

## I-139 - ANÁLISE ECONÔMICA DA DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA DO MAR POR OSMOSE INVERSA VISANDO ABASTECIMENTO PÚBLICO NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

**André Lermontov<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Químico pela Escola de Química da UFRJ. Mestre em Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da UFRJ. Doutor em Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da UFRJ. Gerente de Tecnologia do Grupo Águas do Brasil S/A com mais de 15 anos de experiência em saneamento ambiental, tratamento de água e efluentes.

**Cristiano Piaseck Borges**

Professor do Programa de Engenharia Química da COPPE/UFRJ, responsável pelo Laboratório de Processos de Separação com Membranas. Orientou mais de 50 teses e dissertações, autor de diversos artigos em periódicos e congressos científicos. Atua principalmente no preparo de membranas na forma plana e fibras ocas para diversos processos de separação como osmose inversa, permeação de gases, hemodiálise e pervaporação, destinadas a aplicações como a dessalinização, os biorreatores com membranas, a purificação e reúso de água, a separação de gases ácidos e a purificação de fármacos.

**Paula Werneck Teixeira Reuther**

Pesquisadora da COPPETEC. Trabalha desde 2007 em diversos projetos na área de processos de separação com membranas. Atualmente está cursando mestrado em Engenharia Química na COPPE/UFRJ. Em julho de 2009, concluiu sua pós-graduação na COPPE em “Segurança Aplicada a Projetos de Produção e Exploração de Petróleo e Gás Natural”. Em 2007 se formou em Engenharia Química na UFRJ.

**Lidia Yokoyama**

Engenheira Química pela UFFa. Mestre em Engenharia Metalúrgica - PUC-RJ. Doutora em Química - PUC-RJ. Professora Adjunta do Depto de Processos Inorgânicos – Escola de Química – UFRJ.

**Dante Luiz Luvisotto**

Diretor de Águas de Niterói, Engenheiro Civil formado pela UFPR, pós-graduado em Gestão Empresarial pela FGV – Fundação Getúlio Vargas.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Marquês do Paraná 110 - Centro - Niterói - RJ - CEP: 24030-211 - Brasil - Tel: +55 (21) 2729-9200 - e-mail: [andre.lermontov@grupoaguasdobrasil.com.br](mailto:andre.lermontov@grupoaguasdobrasil.com.br)

### RESUMO

A tecnologia de osmose inversa para a dessalinização de água do mar vem sendo utilizada em diversos países ao redor do mundo, com milhares de plantas em operação. A operação de uma planta de osmose inversa implica na utilização de diversas etapas como captação, filtração em peneiras, coagulação, floculação, filtração em membranas de micro ou ultrafiltração, filtração em cartuchos, tratamento e neutralização e descarte de correntes de produtos de limpeza, além do descarte de corrente concentrada em sais dissolvidos.

Este estudo simulou a viabilidade técnica econômica da implantação de uma estação de tratamento de água pela tecnologia de dessalinização com vazões variadas entre 500 e 5.000 L/s (1.800 e 18.000 m³/h) com fins de abastecimento urbano. São apresentados os custos de capital (CAPEX) e custos de operação (OPEX), assim como o custo por metro cúbico produzido de água com base no custo de operação. Neste estudo foram adotadas várias premissas que nortearam a composição dos custos, sendo as mais importantes a cotação do dólar em 1,771 Reais e o preço da energia elétrica em 0,34 R\$/kWh.

**PALAVRAS-CHAVE:** Dessalinização, Osmose Inversa, Avaliação Técnica Econômica.

### PANORAMA GERAL

A maior fonte, quase inesgotável, de água são os oceanos. A principal desvantagem, no entanto, é sua alta salinidade. Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS) o limite admissível de salinidade na água potável é de 500 mg/L. O CONAMA 357 de 2005 enquadra as águas doces às quais tem salinidade entre 0 e 0,5 ‰, águas salobras, com salinidade superior a 0,5 ‰ e inferior a 30 ‰ e águas salinas, com salinidade igual ou superior a 30 ‰.

A maioria das fontes disponíveis na terra tem salinidade de até 10.000 mg/L, na forma de sais dissolvidos total, enquanto a salinidade de água do mar esta na faixa de 35.000 a 45.000 mg/L. Dessalinizar, em geral, é remover o sal da água do mar ou de água contendo sais dissolvidos, até atingir concentrações aceitáveis para os usos específicos.

O panorama das capacidades instaladas mundialmente, na América Latina e, especificamente, no Brasil são apresentados na Figura 1. Um dos processos de dessalinizar a água é através da utilização de membranas de Osmose Inversa (OI). Este processo foi introduzido na década de 60 e hoje já conta com mais de 14.000 plantas de dessalinização ao redor do mundo, correspondendo a uma capacidade superior a 93 milhões de metros cúbicos por dia, conforme o banco de dados de referência mundial. O panorama relacionado à evolução destas plantas na América do Sul indica 245 unidades, sendo que no Brasil o total de plantas de diversos portes chegam a 52 unidades, com 14 usando água do mar como fonte de água bruta. O número de plantas instaladas no país ainda é modesto quando comparado ao panorama mundial (inferior a 0,5%). O dimensionamento de um sistema de dessalinização é diretamente dependente da qualidade da água que se deseja tratar.



Figura 1 – Panorama da quantidade de plantas instaladas ao redor do mundo, na América do Sul e no Brasil

## TECNOLOGIAS PARA DESSALINIZAÇÃO

Dessalinização pode ser realizada através de uma série de técnicas. Tecnologias industriais de dessalinização usam mudança de fase ou envolvem membranas que conseguem discriminar entre o solvente e alguns solutos. Assim, na dessalinização, as técnicas podem ser classificadas nas seguintes categorias:

- Mudança de fase ou processos térmicos e
- Membranas ou processos em fase única.

Todos os processos necessitam de um pré-tratamento para água do mar, evitando-se a formação de espuma, corrosão, crescimento e proliferação biológica. Na Tabela 1, as mais importantes tecnologias em uso estão listadas.

Tabela 1 - Processos de dessalinização

Processos com mudança de fases	Processos com membranas
1. Flash multi-estágio (MSF)	1. Osmose Inversa (OI)
2. Destilação com múltiplos efeitos de ebulição (MEB)	➢ OI sem recuperação de energia
3. Compressão de vapor (VC)	➢ OI com recuperação de energia (RE-OI)
4. Congelamento	2. Eletrodialise (ED)
5. Umidificação/desumidificação	

Nos processos que ocorrem mudança de fase ou processos térmicos, a destilação de água do mar é conseguida através da utilização de uma fonte de energia térmica. Os processos térmicos comerciais para a dessalinização são flash multi-estágio (MSF), destilação com múltiplos efeitos de ebulição (MEB) e compressão térmica (TVC) ou mecânica (MVC) de vapor.

Os processos MSF e MEB são compostos por um conjunto de fases sucessivas em diminuição da temperatura e pressão. O processo MSF é baseado na geração de vapor da água do mar ou salmoura, devido a uma redução da pressão súbita quando a água do mar entra em uma câmara de vácuo. O processo é repetido sucessivamente com decréscimo da pressão. Este processo requer um fornecimento de vapor externo, normalmente, a uma temperatura em torno de 100°C. A temperatura máxima é limitada pela concentração sal, o que limita o máximo desempenho do processo. No MEB, vapores são gerados devido à absorção de energia térmica pela

água do mar. O vapor gerado em um estágio é capaz de aquecer a solução salina para o próximo estágio, pois a próxima etapa ocorre em temperatura e pressão menores. O desempenho dos processos MEB e MSF é proporcional ao número de estágios. As plantas MEB normalmente utilizam uma fonte externa de vapor a uma temperatura de cerca de 70 °C. Em TVC e MVC, após o vapor inicial ser gerado a partir da solução salina, este vapor é termicamente ou mecanicamente comprimido para gerar uma produção adicional.

A outra categoria de processos para dessalinização que não utiliza mudança de fase são os processos com membranas de osmose inversa (OI) e eletrodialise (ED). O primeiro requer energia para impulsionar a bomba que irá aumentar a pressão da solução salina. A pressão necessária depende da concentração de sais na solução salina e é normalmente em torno de 70 bar para a dessalinização da água do mar.

A ED também necessita de eletricidade para a dessalinização da água, usando membranas contendo grupos iônicos fixos, localizadas entre dois eletrodos. Ambos, OI e ED, são utilizados para a dessalinização de água salobra, mas só OI concorre com os processos térmicos para dessalinização da água do mar. Os processos dominantes são MSF e OI, que respondem por 44 e 42% da capacidade mundial, respectivamente. O processo de MSF representa mais de 93% dos processos de produção térmica, enquanto o processo OI representa mais de 88% dos processos de dessalinização que utilizam membranas.

A Osmose Inversa (OI) ocorre quando se aplica na solução uma pressão de valor maior que o de sua pressão osmótica. Neste caso, para se restabelecer o equilíbrio, o solvente difunde no sentido da solução mais concentrada para a menos concentrada. Inverte-se assim o sentido do escoamento do solvente que ocorreria na osmose, daí a denominação de Osmose Inversa (OI).

No caso particular de soluções diluídas, pode-se utilizar a equação de van't Hoff para o cálculo da pressão osmótica, que é dada por:

$$\pi_i = C_i R T = c_i R T / M_i$$

Onde,  $\pi_i$  é a pressão osmótica devida ao soluto "i",  $C_i$  é a sua concentração molar na solução,  $R$  é a constante universal dos gases,  $T$  a temperatura absoluta,  $c_i$  é a concentração mássica e  $M_i$  a massa molar do soluto "i".

A pressão osmótica é uma das propriedades coligativas de soluções, logo, depende do número de íons, moléculas ou partículas presentes na solução. Assim, para uma mesma concentração mássica, a pressão osmótica de soluções de baixa massa molar será muito maior do que as de soluções de macromoléculas ou suspensões. Por isso, as pressões de operação da Osmose Inversa são bem elevadas, da ordem de dezenas de bar, se comparadas com os outros processos de separação com membranas (PSM) que usam gradiente de pressão como força motriz.

Assim, no caso particular de dessalinização de água do mar (concentração de NaCl em torno de 3,5%), que foi a primeira grande aplicação da Osmose Inversa, é necessário aplicar uma pressão superior a 30 bar, já que pressões inferiores não produzirão fluxo de permeado (água dessalinizada).

Portanto, a Osmose Inversa é um PSM empregado quando se deseja reter solutos de baixa massa molar, tais como sais inorgânicos e pequenas moléculas orgânicas. O nome Osmose Inversa foi adotado lembrando-se que no processo, o fluxo permeado é no sentido inverso do fluxo permeado em condições de osmose natural.

## A QUALIDADE DA ÁGUA

A água obtida em terra difere substancialmente da água do mar pela quantidade relativa de sais encontrados nas mesmas. Água de rio pode ter até 1.500 mg/L de salinidade, a salinidade da água salobra apresenta uma faixa de 3.000 a 10.000 mg/L, enquanto que a salinidade da água do mar varia de 10.000 mg/L (como no caso do mar Báltico) até 45.000 mg/L (como no Golfo Árabe). A baixa salinidade pode ser resultado da presença de foz de rios, bem como devido à abundância da precipitação de chuvas. A salinidade elevada pode ser resultado de altas temperaturas que promovem a evaporação.

A Tabela 2 apresenta a composição relativa de sais na água do mar e de uma água típica de rio, mostrando grandes diferenças nos valores e na presença de substâncias.

Segundo Ferraz na região de Arraial do Cabo, RJ, o sistema hidrológico é constituído por três massas de água de origem e composição físico-química bem diferenciada: a Água Tropical, a Água Costeira e a Água Central do Atlântico Sul. A frequência de ocorrência destas águas está diretamente relacionada ao regime de ventos.

A água tropical é formada a partir da corrente sul equatorial que é transportada em direção ao Sul pela Corrente do Brasil seguindo o talude continental e atingindo até os 200 m de profundidade (Figura 2 e 3). Suas águas são quentes ( $> 20^{\circ}\text{C}$ ) e com alta salinidade ( $> 36\text{ mg/L}$ ) apresentando baixas concentrações de nutrientes e baixos níveis de produtividade biológica. Uma particularidade desta massa de água é que entre a região de Cabo Frio, RJ e a Ilha Grande, RJ, a penetração da Corrente do Brasil sobre a camada superficial da plataforma continental é mais intensa que nas demais regiões da costa Sudeste (Figura 3).

Tabela 2 - Comparação entre a água de rio e água do mar

Íons	água de rio (%)	água do mar (%)
Cloreto, $\text{Cl}^-$	8,6	55
Sódio, $\text{Na}^+$	6,9	30,6
Sulfato, $\text{SO}_4^{2-}$	12,4	7,6
Magnésio, $\text{Mg}^{2+}$	4,6	3,7
Cálcio, $\text{Ca}^{2+}$	16,6	1,2
Potássio, $\text{K}^+$	2,6	1,1
Bicarbonato, $\text{HCO}_3^-$	31,9	0,4
Brometo, $\text{Br}^-$	---	0,2
Borato, $\text{BO}_3^{3-}$	---	0,08
Estrôncio, $\text{Sr}^{2+}$	---	0,04
Fluoreto, $\text{F}^-$	---	0,003
Sílica, $\text{SiO}_2$	14,6	---
Ferro, $\text{Fe}^{2+}$	0,7	---
Nitrato, $\text{NO}_3^-$	1,1	---

A Água Central do Atlântico Sul (ACAS) é originada na Convergência Subtropical aproximadamente a  $30^{\circ}\text{S}$  na região de encontro da corrente do Brasil e da corrente das Falklands (Figura 2). Nesta área, as águas da corrente das Falklands, mais frias e mais densas, submergem de 200 a 600 m e passam a circular entre a Água Tropical (AT) e Água Intermediária Antártica (AIA) (Figura 2 e 3). Essa água é rica em nutrientes, apresenta temperaturas inferiores a  $18^{\circ}\text{C}$ , salinidade entre 34,4 e 36,0‰ e é responsável pelo aumento da produtividade primária e da biomassa quando ressurge na superfície.



Figura 2 - Mapa esquemático das correntes marítimas de superfície da costa brasileira com ênfase na região de Arraial do Cabo

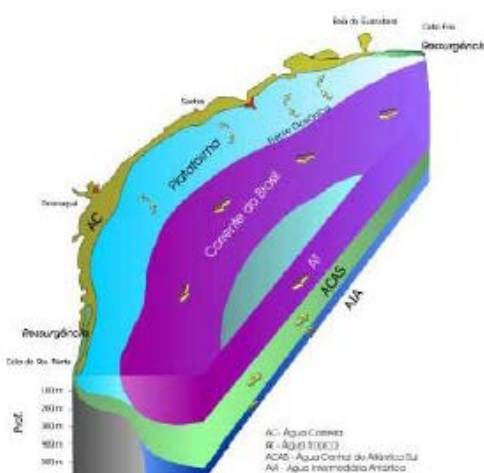


Figura 3 - Diagrama da dinâmica oceanográfica da região sudeste-sul durante o verão.

Na parte interior da plataforma continental, até a isóbata de 50 m encontramos a Água Costeira (AC), formada pela mistura de águas com influência do aporte continental, da AT e da própria ACAS. A AC apresenta temperaturas mais elevadas ( $> 22^{\circ}\text{C}$ ), baixa salinidade ( $< 35$ ) e é oligotrófica.

## ESTRUTURA DE UMA PLANTA DE DESSALINIZAÇÃO

Uma planta de dessalinização utilizando Osmose Inversa (OI) tipicamente apresenta os seguintes constituintes: a) captação; b) pré-tratamento; c) bombas de transferência; d) bombas de alta pressão; e) sistema de Osmose Inversa; f) sistema para recuperação de energia; e g) pós-tratamento. A Figura 4 mostra os principais componentes de uma planta de dessalinização.

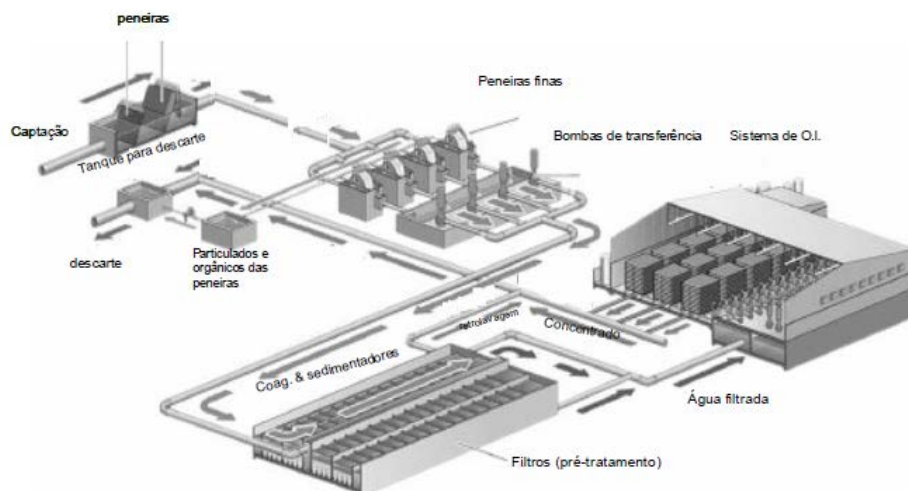


Figura 4 – Esquemático típico de uma ETA de dessalinização

O tipo de a captação da água é fundamental para o projeto e dimensionamento das etapas de pré-tratamento. Dependendo da capacidade da planta podem ser utilizados dois tipos de captação: por bombeamento direto do mar (open-ocean intake) ou através de poços instalados na proximidade do litoral (beach well).

A captação por bombeamento direto do mar é mais utilizada para grandes capacidades e consiste de uma estrutura off-shore para captação; tubulações e tanque de captação, gradeamento e peneiramento, estação de bombeamento, facilidades elétricas, instrumentação e controle, além da adição de produtos químicos.

Para instalações médias e pequenas a captação pode ser realizada através de poços (beach well), possibilitando uma filtração natural que melhora a qualidade da água e simplifica as etapas de pré-tratamento. Poços para a captação têm vazões típicas entre 400 a 4.000 m<sup>3</sup>/d. Uma grande instalação com captação através de poço de 54.000 m<sup>3</sup>/dia opera em Malta, utilizando 15 poços com capacidade individual de 3.800 m<sup>3</sup>/d.

Durante a produção de água dessalinizada há a produção concomitante de uma corrente com elevado teor de sais, denominada corrente do concentrado. Devido à pressão osmótica ser muito elevada, o descarte desta corrente pode afetar a vida aquática. Quando não há possibilidade de diluição, ou seja, não há uma planta de geração de energia associada, recomenda-se não descartar no fundo do mar, pois a mistura é mais lenta. Para melhorar a mistura pode-se utilizar dispersores ou emissários submarinos com difusores.

Em geral, o custo para captação e descarga da corrente concentrada em uma planta de dessalinização por OI está tipicamente entre 10 a 30% do custo total de construção da planta. Caso haja uma planta de geração de energia associada há uma redução considerável neste valor.

No pré-tratamento se utiliza uma sequência de operações como peneiramento, clarificação, filtração, micro e ultrafiltração, adição de compostos químicos para ajuste de pH, remoção de agentes oxidantes e para evitar precipitações (anti-incrustantes). A seguir serão apresentadas as etapas do pré tratamento para operação do sistema de osmose inversa para dessalinização de água do mar, de acordo com as suas finalidades.



Um sistema típico para dessalinização por OI de media ou grande capacidade inclui um conjunto de sistema de remoção de partículas sólidas grosseiras, constituído de gradeamento, peneiras auto limpantes ou peneiras finas auto limpantes. O gradeamento consiste de barras com espaço de 75 a 100 mm com limpeza manual, enquanto o sistema automático com peneiras apresenta aberturas de 3 a 10 mm. As aberturas das peneiras devem ser menores que a distância entre as palhetas das bombas de transferência. Peneiras com estas características são adequadas quando se emprega meios granulares para as etapas posteriores de filtração.

Quando a sequência de pré tratamento utiliza os processos de Microfiltração (MF) ou de Ultrafiltração (UF) é recomendado utilizar peneira mais finas, com abertura de 120  $\mu$ m (0,12 mm) para evitar partículas (fragmentos de conchas) cortantes que podem danificar as membranas. Estas peneiras mais finas aumentam os custos de construção e de operação/manutenção da planta, estimando em torno de 20 a 50% maior do que com a utilização de peneiras convencionais.

A captação da água através de poços (beach well) elimina a necessidade de peneiramento, assim como a adição de coagulantes e a etapa de sedimentação.

Além da remoção de partículas grosseiras por peneiramento é necessário remover material coloidal, sólidos suspensos finos, compostos orgânicos solúveis e compostos inorgânicos que possam atuar como incrustantes nas membranas de Osmose Inversa. A sequência adequada de pré-tratamentos é dependente da qualidade da água captada e, frequentemente, utiliza-se testes em escala piloto para o correto dimensionamento dos pré-tratamentos.

Nos pré-tratamentos convencionais empregam-se os processos de coagulação e floculação, seguido da sedimentação e filtração em meio granular. A sedimentação somente é utilizada antes da filtração quando o índice de sedimentos excede 40 mg/L. Os coagulantes mais convenientes são o cloreto ou o sulfato de ferro, controlando-se a dosagem para evitar excessos que possam atuar como incrustantes das membranas de OI. A adição de polieletrólitos não iônicos ou aniônicos para auxiliar a sedimentação deve ser em concentrações baixas e controladas (1 mg/L). Polieletrólitos catiônicos adsorvem fortemente nas membranas de OI e devem ser evitados.

A filtração através da percolação de meio granular é comum em plantas de dessalinização por osmose inversa cuja captação da água é realizada diretamente do mar. Como meio granular utiliza-se uma ou mais camadas de antracito, areia e brita. A filtração pode ocorrer por gravidade ou por pressurização da alimentação, projetando-se os filtros para uma capacidade de 10 a 12 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.h e para contemplar o tempo necessário de parada para a limpeza por retrolavagem (backwash). A retrolavagem é realizada utilizando parte da água filtrada. Em instalações com grande capacidade os filtros de gravidade são utilizados por apresentarem menor custo.

Os processos de microfiltração (MF) e ultrafiltração (UF) são muito efetivos na remoção de turbidez, atingindo valores inferiores a 0,1 NTU, e para a retenção de partículas suspensas, possibilitando valores de SDI menores que 3. Apesar do custo destes processos estarem apresentando forte redução, para água do mar os filtros granulares ainda são considerados mais baratos e com menor custo de reposição. Entretanto, diversas vantagens indiretas são propiciadas pelos processos de MF e UF e devem ser consideradas, como por exemplo, a menor necessidade de área (50% menor) e a maior estabilidade na qualidade da água fornecida a unidade de Osmose Inversa.

Em relação à geração de resíduos, a filtração através de meio granular produz cerca de 4 a 6% da capacidade da planta. Os resíduos consistem de sólidos e coagulantes que devem ser tratados antes da mistura com a corrente de concentrado da Osmose Inversa para posterior descarte.

Os processos de MF e UF também consomem água para a limpeza periódica das membranas por retrolavagem, estimada de 5 a 10% da capacidade da planta, além de soluções para limpeza química. Além disso, necessitam de peneiras finas que também consomem mais água que as peneiras convencionais.

Os custos operacionais também são afetados pela escolha do processo de filtração, pois os processos de MF ou UF consomem uma maior quantidade de energia, assim como o custo de reposição é mais elevado.

A utilização de filtro cartucho antes da alimentação do sistema de Osmose Inversa serve para a proteção das membranas, evitando que falhas nos processos anteriores danifiquem os módulos de permeação. Usualmente, utilizam-se filtros com retenção nominal de 5  $\mu$ m e 250 mm de comprimento, apresentando capacidade de 0,3 L/s.

O sistema de Osmose Inversa é a parte principal da planta de dessalinização de água do mar e é constituído dos elementos ou módulos com as membranas (poliamida ou celulósicas), de bombas de transferência (“booster”) e de alta pressão, vasos com os filtros cartucho, sistemas de dosagens para anti-incrustantes para evitar a precipitação de sais ou sílica, metabissulfito para remoção de oxidantes, biocidas para controle de bioincrustações, além, adição de ácido ou base para controle do pH. Tanques para os produtos de limpeza periódica (ácido cítrico e hidróxido de sódio) também devem ser previstos. A Figura 5 mostra os detalhes de um sistema de Osmose Inversa.

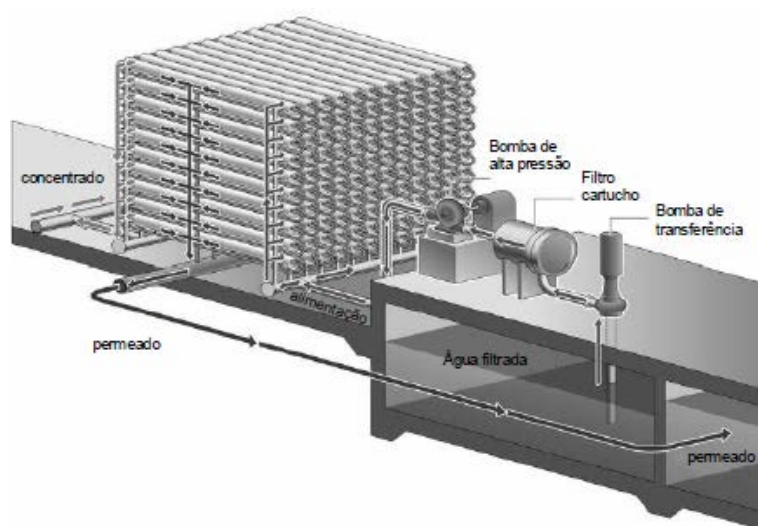


Figura 5 - Principais componentes do sistema de Osmose Inversa

Os módulos com as membranas são padronizados pelos principais fornecedores e fabricados com diferentes diâmetros, 2,5, 4,0, 8,0, 16,0 e 18 polegadas, e com comprimento de 40 polegadas (1,02 metros). Nas plantas de dessalinização com grande capacidade, utilizam-se predominantemente os módulos com 8,0 polegadas. Nestes módulos a alimentação escoar na direção axial através de espaçadores que podem ser de diferentes espessuras (28, 31 ou 34 milésimos de polegadas). Maiores espessuras reduzem a área disponível da membrana no módulo, mas facilitam o escoamento e os procedimentos de limpeza. Nos vasos de pressão, usualmente, utilizam-se sete ou oito módulos instalados em série conectados através do canal do permeado.

Os módulos com 8 polegadas de diâmetro são projetados para produzir cerca de 11 a 14 m<sup>3</sup>/dia (12 a 16 L/h.m<sup>2</sup>). O tempo de operação de um elemento com membranas é estimado entre 5 a 7 anos, mas com a utilização de microfiltração ou ultrafiltração como pré-tratamento, espera-se que atinja-se mais de (07) sete anos de vida útil.

O sistema de osmose inversa é construído com característica modular, utilizando os vasos de pressão dispostos em “skids” denominados como trens. Os vasos são conectados em paralelo para atender a capacidade projetada para a corrente de alimentação. Nas plantas de dessalinização com grande capacidade, cada trem é projetado para produzir 10 a 20% da capacidade da planta. Em sistemas com apenas um passo e um estágio, cada trem possui entre 800 a 900 módulos de permeação SW (seawater), instalados em 100 a 150 vasos de pressão, produzindo aproximadamente 10.000 m<sup>3</sup>/dia/trem.

A configuração do sistema pode envolver estágios e passos. Na primeira situação, a corrente do concentrado dos vasos de pressão do primeiro estágio é utilizada como alimentação para os vasos de pressão do segundo estágio. A configuração de passos é utilizada quando o permeado ainda não atingiu a qualidade requerida, utilizando-se o permeado do primeiro passo para alimentar os vasos do segundo passo. Neste caso, a corrente concentrada do segundo passo, em geral, retorna para a alimentação do primeiro passo.

Os sistemas de OI operando na dessalinização de água do mar para abastecimento municipal, frequentemente, utilizam apenas um estágio de permeação. Os módulos apresentam limites construtivos para a diferença de pressão axial, que se situa entre 0,5 a 1,0 bar. Esta característica limita a vazão de alimentação do vaso para valores inferiores a 17 m<sup>3</sup>/h. A recuperação de permeado por módulo também deve ser limitada para evitar redução demasiada da velocidade de escoamento, o que pode intensificar a formação de incrustações sobre as membranas. Em geral, recomenda-se que a recuperação não ultrapasse 15% para cada módulo instalado no vaso de pressão. Desta forma, a recuperação normal de um sistema de osmose inversa se situa entre 40 e 60% da vazão de alimentação. O aumento da recuperação de água ocasiona uma elevação da pressão osmótica na corrente do retido, necessitando maiores valores para a pressão de operação. Normalmente, as pressões de operação se situam próximas a 70 bar (7 MPa), suficientes para atender as especificações da água para abastecimento, a qual é considerada potável quando o teor total de sólidos dissolvidos for inferior a 500 mg/L e o teor de cloretos inferior a < 250 mg/L.

### Sistema para recuperação de energia

O principal consumo de energia associado com a produção de água dessalinizada está relacionado à etapa de bombeamento da corrente de alimentação do sistema de osmose inversa. A redução da demanda energética do sistema de osmose inversa é obtida pela recuperação da energia a partir da corrente do concentrado que sai dos vasos com pressão elevada. O sistema tradicional utiliza turbina Pelton instalada no eixo da bomba de alta pressão.

A eficiência típica para recuperação de energia utilizando uma turbina Pelton encontra-se entre 87 a 92%, que reduz com a diminuição da recuperação do permeado. Uma alternativa que está sendo introduzida nos sistemas com grande capacidade são os trocadores de pressão, que permitem a pressurização da corrente de alimentação a partir da corrente de concentrado, apresentando eficiência maior que 94%.

O custo relacionado com o consumo de energia para o bombeamento corresponde de 20 a 30 % do custo total para a produção da água dessalinizada. Atualmente, o valor considerado mais provável para o consumo de energia é de 3,5 kWh/m<sup>3</sup> de água dessalinizada, dos quais a unidade de osmose inversa operando com 50% de recuperação demanda entre 2,2 a 2,7 kWh/m<sup>3</sup>.

A Figura 6 apresenta os valores de consumo observado para as plantas de dessalinização com capacidade superior a 40.000 m<sup>3</sup>/h. Pode-se observar que o consumo das maiorias das plantas está entre 5,0 e 3,0 kWh/m<sup>3</sup>. As quatro plantas fora destes limites referem-se a plantas na Arábia Saudita (< 3 kWh/m<sup>3</sup>) ou a plantas específicas no Japão e Espanha (> 5 kWh/m<sup>3</sup>).

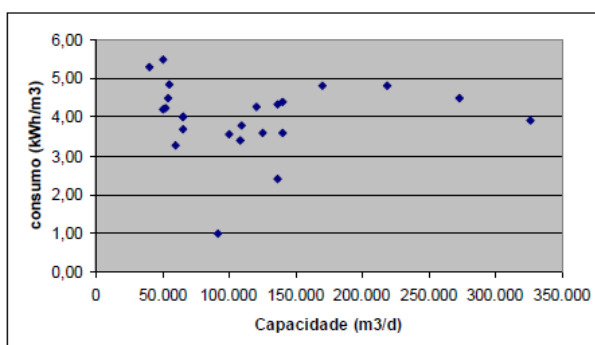


Figura 6 - Consumo de energia específico (kWh/m<sup>3</sup>) observado em plantas com capacidade acima de 40.000 m<sup>3</sup>/h.

### SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE OSMOSE INVERSA

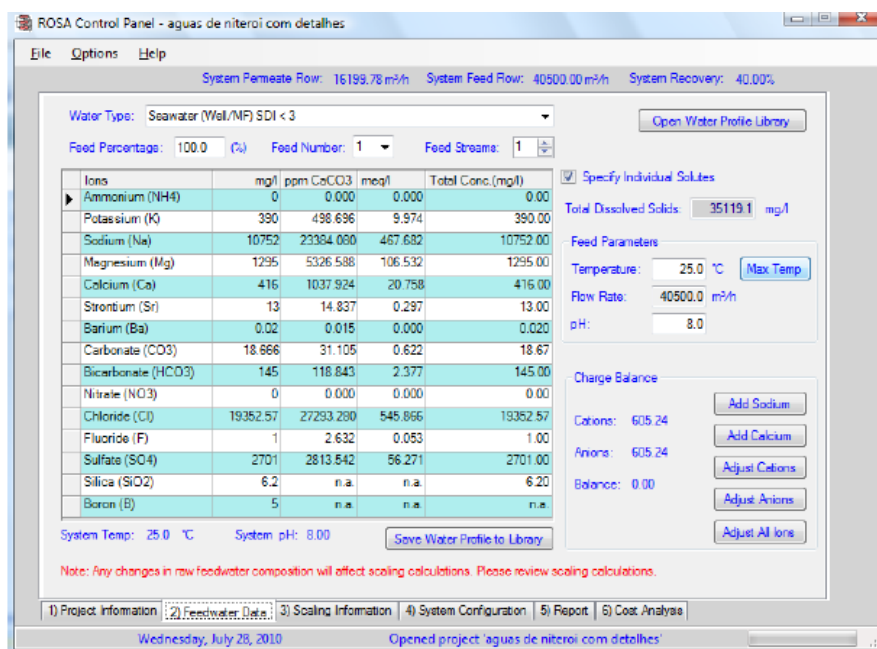
Para o dimensionamento do sistema de osmose inversa a rotina computacional ROSA da Dow foi utilizada com as condições apresentadas na Figura 7, para várias capacidades de produção de água dessalinizada: 500 a 5.000 L/s (43.200 a 432.000 m<sup>3</sup>/dia). Considerou-se que a água de alimentação do sistema de Osmose Inversa apresente SDI menor que 3, que a temperatura e pH de operação sejam mantidas em torno de 25°C e 8,0, respectivamente. A composição da água do mar, com 3,5‰ de sólidos totais dissolvidos foi estimada com base nos levantamentos apresentados em itens anteriores. A recuperação da água de alimentação foi mantida em



40% para representar uma estimativa mais conservadora. A membrana selecionada para a simulação foi de fabricação da Dow/Filmtec com código SW30HR-380. Esta membrana é frequentemente utilizada em estudos e plantas industriais, possibilitando uma melhor comparação com dados da literatura.

A Tabela 3 apresenta os principais detalhes obtidos na simulação do sistema de O.I.. A eficiência de recuperação de energia foi estimada em 90%, o que correspondeu a uma energia específica requerida de 2,41 kWh/m<sup>3</sup> de água dessalinizada.

Esta simulação foi realizada para todas as capacidades em análise, ou seja, de 500 a 5.000 L/s, variando em intervalos de 500 L/s. Para todas as situações, a energia específica requerida foi mantida em 2,41 kWh/m<sup>3</sup>. A Tabela 4 apresenta os valores de área de membrana e potencial total requerida para todas as capacidades avaliadas. Os valores de pressão, vazão de alimentação por vaso de pressão e recuperação foram mantidos. A qualidade do permeado, conseqüentemente, também ficou inalterada.



System Permeate Flow: 16199.78 m<sup>3</sup>/h System Feed Flow: 40500.00 m<sup>3</sup>/h System Recovery: 40.00%

Water Type: Seawater (Wd/MF) SDI < 3

Feed Percentage: 100.0 (%) Feed Number: 1 Feed Streams: 1

Specify Individual Solutes

Ions	mg/l	ppm	CaCO <sub>3</sub>	meq/l	Total Conc.(mg/l)
Ammonium (NH <sub>4</sub> )	0	0.000	0.000	0.000	0.00
Potassium (K)	390	498.696	9.974	390.00	390.00
Sodium (Na)	10752	23384.080	467.682	10752.00	10752.00
Magnesium (Mg)	1295	5326.588	106.532	1295.00	1295.00
Calcium (Ca)	416	1037.924	20.758	416.00	416.00
Strontium (Sr)	13	14.837	0.297	13.00	13.00
Barium (Ba)	0.02	0.015	0.000	0.020	0.020
Carbonate (CO <sub>3</sub> )	18.666	31.105	0.622	18.67	18.67
Bicarbonate (HCO <sub>3</sub> )	145	118.843	2.377	145.00	145.00
Nitrate (NO <sub>3</sub> )	0	0.000	0.000	0.00	0.00
Chloride (Cl)	19352.57	27293.280	545.866	19352.57	19352.57
Fluoride (F)	1	2.632	0.053	1.00	1.00
Sulfate (SO <sub>4</sub> )	2701	2813.542	56.271	2701.00	2701.00
Silica (SiO <sub>2</sub> )	6.2	n.a.	n.a.	6.20	6.20
Boron (B)	5	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

System Temp: 25.0 °C System pH: 8.00

Charge Balance

Cations: 605.24 Anions: 605.24 Balance: 0.00

Buttons: Add Sodium, Add Calcium, Adjust Cations, Adjust Anions, Adjust All Ions

Note: Any changes in raw feedwater composition will affect scaling calculations. Please review scaling calculations.

1) Project Information 2) Feedwater Data 3) Scaling Information 4) System Configuration 5) Report 6) Cost Analysis

Wednesday, July 28, 2010 Opened project 'aguas de niteroi com detalhes'

Figura 7 - Dados para simulação do sistema de Osmose Inversa para a vazão de permeado correspondente a 4.500 L/s.

Tabela 3 - Detalhes do sistema de O.I. para a vazão de permeado de 4.500 L/s

Vazão de alimentação	40.500	m <sup>3</sup> /h
Pressão de alimentação	57,7	bar
Vazão de permeado	16.200	m <sup>3</sup> /h
	4.500	L/s
Vazão de concentrado	24.300	m <sup>3</sup> /h
Pressão do concentrado	55,5	bar
Numero de módulos	28.350	
Área de membrana	1.000.811,7	m <sup>2</sup>
Número de vasos de pressão	4.050	
Pressão osmótica - alimentação	24,79	bar
Pressão osmótica - concentrado	42,18	bar
Diferença de pressão média	23,09	bar
Potência requerida	81.166,8	kW
Energia específica bruta	5,01	kWh/m <sup>3</sup>
Eficiência de recuperação de energia	0,9	
Energia específica requerida	2,41	kWh/m <sup>3</sup>

Tabela 4 - Comparação das demandas de área de membrana e potência total para as diferentes capacidades avaliadas

Capacidade (L/s)	Número de módulos	Vasos de pressão	Potência total requerida (kWh)
500	3.150	450	4.333
1.000	6.300	900	8.666
1.500	9.450	1350	12.998
2.000	12.600	1800	17.331
2.500	15.750	2250	21.664
3.000	18.900	2700	25.997
3.500	22.050	3150	30.330
4.000	25.200	3600	34.663
4.500	28.350	4050	38.996
5.000	31.500	4500	43.329

### CUSTOS DO SISTEMA DE OSMOSE INVERSA

Os custos de O&M e de investimento para o sistema de osmose inversa foram baseando na consideração que o pré-tratamento será efetuado por microfiltração ou ultrafiltração. Esta consideração é conservadora, pois os custos relacionados ao investimento são, em geral, superiores ao tratamento convencional (coagulação, sedimentação e filtração). Por outro lado, a estabilidade operacional do sistema com MF/UF é considerada muito superior, reduzindo a troca de filtros cartucho e a limpeza química do sistema.

Os custos para implementação podem ser divididos em custos de construção (investimento) e custos de operação e manutenção. Os custos relativos à construção incluem custos diretos e indiretos, sendo que os indiretos são estimados com base nos custos diretos.

Entre os custos diretos são relacionados: terreno, captação, equipamentos de osmose inversa e membranas, instrumentação e controles, unidades de pré e pós tratamentos, sistemas para limpezas químicas, tanques de armazenamento, geradores, transformadores, bombas, tubulação, válvulas, instalação elétrica, construção civil, além de facilidades para descarte da corrente de concentrado e de limpeza.

O investimento indireto representa o montante gasto em atividades não relacionadas diretamente com o material e a mão-de-obra das instalações gerais, como por exemplo, engenharia e supervisão, uso de patentes, serviços, etc. Este compreende 25% do investimento direto.

O investimento direto se divide em ISBL (“inside battery limits”) e OSBL (“outside battery limits”). O ISBL inclui os equipamentos, válvulas, tubulações e instrumentação que participam diretamente do processo. Este é estimado somando-se os valores de custo de aquisição de todos os equipamentos principais e multiplicando-se pelo fator de Lang (fl). Este fator leva em consideração a aquisição de outros itens auxiliares aos equipamentos (tubulações, etc.). O fator de Lang usualmente empregado em avaliações de processos químicos é cerca de 4,5. O investimento OSBL inclui unidades auxiliares necessárias para a operação do processo. O investimento OSBL pode ser considerado como sendo 45% dos custos ISBL.

O investimento de giro compreende o montante de capital necessário para operar a planta, podendo ser estimado em 15% do investimento total. O investimento de partida é o montante de capital necessário para iniciar a operação, correspondendo a 8% do investimento fixo. Os custos de operação e manutenção são divididos em fixos e variáveis.

Os custos fixos incluem amortização (5 a 10% do custo de capital total) e seguro (0,5% do custo de capital total). Os custos variáveis incluem pessoal, energia, produtos químicos e manutenção. O principal custo de manutenção é a reposição dos módulos de permeação, que são estimados em até 20% ao ano. Os demais custos de manutenção podem ser estimados em torno de 2% do custo de capital total.

Para a estimativa dos custos, inicialmente, foram calculados os custos para um trem do sistema de osmose inversa. Os principais materiais envolvidos em um trem são: módulos, vasos de pressão, válvulas e tubulações.

As bombas, filtros cartucho e trocadores de pressão são avaliados posteriormente. Os valores relativos aos módulos e vasos de pressão foram obtidos a partir de consulta a literatura e a página de fornecedores na Internet, estando expressos em dólares americanos. Esses valores foram convertidos utilizando a taxa de câmbio de 1 US\$ = 1,771 R\$ e uma taxa de nacionalização de 100%, estando apresentados na Tabela 5. A Tabela 6 apresenta os custos dos vasos e módulos em função da capacidade da planta de dessalinização

Tabela 5 - Custos unitários dos vasos de pressão e módulos instalados no sistema de O.I.

Item	Custo instalado (US\$)	Custo no país (R\$)
Módulos (SW40HR)	580,00	2.054,00
Vaso de pressão (7 elementos)	1.500,00	5.313,00

Tabela 6 - Custos totais dos vasos de pressão e módulos no sistema de O.I.

Capacidade (L/s)	Número de módulos	Número de vasos de pressão	Custo total dos módulos (R\$)	Custo total dos vasos de pressão (R\$)
500	3.150	450	6.471.234,00	2.390.850,00
1.000	6.300	900	12.942.468,00	4.781.700,00
1.500	9.450	1350	19.413.702,00	7.172.550,00
2.000	12.600	1800	25.884.936,00	9.563.400,00
3.000	18.900	2700	38.827.404,00	14.345.100,00
4.000	25.200	3600	51.769.872,00	19.126.800,00
5.000	31.500	4500	64.712.340,00	23.908.500,00

A estimativa dos demais componentes foi realizada com base em valores proporcionais relatados na literatura e obtidos na base DesalData.com, como pode ser observado na Tabela 7 e Composição da Figura 8 extraída diretamente do sítio. A Tabela 10 apresenta os valores de cada item, admitindo que a proporcionalidade observada se mantenha na faixa de capacidades de produção investigadas.

Tabela 7 - Contribuição dos diversos componentes no custo de investimento total em uma planta de dessalinização (DesalData)

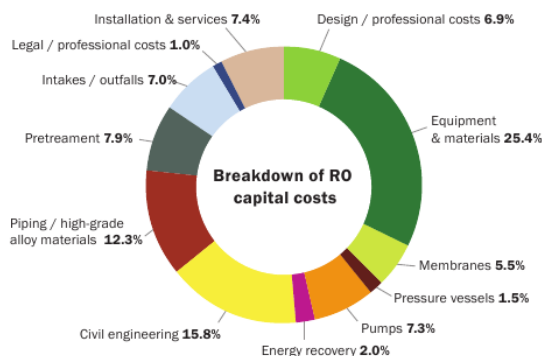
Item	Capacidade (L/s)	500	1000	1500	2000	2500	3000	4000	5000
Captação		11%	11%	11%	11%	12%	12%	12%	12%
Bombas		8%	8%	8%	8%	9%	9%	9%	9%
Projeto e pessoal		11%	11%	9%	9%	9%	9%	9%	9%
Tubulações		12%	12%	13%	13%	11%	11%	11%	11%
Vasos de pressão		1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
Instalação e serviços		7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%
Membranas		5%	5%	5%	5%	4%	4%	4%	4%
Construção civil		14%	14%	15%	15%	16%	16%	16%	16%
Equipamentos e materiais		20%	20%	20%	20%	19%	19%	19%	19%
Jurídico e pessoal		2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
Pré-tratamento (MF/UF)		9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%

Para estimar o custo de investimento nacionalizado de diversos componentes da planta de dessalinização foram adotadas diferentes porcentagens sobre os valores destes componentes.

Para a captação, vasos de pressão, membranas de osmose inversa e pré-tratamento (MF/UF) que necessitam de importação foram usados 100% do valor para a nacionalização.

Para bombas, tubulações, instalação e serviços a porcentagem para a nacionalização utilizada foi de 50% e para os demais itens não foi aplicado nenhuma correção para nacionalização, pois referem-se a itens e serviços disponíveis no mercado nacional.

Para equipamentos e materiais foram usados 70% do valor para nacionalização, visto que alguns equipamentos e materiais são encontrados no mercado nacional.



Source: GWI DesalData

Figura 8 – Divisão do investimento (gráfico original em inglês, fonte: desaldata.com)

A área requerida para a construção da planta de Osmose Inversa, incluindo as etapas de pré-tratamento, adequação do permeado e descarte, foi estimada com base em estudo realizado pelo Departamento do Interior do EUA, representado na Tabela 8. Os valores confirmam que cerca de 40 a 60% da área é utilizada pelo sistema de O.I..

Tabela 8 - Relação entre capacidade da planta de dessalinização e área de construção requerida.

Capacidade (L/s)	Área para o sistema de O.I. (m <sup>2</sup> )	Área para toda a planta (m <sup>2</sup> )
540	1.140 a 1.200	2.800 a 2.860
6.580	12.400 a 14.000	22.100 a 23.600

A Tabela 9 apresenta a demanda de área para o sistema de osmose inversa e para a planta, em função da capacidade requerida. O valor de R\$200,00 por m<sup>2</sup> foi utilizado para a estimativa do custo do terreno.

Tabela 9 - Estimativa da área requerida para a planta de dessalinização e custo do terreno.

Capacidade (L/s)	Área para toda a planta (m <sup>2</sup> )	Área para o sistema de O.I. (m <sup>2</sup> )	Custo do terreno (R\$)
500	2.723	1.115	544.529,80
1000	4.440	2.175	887.907,28
1500	6.156	3.234	1.231.284,77
2000	7.873	4.294	1.574.662,25
3000	11.307	6.413	2.261.417,22
4000	14.741	8.532	2.948.172,19
5000	18.175	10.652	3.634.927,15

Tabela 10 - Custos de Investimento dos diversos componentes em uma planta de dessalinização

Capacidade (L/s)	500	1000	1500	2000	3000	4000	5000
Item - Custo (R\$)							
Captação	14.366.139,48	28.732.278,96	42.710.144,40	56.946.859,20	113.570.156,70	151.426.875,60	189.283.594,50
Bombas	7.765.480,80	15.530.961,60	23.296.442,40	31.061.923,20	66.977.271,90	91.244.399,40	114.055.499,25
Projeto e pessoal	6.471.234,00	12.942.468,00	17.472.331,80	22.002.195,60	44.651.514,60	59.535.352,80	74.419.191,00
Tubulações	11.648.221,20	23.296.442,40	37.856.718,90	50.863.899,24	80.081.520,75	106.775.361,00	133.469.201,25
Vasos de pressão	2.394.356,58	4.788.713,16	7.183.069,74	9.577.426,32	14.269.070,97	19.025.427,96	23.781.784,95
Instalação e serviços	6.794.795,70	13.589.591,40	20.384.387,10	25.237.812,60	50.960.967,75	67.947.957,00	84.934.946,25
Membranas	6.471.234,00	12.942.468,00	19.413.702,00	25.884.936,00	38.827.404,00	51.769.872,00	64.712.340,00
Construção civil	9.059.727,60	18.119.455,20	27.373.319,82	38.827.404,00	79.596.178,20	104.833.990,80	131.042.488,50
Equipamentos e materiais	22.002.195,60	44.004.391,20	66.006.586,80	88.008.782,40	156.765.643,65	209.020.858,20	261.276.072,75
Jurídico e pessoal	1.294.246,80	2.588.493,60	3.882.740,40	5.176.987,20	9.706.851,00	12.942.468,00	16.178.085,00
Pré-tratamento (MF/UF)	11.648.221,20	23.296.442,40	34.944.663,60	46.592.884,80	87.361.659,00	116.482.212,00	145.602.765,00
<b>Total Investimento</b>	<b>99.915.852,96</b>	<b>199.831.705,92</b>	<b>300.524.106,96</b>	<b>400.181.110,56</b>	<b>742.768.238,52</b>	<b>991.004.774,76</b>	<b>1.238.755.968,45</b>
Terreno	544.529,80	887.907,28	1.231.284,77	1.574.662,25	2.261.417,22	2.948.172,19	3.634.927,15
<b>Investimento + terreno</b>	<b>100.460.382,76</b>	<b>200.719.613,20</b>	<b>301.755.391,73</b>	<b>401.755.772,81</b>	<b>745.029.655,74</b>	<b>993.952.946,95</b>	<b>1.242.390.895,60</b>

## CUSTOS OPERACIONAIS E DE MANUTENÇÃO (O&M)

O consumo de energia, principalmente, devido ao bombeamento e pressurização da solução de alimentação e a reposição de membranas apresentam quase a totalidade dos custos operacionais. A Figura 9 mostra para uma planta com capacidade de 200.000 m<sup>3</sup>/dia a relação entre a demanda de energia nas diferentes etapas do processo de dessalinização.

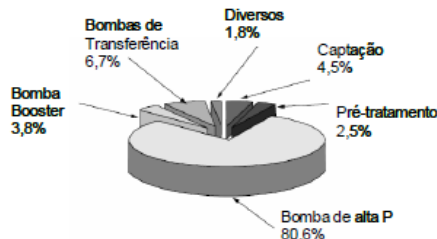


Figura 9 - Demanda de energia em diversas etapas da planta de dessalinização

O custo relacionado com a demanda de energia da unidade, em função da capacidade de produção de água desmineralizada, é apresentado na Tabela 11. Para esta estimativa, os valores calculados para o sistema de O.I. (2,41 kWh/m<sup>3</sup>) foram utilizados. Considerou-se que a demanda de energia no sistema de osmose corresponde a 60% de toda a energia consumida na planta, equivalente a 4,0 kWh/m<sup>3</sup>. Desta forma, utilizado o custo da energia em R\$ 0,34/kWh, pode-se estimar o custo total da energia. Considerou-se 365 dias e 24 horas por dia.

Tabela 11 - Custo da Energia em função da capacidade da planta de dessalinização

Capacidade (L/s)	Potencia total (kWh)	Custo total com energia (R\$/ano)
500	4.333	21.444.480,00
1000	8.666	42.888.960,00
1500	12.998	64.333.440,00
2000	17.331	85.777.920,00
3000	25.997	128.666.880,00
4000	34.663	171.555.840,00
5000	43.329	214.444.800,00

O relatório do Departamento do Interior do EUA apresenta o pessoal necessário para a operação de plantas de dessalinização, cuja extrato resumido após conversão, nacionalização e estimativas é apresentada na Tabela 12 para as capacidades analisadas

Tabela 11 – Custo com pessoal para a operação da planta de dessalinização

Capacidade (L/s)	Custo mensal (R\$)	Custo pessoal (R\$/ano)
500	105.798,53	1.269.582,34
1000	149.943,20	1.799.318,40
1500	167.270,40	2.007.244,80
2000	215.383,87	2.584.606,46
3000	267.466,14	3.209.593,73
4000	298.151,74	3.577.820,93
5000	321.782,56	3.861.390,72

A vida útil de uma membrana de osmose inversa é considerada como 5 anos, entretanto com a utilização do pré-tratamento por micro ou ultrafiltração, pode-se considerar 7 anos com uma estimativa adequada. Este tempo de utilização da membrana implica em uma reposição anual de cerca de 15% da membrana instalada.

Há a necessidade de reposição das membranas de micro ou ultrafiltração, cujo tempo de vida deve ser mantido em 5 anos, ou seja, 20% de reposição anual. O custo das membranas de MF/UF esta em torno de 40% do valor do equipamento de pré-tratamento, e a reposição será 9% deste valor (ver Tabela 9). A Tabela a seguir relaciona o custo anual para a reposição das membranas do sistema de O.I. e do sistema de pré-tratamento.



**Tabela 12 - Custo de reposição das membranas**

Capacidade (L/s)	Reposição de membranas de O.I. (R\$)	Reposição de membranas de MF/UF (R\$)	Custo total para reposição de membranas (R\$/ano)
500	924.462,00	931.857,70	1.856.319,70
1000	1.848.924,00	1.863.715,39	3.712.639,39
1500	2.773.386,00	2.795.573,09	5.568.959,09
2000	3.697.848,00	3.727.430,78	7.425.278,78
3000	5.546.772,00	6.988.932,72	12.535.704,72
4000	7.395.696,00	9.318.576,96	16.714.272,96
5000	9.244.620,00	11.648.221,20	20.892.841,20

A Tabela 13 mostra a relação entre os diferentes itens que compõem os custos operacionais (O&M). Os percentuais foram normalizados, pois somente os custos relacionados com o consumo de energia ficam entre 37 a 43% dos custos de O&M totais.

Como se pode observar, os custos relacionados a produtos químicos, manutenção e outras despesas praticamente equivalem a metade dos custos operacionais, excluindo o custo da energia. Desta forma, nesta avaliação preliminar, adotou-se como critério que estes custos sejam equivalentes aos custos de reposição de membrana e pessoal.

**Tabela 13 - Relação entre os custos operacionais e de manutenção observados na planta de Ashkelon/Israel.**

Componente do custo O&M	Contribuição no custo total (%)	
	Askelon/Israel	Espanha
Produtos químicos	22 – 25	27 – 30
Reposição de membranas	19 – 24	15 – 18
Manutenção	23 – 33	15 – 23
Pessoal	16 – 25	30 – 40
Outros custos	05 – 08	01 – 02

A Tabela 14 relaciona todos os custos envolvidos nos projetos com as capacidades diferentes estudadas. A Tabela 15 calcula o custo do m³ produzido com base no custo operacional.

**Tabela 14 – Relação completa dos custos**

Capacidade (L/s) Item (R\$)	500	1000	1500	2000	3000	4000	5000
<b>Capital - Total (CAPEX)</b>	99.915.852,96	199.831.705,92	300.524.106,96	400.181.110,56	742.768.238,52	991.004.774,76	1.238.755.968,45
Terreno	544.529,80	887.907,28	1.231.284,77	1.574.662,25	2.261.417,22	2.948.172,19	3.634.927,15
<b>O&amp;M - Total (OPEX)</b>	27.696.284,06	53.912.875,58	79.485.847,78	105.797.690,50	160.157.476,90	212.140.027,78	263.953.263,84
Energia	21.444.480,00	42.888.960,00	64.333.440,00	85.777.920,00	128.666.880,00	171.555.840,00	214.444.800,00
Pessoal	1.269.582,34	1.799.318,40	2.007.244,80	2.584.606,46	3.209.593,73	3.577.820,93	3.861.390,72
Reposição de membranas	1.856.319,70	3.712.639,39	5.568.959,09	7.425.278,78	12.535.704,72	16.714.272,96	20.892.841,20
Demais custos operacionais	3.125.902,03	5.511.957,79	7.576.203,89	10.009.885,25	15.745.298,45	20.292.093,89	24.754.231,92

**Tabela 15 – Custo operacional da água produzida**

L	500	1000	1500	2000	3000	4000	5000
R\$/ano	27.696.284,06	53.912.875,58	79.485.847,78	105.797.690,50	160.157.476,90	212.140.027,78	263.953.263,84
m³/ano	15.811.200	31.622.400	47.433.600	63.244.800	94.867.200	126.489.600	158.112.000
R\$/m³	1,75	1,70	1,68	1,67	1,69	1,68	1,67

## CONCLUSÃO

A dessalinização de água do mar por osmose inversa cresceu rapidamente ao longo dos últimos anos tornando-se uma das principais e mais consolidadas tecnologias neste segmento ao redor do mundo. A tecnologia de membranas evoluiu permitindo aumentos significativos de produção e redução de custos.

O estudo descreve todas as etapas de uma planta de dessalinização e ilustra de forma satisfatória com base em diversas premissas a composição dos custos de capital (CAPEX) e custos de operação (OPEX).

Para o cálculo do custo final da água produzida deve-se levar em consideração todo um fluxo de caixa, incluindo algumas variáveis como amortização, TIR, VPL e impostos diversos, entre outros, ficando desta forma o leitor livre para simular e interpretar os resultados obtidos e pretendidos da forma que lhe convir.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AFIFY, A. "Prioritizing desalination strategies using multi-criteria decision analysis". *Desalination* 250 (2010) 928–935.
2. BARBOZA, C.D.N., "Caracterização do Estado Trófico da Enseada de Itaipu", dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense (UFF) - RJ, 2003.
3. CHARCOSSET, C. "A review of membrane processes and renewable energies for desalination". *Desalination* 245 (2009) 214–231.
4. CIPOLLINA, A., MICALE G., RIZZUTI L., "Seawater Desalination – Conventional and Renewable Energy Processes" ed. Springer, 2009.
5. DREIZIN, Y., "Ashkelon seawater desalination project — off-taker's self costs, supplied water costs, total costs and benefits", *Desalination*, 190 (2006) 104–116.
6. FERRAZ, K. C. "Origem e transferência de nutrientes para a Produção Primária de *Ulva* sp. na Ressurgência de Arraial do Cabo: Utilização de Composições Isotópicas naturais de C e N ( $\delta^{13}C$ ,  $\Delta^{14}C$  e  $\delta^{15}N$ )", dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense (UFF) - RJ, 2003.
7. GLOBAL WATER INTELLIGENCE, "Desalination Markets 2010", ed. Media Analytics Ltd., 2010.
8. GREENLEE, L. F., LAWLER, D. F., FREEMAN, B. D., MARROTC, B., MOULINC, P. "Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges". *Water Research* 43 (2009) 2317 – 2348.
9. <http://www.dessaldata.com>, 28/07/2010.
10. "Industry Consortium Analysis of Large Reverse Osmosis/Nanofiltration Element" <http://www.usbr.gov/pmts/water/publications/reportpdfs/report114.pdf>, 05/07/2010.
11. KALOGIROU, S.A. "Seawater desalination using renewable energy sources". *Progress in Energy and Combustion Science* 31 (2005) 242–281.
12. KARAGIANNIS, I. C., SOLDATOS, P. G., "Water desalination cost literature: review and assessment". *Desalination* 223 (2008) 448–456.
13. KUCERA, J., "Reverse Osmosis – Industrial Applications and Processes" ed. John Wiley & Sons, Inc., 2010.
14. LI N. N., FANE A. G., HO W. S. W., MATSUURA T., "Advanced Membrane Technology and Applications" ed. John Wiley & Sons, Inc., 2008.
15. MALLEVIALLE J., ODENDAAL P.E., WIESNER M. R., "Water Treatment Membrane Processes" Ed. McGraw-Hill, 1996.
16. ROSA versão 7.2.1, "Reverse Osmosis System Analysis", 2010.
17. WITTHOLZ, M. K., O'Neill B. K., Colby C.B., Lewis D., "Estimating the cost of desalination plant using a cost database". *Desalination* 229 (2008) 10–20.