



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM
ENGENHARIA QUÍMICA



Dessalinização de água salobra e/ou salgada: métodos, custos e aplicações

Autor: Júlia Betina Torri

Orientador: Aline Schilling Cassini

Porto Alegre, julho de 2015.

Sumário

1	Introdução	1
2	Revisão Bibliográfica	3
2.1	Importância e Distribuição da água	3
2.2	Uso de água de poço no Brasil	7
2.3	Dessalinização	8
2.3.1	Definição e composição da água salgada e salobra	8
2.3.2	Dados e números da dessalinização	9
2.3.3	Histórico da Dessalinização	11
2.4	Processo e métodos de dessalinização	13
2.4.1	Destilação Multiestágios (MSF)	15
2.4.2	Destilação Multiefeitos (MED)	16
2.4.3	Destilação por compressão de vapor (DCV)	17
2.4.4	Destilação Solar (SD)	18
2.4.5	Osmose Inversa (OI)	19
2.4.6	Eletrodialise (ED) e Eletrodialise inversa (EDI)	22
2.4.7	Rejeito do processo da dessalinização	23
2.5	Custos relativos aos processos de dessalinização	24
3	Exemplos da Aplicação de Sistemas de Dessalinização	28
3.1	Fernando de Noronha, Brasil	28
3.2	Espanha	30
3.3	Israel	33
3.4	Arábia Saudita	34
4	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	36
5	Referências	38

Agradecimentos

Quero fazer um agradecimento especial à Prof^a Aline, minha orientadora, seu apoio foi essencial, muito obrigada!

Agradeço aos professores do DEQUI e da UFRGS, por todo ensinamento dado.

Agradeço a meus pais, por todo amor, carinho e todas as palavras de incentivo dadas desde o início da minha vida escolar.

Agradeço ao meu namorado por todo o apoio dado durante a faculdade, por deixar mais fáceis os momentos de dificuldade, e por fazer parte de cada passo desse longo caminho.

Agradeço aos meus amigos e família em geral, por toda compreensão nessa fase que passou. Agora, inicia-se uma nova etapa...

Resumo

Mesmo países que, no momento, não enfrentam problemas de escassez de água devem se deparar com problemas de falta de água no futuro próximo. Em função disso, e da grande oferta de água nos oceanos (água salgada), um caminho a fim de maximizar a oferta de água seria fazer uso de um processo chamado dessalinização, objeto de estudo desse trabalho, que seria utilizar-se da água salgada e/ou salobra, imprópria para consumo, reduzindo-se o teor de sal que ela contém e tornando-a potável. Dessalinizar água salgada e/ou salobra permite aumentar os recursos de água disponíveis no mundo. Processos de dessalinização podem ser categorizados em dois tipos principais: (1) processos térmicos (destilação multiestágios, destilação multiefeitos, Destilação por compressão de vapor, entre outros) e (2) processos de separação por membranas (osmose inversa, eletrodialise, entre outros). A escolha da tecnologia é influenciada pela qualidade da fonte de água, energia demandada, custos, frequência do uso da unidade, volume de água a ser produzido, dentre outros fatores. Assim, não existe um método que seja melhor que os demais: cada um apresenta vantagens e desvantagens. Os custos para realizar o tratamento convencional da água têm aumentado em várias partes do mundo e os custos para dessalinizar têm diminuído, conseqüentemente a dessalinização tem se tornado mais competitiva e economicamente atraente. Alguns países dependem estritamente das tecnologias de dessalinização para obter água potável, como é o caso da Arábia Saudita, Emirados Árabes e Kuwait no Oriente Médio. Os custos de produção da água dessalinizada vêm diminuindo, como resultado de avanços tecnológicos, ao mesmo tempo em que o número de plantas instaladas no mundo tem aumentado. Na Espanha, foram construídas mais de 800 plantas desde 1965, produzindo um total de 5,2 milhões de m³ de água por dia para mais de 10 milhões de pessoas. O país é o quarto que mais dessaliniza água salobra/salina do mundo, ficando atrás apenas da Arábia Saudita, Emirados Árabes, e Estados Unidos. No arquipélago de Fernando de Noronha (Brasil) se encontra a maior unidade de dessalinização do Brasil, que produz 47% de toda a água consumida pela ilha. Está em curso, um projeto para duplicar a capacidade da unidade, passando de 27 m³/h para 60 m³/h, o que, a princípio, acabaria com o problema de rodízio e falta d'água do arquipélago.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Distribuição da água total no planeta. Adaptado de Guerreiro (2009).	3
Figura 2.2: Distribuição da água doce no planeta. Adaptado de Guerreiro (2009).	4
Figura 2.3: Previsão da demanda mundial por água. Adaptado de Foundation for Water Research (2011).	5
Figura 2.4: Distribuição da água, da superfície e da população (em % do total do Brasil). Adaptado de Clarke (2005).	6
Figura 2.5: Distribuição da capacidade global instalada pelo uso da água produzida. Adaptado de IDA (2013)	10
Figura 2.6: Capacidade global acumulada de dessalinização planejada e realizada. Adaptado de GWI DesalData (2012)	10
Figura 2.7: Localização das plantas de dessalinização ao redor do mundo. Adaptado de Foundation For Water Research (2011).	11
Figura 2.8: Esquema simples do processo de dessalinização.	13
Figura 2.9: Capacidade Instalada de processos térmicos e com membranas para dessalinização. Adaptado de GWI (2015).	14
Figura 2.10: Capacidade total mundial instalada por tecnologia. Adaptado de IDA (2014).	15
Figura 2.11: Diagrama Simplificado de um processo de Destilação Multiestágios. Adaptado de Foundation For Water Research (2011).	16
Figura 2.12: Diagrama Simplificado de um processo de destilação multiefeitos. Adaptado de Foundation For Water Research (2011).	17
Figura 2.13: Esquema simples do processo de destilação por compressão de vapor por meio de um compressor mecânico. Adaptado de Guerreiro (2009).	18
Figura 2.14: Diagrama simplificado de um processo de Destilação Solar (SD). Adaptado de Foundation For Water Research (2011).	19
Figura 2.15: Princípio da Osmose Inversa. Adaptado de YOUNOS e TULOU (2005).	20
Figura 2.16: Diagrama simplificado de uma planta de dessalinização da água do mar ou salobra por osmose inversa. Adaptado de Guerreiro (2009).	20
Figura 2.17: Esquema de um sistema de eletrodíálise. Adaptado de Charcosset (2009).	23
Figura 2.18: Custo da água dessalinizada por OI em diversas plantas de 1990 a 2005. Adaptado de Hoang (2009).	25
Figura 3.1: Captação da água do mar na praia de Boldró, em Fernando de Noronha, para dessalinização. Adaptado de Tavares (2015).	28
Figura 3.2: Adutora de PVC do sistema de captura da água do mar na praia de Boldró, em Fernando de Noronha. Adaptado de Tavares (2015).	29
Figura 3.3: Equipamentos para o pré-tratamento e processo de dessalinização por osmose inversa em Fernando de Noronha. Adaptado de Tavares (2015).	29
Figura 3.4: Mapa da localização das plantas de dessalinização na Espanha. Adaptado de Mañueco (2015).	31

Figura 3.5: Vista aérea da planta de dessalinização de Torrevieja, Espanha. Adaptado de Mañueco (2015).	32
Figura 3.6: Unidades de Osmose Inversa na planta de dessalinização de Torrevieja, Espanha. Adaptado de Mañueco (2015).	32
Figura 3.7: Vista aérea da planta de dessalinização de Barcelona, Espanha. Adaptado de Mañueco (2015).	33
Figura 3.8: Unidades de Osmose Inversa na planta de dessalinização de Barcelona, Espanha. Adaptado de Mañueco (2015).	33
Figura 3.9: Esquema da planta de dessalinização por osmose inversa de Israel. Adaptado de Tenne (2015).....	34
Figura 3.10: Capacidade de produção de água dessalinizada da Arábia Saudita. Adaptado de Al-Alshaikh (2015).....	35

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Disponibilidade Hídrica no Brasil. Adaptado de Secretaria de Recursos Hídricos de São Paulo (2000).....	7
Tabela 2.2: O sabor da água de acordo com a concentração de sólidos totais dissolvidos Adaptado de Foundation for Water Research (2011).....	8
Tabela 2.3: Composição química da água do mar em ordem de abundância. Adaptado de Libes (1992).	9
Tabela 2.4: Faixa de salinidade para diferentes processos de dessalinização. Adaptado de Menezes (2009).....	13
Tabela 3.1: Quantidade de água demandada e disponível em Israel de 2008 a 2020 (projeção). Adaptado de Tenne (2015).....	32

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABAS	Associação Brasileira de Águas Subterrâneas
AC	Antes de Cristo
ED	Eletrodiálise
EDI	Eletrodiálise inversa
EUA	Estados Unidos da América
Hab	Habitantes
IDA	<i>International Desalination Association</i>
MED	Destilação Multiefeitos
MSF	Destilação Multiestágios
OI	Osmose Inversa
OMS	Organização Mundial de Saúde
PVC	Policloreto de Vinila
SD	Destilação Solar
STD	Sólidos totais dissolvidos
VCD	Destilação por compressão de vapor
CEDAE	Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro
Compesa	Companhia Pernambucana de Saneamento
CONAMA	Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente
DMAE	Departamento Municipal de Águas e Esgotos de Porto Alegre

1 Introdução

A dessalinização para produção de água potável é uma técnica bastante utilizada em regiões com poucos recursos hídricos, garantindo o abastecimento de água de boa qualidade, mesmo em condições pouco favoráveis. Esse processo transforma a água salgada ou salobra em água potável, retirando os sais e minerais dissolvidos.

O crescimento da população, a urbanização, a agricultura e as mudanças climáticas continuarão a pressionar os recursos de água potável tornando mais urgentes as tecnologias de tratamento de água. Com os avanços nas técnicas de dessalinização, a construção de plantas em várias regiões do mundo e a grande quantidade de água salgada distribuída nos mares e oceanos, a dessalinização tem se tornado, cada vez mais, uma parte importante da solução para a escassez de água potável.

Apesar do Brasil possuir cerca de 12% da água doce do mundo, ela não é distribuída de forma uniforme. Em outras palavras, regiões com poucos habitantes apresentam grande quantidade de recursos hídricos. Dessa forma, e devido aos recorrentes problemas de falta de água do Nordeste, e recentemente na região Sudeste, desenvolver outras alternativas para a obtenção de água potável no Brasil é essencial.

Na região semiárida do Nordeste do país, é comum encontrar água salobra nos poços perfurados, sendo imprópria para consumo devido ao alto grau de salinidade. Devido a esse problema, com o intuito de aproveitar essa água e transformá-la em água potável para as comunidades, o Ministério do Meio Ambiente, através do programa Água Doce, escolheu a dessalinização como alternativa, instalando mais de quatro mil dessalinizadores na região desde 2003.

Todos processos de dessalinização se utilizam de tecnologias da indústria química, no qual uma corrente de água salina é alimentada no início do processo, energia na forma de calor, pressão ou eletricidade é aplicada e duas correntes são produzidas: uma de água dessalinizada (doce) e outra concentrada em sais que deve ser disposta em local adequado.

Existem aproximadamente 20.000 plantas de dessalinização em mais de 150 países: Austrália, China, Japão, Estados Unidos, Índia, Israel, Espanha e outros países europeus, Israel, Chile, Oriente Médio, norte da África, entre outros. Dentre as tecnologias mais usadas se encontram a de osmose inversa (tecnologia de membrana), a destilação multiestágios e a destilação multiefeitos (ambas tecnologias térmicas).

A escolha da tecnologia é influenciada pela qualidade da fonte de água, energia demandada, custos, frequência do uso da unidade, volume de água a ser produzido, dentre outros fatores. Assim, não existe um método que seja melhor que os demais: cada um apresenta vantagens e desvantagens.

O crescimento do mercado da dessalinização vem sendo estimulado por uma variedade de fatores. O alto custo e a menor disponibilidade de águas de superfície e águas subterrâneas, o crescimento da economia e da população em áreas que dependem da dessalinização para obtenção de água, o impacto das mudanças climáticas, o desejo das pessoas de viverem em cidades litorâneas (70% da população mundial já vive a menos de 80km do mar), onde a água tem disponibilidade limitada e a diminuição nos

preços da dessalinização são os fatores que mais impulsionam o crescimento das plantas que se utilizam deste processo.

Dentro deste contexto, o presente trabalho tem como objetivo apresentar uma visão aprofundada da problemática da escassez de água, bem como algumas das tecnologias existentes para a realização do processo de dessalinização, visando aumentar a oferta de água potável. Constitui-se também do objetivo do trabalho, analisar alguns exemplos reais da aplicação destas tecnologias em plantas de dessalinização no mundo.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Importância e Distribuição da água

A água é um recurso fundamental para a existência da vida, tanto animal quanto vegetal. Ela constitui mais de 60% de todas as funções necessárias à vida do organismo humano (Serafim et al., 2014). Depois do oxigênio, é da água que o corpo humano mais precisa para sobreviver, sendo esta de qualidade adequada e em quantidade suficiente para manter a saúde do homem e propiciar o desenvolvimento econômico (Sousa, 2002).

Desde a descoberta de que a produção de alimentos dependia da oferta de água usada no cultivo, a água tem sido um bem de extrema importância para o homem. Sociedades foram desenvolvidas próximas a regiões com boas ofertas de recursos hídricos e fácil captação de modo que atendessem a suas demandas domésticas e agrícolas. Sendo que esses recursos eram suficientes para aquela sociedade naquele momento, as sociedades foram virando cidades e grandes metrópoles e água foi se tornando escassa. Posteriormente, a água passou a ser usada para movimentar máquinas que cortavam madeira, em moinhos de grãos e finalmente em processos industriais (Grassi, 2001).

A superfície do nosso planeta é constituída por apenas 30% de terra firme. Os outros 70% são de água, correspondendo a um volume estimado de 1,4 bilhão de km³ de água no planeta (Grassi, 2001). Da qual cerca de 97,5 % está presente nas águas dos oceanos e mares, na forma de água salgada, ou seja, imprópria para o consumo humano. Dos 2,5 %, total de água doce existente, 20 % são águas subterrâneas, 79 % são águas que se encontram armazenadas nas calotas polares e geleiras e apenas 1 % do volume inicial é água disponível para consumo pela população mundial, sendo encontrada na forma de rios, lagos, umidade do solo, atmosfera (umidade) e na biota (Figura 2.1) (Guerreiro, 2009).

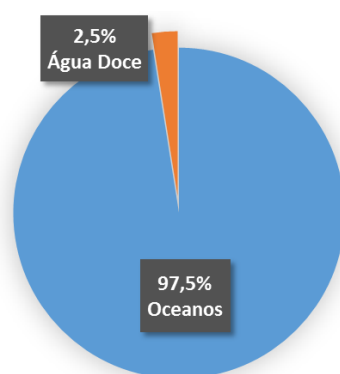


Figura 2.1: Distribuição da água total no planeta. Adaptado de Guerreiro (2009).

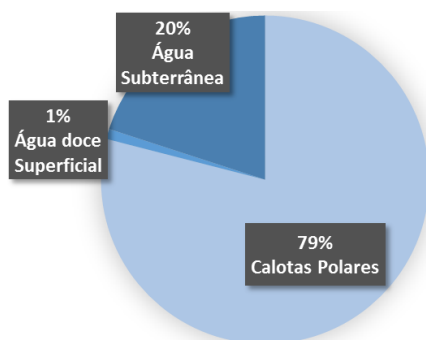


Figura 2.2: Distribuição da água doce no planeta. Adaptado de Guerreiro (2009).

Apesar da grande quantidade de água que cobre a superfície da Terra, existe uma crise mundial a respeito da disponibilidade de água de boa qualidade que atinge níveis locais, regionais e nacionais (Mathioulakis et al, 2007).

Existem estudos que apontam para uma escassez cada vez mais pronunciada de água para a produção de alimentos, desenvolvimento econômico e proteção de ecossistemas naturais (Grassi, 2001). Aproximadamente 25% da população mundial não tem acesso à água doce de boa qualidade e em quantidade suficiente e mais que 80 países enfrentam severos problemas acerca da água (Karagiannis e Soldatos, 2007).

Estima-se que a água doce disponível para consumo humano varie entre 12.500 e 14.000 km³ de água por ano. Segundo foi estimado no ano 2000, isto representa, teoricamente, ao redor de 7000 m³ per capita por ano. Conforme a projeção das Nações Unidas, a população do planeta em 2050 será de mais de 9 bilhões de pessoas, mesmo com o declínio da taxa de aumento populacional, sobrepondo em 3 milhões de pessoas o número de habitantes que se tem atualmente. Aproximadamente 95% desse aumento ocorrerá em países do Terceiro Mundo (United Nations, 2005), onde justamente se encontram os maiores índices de pobreza, com deficiências de água. Levando em conta essa projeção, no ano de 2050, a disponibilidade global de água doce per capita diminuiria para 5100 m³ de água. Essa quantidade seria suficiente para satisfazer as necessidades humanas, visto que especialistas estimam que o consumo de água per capita deve ser de, no mínimo, 1000 m³ por ano, se a água estivesse distribuída igualmente entre todos os habitantes do mundo. Entretanto, os valores de água disponível per capita não levam em conta a distribuição não equitativa da água no mundo, já que em muitos casos, a água não está onde se quer, nem em quantidade suficiente (Menezes, 2009)

Mesmo países que no momento não enfrentam problemas de escassez de água devem se deparar com problemas de falta de água no futuro próximo. De acordo com o Worldwatch Institute, mais de dois terços da população mundial podem vivenciar situações de insuficiência de água em 2025, afetando praticamente todo país no mundo, incluindo os desenvolvidos, a menos que a demanda seja reduzida (Karagiannis e Soldatos, 2007). A Figura 2.2 mostra a seriedade do problema que pode ser a diferença brusca entre a demanda e a oferta global por água nas próximas décadas (Foundation for Water Research, 2011).

Segundo a Foundation for Water Research (2011), o problema do aumento da demanda por água e conseqüentemente a escassez pode ser solucionada de várias formas, cada uma contribuindo à sua maneira:

- redução das perdas de água nas tubulações durante a distribuição e uso;
- aumento da reciclagem da água no uso doméstico e industrial;
- aumento da eficiência do emprego da água nos banheiros e afins (ex. redução da quantidade de água usada nos banheiros);
- a transferência de água de regiões ricas em recursos hídricos para regiões carentes de água;
- e principalmente desenvolvimento e uso de tecnologias assim como a utilização de novas fontes de água.

Em função da problemática exposta anteriormente e da grande oferta de água nos oceanos (água salgada), um caminho a fim de maximizar a oferta de água seria fazer uso de um processo chamado dessalinização, objeto de estudo desse trabalho, que seria utilizar-se da água salgada e/ou salobra, que não é possível ser consumida, reduzindo-se o teor de sal que ela contém e tornando-a potável.

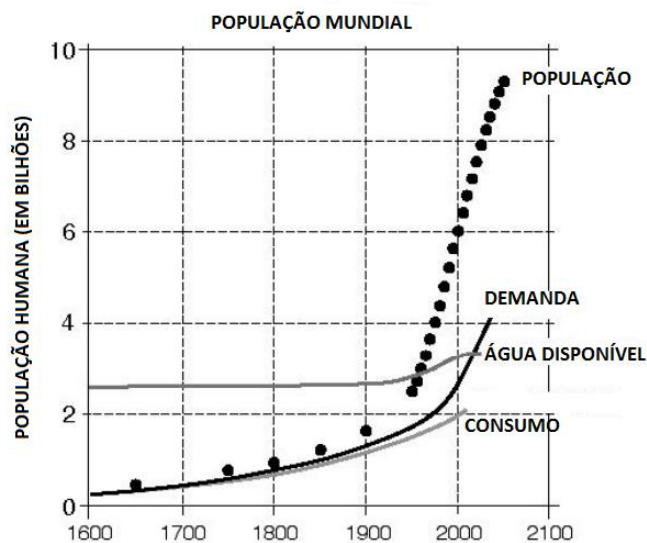


Figura 2.3: Previsão da demanda mundial por água. Adaptado de Foundation for Water Research (2011).

Na maioria das regiões áridas e semiáridas, água doce é muito escassa. Isso é especialmente verdade para a região do Mediterrâneo e Oriente Médio onde grandes cidades e pequenas vilas estão sofrendo pela falta de água de qualidade, mas, ao mesmo tempo, eles têm abundantes fontes de água salgada, podendo fazer bom uso da dessalinização (Mathioulakis et al, 2007).

No mundo todo, o maior uso que se faz da água é na agricultura. A irrigação retira aproximadamente 69% da água doce do planeta. A irrigação consiste em um tipo de uso denominado consuntivo. Isto quer dizer que o recurso utilizado não retorna para a mesma fonte de onde foi retirado. As atividades industriais, ao contrário, são

consideradas não consuntivas, uma vez que a água, embora possa estar contaminada com determinados resíduos, retorna para sua fonte, permanecendo disponível. Estas atividades consomem cerca de 23% e o homem, através do uso direto, é responsável pelo consumo de 8% da água disponível no planeta. Os dados apresentados anteriormente deixam claro que a gravidade da crise hídrica no futuro não é mera especulação. Ao contrário, para atender a uma demanda crescente por alimentos, visto que a população irá aumentar bastante nos próximos anos, a expectativa é de um maior uso de água na irrigação (Grassi, 2001).

O Brasil, de acordo com a OMS (Organização Mundial de Saúde), é um país privilegiado em termos de recursos hídricos, pois possui 12% da água doce que escoa na superfície do planeta (Suassuna, 2004). Porém, como mostra a Figura 2.3, a distribuição dessa água é extremamente desigual: 69% do total de água superficial no Brasil localiza-se na região Norte, onde vive apenas 7% da população brasileira, ou seja, muita água numa região com poucos habitantes. O nordeste brasileiro, que concentra 29% da população do Brasil, possui apenas 3% dos recursos hídricos do país (Menezes, 2009).

Essa desigualdade de percentuais hídricos existente no país, com visível desvantagem para o Nordeste, é consequência das características geoambientais da região. Na tabela 2.1, é mostrada a situação crítica do Nordeste, onde, de todos os estados que fazem parte, apenas o Piauí apresenta situação confortável. Nesta tabela é comparado a disponibilidade hídrica per capita ($m^3/hab/ano$) de alguns países da Europa em relação à alguns estados brasileiros, mostrando que Reino Unido e Alemanha estão na mesma situação, quanto a disponibilidade hídrica per capita, que Ceará, Alagoas e Sergipe (Luca, 2012).

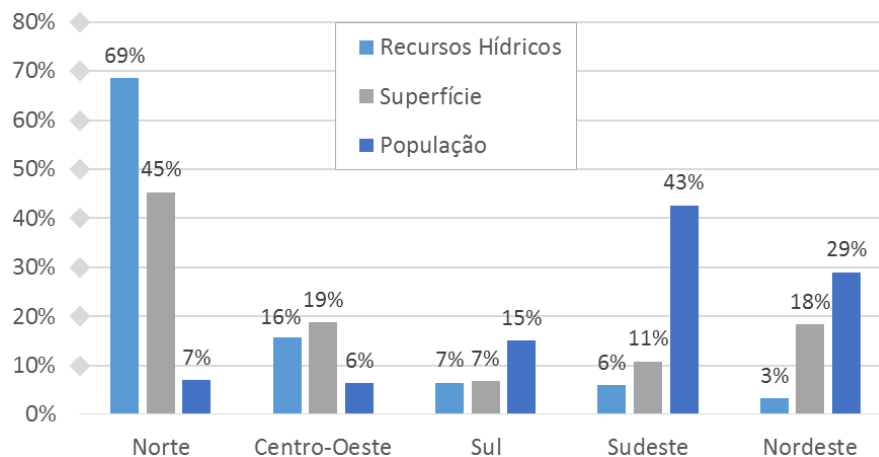


Figura 2.4: Distribuição da água, da superfície e da população (em % do total do Brasil). Adaptado de Clarke (2005).

Para Rebouças (1997), o estigma da escassez no Nordeste, já que existe uma oferta de água doce, está caracterizada pelo fato de 80% das descargas dos rios ocorrerem nos setores ocupados por 5% da população, enquanto os 20% restantes devem abastecer 95% do contingente.

Disponibilidade hídrica per capita m ³ /hab/ano	País	Disponibilidade hídrica per capita m ³ /hab/ano	Estado Brasileiro	Disponibilidade hídrica per capita m ³ /hab/ano
Abundante >20.000	Finlândia	22.600	Roraima	1.747.010
	Suécia	21.800	Amazonas Rio Grande do Sul	878.929 20.798
Muito Rico >10.000	Irlanda	14.000	Paraná	13.662
	Áustria	12.000	Minas Gerais	12.325
Rico >5.000	Portugal	6.100	Piauí	9.608
	Grécia	5.900	Espírito Santo	7.235
Situação Limite >2.500	França	3.600	Bahia	3.028
	Espanha	2.900	São Paulo	2.913
Pobre <2.500	Reino Unido	2.200	Ceará	2.436
	Alemanha	2.000	Alagoas Sergipe	1.752 1.743

Tabela 2.1: Comparação da disponibilidade hídrica no Brasil em relação à alguns países da Europa. Adaptado de Secretaria de Recursos Hídricos de São Paulo (2000)

2.2 Uso de água de poço no Brasil

Uma importante fonte alternativa às águas superficiais são as águas subterrâneas. Até 2009, estima-se a existência de pelo menos 400.000 poços no Brasil. Essas águas são extremamente exploradas no país, e vêm sendo utilizadas para o abastecimento humano, irrigação, indústria e lazer. Além disso, 15,6% dos domicílios utilizam exclusivamente água subterrânea e 77,8% usam redes de abastecimento de água e, por fim, 6,6% usam outras fontes de abastecimento (Menezes, 2009).

Apesar da deficiência em recursos hídricos superficiais, poderiam ser extraídos do subsolo da Região Nordeste, sem risco de esgotamento dos mananciais, pelo menos 19,5 bilhões de m³ de água por ano (40 vezes o volume explorado hoje), segundo estudos da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS). O uso desta água, porém, é limitado por um problema bastante frequente dos poços do interior nordestino: o alto teor de sais. Grande parte da região (788 mil km², ou 51% da área total do Nordeste) está situada sobre rochas cristalinas e o contato por longo tempo, no subsolo, entre a água e esse tipo de rocha, leva a um processo de salinização (Soares et al, 2006).

Frequentemente, os poços são perfurados em regiões secas e carentes de água e logo após, constatado que a água é imprópria para consumo devido ao alto teor de sais, são rejeitados. Como essa água não atinge seu objetivo principal que é o de promover água de boa qualidade para a população, os prejuízos são grandes tendo em vista o custo de perfuração dos poços (Oliveira, 1999). Sem opção, diversas comunidades rurais nordestinas consomem água com salinidade acima do limite recomendado pela OMS, que é de 500 ppm. Nessas comunidades, a única fonte de água é o aquífero cristalino subterrâneo (Carvalho, 2000).

Monteiro (2002) encontrou forte correlação entre indicadores socioeconômicos no estado do Ceará e a salinização das águas que abastecem suas populações. Os 10 municípios (entre 170) com piores indicadores possuem quase 70% de seus poços com altos teores de sais, enquanto nos 10 melhores classificados este percentual é de apenas 16%.

Desde 2002, os Governos Federal e Estaduais têm procurado instalar equipamentos de dessalinização das águas salobras subterrâneas, objetivando a geração de água doce para o abastecimento urbano no Nordeste, sendo que até 2004, mais de 3 mil dessalinizadores já tinham sido instalados na região (Soares et al, 2006).

2.3 Dessalinização

2.3.1 Definição e composição da água salgada e salobra

A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA nº 357 de 2005, que determina os padrões de qualidade das águas do território nacional, considera que a classificação das águas doces, salobras e salinas é essencial à defesa de seus níveis de qualidade, trazendo em suas definições os limites de salinidade de cada classe:

- águas doces: águas com salinidade igual ou inferior a 0,5‰
- águas salobras: águas com salinidade entre 0,5‰ e 30‰
- água salinas: água com salinidade igual ou superior a 30‰

Logan (1965) define salinidade como a concentração total dos íons dissolvidos na água. Assim, quanto maior a salinidade, maior será a quantidade de sólidos totais dissolvidos (STD) nesta e maior sua condutividade elétrica, pois os íons são partículas carregadas eletricamente (Logan, 1965 apud Oliveira, 2005). A Tabela 2.2 mostra a palatabilidade da água em diferentes concentrações de sólidos dissolvidos expresso em mg/l.

Palatabilidade	Sólidos Dissolvidos (mg/l)
Excelente	menos que 300
Boa	entre 300 e 600
Razoável	entre 600 e 900
Pobre	entre 900 e 1.200
Inaceitável	maior que 1.200

Tabela 2.2: O sabor da água de acordo com a concentração de sólidos totais dissolvidos
Adaptado de Foundation for Water Research (2011).

A salinidade do mar atinge entre 33.000 mg/l e 38.000 mg/l. Na literatura, a composição iônica do mar tem sido mensurada como 19,35 g/kg (Cl), 10,78 g/kg (Na), 1,28 g/kg (Mg), 2,712 g/kg (S), 0,4176 g/kg (Ca), 0,399 g/kg (K) (Pearce, 2015). Na Tabela 2.3 pode se ver alguns componentes químicos encontrados no mar em ordem de abundância. Os mares e lagos podem ter uma grande variabilidade nos sólidos totais dissolvidos, como por exemplo, o Golfo Árábico com uma média de 48.000 mg/l de STD e Mono Lake na Califórnia, EUA, com um conteúdo de 100.000 mg/l. A salinidade do Mar Morto atinge 250.000 mg/l, um nível aproximadamente sete vezes maior que a dos oceanos (Foundation for Water Research, 2011).

Categoria	Exemplos	Faixa de concentração
Íons mais abundantes	Cl ⁻ , Na ⁺ , Mg ⁺⁺ , SO ₄ ⁻ , Ca ⁺⁺ , K ⁺	mM
Íons menos abundantes	HCO ₃ ⁻ , Br ⁻ , Sr ⁺⁺ , F ⁻	μM
Gases	N ₂ , O ₂ , Ar, CO ₂ , N ₂ O, (CH ₃) ₂ S, H ₂ S, H ₂ , CH ₄	nM a mM
Nutrientes	NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , NH ₄ ⁺ , PO ₄ ³⁻ , H ₄ SiO ₄	μM
Metais (traços)	Ni, Li, Fe, Mn, Zn, Pb, Cu, Co, U, Hg	< 0,05 μM
Compostos orgânicos dissolvidos	Aminoácidos e ácidos húmicos	g.L ⁻¹ a mg.L ⁻¹
Colóides	Espuma do mar e flocos	
Particulado	Areia, argila, tecido morto, organismos marinhos, fezes	g.L ⁻¹ a mg.L ⁻¹

Tabela 2.3: Composição química da água do mar em ordem de abundância. Adaptado de Libes (1992).

2.3.2 Dados e números da dessalinização

O processo de dessalinização da água do mar resulta em duas correntes: corrente de água doce contendo baixa concentração de sais dissolvidos (produto do processo) e a salmoura, corrente altamente concentrada com sólidos totais dissolvidos. Esse processo requer energia na forma de eletricidade, pressão ou calor para dessalinizar, e utiliza diversas técnicas diferentes para separação (Khawaji et al, 2008). Segundo Charcosset (2009), geralmente, processos de dessalinização podem ser categorizados em dois tipos principais: (1) processos térmicos e (2) processos de separação por membranas, os quais serão aprofundados no prosseguimento deste trabalho.

A dessalinização permite aumentar os recursos de água disponíveis no mundo produzindo água doce de fontes salinas ou salobras. Pode ser bem empregada nas seguintes situações: em localidades situadas próximas do litoral ou em ilhas áridas, para transformar água do mar em água potável, em localidades onde a água obtida de poços profundos é salobra e, portanto, imprópria para o consumo humano, em navios, submarinos, plataformas de petróleo e outras embarcações que necessitam de água potável para suas tripulações, bem como em locais, próximo ao mar, onde houveram tragédias, tais como terremotos, tsunamis, furacões, entre outros (Brasil, 2005).

Os custos de produção convencional da água têm aumentado em várias partes do mundo e os custos para dessalinizar tem diminuído, conseqüentemente a dessalinização tem se tornado mais competitiva e economicamente atraente (Burn, 2015). Lattemann et al (2010) estimaram que em 2015 os custos para o tratamento de água tradicional, tratamento da água de reuso e dessalinização serão mais parecidos, pelo menos nos EUA. Contudo, a produção de água dessalinizada no mundo ainda corresponde a menos que 1% do total de água usada (Burn, 2015).

Em 2001, de toda água dessalinizada do mundo, 60% era proveniente da água do mar e 40% proveniente da água salobra (Khawaji et al, 2008). Enquanto que as tecnologias de dessalinização podem ser usadas em diversas aplicações, o maior uso é para converter água salgada para água potável com propósitos municipais (60%). Entretanto, como mostra a Figura 2.4, água dessalinizada também é usada para agricultura (2%) e para propósitos industriais (28%) (IDA, 2013). Apesar do uso da água dessalinizada na agricultura ser limitada pelo preço mais alto comparado a água comumente usada e da necessidade das plantações serem perto de uma fonte de água salobra ou salgada, seria interessante que se usasse mais água dessalinizada na agricultura, pois além de ser

ambientalmente melhor, tem a vantagem da segurança do fornecimento de água e consequentemente da produção de alimentos (Burn, 2015).

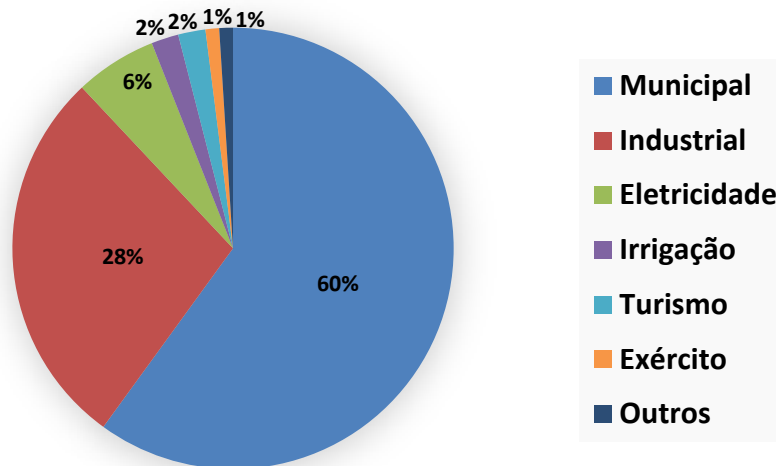


Figura 2.5: Distribuição da capacidade global instalada pelo uso da água produzida. Adaptado de IDA (2013)

A capacidade mundial de dessalinização em 2012 era de 77,4 milhões de m³ por dia (IDA, 2013), e a taxa média de crescimento da capacidade diária de dessalinização, de 2002 para 2007, foi de 12% ao ano (Global Water Intelligence, 2007). Em relação ao número de plantas, o número tem aumentado significativamente, como mostrado na Figura 2.5.

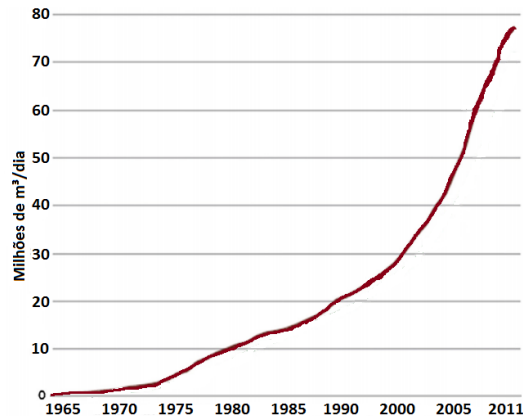


Figura 2.6: Capacidade global acumulada de dessalinização planejada e realizada. Adaptado de GWI DesalData (2012)

Khawaji et al (2008) estimam que mais de 75 milhões de pessoas no mundo todo obtenham água pela dessalinização da água salgada ou salobra. O *IDA Desalting Inventory 2004 Report* mostra que no final de 2002, as plantas de dessalinização no mundo totalizavam 17.348 unidades em 10.350 plantas e a maior parte delas no Oriente Médio (Figura 2.6). Segundo Khawaji et al (2008), os cinco maiores países líderes em dessalinização são Arábia Saudita (17,4%), EUA (16,2%), Emirados Árabes Unidos (14,7%), Espanha (6,4%) e Kuwait (5,8%). Segundo Henthorne (2009) a maior planta de dessalinização em operação do mundo produzia, em 2009, 947.890 m³/dia na *Al-Jubail Plant* na Arábia Saudita.

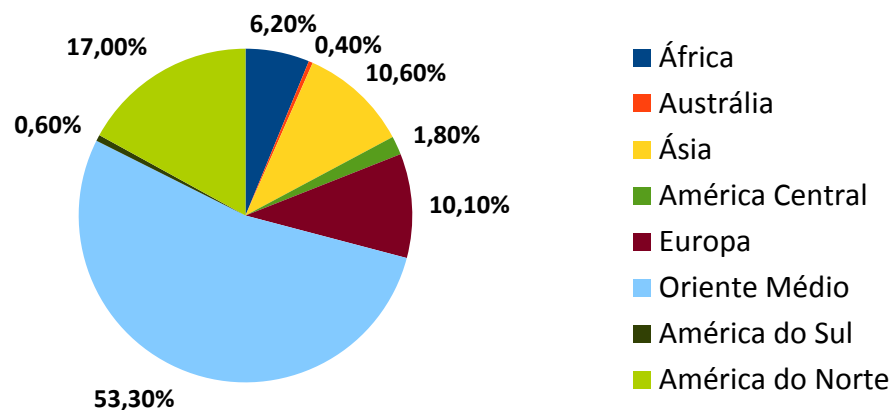


Figura 2.7: Localização das plantas de dessalinização ao redor do mundo. Adaptado de Foundation For Water Research (2011).

Atualmente, alguns países dependem estritamente das tecnologias de dessalinização para obter água potável, como é o caso da Arábia Saudita, Emirados Árabes e Kuwait no Oriente Médio. É consenso que a dessalinização vai continuar crescendo em popularidade no Oriente Médio (Middle East Electricity, 2005). Nos Estados Unidos, a escassez de água em várias cidades resultou num planejamento de médio e longo prazo a fim de aumentar o uso da dessalinização da água do mar para suprir as poucas possibilidades de se obter água potável nessas regiões (Royal Academy of Engineering, 2010).

Em Sydney (Austrália), a taxa de uso de água está aumentando por causa do crescimento da população, chegando a superar a taxa de abastecimento de água que provém dos reservatórios, uma situação que tem sido seriamente exacerbada por períodos de seca. Como consequência, a cidade instalou, em 2010, uma das maiores plantas de dessalinização do mundo que retira água do mar e fornece água de boa qualidade para mais de 1.500.000 habitantes. O custo é quase duas vezes maior do que se a água viesse dos reservatórios, mas tem a vantagem da segurança, não sendo a disponibilidade de água influenciada pelo clima (Sidney Desal, 2015).

2.3.3 Histórico da Dessalinização

A humanidade já dessaliniza água há séculos. De fato, uma das primeiras referências em dessalinização foi Aristóteles, que escreveu sobre destilação da água do mar em 320 AC (Henthorne, 2009).

Alega-se que a primeira planta de dessalinização foi nos Estados Unidos da América e transformava água do mar em água potável no Fort Zachary Taylor em Key West, Florida já em 1861 (Ehrenman, 2004).

Em 1928, foi instalada em Curaçao a primeira planta de dessalinização, com a tecnologia que conhecemos hoje, que produzia 50 m³ de água potável pelo processo da destilação artificial (Pereira, 2015).

Um grande avanço tecnológico ocorreu, no início dos anos 40, durante a segunda guerra mundial, quando estabelecimentos militares operando em áreas áridas precisavam de um jeito de suprir suas tropas com água potável. A contribuição dos Estados Unidos da América foi marcante, mas também foram implementado novos métodos e técnicas em outros países, entre os quais destacam-se Inglaterra, Itália, França, Alemanha e Japão (Tsiourtis, 2001).

Uma planta de destilação foi instalada no HMS Vanguard em 1945, submarino inglês construído durante a Segunda Guerra Mundial (Foundation For Water Research, 2011).

Segundo Rios (2003),

Nos Estados Unidos da América, as primeiras iniciativas para o aproveitamento da água do mar datam de 1952, quando o Congresso aprovou a Lei Pública número 448, cuja finalidade seria criar meios que permitissem reduzir o custo da dessalinização da água do mar. O Congresso designou a Secretaria do Interior para fazer cumprir a lei, daí resultando a criação do Departamento de Águas Salgadas.

O Chile foi um dos países pioneiros na utilização da destilação solar, construindo o seu primeiro destilador em 1961.

Em 1964 entrou em funcionamento o alambique solar de Syni, ilha grega do Mar Egeu, considerado o maior da época, destinado a abastecer de água potável a sua população de 30.000 habitantes.

A Grã-Bretanha, já em 1965, produzia 74% de água doce que se dessalinizava no mundo, num total aproximado de 190.000 m³ por dia.

No Brasil, algumas experiências com destilação solar foram realizadas em 1970, sob os auspícios do ITA - Instituto Tecnológico da Aeronáutica, em São José dos Campos.

Em 1971 as instalações de Curaçao foram ampliadas para produzir 20.000 m³ por dia.

Em 1983, o LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em Lisboa - Portugal, iniciou algumas experiências com o processo de osmose inversa, visando, sobretudo, o abastecimento das ilhas dos Açores, Madeira e Porto Santo.

Em 1987, a Petrobras iniciou o seu programa de dessalinização de água do mar para atender às suas plataformas marítimas, usando o processo da osmose reversa, tendo esse processo sido usado pioneiramente, aqui no Brasil, em terras baianas, para dessalinizar água salobra nos povoados de Olho D'Água das Moças, no município de Feira de Santana, e Malhador, no município de Ipiara.

2.4 Processo e métodos de dessalinização

Todos processos de dessalinização se utilizam de tecnologias da indústria química, no qual uma corrente de água salina é alimentada no início do processo, energia na forma de calor, pressão ou eletricidade é aplicada e duas correntes são produzidas: uma de água dessalinizada (doce) e outra concentrada em sais que deve ser disposta em local adequado. Na Figura 2.7 é mostrado o processo resumidamente.

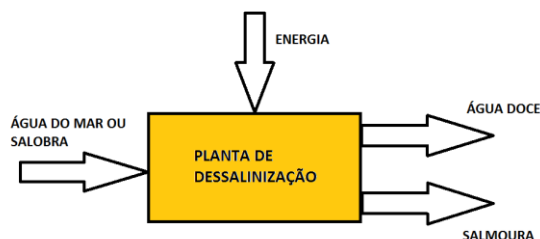


Figura 2.8: Esquema simples do processo de dessalinização.

Younos e Tulou (2005) referem os seguintes processos térmicos para a dessalinização:

- Destilação Multiestágios (MSF)
- Destilação Multiefeitos (MED)
- Destilação por compressão de vapor (VCD)
- Destilação Solar (SD)

No que diz respeito às tecnologias de membranas, Younos e Tulou (2005) referem os seguintes métodos:

- Osmose Inversa (OI)
- Eletrodialise (ED) e Eletrodialise inversa (EDI)

A escolha da tecnologia é influenciada pela qualidade da fonte de água, energia demandada, custos, frequência do uso da unidade, volume de água a ser produzido, dentre outros fatores. De todos esses, a qualidade da água a ser dessalinizada é o fator mais crítico para determinar os tipos de tecnologia que são possíveis de usar para dessalinização de diferentes águas. A concentração de sais, em particular, decidirá qual processo é mais apropriado, levando em conta que incrustações (*fouling*) e dimensionamento são funções da composição da água inicial (Burn, 2015). Assim, não existe um método que seja melhor que os demais: cada um apresenta vantagens e desvantagens. Na tabela 2.4 pode se observar os tipos de processos para cada faixa de valores aproximados de concentração salina.

O uso dos processos de MSF, MED, ED e OI tem recebido atenção significativa na intenção de melhorar a confiabilidade e performance dos processos de dessalinização, embora comercialmente as duas tecnologias mais importantes ainda sejam MSF e OI (Kim et al., 2009).

Processos	Concentrações Salinas (ppm)
MSF e MED	10.000 a 50.000
Osmose Inversa	1.000 a 15.000
Eletrodiálise	1.000 a 5.000

Tabela 2.4: Faixa de salinidade para diferentes processos de dessalinização. Adaptado de Menezes (2009).

O uso das tecnologias de membranas para dessalinização tornou-se totalmente comercial nos anos 1980s. Naquela época, a dessalinização térmica estava muito bem estabelecida, especialmente no Oriente Médio (Henthorne, 2009). Pode-se observar na Figura 2.8, que em meados de 1990, os processos térmicos eram mais usados que os de membranas. Contudo, os processos com membranas foram ganhando destaque a partir de 2000, devido ao seu baixo custo (para processos de grande escala) e simplicidade, tornando-se o processo mais comumente utilizado.

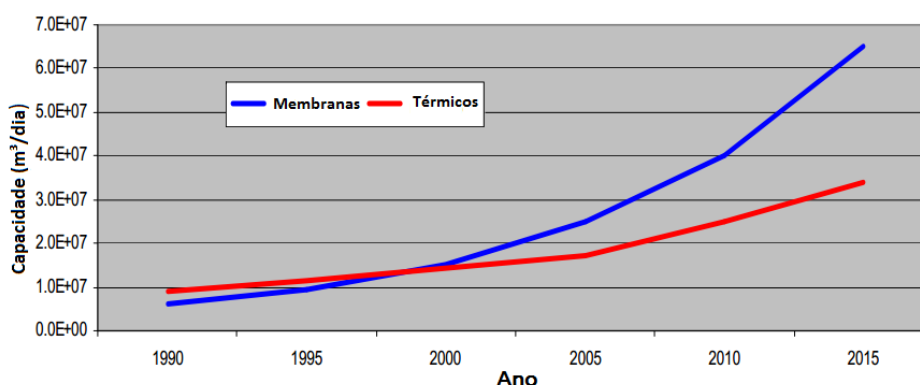


Figura 2.9: Capacidade Instalada de processos térmicos e com membranas para dessalinização. Adaptado de GWI (2015).

A capacidade total mundial instalada por tecnologia é apresentada na Figura 2.9. Como pode ser observado nesta figura, a osmose inversa, processo de membranas predominante, responde por 65% da capacidade total.

Os processos térmicos se utilizam do princípio da destilação, isto é, quando uma solução salina é fervida, durante a mudança de fase da água, os sais dissolvidos, por serem relativamente não-voláteis, permanecem na solução à medida que a água evapora. Na sequência do processo, o vapor é condensado em uma superfície fria, gerando água doce.

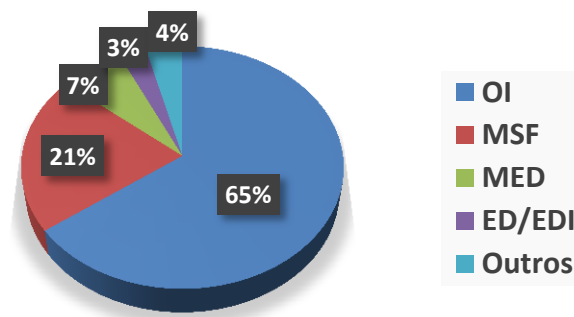


Figura 2.10: Capacidade total mundial instalada por tecnologia. Adaptado de IDA (2014).

2.4.1 Destilação Multiestágios (MSF)

O processo de destilação multiestágios (MSF) é baseado no princípio da vaporização instantânea ou *flash* e, conforme a Figura 2.9, corresponde a cerca de 21% das plantas de dessalinização no mundo (IDA, 2014).

Nesse processo, água salgada é aquecida, aumentando então sua pressão e temperatura, e passa para outro recipiente chamado de estágio (espécie de câmara) numa pressão menor, o que causa uma vaporização instantânea de parte da água (sem precisar adicionar mais calor); o vapor encosta na superfície externa do tubo de água fria que alimenta o primeiro estágio e condensa como água pura, sendo recolhida para o exterior da câmara. O calor latente liberado a partir da condensação do vapor é utilizado para aquecer a água de alimentação. A solução concentrada em sais (salmoura) passa para o segundo estágio numa pressão e temperatura ainda menor e mais água evapora, e consequentemente vapor é condensado. O processo é continuamente repetido através de uma série de estágios. Tipicamente, uma planta de MSF pode conter de 4 a 40 estágios. De todos os processos térmicos, MSF é o mais usado mundialmente e o mais confiável. A Figura 2.10 mostra um sistema MSF de apenas 3 estágios, mas, em plantas comerciais, um número muito maior de estágios são geralmente utilizados (Foundation For Water Research, 2011). Quanto maior o número de estágios, maior será a área de transferência de calor e melhor a eficiência da planta, contudo, aumentam também os custos da planta (Khawaji, 2008).

As plantas de MSF geralmente operam com temperaturas da salmoura entre 90 e 120°C. A operação da planta na temperatura mais alta de 120°C tende a aumentar a eficiência, contudo também aumenta o potencial para formação de incrustações e a corrosão acelerada das superfícies de metais em contato com a água salgada, sendo necessários materiais especiais para evitar incrustações e a deposição de sais (Pearce, 2015).

A água dessalinizada produzida pelo processo de destilação multiestágios contém poucos sais e minerais dissolvidos (tipicamente 2 a 10 ppm), por isso, se ela tiver finalidade de uso potável, deve passar por um pós-tratamento. A água sem sólidos dissolvidos é insípida e sem gosto, além de ser agressiva e corrosiva para os materiais normalmente usados nos sistemas de distribuição, tais como metal e concreto. Com o objetivo de superar esses problemas, vários processos podem ser realizados a fim de tornar a água potável. A água pode ser remineralizada adicionando cal hidratada e

dióxido de carbono (CO₂) com o objetivo de aumentar a dureza, alcalinidade, pH, e minerais dissolvidos. A cloração pode ser realizada injetando gás de cloro, sódio ou hipoclorito de cálcio afim de desinfectar a água e eliminar o crescimento bacteriano. Já a aeração é feita para repor o oxigênio que foi removido durante o processo de destilação MSF, melhorando o sabor da água (Khawaji, 1994).

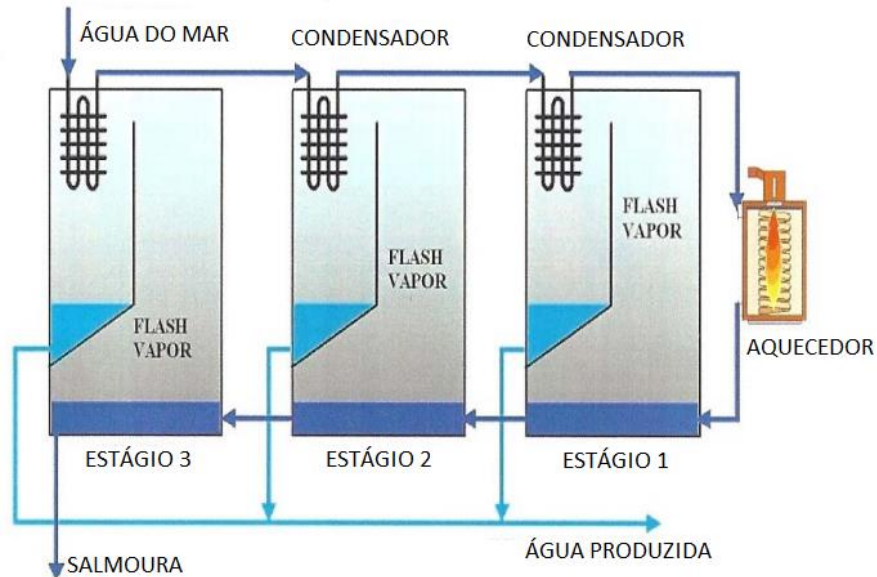


Figura 2.11: Diagrama Simplificado de um processo de Destilação Multiestágios. Adaptado de Foundation For Water Research (2011).

Plantas de MSF vêm sendo construídas desde os anos 50. A maior unidade de MSF se encontra nos Emirados Árabes Unidos, a qual é chamada de *Shuweiat Plant* e tem capacidade de 75.700 m³ por dia (Khawaji, 2008).

2.4.2 Destilação Multiefeitos (MED)

A destilação multiefeitos (MED) também conhecido como *long-tube vertical distillation (LTV)* é o mais antigo método de dessalinização e também o mais eficiente termodinamicamente. Conforme a Figura 2.9, é o processo usado em cerca de 7% das plantas de dessalinização no mundo. Funciona com um princípio similar ao da destilação por multiestágios, exceto que o vapor de água doce formado num efeito é usado para evaporar água do mar no outro efeito, promovendo uma fonte de calor para as evaporações seguintes (Henthorne, 2009).

O processo MED acontece em uma série de evaporadores chamados de efeitos, o qual tem início com a aspersão da água salgada fria diretamente sobre um conjunto de tubos quentes contendo vapor. Nesse momento, parte da água evapora e esse vapor de água pura é coletado para ceder calor e aquecer os tubos que vão evaporar a água do mar no próximo efeito. A água salgada remanescente (que não evaporou) é usada para resfriar e condensar o vapor e serve de corrente de alimentação para o próximo efeito. Tal como na MSF, a pressão vai diminuindo entre cada efeito, bem como a temperatura (Guerreiro, 2009). A Figura 2.11 exemplifica o funcionamento de um processo por destilação multiefeitos.

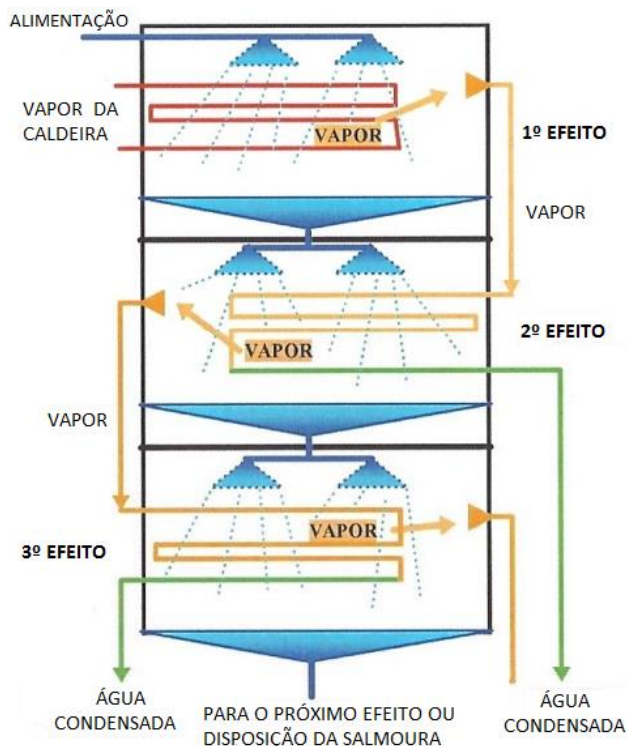


Figura 2.12: Diagrama Simplificado de um processo de destilação multiefeitos. Adaptado de Foundation For Water Research (2011).

O consumo de energia de uma planta MED é significativamente menor que de uma planta MSF, sendo mais eficiente do ponto de vista termodinâmico e de transferência de calor. Em contrapartida, é impossível utilizar a tecnologia MED em pequena escala (Darwish, 1995).

As plantas de MED funcionam com temperaturas menores, se comparado às plantas de MSF, o que reduz a corrosão e deposição de sais nas superfícies metálicas, embora aumente a necessidade de área de transferência de calor adicional nos tubos, que podem ser horizontais, verticais ou submersos (Ophir et al., 1994).

O tamanho de unidades de baixa temperatura de MED tem aumentado gradualmente. Duas unidades de MED em *Sharjah*, UAE, tem, cada uma, capacidade de 22.700 m³/dia (Awerbuch, 2002). A maioria das aplicações recentes de grandes plantas MED tem sido no Oriente Médio; embora o número de plantas MED ainda seja relativamente menor quando comparado com MSF, este número tem aumentado (Khawaji, 2008).

2.4.3 Destilação por compressão de vapor (DCV)

A destilação por compressão de vapor é mais uma das técnicas de dessalinização por processos térmicos, em que o princípio de funcionamento é semelhante ao do MED com a diferença de que a DCV tem por base a compressão do vapor de água gerado na evaporação da água.

Esta tecnologia funciona com um compressor comprimindo o vapor; como resultado dessa compressão, a temperatura e a pressão do vapor aumentam, ou seja, o trabalho feito na compressão do vapor se transforma em calor. A água salgada da alimentação é usada para resfriar o vapor comprimido que se condensa, transformando-se em água

destilada, ao mesmo tempo que água salgada é aquecida, produzindo mais vapor (Foundation For Water Research, 2011). O processo é ilustrado na Figura 2.12.

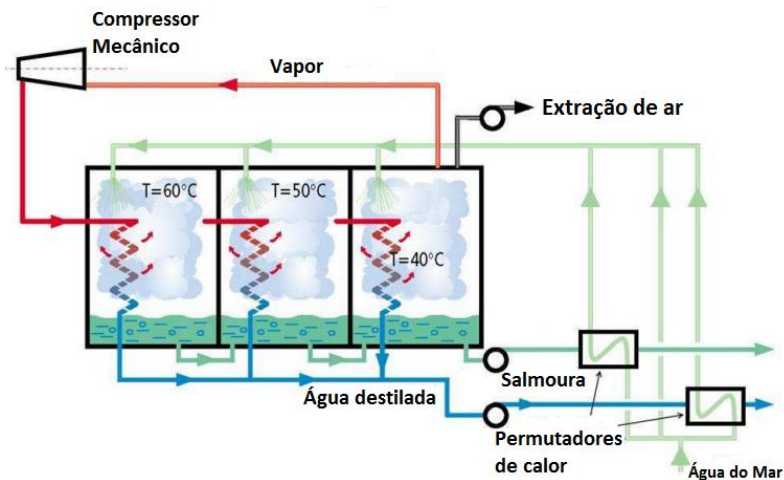


Figura 2.13: Esquema simples do processo de destilação por compressão de vapor por meio de um compressor mecânico. Adaptado de Guerreiro (2009).

A destilação por compressão de vapor é normalmente usada onde o requerimento de água doce é relativamente pequeno, tal como em pequenas comunidades, navios ou em grandes hotéis com requerimento de até 5000 m³/dia. O consumo de energia da maior unidade é de, aproximadamente, 8 kWh/m³ de água produzida. Tendo um compressor com alta capacidade, é possível operar a planta com temperaturas menores que 70°C, o que reduz a possibilidade de se ter incrustações e corrosão (Khawaji, 2008).

2.4.4 Destilação Solar (SD)

A destilação solar usa a energia térmica do sol para processar a dessalinização, é um processo antigo e uma tecnologia possível apenas para pequenas escalas.

O processo é similar a uma parte do ciclo natural da água, no qual a água do mar é aquecida pelos raios solares para produzir vapor d'água. O sistema consiste de um grande tanque de vidro, que permite a entrada da radiação solar, onde o calor do sol aquece a água do mar, evaporando parte dela. O vapor é, então, condensado na superfície interior da cobertura, e a água doce resultante é coletada lateralmente como mostrado no diagrama da Figura 2.13 (Khawaji, 2008).

A grande vantagem desse método é que se trata de um sistema de baixo custo. Contudo, há uma série de inconvenientes: é necessário ter uma boa vedação do tanque para evitar que vapor e calor escapem, reduzindo a efetividade do sistema; além disso, embora a energia térmica não tenha custo, energia adicional é necessária para bombear a água para dentro e para fora do sistema.

Variações desse tipo de sistema continuam sendo estudados num esforço em aumentar a eficiência, mas elas compartilham dificuldades como a vulnerabilidade quanto às condições climáticas e a necessidade de uma grande área para implantação. Segundo Semiat (2000) são precisos 250 m² para conseguir produzir 1 m³ de água doce por dia. Esta tecnologia pode ser uma boa solução para regiões do globo com vastas áreas desertas e baixos recursos técnicos e econômicos (Buros, 1990).

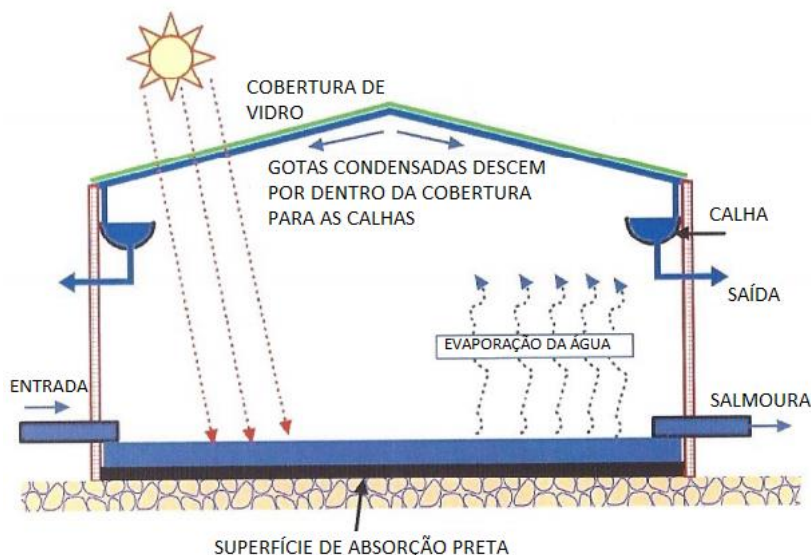


Figura 2.14: Diagrama simplificado de um processo de Destilação Solar (SD). Adaptado de Foundation For Water Research (2011).

2.4.5 Osmose Inversa (OI)

O método de dessalinização por osmose inversa é o mais usado atualmente (2015) correspondendo a cerca de 65% das plantas de dessalinização no mundo (Figura 2.9).

A osmose é o processo em que água passa através de uma membrana semipermeável de uma solução de baixa concentração para uma solução de alta concentração. A pressão necessária a ser aplicada para ocorrer o processo, é chamada pressão osmótica a qual, conforme Juan (2000), é quantificada como a diferença de nível entre as duas soluções após se atingir o equilíbrio. Considerando que o interesse seja aumentar o volume de água pura (dessalinização), deve ser aplicado uma pressão extra, superior à pressão osmótica, capaz de suplantar o potencial osmótico da solução mais concentrada, fazendo sair dela água pura em direção à solução menos concentrada. Como neste caso, água pura estaria se movimentando em sentido contrário ao sentido natural da osmose, dá-se, a este processo, o nome de osmose inversa (Figura 2.14) (Soares, 2006).

O processo de separação por osmose inversa não necessita aquecimento, pois ocorre a temperatura ambiente, e sem mudança de fase.

Água salina é bombeada sob pressão através da superfície da membrana, moléculas de água passam através da membrana deixando uma solução salina concentrada no lado da alimentação e água doce no lado de menor pressão. Quanto mais água permeia a membrana, mais a alimentação se torna concentrada.

A solução concentrada é denominada rejeito (salmoura) e a água doce, de permeado ou recuperado, o qual pode ser entre 10% e 50% da água de alimentação, dependendo da salinidade e pressão da água inicial (Foundation For Water Research, 2011). A taxa em que a água atravessa a membrana é proporcional à diferença de pressão que excede a diferença de pressão osmótica natural (Charcosset, 2009). Para dessalinizar água salobra, as pressões de operações são entre 15 e 30 bar e, para dessalinizar a água do mar entre 55 e 70 bar (Abdallah, 2005). A pressão necessária para o processo de osmose inversa é diretamente proporcional à concentração de sais na água a ser dessalinizada.

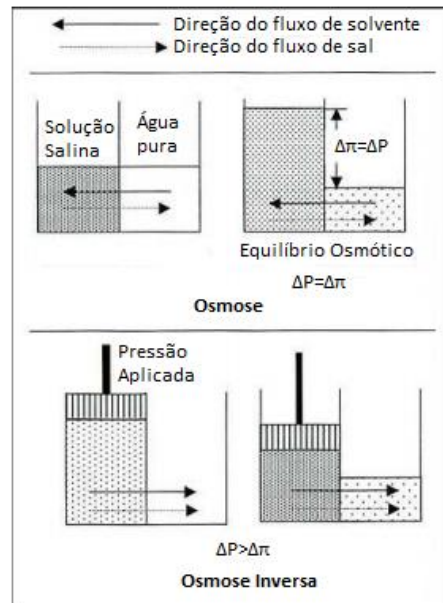


Figura 2.15: Princípio da Osmose Inversa. Adaptado de YOUNOS e TULOU (2005).

Os quatro maiores componentes de uma planta de osmose inversa de água do mar são o pré-tratamento da água de alimentação, a bomba de alta pressão, a membrana e o pós-tratamento do permeado (Guerreiro, 2009). Na Figura 2.15 é possível ver um esquema de uma central de dessalinização com as fases de pré e pós tratamento.

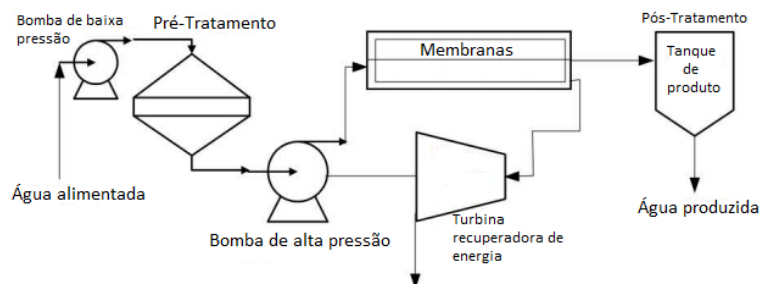


Figura 2.16: Diagrama simplificado de uma planta de dessalinização da água do mar ou salobra por osmose inversa. Adaptado de Guerreiro (2009).

O pré-tratamento da água do mar a ser alimentada numa membrana de osmose inversa é uma parte extremamente importante e deve ser dado bastante atenção nesse ponto no projeto de uma planta de dessalinização de osmose inversa. Há vários parâmetros que influenciam na escolha do pré-tratamento como características de alimentação da água (carbono orgânico dissolvido, STD, turbidez, quantidade de algas e sua evolução durante as estações, temperatura, entre outros), tipo de membrana e configuração, taxa de recuperação da água e qualidade da água permeada (Zanati, 2007). A etapa do pré-tratamento é necessária para eliminar os constituintes indesejáveis na água de alimentação, minimizando os problemas de incrustações e diminuição do fluxo permeado, e fornecendo boa proteção para as membranas e maior vida útil (Charcosset, 2009).

O pré-tratamento pode compreender diferentes tecnologias, tal como um tratamento convencional ou tecnologias avançadas tais como membranas de ultrafiltração (Zanati, 2007). Dentro do pré-tratamento convencional pode-se fazer uso de grades para remoção de sólidos grosseiros, filtro por gravidade de areia ou antracito, filtro de cartucho (que

remove partículas maiores que 10 μm) e outros equipamentos cuja as finalidades serão basicamente as mesmas: remover sólidos em suspensão (Khawaji, 2008).

O elemento principal nos sistemas de dessalinização da água por osmose inversa são as membranas. Segundo Mulder (1991), de uma maneira geral, uma membrana é uma barreira que separa duas fases e que restringe total ou parcialmente o transporte de uma ou várias espécies químicas presentes nas fases.

Dois configurações de maior sucesso comercialmente no campo da dessalinização são as membranas em espiral e as de fibra oca, sendo normalmente feitas de triacetato de celulose e poliamidas (Khawaji, 2008).

O pós-tratamento consiste na estabilização e preparação da água para sua distribuição e geralmente inclui o ajuste de pH, a remoção de gases dissolvidos que podem ter passado pela membrana, tais como o CO_2 e o ácido sulfídrico (H_2S), e a desinfecção usando gás cloro ou hipoclorito de cálcio (Guerreiro, 2009). O custo do pós-tratamento para a tecnologia de osmose inversa é menor em relação ao dos métodos térmicos, pois a água dessalinizada pela osmose inversa apresenta maiores quantidades de sais dissolvidos, necessitando de menor número de processos de potabilização. Além disso a membrana de osmose inversa consegue reter agentes contaminantes como bactérias, vírus e fungos.

Outros fatores importantes que devem ser considerados no momento do projeto de plantas de osmose inversa são a vazão de alimentação, a porcentagem de água pura recuperada, a salinidade do permeado, o tempo de vida da membrana, o consumo de energia, e a temperatura da água de alimentação (Khawaji, 2008).

Em comparação ao MSF, o surgimento de problemas relacionados à corrosão nos processos de OI são menores devido às condições de temperatura ambiente. Além disso, o uso de ligas de metais é menor e materiais poliméricos são usados tanto quanto possível (Abu-Safiah, 1991).

Dois fatores têm ajudado a diminuir os custos de plantas de OI durante a última década: o desenvolvimento de membranas que podem operar eficientemente por longo tempo e o uso de equipamentos de recuperação de energia. Segundo Khawaji (2008), a corrente de salmoura, ao passar pela membrana, perde aproximadamente apenas 1 a 4 bar da pressão aplicada pela bomba de alta pressão, podendo então ser recuperada uma grande quantidade de energia. As unidades de recuperação de energia são componentes mecânicos do sistema, turbinas ou bombas, que podem converter a pressão em energia, produzindo eletricidade.

O maior custo na dessalinização por OI está relacionado com a energia, que pode representar entre 30 e 50% dos custos de operação (Burn, 2015). Sistemas de dessalinização da água do mar por OI usam de 6 a 8 kWh/m^3 , sem recuperação de energia, e de 4 a 5 kWh/m^3 , com dispositivo de recuperação de energia (Pearce, 2015). Já os processos com água salobra, segundo Hoang et al. (2009), consomem cerca de 0,7 a 1 kWh/m^3 . A maior energia requerida num sistema de dessalinização por OI é consumida diretamente na etapa de OI (basicamente pela bomba de alta pressão); segundo Burn (2015), esta etapa consome de 66% a 70% de toda energia da planta de dessalinização. Já o bombeamento da água do mar (coletada aproximadamente 6 m

abaixo do nível do mar), os equipamentos de pré-tratamento, e a disposição do concentrado de volta ao oceano consomem cerca de 29% a 33% da energia total da planta (Burn, 2015).

Alguns problemas associados com o uso do processo de OI podem incluir a necessidade de limpeza das membranas (retrolavagem ou tratamento químico), a pouca resistência destas ao cloro e a formação de incrustações, com conseqüente diminuição do fluxo permeado. Além disso, a curta durabilidade das membranas também representa um problema significativo, gerando altos custos de reposição e um resíduo de complexa disposição; é comum as unidades de dessalinização por OI não terem um plano de disposição destes módulos usados e os mesmos simplesmente ficarem estocados por tempo indeterminado.

Entre as vantagens dos processos de OI podemos citar o baixo consumo energético, o baixo custo de investimento inicial e de operação, a necessidade de pequenos espaços e os equipamentos serem modulares e simples. Os custos das membranas estão diminuindo e se tornando cada vez mais eficientes e com maior durabilidade (Soares, 2006).

Uma variante do processo com membranas de osmose que vem ganhando destaque nas pesquisas é o processo de osmose direta (OD). Neste, a separação do sal da solução se dá através da passagem do solvente da região de maior concentração para a região de menor concentração através da própria pressão osmótica (força motriz); assim, tem-se um processo mais econômico em termos de energia, que dispensa a aplicação de pressão. As membranas de OD recentemente desenvolvidas vêm apresentando maior permeabilidade e maiores taxas de retenção, tornando-as cada vez mais interessantes para a dessalinização (Altaee e Zaragoza, 2014).

2.4.6 *Eletrodialise (ED) e Eletrodialise inversa (EDI)*

Eletrodialise é um processo de separação por membranas, limitado a alimentações com no máximo 3000 mg/L de STD, sendo assim restringido apenas para dessalinização de água salobra. Em uma câmara com um eletrodo positivo numa extremidade e um negativo na outra, íons são separados através de membranas de troca iônica sob a influência de um campo elétrico. Os cátions (íons positivos) migram da água salobra para o eletrodo negativo através de uma membrana de troca catiônica (MTC), que só permite a passagem de cátions. Da mesma forma, ânions (íons negativos) migram da água para o eletrodo positivo através de uma membrana de troca aniônica (MTA), que só permite a passagem de ânions (ilustrado na Figura 2.16) (Younos e Tulou, 2005).

Numa escala industrial, um sistema de eletrodialise contém centenas de pares de membranas de troca catiônica e aniônica colocados alternadamente entre os eletrodos e separadas por espaçadores de fluxo que permitem a passagem da água. As correntes em cada espaçador de fluxo alternado são uma sequência de água concentrada e diluída que fluem em paralelo uma com a outra (Burn, 2015).

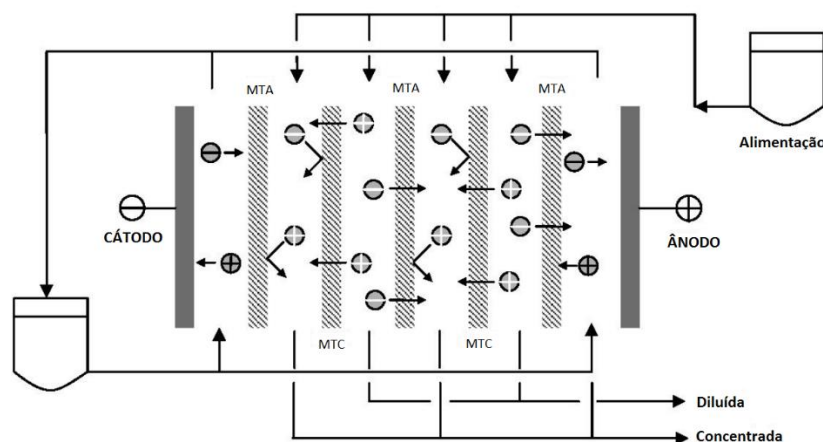


Figura 2.17: Esquema de um sistema de eletrodialise. Adaptado de Charcosset (2009).

É necessário realizar um pequeno pré-tratamento antes do processo em questão, visto que os sólidos em suspensão maiores que $10\ \mu\text{m}$ devem ser removidos para evitar *fouling* na membrana. Também é importante a remoção de substâncias orgânicas, colóides e alguns óxidos, já que eles podem causar a neutralização da membrana, afetando seu efeito seletivo (Guerreiro, 2009).

Em geral, o processo de eletrodialise tem uma taxa alta de recuperação e consegue remover de 75% a 98% dos sólidos totais dissolvidos na água salobra, a uma pressão de 5 a 7 bar (Younos e Tulou, 2005).

Para prevenção de *fouling* existe um processo similar, chamado de eletrodialise inversa (EDI), em que a polaridade é invertida a cada 20 min, criando um mecanismo de limpeza e diminuindo as incrustações.

A taxa de recuperação da EDI é ainda maior que da eletrodialise, podendo atingir até 94% de remoção de sólidos totais dissolvidos (Charcosset, 2009). Em relação ao processo de OI, Younos e Tulou (2005) assinalam que nos processos de EDI e ED são usados menos produtos químicos, os custos são menores e os parâmetros operacionais são mais adaptáveis. Contudo, as tecnologias ED e EDI são bem menos flexíveis, especialmente quanto a salinidade da água inicial, além de não reterem os agentes patogênicos (vírus, bactérias e fungos).

A maior planta de EDI no mundo ($200.000\ \text{m}^3/\text{dia}$) em Barcelona, Espanha, trata água do Rio *Llobregat* com uma salinidade de aproximadamente $3000\ \mu\text{S}/\text{cm}$, com um consumo de energia de $0,6\ \text{kWh}/\text{m}^3$.

Recentes avanços na tecnologia de EDI tem resultado em melhora da performance, custos menores e maior vida útil da planta (Ferrer, 2007).

2.4.7 Rejeito do processo da dessalinização

Conjuntamente com a obtenção da água potável a partir do processo de dessalinização, gera-se também uma corrente de água bastante concentrada em sais (aproximadamente $70.000\ \text{mg}/\text{L}$ de STD) que deve ser disposta em local apropriado (Kim, 2009).

Nas grandes usinas de dessalinização pelo mundo, a principal destinação do rejeito é seu retorno ao mar; esta alternativa de disposição seria ideal, considerando-se o poder de diluição dos oceanos, porém, como alertam Hoepner e Lattemann (2002) é conveniente considerar a fragilidade de cada ecossistema. Para Einav e Lokiec (2002), os prejuízos aos ecossistemas marinhos se devem não só à alta concentração do rejeito, mas, também, à presença de compostos químicos que foram usados no pré-tratamento da água.

Para atenuar os impactos dos processos de dessalinização na vida marinha, a indústria tem criado projetos avançados em dispositivos de captação da água no mar que reduzem consideravelmente a chance de arrastamento e invasão de espécies marinhas, e tem se preocupado também em desenvolver dispositivos de descarga da salmoura no mar, os quais sejam capazes de eficientemente descarregar e difundir a salmoura (rejeito), minimizando o impacto ao meio ambiente (Henthorne, 2009).

Em geral, nos países desenvolvidos, o rejeito está sendo transportado para os oceanos ou injetados em poços de grande profundidade; todavia, outras alternativas estão sendo estudadas, tais como bacias de evaporação, redução de volume do rejeito por plantas aquáticas, bacias de percolação e irrigação de plantas halófitas (Porto et al., 2001)

Conforme Mickley (2004), a escolha da melhor opção para se dispor o rejeito da dessalinização deve atender, dentre outros fatores, às disponibilidades locais (terra, compatibilidade das águas receptoras e distância), às disponibilidades regionais (geologia, leis estaduais, geografia e clima), ao volume de concentrado, aos custos envolvidos e à opinião pública.

Ahmed et al. (2003) confirmam a viabilidade técnica de se tratar rejeitos de dessalinização em instalações de estrutura simples, usando a tecnologia de cristalização de sais. Com base na análise destes autores, vários tipos de sais, incluindo cloreto de sódio, hidróxido de magnésio, cloreto de cálcio, carbonato de sódio e sulfato de sódio, podem ser produzidos. Esses produtos são de alta qualidade e estão na demanda de várias indústrias.

No nordeste do Brasil, onde se dessaliniza água salobra mediante dessalinizadores de pequeno porte, outras alternativas que não apenas as usuais devem ser avaliadas e propostas. Em algumas comunidades do sertão, com a água salobra da dessalinização cultivam-se peixes, mais precisamente a tilápia (espécie que mais se adaptou ao sistema) e camarões. Também são usadas plantas halófitas, em especial, a *Atriplex nummularia*, que tem alta tolerância aos sais, conseguindo absorver grande quantidade de água salgada quando irrigada com a salmoura. Essas plantas são fontes ricas em proteína e caroteno e servem de alimentação para o gado cultivado no sertão nordestino (Soares, 2006).

2.5 Custos relativos aos processos de dessalinização

Os custos de produção da água dessalinizada vêm diminuindo como resultado de avanços tecnológicos ao mesmo tempo em que o número de plantas instaladas no mundo tem aumentado. Na Figura 2.17 são mostrados os valores (em \$/m³ de água) para a produção de água dessalinizada por OI, de 1990 a 2005, para diversas plantas no mundo. A quantidade de energia necessária para dessalinizar a água do mar, entre 1980 e 2000, foi reduzida pela metade devido a melhorias em bombas e outros equipamentos, e

tem sido ainda mais reduzida pelo desenvolvimento de novos sistemas de recuperação de energia que chegam a recuperar 97% da energia utilizada no processo. Como o mais dispendioso na planta são os custos com energia, essa diminuição no consumo da mesma tem direta consequência na diminuição dos custos da dessalinização. Contudo, tem havido uma recente tendência de aumento nos custos devido ao aumento dos preços da construção civil e da energia (Service, 2006).

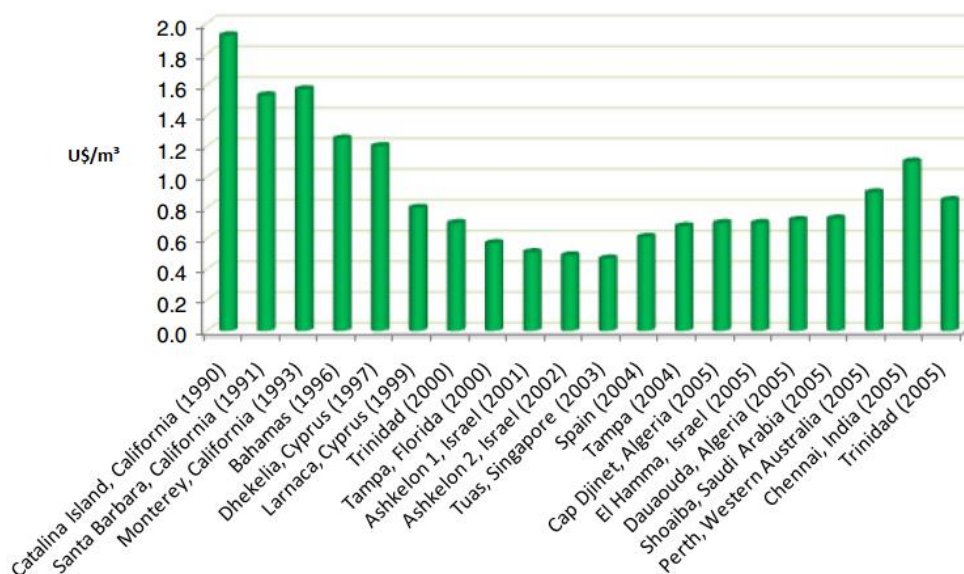


Figura 2.18: Custo da água dessalinizada por OI em diversas plantas de 1990 a 2005. Adaptado de Hoang (2009).

Os custos da dessalinização variam significativamente dependendo do tamanho e tipo de planta de dessalinização, da fonte e da qualidade da água de alimentação, da necessidade de pré-tratamento, da automação e controle, da localização da planta, das condições do lugar, da qualificação do laboratório de qualidade, da vida útil da planta e, não menos importante, dos custos de energia. Água com baixa salinidade requer menor consumo de energia e uma baixa dosagem de produtos químicos anti-incrustantes. Plantas com capacidade conseguem um maior aproveitamento de energia e, portanto, apresentam um menor custo de água por m³. No entanto, elas também requerem alta quantidade de energia, ou seja, precisam dispor de uma boa infraestrutura de energia elétrica nos arredores, e geram um grande volume de solução salina concentrada que deve ser disposta corretamente (Zhou, 2005).

O custo para a dessalinização da água salobra é tipicamente um terço do custo para dessalinizar água do mar. Contudo, a água salobra é mais comumente associada à água subterrânea, que não é um recurso infinito (como a água do mar é considerada). Além disso, quando se tem unidades de dessalinização afastadas da costa oceânica, a disposição do resíduo (salmoura) se torna um desafio, o que muitas vezes incrementa o custo da produção de água, apesar das novas tecnologias tenderem a diminuir a produção do rejeito (Burn, 2015).

O custo de um processo de dessalinização é avaliado em função dos dois maiores elementos: o custo de capital associado à construção e os custos de operação e manutenção (Henthorne, 2009). O custo da água produzida, expresso em \$/m³ de água, é

obtido dividindo a soma dos custos relatados anteriormente, pela quantidade total de água produzida (Khawaji, 2008).

Além destas variáveis que afetam o custo de um processo de dessalinização, é fundamental, também, a avaliação do local onde a planta de dessalinização está instalada, pois fatores tais como a variação nos preços de energia e construção civil, além das diferentes políticas governamentais, incluindo os subsídios muitas vezes oferecidos pelos governos locais, são também fundamentais para a avaliação da viabilidade dos processos de dessalinização em diferentes partes do mundo. A Associação Internacional de Dessalinização (IDA) acredita que a questão fundamental é o valor – não simplesmente o custo – da água. Pois o acesso à água doce e limpa é vital para a vida humana e também essencial para o desenvolvimento econômico (Henthorne, 2009).

Para a dessalinização da água do mar, o método de OI tem se tornado o mais usado atualmente (2015), devido, principalmente, ao decréscimo nos preços das membranas. Contudo, os sistemas de dessalinização em larga escala (mais que 500.000 m³ de água por dia) em muitos países, como China ou Oriente Médio, usam principalmente métodos térmicos. Nesses casos, o custo da água produzida varia entre 0,50 US\$/m³ e 1,00 US\$/m³. Para sistemas de tamanho médio (12.000 - 60.000 m³ de água por dia), o custo da dessalinização da água do mar tem uma variabilidade alta, entre 0,44 US\$/m³ e 1,62 US\$/m³. Para unidades menores (capacidade diária de 1000 - 5000 m³), OI é o método dominante e o custo da dessalinização da água do mar está na faixa de 0,56 US\$/m³ e 3,15 US\$/m³ (Wu, 2006). Para unidades com uma capacidade de poucos metros cúbicos para 1000 m³, o custo pode ser ainda mais alto (1,78 US\$/m³ - 15,20 US\$/m³). Essas unidades pequenas usam principalmente energia renovável, e por essa razão, bem como devido à baixa economia de escala, o custo é alto (Tzen, 2006). Apenas a título de comparação, o Departamento Municipal de Águas e Esgotos (DMAE, 2015) de Porto Alegre cobra pela água o equivalente a R\$ 2,74/m³ (0,87 US\$/m³, considerando o dólar à R\$ 3,13, segundo o Banco Central do Brasil), valor similar ao preço da água dessalinizada. Já na cidade litorânea do Rio de Janeiro, segundo a Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (CEDAE, 2015), a população obtém água a um custo de R\$ 3,16/m³, ou seja, 1,01 US\$/m³. Esse valor é muito próximo ao valor pago pela água dessalinizada em várias partes do mundo.

Sistemas de dessalinização podem ser divididos em duas categorias: aqueles que usam uma fonte convencional de energia, como gás, óleo, eletricidade, e aqueles alimentados por fontes de energia renováveis, tais como energia eólica, solar (células fotovoltaicas ou coletores solares) e geotermal.

Sistemas com energia renováveis oferecem uma alternativa para diminuir a dependência dos combustíveis fósseis, além de serem inesgotáveis e oferecerem vários benefícios para o meio ambiente, se comparado com fontes de energia convencionais. Contudo, seu custo ainda é alto, encarecendo o valor da água produzida. Cada tipo de energia renovável tem suas próprias vantagens que fazem dela adequada ou não para certas aplicações (Hepbasli, 2008). Ao mesmo tempo, segundo Mathioulakis (2007), a seleção da energia renovável apropriada depende de uma série de fatores, que incluem tamanho da planta, salinidade da água de alimentação, localização da planta, avaliação da rede de eletricidade da região, infraestrutura técnica, o tipo e, principalmente, o potencial das fontes locais de energia renováveis. Em geral, em regiões áridas (que são frequentemente remotas), em áreas costeiras ou em pequenas ilhas onde fontes de

energia renováveis estão disponíveis e a obtenção de energia convencional é difícil, a melhor opção para unidades de dessalinização se torna o uso das energias renováveis. Contudo, os sistemas alimentados com esse tipo de energia ainda têm uma capacidade limitada de produção e são escassos, representando, em 2007, apenas 0,02% da capacidade total de dessalinização no mundo (Mathioulakis, 2007).

Na ilha de Kimolos, Grécia, o processo MED aproveita o uso da energia geotermal da ilha num sistema de dessalinização de 80 m³ de água salobra por dia com um custo de 2,00 €/m³ de água doce produzida (Tzen, 2006).

Kaldellis et al. (2004) estudaram o custo da produção de água dessalinizada para ilhas remotas usando energia eólica e solar com processo de OI. De acordo com o resultado obtido, o custo máximo da água produzida era menor que 2,5 €/m³ para instalações de capacidade média e não mais que 3,5 €/m³ em sistemas muito pequenos.

Em 2000, o custo para dessalinizar água do mar com OI estava estimado entre 0,55 US\$/m³ e 2,50 US\$/m³ quando a capacidade da planta estava na faixa dos 1.000 - 100.000 m³/dia. Primeiramente, a OI era usada principalmente para dessalinizar água salobra, mas o processo tornou-se o método predominante para muitos tipos de dessalinização, inclusive da água do mar em sistemas de alta capacidade de produção (Karagiannis e Soldatos, 2007). Em 2005, em sistemas com produção diária de 1.000 - 320.000 m³, o custo estimado já se encontrava na faixa de 0,45 US\$/m³ e 1,72 US\$/m³ (Atikol, 2005).

Quanto ao processo de dessalinização com métodos térmicos, o custo da água produzida por m³ é maior quando comparado à OI, devido à alta quantidade de combustíveis requerida para vaporizar a água salgada. Por outro lado, os métodos térmicos são mais efetivos que os métodos por membrana em termos de eficiência de dessalinização quando a água contém quantidades muito alta de sais.

Plantas de dessalinização podem usar sistemas híbridos para aumentar a produtividade e/ou reduzir o custo. Uma unidade de dessalinização pode ser hibridizada não só em relação à fonte de energia, mas também em relação ao método de dessalinização.

Tzen (2006) apresentou dois sistemas pequenos que produzem 3m³/dia usando energia solar (células fotovoltaicas) combinada com energia eólica. Num sistema com água salobra, o custo era 7,53 €/m³, enquanto que, numa unidade alimentada com água do mar o custo era de 23 €/m³. Tian et al. (2005) mostraram que quando uma planta de MSF alimentada por água do mar e com capacidade de 528.000 m³/dia é combinada com uma unidade de OI para produção do mesmo volume de água o custo pode ser reduzido em 15%.

Apesar da dificuldade de obtenção de crédito no mercado mundial ter impactado a indústria de dessalinização, esta continua crescendo. De fato, ela tem encontrado maneiras de minimizar os custos, tornando-se mais criativa na elaboração dos contratos e aumentando as possibilidades de se realizar financiamentos, incluindo a privatização de algumas das instalações existentes (Henthorne, 2009).

O crescimento na dessalinização está sendo estimulado por uma variedade de fatores: o custo mais elevado da água obtida de modo convencional, a baixa disponibilidade de

águas superficiais, o crescimento de economias e populações em áreas que dependem da dessalinização para se obter água, o impacto das alterações climáticas e da seca, o desejo das pessoas de viver nas regiões litorâneas onde a disponibilidade de água é limitada e a diminuição relativa do custo de dessalinização (IDA, 2013).

3 Exemplos da Aplicação de Sistemas de Dessalinização

A seguir são apresentados alguns exemplos de unidades de dessalinização que estão atualmente em operação ao redor do mundo.

3.1 Fernando de Noronha, Brasil

O arquipélago de Fernando de Noronha, localizado a 545 km do Recife (Pernambuco), conta com o maior sistema de dessalinização da água do mar do Brasil para produção de água potável. É a principal fonte de água potável do lugar, onde apenas a maior das 21 ilhas é habitada, contando com 4 mil moradores e cerca de 500 turistas/mês (Rodrigues e Brenha, 2014).

No sistema de dessalinização de Fernando de Noronha, a água do mar é capturada na praia de Boldró (Figura 3.1). A grande limitação desse sistema é a oscilação das marés, pois somente é possível recolher água do mar no período da maré alta, resultando num período de funcionamento do sistema dessalinizador de 10 a 14 horas (Tavares, 2015).



Figura 3.1: Captação da água do mar na praia de Boldró, em Fernando de Noronha, para dessalinização. Adaptado de Tavares (2015).

A água do mar, segundo Tavares (2015), presidente da Compesa (Companhia Pernambucana de Saneamento), é então enviada por uma tubulação de PVC de 100 mm de diâmetro e um comprimento de 340 m (Figura 3.2) para um tanque de armazenamento de água salgada.



Figura 3.2: Adutora de PVC do sistema de captura da água do mar na praia de Boldró, em Fernando de Noronha. Adaptado de Tavares (2015).

No processo de pré-tratamento, a água do mar passa através de um filtro de areia e filtro de cartucho, usados para remover sólidos e outras partículas em suspensão. Em seguida, a pressão da água do mar é aumentada por uma bomba de alta pressão para iniciar o processo por osmose inversa (Figura 3.3).

De toda água do mar que entra no processo, 60% é retida na membrana de osmose inversa e enviada de volta ao mar.

Com uma demanda de 58 m³/h, as fontes de água potável da ilha não são suficientes para prover água diariamente para todos habitantes. Entre as fontes, além do sistema de dessalinização, há um açude (com capacidade para acumular 200.000 m³ de água) que enche quando chove, mas seca no período de estiagem. Também há os poços artesianos, porém, são muito dependentes das chuvas, além de terem baixa produtividade. A água dessalinizada, do açude e dos poços artesianos, é distribuída por caminhões-pipa que percorrem os 17 quilômetros quadrados da ilha levando água para a população (Tavares, 2015).



Figura 3.3: Equipamentos para o pré-tratamento e processo de dessalinização por osmose inversa em Fernando de Noronha. Adaptado de Tavares (2015).

Antes de 2004, quando o sistema de dessalinização foi instalado em Fernando de Noronha, os moradores obtinham água somente a cada dez ou mais dias, armazenando-a em reservatórios. Com a atual capacidade do sistema de dessalinização e de outras fontes de água, a população vive sob um rodízio de um dia com água para cada seis dias sem (Rodrigues e Brenha, 2014).

Segundo a Compesa, está em fase de licitação uma obra que ampliaria a captação da água do mar, de maneira que a dessalinização possa ocorrer 24 horas por dia. Através dessa ampliação, com investimento de 4,7 milhões de reais, a capacidade de dessalinização passaria de 27 m³/h para 60 m³/h, o que, a princípio, acabaria com o problema de rodízio e falta d'água do arquipélago de Fernando de Noronha (Tavares, 2015).

3.2 Espanha

A Espanha teve sua primeira planta de dessalinização construída em 1965, na ilha de *Lanzarote*, produzindo 2.300 m³/dia. Até 1971, foram instaladas apenas plantas de processos térmicos, tais como destilação multiestágios (MSF) e destilação por compressão de vapor, nas ilhas de *Fuenteventura*, *Ceuta* e *Las Palmas de Gran Canarias*. Algumas das muitas ilhas espanholas em que o crescimento do turismo aumentou significativamente a demanda por recursos de água potável. A primeira planta de dessalinização via osmose inversa no país começou a operar em 1980 nas ilhas Gran Canarias tratando a água salobra subterrânea da ilha. A partir de 1990, todas as plantas construídas já eram de osmose inversa, substituindo totalmente os processos térmicos (Mañueco, 2015).

Atualmente, a Espanha possui mais de 800 plantas de dessalinização, produzindo um total de 5,2 milhões de m³ de água por dia para mais de 10 milhões de pessoas. Sendo o quarto país que mais dessaliniza água salobra/salina do mundo, ficando atrás apenas da Arábia Saudita, Emirados Árabes e Estados Unidos (Habibi e Sabato, 2013).

Na Espanha, o governo Zapatero, eleito em 2004, abandonou os planos do seu predecessor que visavam abastecer as regiões áridas e secas do sul do país, bombeando água do norte (clima temperado, chuva abundante e um grande volume de água potável). Em vez disso, ele decidiu construir usinas de dessalinização por osmose inversa ao longo do litoral sul da Espanha, gerando água "nova", através da tecnologia (Ali, 2006). A Figura 3.4 mostra a localização das maiores plantas de dessalinização da Espanha.



Figura 3.4: Mapa da localização das plantas de dessalinização na Espanha. Adaptado de Mañueco (2015).

A Espanha é um dos países europeus que mais se dedica à agricultura, a qual consome 80% de toda água do país. O programa de dessalinização nacional tem o objetivo também de fornecer água para a população, além de garantir o fornecimento de água dessalinizada para ser usada na irrigação de 250.000 hectares de plantações, assegurando a safra dos produtos para mais de 100.000 fazendeiros (Mañueco, 2015).

A maior planta de dessalinização da Espanha fica na cidade de Torrevieja e foi instalada em 2010 com um custo de 408 milhões de dólares. Possui uma capacidade de produção de 240.000 m³ de água/dia e fornece água para 400.000 habitantes da região, além de irrigar mais de 8.000 hectares de plantações (Cala, 2013). As Figuras 3.5 e 3.6 apresentam uma imagem da planta de Torrevieja e da unidade de osmose inversa, respectivamente.



Figura 3.5: Vista aérea da planta de dessalinização de Torrevieja, Espanha. Adaptado de Mañueco (2015).



Figura 3.6: Unidades de Osmose Inversa na planta de dessalinização de Torrevieja, Espanha. Adaptado de Mañueco (2015).

A segunda maior planta de dessalinização da Espanha encontra-se em Barcelona e iniciou a operação em 2009. Tem uma produção de 200.000 m³ de água/dia e segundo a empresa Degremont, abastece cerca de 20% da cidade de Barcelona. As Figuras 3.7 e 3.8 apresentam uma imagem da planta de Torrevieja e da unidade de osmose inversa, respectivamente.

A planta da cidade de *Águilas*, terceira maior planta de dessalinização da água do mar da Espanha, tem capacidade de produção de 180.000 m³ de água por dia. Começou a operar em 2012 com um custo de 0,49 US\$/m³ de água dessalinizada (Mañueco, 2015).



Figura 3.7: Vista aérea da planta de dessalinização de Barcelona, Espanha. Adaptado de Mañueco (2015).



Figura 3.8: Unidades de Osmose Inversa na planta de dessalinização de Barcelona, Espanha. Adaptado de Mañueco (2015).

3.3 Israel

Em Israel, com mais da metade do território em área de deserto, 76% da água para consumo doméstico já provêm da dessalinização. É um país semiárido, no qual seus recursos naturais de água – chuva, Mar da Galileia e três aquíferos – não conseguem mais fornecer, sozinhos, a água que o país necessita. Com o uso da água dessalinizada, as fontes naturais de água, principalmente os aquíferos, podem se recuperar após muitos anos de estiagem (Tenne, 2015). As usinas de dessalinização fornecem 670 milhões de metros cúbicos por ano, dos 880 milhões consumidos domesticamente no país (Tabela 3.1) (Tenne, 2015).

O governo de Israel investe maciçamente em dessalinização (mais de US\$ 3,5 bilhões por ano), com 39 unidades em funcionamento. A planta de *Sorek* é a maior do país, com capacidade diária de produção de 560.000 m³ de água dessalinizada, à um custo de 0,52 US\$/m³ de água produzida (Tenne, 2015).

De acordo com Flint (2014), em Israel, é mais barato utilizar água dessalinizada do que canalizar abastecimento de lugares distantes. Até 2005, quando a água dessalinizada começou a ser utilizada em larga escala no país, grande parte da água consumida em Tel Aviv era canalizada por meio do Canal Nacional, do Mar da Galileia, que fica a 150 quilômetros da maior cidade de Israel.

Ano	2008	2013	2015	2020
Recursos naturais	675	1.170	1.170	1.170
Dessalinização da água salobra	30	50	70	70
Dessalinização da água do mar	140	585	600	750
Total Disponível	845	1.805	1.840	1.990
Total Demandado	1.382	1.765	1.840	1.970

Tabela 3.1: Quantidade de água demandada e disponível em Israel de 2008 a 2020 (projeção). Adaptado de Tenne (2015).

Israel se encontra com constantes investimentos no desenvolvimento de melhorias nas tecnologias de pré-tratamento e pós-tratamento das plantas de osmose inversa, além de melhorias na tecnologia a fim de minimizar o consumo de energia requerida para o processo. O método de dessalinização por osmose inversa é a tecnologia mais usada nas plantas construídas recentemente no país. Na Figura 3.9 aparece um esquema das plantas de dessalinização por osmose inversa usadas em Israel.

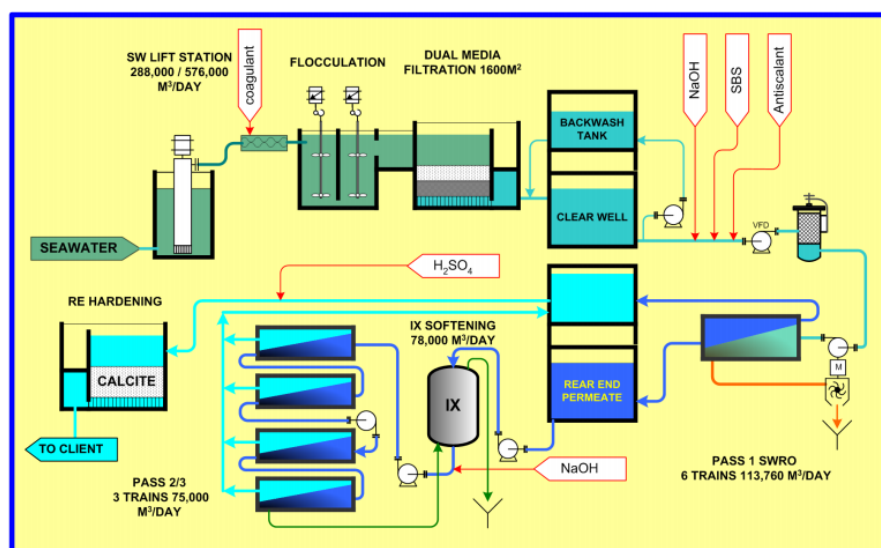


Figura 3.9: Esquema da planta de dessalinização por osmose inversa de Israel. Adaptado de Tenne (2015).

3.4 Arábia Saudita

A Arábia Saudita é o país que mais dessaliniza água no mundo, ficando na frente dos EUA, Emirados Árabes Unidos, Espanha e Kuwait em relação à capacidade de dessalinização. No país, a dessalinização teve início em 1928, quando as primeiras plantas foram construídas, mas foi a partir de 1970 que as plantas em operação atualmente começaram a tomar forma (Al-Alshaiikh, 2015).

Uma grande extensão do país é banhada pelo Mar Vermelho e pelo Golfo Árabe. Conforme a Figura 3.10, a partir do Mar Vermelho se dessaliniza 2.428.880 m³ de água/dia, enquanto que, do Golfo Árabe, são dessalinizados 2.727.414 m³ de água/dia, totalizando 5.156.294 m³ de água dessalinizada/dia. O método mais usado na Arábia Saudita é a destilação multiestágios (MSF), correspondendo a 80% das usinas de dessalinização (Al-Alshaikh, 2015).

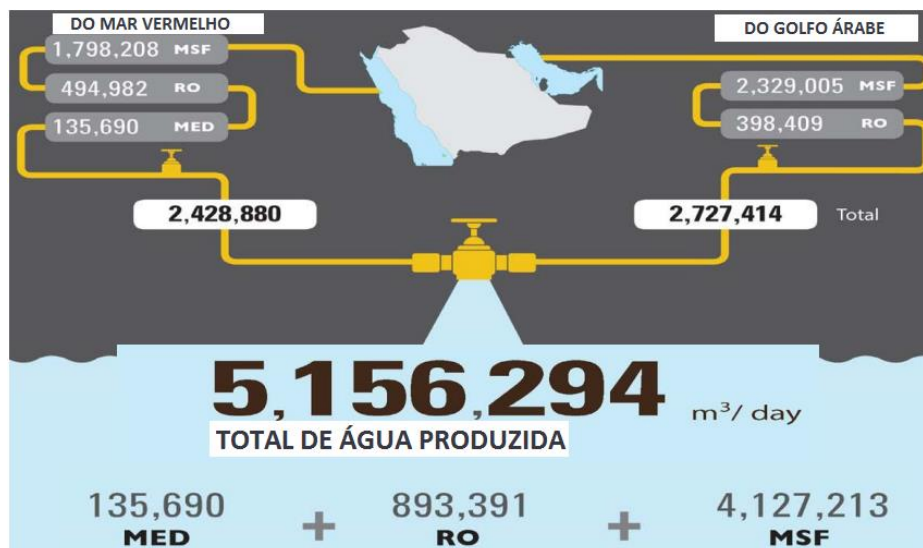


Figura 3.10: Capacidade de produção de água dessalinizada da Arábia Saudita. Adaptado de Al-Alshaikh (2015).

Até 2020, o governo da Arábia Saudita projeta um aumento de 3.000.000 de m³ de água dessalinizada por dia e, com os altos investimentos do governo, a projeção da capacidade de dessalinização do país é de 12.526.294 m³ de água dessalinizada por dia em 2030. Segundo Al-Alshaikh (2015), a maioria das futuras plantas construídas será de osmose inversa, apesar dos métodos térmicos continuarem viáveis para a região. O governo continuará focado em construir plantas alimentadas por energias renováveis, principalmente energia solar, aproveitando-se das características de clima da região.

4 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Neste trabalho, desejava-se expor a problemática, cada vez mais presente, da escassez de água potável no mundo e apresentar o processo de dessalinização como uma alternativa viável de ser utilizada como uma das formas de diminuir este problema. Assim, algumas tecnologias utilizadas para a dessalinização de águas salinas e salobras foram apresentadas, bem como algumas questões econômicas e ambientais foram discutidas.

Depois do estudo e da pesquisa realizada percebeu-se que a questão da escassez de água é realmente relevante nos dias de hoje. O crescimento da população e a diminuição da oferta de água potável no mundo sugerem a busca por alternativas viáveis de obtenção de água doce a fim de equalizar essa questão.

Neste trabalho pode-se analisar os diferentes métodos de dessalinização da água salobra e salgada, sendo que os mais usados atualmente são a osmose inversa (65%) e a destilação multiestágios (21%). É consenso que o método de dessalinização por osmose inversa é o predominante nos projetos atuais, devido, principalmente, ao decréscimo nos preços das membranas, além do desenvolvimento de equipamentos de recuperação de energia, reduzindo a energia gasta no processo.

Os métodos com energias renováveis merecem mais estudos e devem ser continuamente desenvolvidos, de modo que seja possível a diminuição de seu custo. Sistemas com energias renováveis oferecem uma alternativa para diminuir a dependência dos combustíveis fósseis, além de serem inesgotáveis e oferecerem vários benefícios para o meio ambiente, se comparado com fontes de energia convencionais. Contudo, seu custo ainda é alto, encarecendo o valor da água produzida. O uso das fontes alternativas de energia, como a eólica e a solar, apresenta-se como uma solução para viabilizar a dessalinização em lugares onde há pouca infraestrutura elétrica.

Com o aumento no número de plantas instaladas ao redor do mundo e as melhorias técnicas no processo tem havido uma redução no custo de produção de água dessalinizada. Para sistemas com energia convencional, o custo da água do mar dessalinizada está na faixa de 0,44 €/m³ de água a 3 €/m³ de água, enquanto que para dessalinizar a água salobra o custo é quase a metade. Quando fontes de energia renováveis são usadas o custo é muito maior e, em alguns casos, pode atingir até 15 €/m³ de água, devido ao sistema de fornecimento de energia mais caro. Contudo, esse custo pode ser contrabalanceado pelos benefícios ao meio ambiente. A escolha do método de dessalinização afeta significativamente o custo da água dessalinizada, sendo os métodos térmicos, em geral, com um custo (por m³ de água) maior que os métodos por membranas.

Enfim, tecnologias de dessalinização são a chave para assegurar um fornecimento confiável de água potável, seja aumentando as fontes locais existentes ou tornando-se a fonte principal de água em regiões onde outras fontes estão escassas ou praticamente inexistentes. Entretanto, apesar da dessalinização ter um papel extremamente importante no aumento da oferta de água doce, são necessários também outros fatores que, em conjunto, vão atenuar a situação da falta de água presente e futura no mundo. É necessário que haja uma gestão hídrica global eficiente, e principalmente, de modo geral, um uso mais consciente da água, com menos desperdícios e mais reuso/reciclagem da água de uso doméstico, industrial e municipal.

Como sugestões para trabalhos futuros, seria interessante analisar a água dos poços artesianos que existem na região sul do Brasil quanto à salinidade e a possível aplicação de dessalinizadores para tornar essa água potável.

Um estudo do que fazer com os módulos descartados de OI e/ou OD seria de extrema importância a fim de alavancar ainda mais o uso destas tecnologias de maneira ambientalmente correta. Ainda em relação à problemática da curta vida útil das membranas, o desenvolvimento de membranas biodegradáveis pode também ser uma alternativa interessante a fim de minimizar o impacto destas ao meio ambiente.

O estudo de sistemas híbridos, que englobam pelo menos duas das tecnologias citadas ao longo do texto também poderia ser mais explorado.

5 Referências

ABDALLAH, S. M. *Performance of a photovoltaic powered reverse osmosis system under local climatic conditions*, *Desalination*, 183, 95–104, 2005.

ABU-SAFIAH A. *Material selection for the High Pressure Section of Seawater RO plants*, *Desalination*, 84, 279–308, 1991.

AHMED, M.; ARAKEL, A.; HOEY, D.; THUMARUKUDY, M. R.; GOOSEN, M. F. A.; HADDABI, M. A.; BELUSHI, A. A. *Feasibility of salt production from inland RO desalination plant reject brine: a case study*. *Desalination*, v.158, 109-117, 2003

AL-ALSHAIKH, A. *The World's Largest Desalination Market: Saudi Arabia*. In: WATER REUSE AND DESALINATION FOR LATIN AMERICA DEVELOPMENT, 2015, Rio de Janeiro.

ALAWADHI, A.A. *Regional Report on Desalination GCC Countries*, in: Proceedings of the IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, 8–13, 2002.

ALI, R. *A Dessalinização, Solução Milagre para a Falta de Água?*. Prospect Magazine, London, mai. 2006.

ALTAE, A.; ZARAGOZA, G. *A conceptual design of low fouling and high recovery FO-MSF desalination plant*. *Desalination*, v.343, 2-7, 2014.

ATIKOL, U. AYBAR, H.S. *Estimation of water production cost in the feasibility analysis of RO systems*, *Desalination*, 184, 253–258, 2005.

AWERBUCH, L.A., *Vision for Desalination – Challenges and Opportunities*, in: Proceedings of the IDA World Congress and Water Reuse, Manama, Bahrain, 2002.

AYYASH, Y.; IMAI, H. ; YAMADA, T. ; FUKUDA, T.; TANIYAMA T. *Performance of reverse osmosis membrane in Jeddah Phase I Plant*, *Desalination*, 98, 215–224, 1994.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. Disponível em: <<http://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/batch/taxas.asp?id=txdolar>>. Acesso em: 02 jun. 2015

BRASIL. Câmara Dos Deputados. *Dessalinização de Água do Mar no Litoral Nordestino e Influência da Transposição de Água na Vazão do Rio São Francisco*. Brasília. 2005

BRASIL/SENADO FEDERAL. *Dessalinizar a água é cada vez mais viável*. Revista em Discussão!, Brasília, nº 23, dez.2014. Disponível em: <<http://www.senado.gov.br/noticias/jornal/emdiscussao/escassezdeagua/materia.html?materia=dessalinizar-a-agua-e-cada-vez-mais-viavel.html>>. Acesso em: 02 jun. 2015

BURN, S. et al. *Desalination techniques – A review of the opportunities for desalination in agriculture*. Desalination, 2015.

BUROS, O.K., *The Desalting ABC*, International Desalination Association, Topsfield, USA, 1990.

CALA, A. *Spain's Desalination Ambitions Unravel*. The International Herald Tribune, New York, Out-2013.

CARVALHO, P. *Água Potável via Energia Solar*. Ciência Hoje, Rio de Janeiro, v.27, n. 158, 72 – 74, 2000.

CEDAE. Disponível em: <<http://www.cedae.com.br/>>. Acesso em: 02 jun. 2015

CHARCOSSET, C. *A review of membrane processes and renewable energies for desalination*. Desalination, 245, 214-231, 2009.

CLARKE, R.; KING, J. *O atlas da água*. São Paulo: Publifolha, 2005, 128 p.

CRAVO, J.G.; CARDOSO, H.E. *Dessalinização de águas: conceitos e aplicações no Brasil*. A Água em Revista, CPRM/Belo Horizonte (MG), v.7, n.11, 4-20, 1999.

DARWISH, M.A. *Desalination Process: A Technical Comparison*, in: Proceedings of IDA World Congress on Desalination and Water Sciences, Abu Dhabi, Emirados Árabes Unidos, Vol. I, 149–173, 1995.

DEGREMONT. Disponível em: <<http://www.degremont.com.br/PT/Referencias/Pages/Barcelona-Espanha.aspx>>. Acesso em: 22 mai. 2015

DMAE. Disponível em: <http://www2.portoalegre.rs.gov.br/dmae/default.php?reg=9&p_secao=177>. Acesso em: 02 jun. 2015

EHRENMAN, G. *From sea to sink: with supplies of water under stress, the prospect of rendering saltwater drinkable is growing more appealing and more affordable*. Mechanical Engineering Magazine On-Line. 2004

EINAV, R.; LOKIEC, F. *Environmental aspects of a desalination plant in Ashkelon*. Desalination, 156, 79-85, 2003.

FERRER, M.A.; ZARZO, D.M.; LEMES, R. *Trihalomethanes (THM) Precursor Reduction of Surface Water by EDR Technology*, 2007.

FLINT, G. *Para engenheiro israelense, dessalinizar água do mar é opção para amenizar crises hídricas em SP*. Opera Mundi, 2014.

FOUNDATION FOR WATER RESEARCH. *Desalination for Water Supply*. Bucks, UK, 2011. 35 p.

GLOBAL WATER INTELLIGENCE, *Market Profile: Desalination Markets 2007 Preview*, p.27, 2006.

GRASSI, T. M. Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola: *As Águas no Planeta Terra* - Edição especial – Mai 2001.

GUERREIRO, B. F. M. *Dessalinização para produção de água potável: Perspectivas para Portugal*. 2009. 62 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.

GWI DesalData. Disponível em: < <http://www.desaldata.com> >. Acesso em: 29 mai. 2015

HABIBI, A.; SABATO, R. *Escassez de água: desafio ameaçador, mas com um futuro promissor*. University of Pennsylvania, Wharton, jan. 2013. Disponível em: < <https://www.knowledgeatwharton.com.br/article/escassez-de-agua-desafio-ameacador-mas-com-um-futuro-promissor/>>. Acesso em: 22 mai. 2015

HENTHORNE, L. *Desalination – a critical element of water solutions for the 21st century*. Drinking Water – Sources, Sanitation and Safeguarding, p. 47-57, 2009.

HEPBASLI, A. *A key review on exegetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future*, Renewable Sustainable Energy Rev., 12, 593–661, 2008.

HOANG, M.; BOLTO, B.; HASKARD, C.; BARRON, O.; GRAY, S.; LESLIE, G.; *Desalination plants: an Australia survey*, Water 36, 67–73, 2009.

HOEPNER, T.; LATTEMANN, S. *Chemical impacts from seawater desalination plants: a case study of the northern Red Sea*. Desalination, 152, 133-140, 2002.

IDA (Internacional Desalination Association). *Desalination Yearbook*. 2014

IDA. *Desalting Inventory 2004: Desalination Business Stabilized on a High Lever*, Int. Desal. Water Reuse, 14, 14-17, 2004.

JUAN, J. A. M. S. *Desalación de aguas salobres y de mar: Osmose inversa*. Madrid: Mundi-Prensa. 395p. 2000

KALDELLIS, J.K., KAVADIAS, K.A.; KONDILI, E. *Renewable energy desalination plants for the Greek islands – technical and economic considerations*, Desalination, 170, 187–203, 2004.

KARAGIANNIS, I.; SOLDATOS, P. *Water Desalination cost literature: Review and assessment*. Desalination, 223, 448-456, 2007.

KHAWAJI, A.D.; KUTUBKHANAH, I. K.; WIE, J.M. *Advances in seawater desalination technologies*. Desalination, 221, 47-69, 2008.

KHAWAJI, A.D.; WIE, J.M., *Potabilization of desalinated water at Madinat Yanbu Al-Sinaiyah*, Desalination, 98, 135–146, 1994.

KIM, Y.; KIM, S.; KIM, Y.; LEE, S. *Overview of systems engineering approaches for a large-scale seawater desalination plant with a reverse osmosis network*. *Desalination*, 238, 312-332, 2009.

LATTEMANN, S.; KENNEDY, M.D., SCHIPPERS, J.C.; AMY, G. *Sustainable water for the future: water recycling versus desalination* *Water Future* 2, 7–39, 2010.

LIBES, S.M. *An Introduction to Marine Biogeochemistry*. New York, John Wiley & Sons. 734 p., 1992.

LUCA, R. *Proposta de Geração de água doce a partir de água salgada para o Nordeste*. 2012. 58 p. Trabalho de conclusão de curso (Diplomação em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MAÑUECO, G. *The role of Sea Water Desalination in Spain*. In: WATER REUSE AND DESALINATION FOR LATIN AMERICA DEVELOPMENT, 2015, Rio de Janeiro.

MATHIOULAKIS, E.; BELESSIOTIS, V.; DELYANNIS. *Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art*. *Desalination*, 203, 346-365, 2007.

MENEZES, S. J. *Desenvolvimento de Dispositivo caseiro para dessalinização de água salobra para dessedentação humana*. 2009. 115 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

MICKLEY, M. C. *Desalination concentrate management and issues in the United States*. Jul, 2004.

MIDDLE EAST ELECTRICITY. *Drinking Water from the Sea*, 21–22, 2005.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE/BRASIL. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2015/03/programa-agua-doce-levara-agua-potavel-a-200-mil-pessoas>>. Acesso em: 02 jun. 2015

MONTEIRO, V.P. *Critérios para implantação de tecnologias de abastecimento de água potável em regiões afetadas pelo alto teor de sal*. Fortaleza: UFC, 2002, 56P. Dissertação Mestrado.

MULDER, M.H.V. *Basic Principles of Membrane Technology*. Holanda: Kluwer Acad Pub., 1991.

OLIVEIRA, E. M.; BARROS, S. I. *Unidades de dessalinização d'água – Experiência pioneira no semiárido nordestino do estado do Rio Grande do Norte*. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2, 3559-3568, 1999.

OLIVEIRA, J.I.R. *Estudos da Contribuição Potencial do Solo no Processo de Salinização de águas superficiais em uma pequena bacia hidrográfica do semiárido baiano*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana). Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2005.

OPHIR, A.; GENDEL, A.; KRONENBERG, G., *The LT-MED process for SW Cogen Plants*, *Desalination Water Reuse*, 4, 28–31, 1994.

- PEARCE, M. Novel Findings in *Desalination*. *Desalination*, 360, 13-18, 2015.
- PEREIRA, M.A. 87 years of Desalination in Curacao. In: WATER REUSE AND DESALINATION FOR LATIN AMERICA DEVELOPMENT, 2015, Rio de Janeiro.
- PORTO, E. R.; AMORIM, M. C. C.; SILVA JÚNIOR, L. G. A. *Uso do rejeito da dessalinização de água salobra para irrigação da erva-sal (Atriplex nummularia)*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.5, 111-114, 2001.
- REBOUÇAS, A. C. *Água na região Nordeste: Desperdício e escassez*. In: *Estudos Avançados*, São Paulo. v. 11, p. 29, 1997b.
- RIOS, J.P. *Dessalinização da água*. *Ecoviagem*, 2003. Disponível em: <<http://ecoviagem.uol.com.br/fique-por-dentro/artigos/meio-ambiente/dessalinizacao-da-agua-682.asp>>. Acesso em: 29 mai. 2015
- RODRIGUES, A; BRENHA, H. *Dessalinização atenuou racionamento em Fernando de Noronha*. *Folha de São Paulo*, São Paulo, 07 set. 2014. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2014/09/1512291-dessalinizacao-atenuou-racionamento-em-arquipelago.shtml>>. Acesso em: 01 jun. 2015
- ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING. *Global Water Security – an engineering perspective*. 2010
- SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS. *Quadro de Disponibilidade Hídrica*. São Paulo, 2000
- SEMIAT, R. *Desalination: Present and Future*. *Water International*. International Water Resources Association, 54-65, 2000.
- SERAFIM, A.; VIEIRA, E.; LINDEMANN, I. *Importância da água no organismo humano*. Santa Maria, RS: UNIFRA, 2014.
- SERVICE, R.F. *Desalination freshens up*, *Science*, 313, 1088–1090, 2006.
- SIDNEY DESAL. Disponível em: <<http://www.sydneydesal.com.au/who-we-are/our-history/>>. Acesso em: 29 mai. 2015
- SOARES, M. T. *Destinação de águas residuais provenientes do processo de dessalinização por osmose reversa*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.20, n.3, 730-737, 2006.
- SOARES, T. M.; SILVA, I. J. O.; DUARTE, S. N.; SILVA, E. F. F. *Destinação de águas residuárias provenientes do processo de dessalinização por osmose reversa*. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola. Ambiental*, v.10, n.3, p. 730 – 737, 2006.
- SOUSA, S.G. T. *Água Potável garantia de qualidade de vida*. Teresina, PI: UFPI, [ca. 2002]
- SUASSUNA, J. *Recursos Hídricos no Nordeste: a necessidade de gerenciamento*. 2004
- TAVARES, R. *Desalination Experience in Fernando de Noronha Archipelago*. In: WATER REUSE AND DESALINATION FOR LATIN AMERICA DEVELOPMENT, 2015, Rio de Janeiro.

TENNE, A. *Closing the gap the Israeli experience*. In: WATER REUSE AND DESALINATION FOR LATIN AMERICA DEVELOPMENT, 2015, Rio de Janeiro.

TIAN, L.; GUO, J.; TANG, Y.; CAO, L. *A historical opportunity: economic competitiveness of seawater desalination project between nuclear and fossil fuel while the world oil price over \$50 per barrel of oil equivalent (boe) — part A: MSF*, Desalination, 183, 317-325, 2005.

TSIOURTIS, N.X. *Desalination and the environment*. Desalination, 141, 223-236, 2001.

TZEN, E. *Renewable energy sources for desalination*. In: Workshop on Desalination Units Powered by RES, Athens, 2006.

UNITED NATIONS. Department of Economic and Social Affairs. *Population Challenges and Development Goals*. New York, 2005.

WU, S. *Analysis of water production costs of a nuclear desalination plant with a nuclear heating reactor coupled with MED processes*, Desalination, 190, 287–294, 2006.

YOUNOS T.; TULOU K.E. *Overview of Desalination Techniques*. *Journal of Contemporary Water Research & Education Issue*. Universities Council on Water Resources, 3-10, 2005.

ZANATI, E.; KHATIB, K.M. *Integrated Membrane - Based Desalination System*, Desalination, 205, 15–25, 2007.

ZHOU, Y.; TOL, R.S.J. *Evaluating the costs of desalination and water transport*, Water Resour. Res. 41, 2005.