

2 Sistemas de Dessalinização e Aquedutos

2.1. Técnicas de Dessalinização

Neste trabalho são apresentadas as características básicas das plantas térmicas e de osmose reversa, destacando suas diferenças básicas e apresentando dados para a estimativa dos custos.

2.1.1. Osmose Reversa

O fenômeno de osmose é amplamente encontrado na natureza. As plantas usam a osmose para levar a água do solo até as folhas e frutos. Este processo baseia-se na diferença de concentrações que causa um fluxo de água na direção do reservatório com menor concentração. A diferença de pressão que possibilita a ocorrência do escoamento é denominada de pressão osmótica.

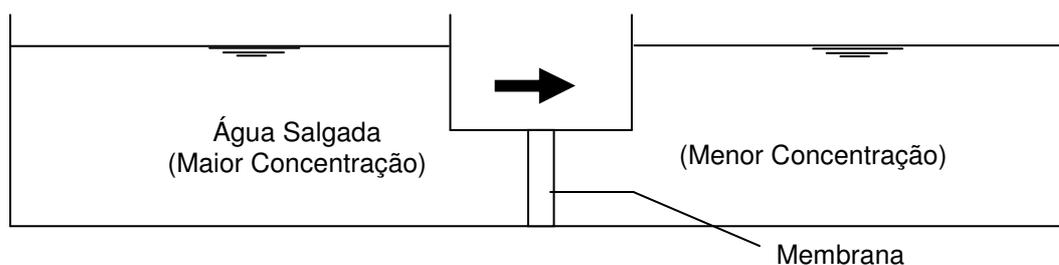


Figura 1 – Representação esquemática do processo de osmose.

O processo de osmose reversa consiste em estabelecer um fluxo na direção contrária, conforme indicado na Figura 1. A água deve escoar do reservatório com água salgada na direção do reservatório com água pura. Para que haja um fluxo na direção contrária ao fluxo natural é necessário gerar uma pressão maior e contrária à pressão osmótica. Esta pressão deve ser induzida pelo bombeio do fluido através da membrana semipermeável.



Figura 2 – Ilustração de uma planta de osmose reversa.

O fluxo de água através das membranas semipermeáveis é muito pequeno e por isso torna-se necessária uma grande área de membranas para que se obtenha um volume de água que atenda à demanda requerida. As membranas podem ser encontradas em espiral (Figura 3), ou na forma de tubos (Figura 4).

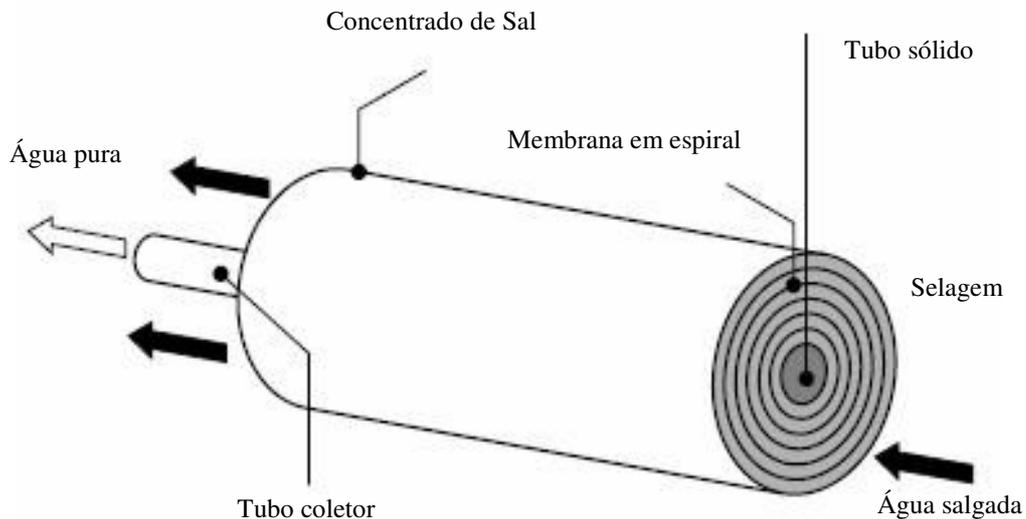


Figura 3 – Configuração de sistema de osmose reversa em espiral.

De acordo com Semiaty (2000) as membranas semipermeáveis utilizadas no processo de dessalinização são sensíveis às mudanças no pH da água. A presença de algas e outros componentes químicos pode interferir em seu funcionamento.

Normalmente um sistema de pré-tratamento deve controlar a presença de algas com o objetivo de aumentar a eficiência do sistema. A recuperação de água potável em sistemas de osmose reversa pode variar entre 35% e 50% da água salgada utilizada no processo. Na dessalinização por osmose reversa a qualidade da água produzida depende exclusivamente da qualidade da água salgada utilizada no mesmo. Quanto maior a concentração de sal na entrada do sistema, maior será a quantidade de resíduos no produto da dessalinização.

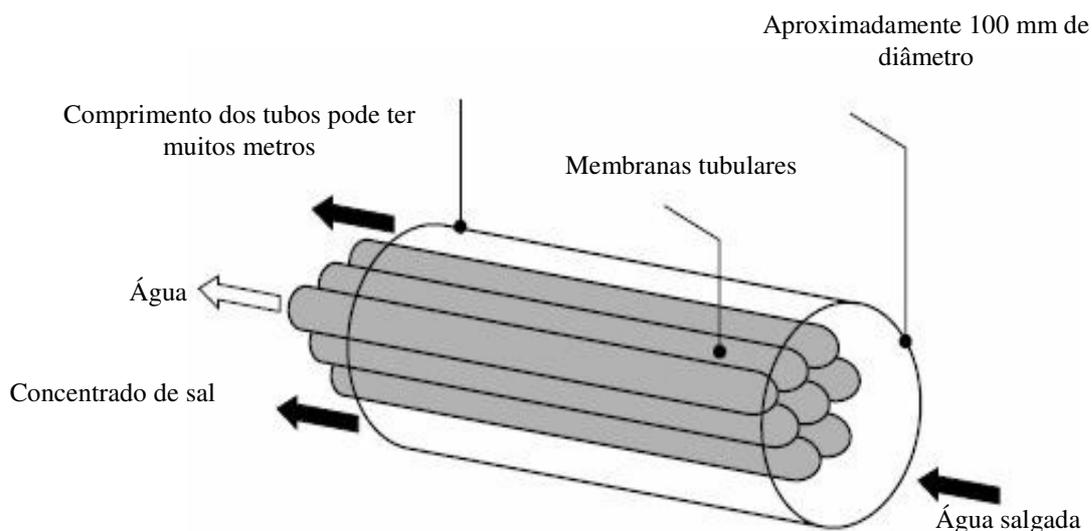


Figura 4 – Sistema de dessalinização por osmose reversa; sistema tubular.

Uma das características mais importantes dos sistemas de dessalinização por osmose reversa é o fato de seu funcionamento depender exclusivamente do abastecimento de energia elétrica, não sendo necessária a obtenção de energia térmica proveniente de plantas industriais. Sendo este tipo de tecnologia comercializada em módulos, onde são informados a produtividade e o consumo energético, o dimensionamento de plantas de osmose reversa se restringe à identificação da demanda e à especificação de tais módulos, restando, portanto, a otimização dos sistemas de transporte e de pré-tratamento como alternativa para redução dos custos.

2.1.2. Dessalinização Térmica

Além da dessalinização por osmose reversa, outra técnica amplamente adotada nos dias atuais utiliza o conceito de evaporação. São duas as principais técnicas de evaporação: MSF (*Multi Stage Flash*) e MEE (*Multi Effect Evaporation*). De acordo com Semiat (2000), as primeiras tentativas de utilização da dessalinização térmica mostraram ser esta uma opção de alto consumo energético. Buscando reduzir o consumo energético decorrente da produção surgiram os sistemas de dessalinização térmica modernos, cujo conceito é baseado no reaproveitamento da energia ao longo de todo sistema. Assim, o vapor utilizado para realizar a primeira evaporação será utilizado novamente em seguida, de tal forma que ocorra uma otimização no aproveitamento da energia disponível.

Em decorrência da reutilização da energia térmica presente no vapor surgiu o conceito de células, ou câmaras, encontrado nos sistemas de dessalinização térmica. O sistema *Multi Effect Evaporation* (MEE) é dividido em vários estágios, onde o processo de evaporação ocorre gradualmente.

A água percorre um circuito que se inicia com o bombeamento da mesma até a primeira câmara. Ao longo deste trajeto a água passa por um pré-aquecimento, após o qual é injetada na primeira câmara através de esguichos, ocorrendo o primeiro processo de evaporação. Sendo a água do mar composta de sais minerais, parte desta evapora, restando um concentrado de água e sal dentro da câmara, que passará para o estágio seguinte para sofrer uma nova evaporação. Na primeira câmara, o calor utilizado para realizar a evaporação é proveniente dos gases de exaustão de uma planta industrial, que neste trabalho será o de uma termoelétrica. Os processos seguidos de evaporação são realizados com a energia térmica do vapor produzido na primeira câmara. Ao final do processo tem-se um concentrado de água e sal, tratado como rejeito, e a água destilada, que será transportada para a cidade a ser abastecida.

Apesar da aparente simplicidade do processo, esta tecnologia apresenta uma série de obstáculos a serem contornados. O primeiro desafio é a eficiência térmica. De acordo com Semiat (2000) a redução das perdas de calor para o ambiente são um fator essencial para a melhoria da eficiência, bem como a

otimização da área de troca de calor dentro das câmaras. No entanto, o aumento da área de troca de calor dentro das câmaras leva, concomitantemente, a um aumento do custo do sistema.

A perda de energia para o ambiente representa uma perda de produtividade, uma vez que este calor perdido poderia ser utilizado para o tratamento de uma quantidade maior de água. Segundo Semiati (2000) muitos esforços estão voltados para o aumento da eficiência térmica desse tipo de sistema. Outro problema normalmente encontrado em plantas de dessalinização é a ocorrência de incrustações, que podem causar grandes prejuízos na fase de operação do sistema.

A avaliação do rendimento dos sistemas de dessalinização térmica é feita através de um fator denominado *Gain Output Ratio* (GOR), que é a relação entre a quantidade de água produzida e a quantidade de gases de exaustão utilizados na produção, ambas em toneladas. Atualmente, as plantas em operação apresentam um GOR que varia entre 8 e 16, de acordo com resultados apresentados em Safar (1999).

No entanto, Semiati (2000) ressalta para a tendência de que as novas plantas de dessalinização comecem a operar com GOR de 30, o que representa uma melhoria significativa em relação aos métodos tradicionais.

Os sistemas de dessalinização MEE podem ser encontrados na configuração vertical ou horizontal. A última opção apresenta altos custos de bombeamento, enquanto a primeira opção acarreta maiores gastos de manutenção do sistema. Estudos realizados por Safar (1999) comparam as vantagens e desvantagens entre as duas opções: por exemplo, a área para troca de calor na opção vertical é metade da área na opção horizontal, mostrada na Figura 5.

Portanto, do ponto de vista de troca de calor a opção horizontal seria mais favorável. No entanto, o número de células requerido nesta opção horizontal é maior para produzir a mesma quantidade de água. As plantas verticais, como consequência da disposição de suas células, apresentam menor custo de bombeio em relação às plantas horizontais.

Uma das principais vantagens da opção vertical em relação à horizontal é o fato de ser mais compacta, ocupando menos espaço que a planta horizontal. Apesar da área de troca de calor reduzida, Safar (1999) afirma que as plantas

verticais apresentam maior taxa de transferência de calor, em função do escoamento facilitado por sua posição vertical. Este trabalho será desenvolvido usando como referência uma planta vertical.

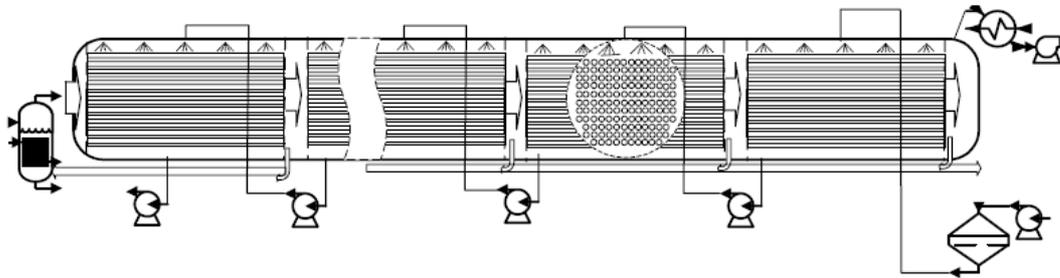


Figura 5 – Ilustração do sistema MEE Horizontal. Ilustração obtida em Semiaty (2000).

A escolha entre as alternativas de dessalinização deve ser baseada em diversos fatores de caráter técnico e econômico. Entre os fatores econômicos estão o consumo energético e o custo de manutenção. Entre os fatores técnicos está a pureza da água produzida, que é determinante para o tipo de aplicação do produto. Assim, cada cenário poderá receber um tipo de planta diferente, dependendo da disponibilidade energética da região e a destinação que será dado à água produzida.

2.2. Consumo Energético dos Sistemas de Dessalinização

De acordo com Ebensperger (2005), o consumo de energia é um fator essencial na comparação entre as técnicas de dessalinização por osmose reversa e térmica. A osmose reversa utiliza uma quantidade menor de energia quando comparada com qualquer uma das técnicas de evaporação. Ebensperger (2005) apresenta ainda uma comparação entre duas plantas de mesma capacidade com o objetivo de confrontar os resultados obtidos, em termos de consumo energético para os dois conceitos. A primeira é uma planta de evaporação chamada *Tripoli West*, localizada na Líbia, que produz 10 milhões gpd (galões por dia). A segunda, *Sabha A*, localizada em Israel, com a mesma capacidade, funciona com base no conceito de membrana. A planta térmica *Tripoli West* apresentou um custo de energia equivalente a 41% do custo operacional. No caso da planta *Sabha A*, o custo de energia representou apenas 26% do custo operacional da

planta. O motivo para tal discrepância deve-se à necessidade de produção de vapor para as plantas térmicas e bombeio ao longo do sistema, o que é desnecessário no caso de produção por membrana, cujo consumo energético consiste exclusivamente no bombeio da água da região mais concentrada para a menos concentrada. Portanto, do ponto de vista energético, as plantas de dessalinização por osmose reversa são mais eficientes.

Para contornar essa limitação, as plantas de dessalinização térmica devem estar posicionadas perto de uma planta industrial, de forma a reduzir o consumo energético pela proximidade com a produção de gases de exaustão.

2.3.

Custo de Manutenção dos Sistemas de Dessalinização

Outro meio de comparação entre as tecnologias de dessalinização por osmose ou evaporação é o custo de manutenção. Geralmente as plantas que adotam o conceito de osmose reversa são mais vulneráveis aos efeitos ambientais, tais como mudança no pH da água, presença de algas ou bactérias, como foi citado anteriormente. Este fator exige a instalação de um pré-tratamento da água salgada, elevando os custos de manutenção. A necessidade de interromper a produção para limpeza dos módulos de produção certamente elevará os custos, colocando o conceito de membrana em desvantagem com relação ao conceito de evaporação. Deste modo, a parada de produção em plantas que utilizam osmose reversa é muito comum, sendo considerada uma vantagem em locais onde a produção de água é intermitente.

Ebensperger (2005) destaca que a tecnologia de membrana vem sendo aperfeiçoada ao longo dos anos, possibilitando um aumento na produtividade de 94% entre os anos 1990 e 2000, acompanhada por uma redução de custos de 86% no mesmo período.

Portanto, em plantas que operam em regime intermitente, deve-se adotar o sistema de osmose reversa, enquanto para plantas com operação constante recomenda-se o uso da tecnologia de evaporação, garantindo um menor custo de manutenção. Apesar disso, pode-se dimensionar o sistema de forma que os módulos parados para manutenção sejam substituídos por sistemas sobressalentes,

eliminando a necessidade de aplicar a tecnologia para fornecimento intermitente. Ainda assim incorrer-se-ia em considerável aumento do custo.

2.4. Nível de Pureza da Água Produzida

Além da energia e dos custos de manutenção, a pureza da água produzida é também um fator de comparação entre as técnicas de osmose reversa e evaporação. Neste caso a planta térmica leva vantagem em relação à osmose reversa. De acordo com Ebensperger (2005), enquanto as plantas que adotam o conceito de osmose reversa produzem água com pureza entre 100 e 600ppm, as plantas térmicas atingem um nível que varia entre 5 e 50ppm.

Deve-se ressaltar que o aumento na qualidade do produto nas plantas que adotam o conceito de osmose reversa depende de um sistema de pré-tratamento que melhore a qualidade da água na entrada do sistema, o que representa um sensível aumento dos custos.

2.5. Estimativa de Custos dos Sistemas de Dessalinização

Pode-se constatar pela Figura 6 que o custo fixo, ou custo de capital da planta de dessalinização térmica, é maior do que uma planta de osmose reversa. Outros custos como supervisão e operação, químicos e troca de membrana são mais altos no caso de osmose reversa em função da grande complexidade deste tipo de planta. Além do custo fixo, o consumo energético também é crítico para as plantas térmicas. De acordo com Semiat (2000), existem estudos para que se utilize energias alternativas associadas à dessalinização térmica. Entre elas destaca-se a energia solar, que ainda não é amplamente utilizada em função do seu alto custo. No entanto, deve-se atentar para esta alternativa que pode se tornar viável em termos técnicos e econômicos em um futuro próximo.

Na avaliação de custos de Ettouney (2002) alguns fatores principais que causam grande impacto na composição de custos de uma planta de dessalinização são a salinidade e qualidade da água utilizada, a capacidade da planta, a mão-de-obra qualificada, o custo da energia utilizada para produção e a vida útil da planta.

Quanto maior o nível de salinidade da água, maior é a necessidade de aplicação de produtos químicos. Sendo os níveis de salinidade mais baixos tem-se um funcionamento melhor da planta, com menor necessidade de paradas de produção. Quanto mais cara a fonte de energia utilizada para produção maior será o custo por litro do produto. Ettouney (2002) afirma ainda que a formação do custo de um sistema de dessalinização pode ser efetuado dividindo-o em dois tipos: custo de capital direto e custo de capital indireto.

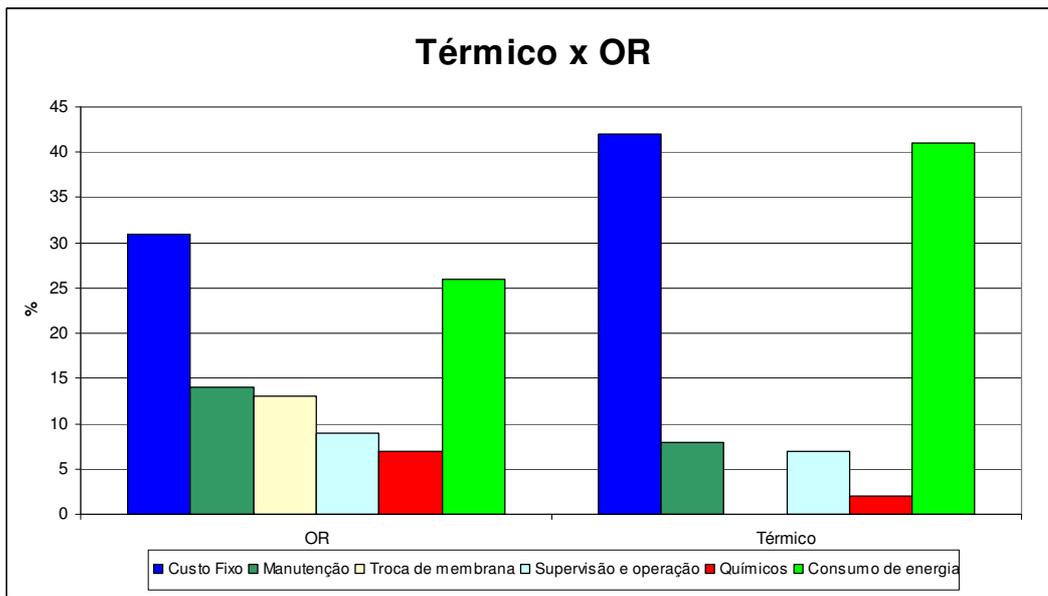


Figura 6 – Comparação entre os custos dos sistemas de osmose reversa e dessalinização térmica (Fonte: Ebensperger (2005)).

O custo de capital direto consiste na compra dos grandes equipamentos, na aquisição de equipamentos auxiliares, compra do terreno e demais custos de construção e manutenção. O custo do terreno utilizado para construção pode variar dependendo se a produção é feita pelo governo ou pela iniciativa privada. No caso de ser um empreendimento privado, deve-se considerar todos os impostos cobrados para produção industrial em função do estado onde será localizada a planta. No caso de plantas subsidiadas pelo governo o custo pode atingir valores muito próximos de zero.

Os equipamentos de processo incluem também os instrumentos de controle, dutos, bombas, equipamentos elétricos, assim como equipamentos de pré e pós-processamento. O custo dos equipamentos de processo de uma planta de osmose reversa que produza 100.000 m³ por dia pode chegar a 50 milhões de dólares,

enquanto para uma planta MEE que produza 27.000 m³ por dia o custo pode chegar a 40 milhões de dólares.

O custo de construção e montagem depende do local e da quantidade de detalhes e recursos da instalação. O custo de construção e montagem pode variar entre US\$ 100 e US\$ 1.000 por metro quadrado. O custo dos módulos de osmose reversa variam de acordo com a capacidade do sistema, podendo chegar a US\$ 1.000 para um módulo com capacidade de 100m³ por dia.

Os custos indiretos incluem o seguro da planta, custos de construção adicionais, custos do proprietário e custos de contingência. O seguro da planta pode ser estimado como 5% do custo direto total do sistema. O custo de construção adicional é cerca de 15% do valor estimado para construção completa do sistema. O custo do proprietário equivale a cerca de 10% do custo dos equipamentos e os custos de contingência podem chegar a 10% do custo direto total.

Ettouney (2002) estima ainda os custos anuais de uma planta durante o regime operacional. Entre eles está o custo do consumo energético e da mão-de-obra. O custo energético deve variar de acordo com a região do projeto. O custo de mão de obra pode variar de acordo com o tipo de planta (pública ou privada) e com a localização. O custo de manutenção pode ser estimado em 2% do custo total anual, devendo ser incluído também o custo de amortização do sistema, que será visto posteriormente, no item que trata sobre a viabilidade econômica. Será incluído no modelo o custo dos produtos químicos utilizados para limpeza do sistema, estimado em US\$ 0,0122 por metro cúbico, conforme sugerido por Ettouney (2002).

2.6. Aqueduto

Neste trabalho, considera-se que o transporte da água produzida na planta de dessalinização até o ponto de abastecimento será realizado através de um aqueduto. Além do aqueduto até a cidade abastecida outros dois dutos devem ser considerados (ver Figura 7), sendo um para o transporte de rejeitos produzidos pela planta de dessalinização, chamado duto de rejeitos, e o outro para transporte de água do mar até o sistema dessalinizador, chamado duto de admissão.

As três linhas de aquedutos serão equipadas com estações de bombeio, cuja potência será definida pelo usuário do programa computacional, assim como outras propriedades como custo de compra, custo de construção e montagem e custo das estações de bombeio.