessalinização das águas do mar e salobra.

No final da década de 60, unidades de até 8.000 metros cúbicos começaram a se instalar em várias partes do mundo. Essas unidades, a maioria de processos térmicos, foram usadas para dessalinizar a água do mar, porém nos anos 70 os processos de membranas comerciais começaram a surgir e ser empregados. Originalmente, o processo de destilação foi usado para dessalinização da água salobra. Essa técnica era dispendiosa e inibiu o seu desenvolvimento para o

tratamento da água. Quando a eletrodialise foi introduzida, permitiu dessalinizar água salobra muito mais economicamente e muitas aplicações foram então encontradas. Similarmente, a osmose reversa (RO) foi originalmente empregada para dessalinização de águas salobras, no entanto o processo provou ser adequado também para dessalinizar água do mar.

Nos anos 80, a tecnologia de dessalinização tornou-se um empreendimento totalmente comercial. A tecnologia beneficiou-se das experiências operacionais alcançadas com as unidades construídas e operadas nas décadas anteriores. Uma variedade de tecnologias de dessalinização foi desenvolvida através dos anos e, baseadas nos seus sucessos comerciais, podem ser classificadas como mais e menos importantes processos de dessalinização.

Nas últimas décadas, vários estudos têm sido realizados no sentido de melhorar o desempenho, segurança, viabilidade econômica, etc, das diversas técnicas de dessalinização existentes.

## **PRINCIPAIS PROCESSOS DE DESSALINIZAÇÃO E SEUS PRINCÍPIOS BÁSICOS DE FUNCIONAMENTO**

Um dispositivo de dessalinização essencialmente efetua a separação da água salina em dois fluxos: um com baixa concentração de sais dissolvidos (o fluxo de água doce, potável) e, o outro contendo os remanescentes sais dissolvidos (o concentrado ou fluxo de salmoura). O dispositivo requer energia para operar e pode usar variadas tecnologias para efetuar a separação.

### **1. PROCESSOS TÉRMICOS**

A maior parte da água dessalinizada no mundo é produzida com calor para destilar águas do mar e obter-se água doce. Para isso ser feito economicamente, numa estação de dessalinização o ponto de ebulição é controlado por ajuste da pressão da água que está sendo destilada.

Para reduzir significativamente a quantidade de energia necessária para a vaporização, o processo de destilação para dessalinização usualmente adota múltiplas ebulições em sucessivos estágios, cada qual operando a uma menor temperatura e pressão.

Diferentes arranjos caracterizam os tipos de processos de destilação. Os principais processos são: Flash de Múltiplo Estágio, Destilação através de Energia Solar, Ebulição de Efeito Múltiplo, Compressão de Vapor. Dentre estes, três tipos básicos são mais comercialmente usados: Flash de Múltiplos Estágios, Destilação

de Múltiplo Efeito e Compressão de Vapor.

Outro processo térmico de dessalinização é o Congelamento. Os métodos de congelamento são: Congelamento Direto e Congelamento Indireto.

### 1.1. PRINCIPIO BÁSICO DE FUNCIONAMENTO DO DESTILADOR “FLASH”

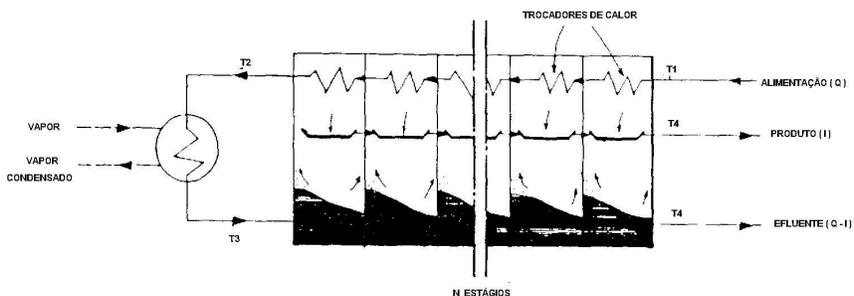
No processo MSF, a água marinha é aquecida em um recipiente chamado de aquecedor de água salgada. Isto é feito geralmente condensando-se o vapor em uma série de tubos que passam através do recipiente que por sua vez aquece a água marinha. Esta água marinha aquecida flui então para outro recipiente, denominado de estágio, onde a pressão é tal que a água irá ferver imediatamente. A introdução súbita da água aquecida na câmara faz com que esta ferva rapidamente, quase explodindo ou transformando-se rapidamente em vapor. Geralmente, apenas uma pequena parcela desta água é convertida em vapor (vapor d'água), dependendo da pressão mantida neste estágio a ebulição irá continuar apenas até o ponto em que a água esfria.

O vapor gerado pelo “flashing” é convertido em água doce através da condensação em tubos de troca de calor que correm através de cada estágio. Os tubos são resfriados através da entrada de água que vai para o aquecedor de água salgada. Isto, por sua vez, aquece a água de forma que a quantidade de energia térmica necessária no aquecedor para aumentar a temperatura da água salgada seja reduzida.

A Figura 1.1 mostra esquematicamente o processo de evaporação “flash” para n estágios: a água a tratar passa por uma seqüência de trocadores de calor, nos quais a temperatura é progressivamente acumulada, por condensação do vapor produzido nas correspondentes câmaras de expansão (“flash”), atingindo de 80 a 110 °C. Depois de aquecimento suplementar entre 90 e 120 °C por uma fonte externa de vapor, a água salina é expandida consecutivamente através de um número n de estágios, contendo trocadores de calor, onde sua pressão de vapor é progressivamente reduzida.

### 1.2. PRINCIPIO BÁSICO DE FUNCIONAMENTO DO DESTILADOR SOLAR

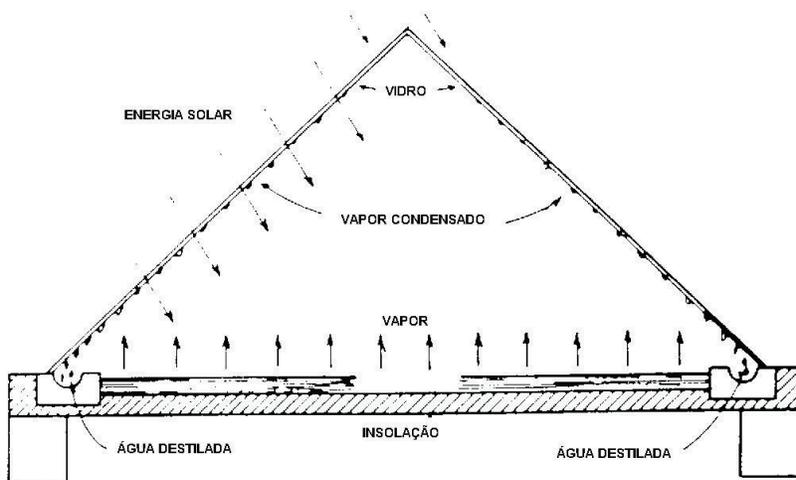
Estes dispositivos geralmente imitam uma parte do ciclo hidrológico natural no qual a água salina é aquecida pelos raios solares de forma a propiciar a produção de vapor d'água (umidificação). O vapor de água é então condensado em



**FIGURA 1.1**

Destilação por evaporação “Flash” de múltiplo estágio - LORCH (1987)

uma superfície fria e o condensado coletado como água produto. Um exemplo deste tipo de processo é o destilador solar, similar à estufa solar de plantas e vegetais, no qual a água é aquecida num reservatório existente sobre o piso (ocupando toda área do piso). A água condensa na superfície interna da cobertura inclinada de vidro que cobre o reservatório conforme mostra a figura 1.2.



**FIGURA 1.2**

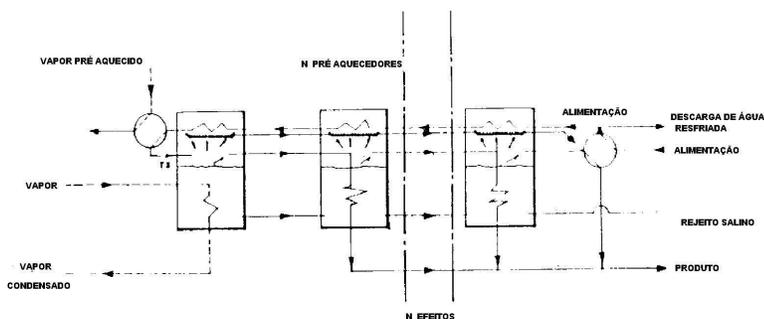
Destilação por evaporação através de energia solar - SPIEGLER (1965)

Os destiladores solares são dispendiosos na construção, embora a energia térmica deva ser livre de custos, a energia adicional é necessária para bombear a água. Além disso, é necessária manutenção e operacionalização cuidadosas para prevenir a formação de escalas (crostas) causada pela secagem do reservatório.

### 1.3. DESTILAÇÃO DE MÚLTIPLO EFEITO (MED)

Destilação de múltiplos efeitos (MED), como o processo MSF, acontece em uma série de recipientes (efeitos) e utiliza o princípio de redução de pressão interna nos vários efeitos. Isto permite à água marinha se submeter à ebulição múltipla sem suprimento de calor adicional após o primeiro efeito. Em uma planta MED, a água marinha entra no primeiro efeito e a sua temperatura é elevada até o ponto de ebulição após ser pré-aquecida nos tubos. A água marinha é então vaporizada sobre a superfície dos tubos evaporadores numa película fina para promover ebulição e evaporação rápida. Os tubos são aquecidos pelo vapor através de um aquecedor, ou de outra fonte, que é condensado durante o processo de transferência de calor. O condensado do vapor é reciclado para reutilização.

Apenas uma porção de água marinha aplicada aos tubos do primeiro efeito é evaporada. A água remanescente é levada para o segundo efeito, onde é novamente aplicada a uma série de tubos. Estes tubos são por sua vez aquecidos pelos vapores criados no primeiro efeito. Este vapor é condensado formando o produto água doce, enquanto libera calor para evaporar uma porção de água marinha remanescente no próximo efeito. Isto continua pelos vários efeitos. Nas grandes plantas, tipicamente são encontrados de 8 a 16 efeitos.



**FIGURA 1.3**  
Destilação por evaporação de múltiplo efeito. LORCH (1987)

## 1.4. DESTILAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR

A destilação por compressão de vapor é geralmente utilizada para unidades de dessalinização de água marinha em larga e média escala. O calor para evaporação da água vem da compressão do vapor muito mais do que da troca direta de calor a partir do vapor produzido em um aquecedor.

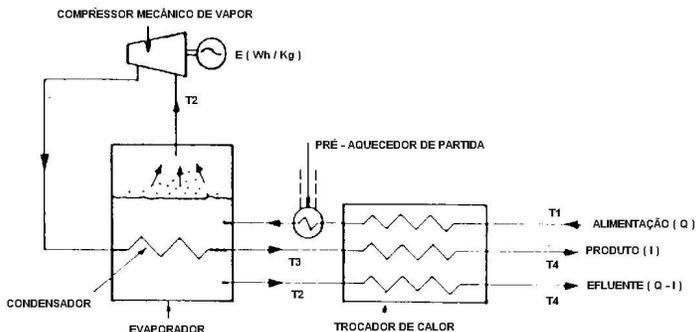
As plantas que utilizam este processo são geralmente desenhadas para tirar vantagem do princípio de redução da temperatura do ponto de ebulição através da redução de pressão. Dois métodos primários são utilizados tanto para condensar vapor quanto para produzir calor suficiente para evaporar a água do mar que chega: um compressor mecânico ou um jato de vapor. O compressor mecânico é comumente operado eletricamente, permitindo o uso exclusivo de energia elétrica para produzir água através da destilação.

Na unidade VC do tipo jato de vapor, também chamado de termo-compressor, um orifício no jato de vapor cria e extrai vapor de água do recipiente principal, criando uma pressão ambiente mais baixa neste. O jato de vapor comprime o vapor de água extraído. Esta mistura é condensada nas paredes do tubo para fornecer energia (calor de condensação) para evaporar a água marinha que é aplicada no lado externo das paredes do tubo no recipiente.

Temos na figura 1.4 um esquema simplificado do processo. A água a tratar é pré-aquecida a uma temperatura de 60 a 100 °C pela troca de calor com a condensação do destilado e com o rejeito salino. Para dar a partida e garantir as condições de operação normal, um pré-aquecedor é alimentado externamente. O processo pode ser único ou com vários efeitos. O vapor produzido no efeito é comprimido, mecanicamente ou por termo-compressão antes de entrar no condensador e realizar a troca de calor no evaporador. O destilado e o rejeito salino são descarregados através de um trocador de calor.

## 1.5. CONGELAMENTO DIRETO

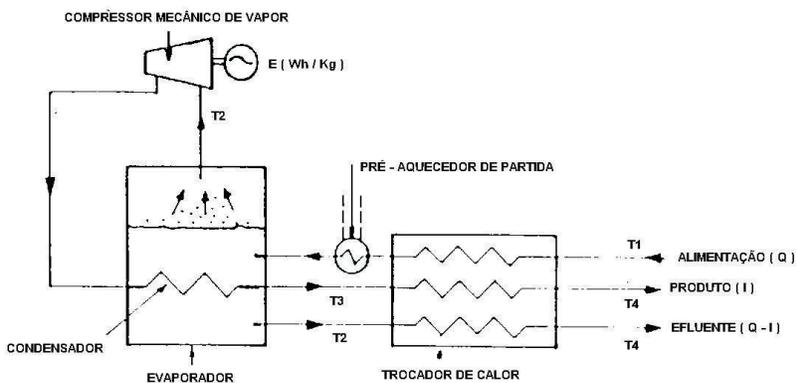
No congelamento direto, a água a tratar é pré-resfriada por troca de calor e entra numa torre de congelamento ou “freezer”, conforme mostra a Figura 1.5, onde a pressão é mantida a aproximadamente 400 N/m<sup>2</sup> (0,004 atm). Sob tal pressão, a água salina entra em ebulição e libera vapor. Este calor de evaporação é removido da água resfriada e dá início à formação dos cristais de gelo. O líquido residual é o resíduo salino concentrado, que através de trocadores de calor, volta à temperatura ambiente e é afastado do processo, com exceção de uma parcela que retorna ao “freezer”, para controle da fluidez do rejeito.



**FIGURA 1.4**

Destilação pelo Processo de compressão de Vapor. LORCH (1987)

Os cristais de gelo são raspados na direção do derretedor, que para impedir a entrada de ar e facilitar a entrada dos cristais, mantém a mesma pressão do “freezer”. No recipiente de derretimento, o gelo é distribuído e entra em contato com o vapor d’água do “freezer” que é condensado, derretendo o gelo. A água produzida está à temperatura próxima do ponto de congelamento, o que é aproveitado, bombeando-a para armazenamento, através de trocadores de calor que vão resfriar a água de alimentação que está entrando no processo.



**FIGURA 1.5**

Congelamento Direto - SPIEGLER (1965)

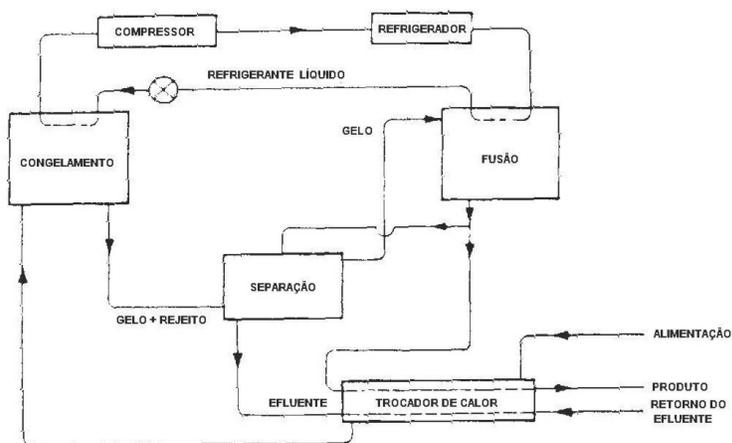
Para manter o equilíbrio térmico do sistema, é preciso compensar as entradas de calor, derivadas das seguintes fontes: energia aplicada ao compressor principal, trabalho de bombeamento e penetração de calor da atmosfera. Para isolar o sistema dessas entradas de calor, em geral é usado um sistema convencional de refrigeração, que remove calor da água de alimentação.

### 1.6. CONGELAMENTO INDIRETO

No sistema de congelamento, mostrado na figura 1.6, o n-butano é misturado com a água do mar pré-resfriada. Ocorre então a troca de calor, congelando a água e esquentando o hidrocarboneto. Devido à baixa pressão no sistema, o n-butano evapora.

A solução salina adsorvida nos cristais de gelo é removida através de lavagem com água doce. Os cristais de gelo são levados a um recipiente para o derretimento e obtenção do produto água.

Pouca energia é envolvida nesse processo, no qual são formados gelos de relativamente grandes dimensões, diminuindo os custos de lavagem. Se a taxa de formação de cristais for alta, e a retirada de vapores não está envolvida, o equipamento requer volume relativamente pequeno. A desvantagem de processo indireto é a dispendiosa separação e lavagem do gelo.



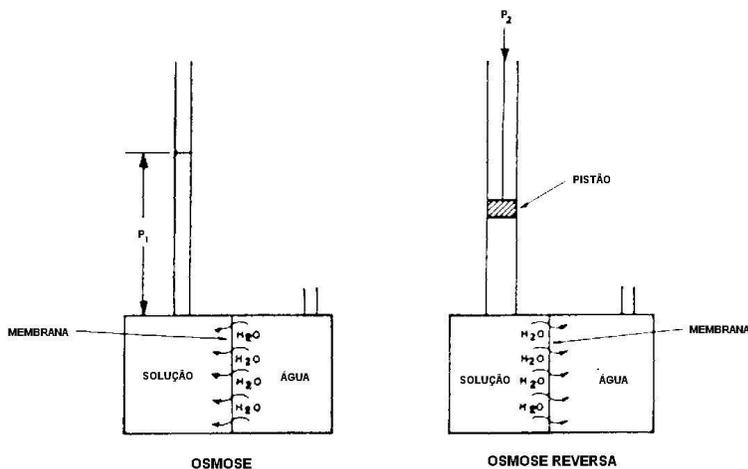
**FIGURA 1.6**  
Congelamento Indireto - SPIEGLER; LAIRD (1980)

## 2. PROCESSOS ATRAVÉS DE MEMBRANA

Na natureza, as membranas desempenham um importante papel na separação dos sais. Isto inclui tanto os processos de diálise quanto de osmose que ocorrem no corpo. As membranas são utilizadas em dois processos comercialmente importantes de dessalinização: Eletrodialise (ED) e Osmose Reversa (RO). Cada processo utiliza a capacidade das membranas de diferenciar e separar seletivamente sais e água. Entretanto, as membranas são utilizadas diferentemente em cada um destes processos.

### 1.1. OSMOSE REVERSA

Na osmose reversa, a água escoar no sentido inverso ao da osmose, devido à aplicação de pressão à solução mais concentrada. Portanto, a água passa pela membrana no sentido da solução mais diluída, produzindo água doce, deixando para trás um resíduo fortemente concentrado e sob pressão, obviamente superior à pressão osmótica e cujo valor depende da diferença entre as concentrações.



A Figura 2.1 mostra uma comparação entre osmose e osmose reversa.

Na prática, a água salina é bombeada para um recipiente fechado onde é pressurizada contra a membrana. Como uma parte da água passa através da membrana, a água remanescente aumenta a concentração de sal. Ao mesmo tempo, uma parte desta água é escoada sem passar através da membrana.

Sem este escoamento controlado, a água pressurizada continuaria a aumentar a concentração de sal, criando problemas como precipitação de sais supersaturados e aumento da pressão osmótica através das membranas. A quantidade de água escoada para ser consumida neste fluxo de salmoura varia de 20 a 70% do fluxo de alimentação, dependendo da quantidade de sal da água do abastecimento.

A bomba de alta pressão fornece a pressão necessária para permitir à água passar pela membrana e ter os sais rejeitados. Esta pressão varia de 1,7 a 2,7 N/m<sup>2</sup> para a água salobra e de 5,4 a 8,0 N/m<sup>2</sup> para a água salgada.

A membrana e seu conjunto consistem de um recipiente de pressão e uma membrana que permite que a água seja pressurizada contra a membrana. A membrana deve ser capaz de suportar a queda de toda a pressão através dela. As membranas semipermeáveis são frágeis e variam em sua capacidade de passar água doce e rejeitar a passagem de sais. Nenhuma membrana é perfeita na sua capacidade de rejeição de sais, de forma que uma pequena quantidade de sais passa através da membrana e aparece na água produto.

O projeto simplificado de um sistema de osmose reversa para a dessalinização de água consiste basicamente de uma bomba para trazer a água a tratar na pressão de operação requerida, uma membrana num recipiente sob pressão e uma válvula para controle da descarga do rejeito salino.

## 1.2 ELETRODIÁLISE

Os constituintes iônicos desenvolvidos em uma solução salina tais como Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> e CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> estão dispersos na água, neutralizando eficazmente suas cargas individuais. Quando são colocados eletrodos ligados a uma fonte externa de corrente contínua como uma bateria e um contêiner de água salgada, a corrente elétrica é transportada através da solução, com os íons tendendo a migrar para o eletrodo de carga oposta.

Para estes fenômenos dessalinizarem a água, as membranas deverão permitir a passagem de cátions ou ânions (mas não de ambas), sendo colocadas entre um par de eletrodos. Estas membranas são arrumadas alternadamente com uma membrana seletiva de ânions seguida de uma membrana seletiva de cátions. Uma

chapa espaçadora que permite à água fluir pela face da membrana é colocada entre cada par de membranas.

Um espaçador estabelece um canal que transporta água como produto, enquanto o próximo carrega água salobra. Como os eletrodos estão carregados e a água salina flui ao longo do espaçador em ângulos retos para os eletrodos, os ânions na água são atraídos e desviados na direção dos eletrodos positivos. Isto dilui o conteúdo de sal da água no canal. Os ânions passam através da membrana seletiva de ânions, mas não podem passar além da membrana seletiva de cátions, que bloqueia seu trajeto e prende o ânion na água salgada. De forma semelhante, os cátions sob a influência do eletrodo negativo movem-se na direção oposta através da membrana seletiva de cátion para o canal de concentrado no outro lado. Aqui os cátions são aprisionados porque a próxima membrana é seletiva de ânions e evita mais movimento na direção do eletrodo.

Através desta combinação, as soluções concentradas e diluídas são criadas nos espaços entre as membranas alternantes. Estes espaços, ligados pelas duas membranas (uma aniônica e outra catiônica) são chamados células. O par de células consiste de duas células, numa das quais os íons migram (a célula diluída com a água produto) e outra na qual os íons se concentram (a célula concentrada com o fluxo de salmoura).

A unidade básica de eletrodialise consiste de vários pares (centenas) de células juntas a eletrodos na parte externa e é referida como um perfilado de membranas. A água passa simultaneamente em caminhos paralelos através de todas as células para proporcionar um fluxo contínuo de água dessalinizada e água salgada para emergir no perfilado. Dependendo do desenho do sistema, produtos químicos podem ser adicionados aos fluxos no perfilado, para reduzir o potencial de formação crostas.

## REFERÊNCIAS

BUROS, O. K. **The Desalting ABC's**. 2 ed. International Desalination Association. 2000.

BUROS, O. K. **The Desalting ABC's**. International Desalination Association. 1990.

CAOURIS, Y. G. et al. **Economic Aspects of Low-Temperature Multi-Effect Desalination Plants**. Desalination, v. 71, p. 177-201. 1989.

CURRY, J. A.; WEBSTER, P. J. **Thermodynamics of Atmospheres and Oceans**. University of Colorado, Boulder. Academic Press. 1999.

- DARWISH, M. A.; EL-HADIK, A. A. **The Multi-Effect Boiling Desalting System and its Comparison with the Multi-Stage Flash System**. Desalination, v. 60, p. 251-265. 1986.
- DUKER, A. E. et al. **Development of Mathematical Model and Computer Program for Optimization of Vertical Tube Evaporator Saline Water Plants**. OSW R&D Report N ° 404. 1969.
- EL-DESSOUKY, H. T.; ASAZA G. M. R. **Computer Simulation of the Horizontal Falling Film Desalination**. Desalination, v. 55, p. 119-138. 1985.
- EL-NASHAR, A. M. **Abu Dhabi Solar Distillation Plant**. Desalination, v. 52, p. 217-234. 1985.
- EL-NASHAR, A. M. **Predicting Part Load Performance of small MED Evaporators - A Simple Simulation Program and its Experimental Verification**. Desalination, v. 130, p. 217-234. 2000.
- EL-NASHAR, A. M. **Validating the Performance Simulation Program "SOLDES" Using Data from an Operating Solar Desalination Plant**. Desalination, v. 130, p. 235-253. 2000.
- EL-NASHAR, A. M.; QAMHIYEH, A. A. **Simulation of the Steady-State Operation of a Multi-effect Stack Seawater Distillation Plant**. Desalination, v. 101, p. 231-243. 1995.
- EL-NASHAR, A. M.; QAMHIYEH, A. **Simulation of the Performance of MES Evaporators Under Unsteady State Operating Conditions**. Desalination, v. 79, p. 65-83. 1990.
- GARCIA-RODRIGUES, L.; GÓMES-CAMACHO, C. **Thermo-Economic Analysis of a Solar Multi-Effect Distillation Plant Installed at the Plataforma Solar de Almería (Spain)**. Desalination, v. 122, p. 205-214. 1999.
- LORCH, W. **Handbook of Water Purification**, 2. ed. The Lorc Foundation. University of Buckingham, 1987.