



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**  
**PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA**  
**NÚCLEO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: DESENVOLVIMENTO REGIONAL**  
**PROGRAMA REGIONAL DE DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE**

**SISTEMA DE TRATAMENTO DE ÁGUA SALOBRA: ALTERNATIVA DE  
COMBATE À ESCASSEZ HÍDRICA NO SEMI-ÁRIDO SERGIPANO**

Autor: Silvia Cupertino Formoso

Orientador: Prof. Dr. Roberto Rodrigues de Souza

Fevereiro - 2010

São Cristóvão – Sergipe

Brasil

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**  
**PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA**  
**NÚCLEO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: DESENVOLVIMENTO REGIONAL**  
**PROGRAMA REGIONAL DE DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE**

**SISTEMA DE TRATAMENTO DE ÁGUA SALOBRA: ALTERNATIVA DE  
COMBATE À ESCASSEZ HÍDRICA NO SEMI-ÁRIDO SERGIPANO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Núcleo de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Sergipe, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Autor: Silvia Cupertino Formoso

Orientador: Prof. Dr. Roberto Rodrigues de Souza

Fevereiro - 2010

São Cristóvão – Sergipe

Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

Formoso, Silvia Cupertino

F723s Sistema de tratamento de água salobra : alternativa de combate à escassez hídrica no semi-árido sergipano / Silvia Cupertino Formoso. – São Cristóvão, 2010.

119 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Núcleo de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Programa Regional de Desenvolvimento e Meio Ambiente, Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa, Universidade Federal de Sergipe, 2010.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Rodrigues de Souza.

1. Tratamento de água – Semi-árido – Sergipe. 2. Água – Dessalinização. 3. Destilação solar. 4. Escassez de água – Regiões semi-áridas I. Título.

CDU 628.165(813.7)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

**PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA**

**NÚCLEO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: DESENVOLVIMENTO REGIONAL**

**PROGRAMA REGIONAL DE DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE**

**SISTEMA DE TRATAMENTO DE ÁGUA SALOBRA: ALTERNATIVA DE  
COMBATE À ESCASSEZ HÍDRICA NO SEMI-ÁRIDO SERGIPANO**

Dissertação de Mestrado defendida por Silvia Cupertino Formoso e aprovada em 01 de Fevereiro de 2010 pela banca examinadora constituída pelos doutores:

Roberto Rodriguez de Souza - Orientador

Departamento de Engenharia Química & PRODEMA

Universidade Federal de Sergipe

Prof. Dr. Luiz Mário Nelson de Gois

Departamento de Engenharia Química / Escola Politécnica

Universidade Federal da Bahia

Prof. Dr. Gregório Guirado Faccioli

Departamento de Agronomia & PRODEMA

Universidade Federal de Sergipe

Este exemplar corresponde à versão final da dissertação de Mestrado em  
Desenvolvimento e Meio Ambiente.



---

Prof. Dr. Roberto Rodrigues de Souza  
**Departamento de Engenharia Química & PRODEMA**  
**Universidade Federal de Sergipe**

É concedido ao núcleo responsável pelo Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Sergipe permissão para disponibilizar, reproduzir cópias desta dissertação e emprestar ou vender tais cópias.



---

**Silvia Cupertino Formoso - Autora**

**PRODEMA**

**Universidade Federal de Sergipe**



---

**Prof. Dr. Roberto Rodrigues de Souza**

**Departamento de Engenharia Química & PRODEMA**

**Universidade Federal de Sergipe**

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus, por estar sempre presente em todos os momentos, dando forças para que eu nunca recuasse ou parasse. Sei que não cheguei ao fim e sim ao início de uma longa jornada, e posso ter a certeza de que Ele sempre estará comigo.

Em segundo lugar, gostaria de agradecer aos meus pais, que me deram a vida e me ensinaram a viver com dignidade, iluminando meus caminhos com carinho, apoio, cumplicidade e dedicação. Lembro sempre da força e do exemplo de vida que vocês representam. Vocês me mostraram os rumos e me deixaram seguir aquele que julguei ser o melhor para mim. A vocês, não teria palavras para agradecer tudo que fizeram e ainda fazem por mim, para exprimir uma emoção ímpar, que palavras dificilmente traduziriam. Seria impossível me imaginar aqui se não fosse por vocês.

Em seguida, gostaria de agradecer aos meus professores, em especial: a meu orientador, o Prof. Dr. Roberto Rodrigues de Souza, por sempre buscar despertar em mim o desejo de conhecimento, por me ajudar a contornar os obstáculos e por contribuir para o meu amadurecimento com suas palavras; ao Prof. Dr. José Jailton Marques, por compartilhar suas idéias, pelas sugestões dadas ao longo do desenvolvimento do trabalho e por mostrar-se sempre disposto a ajudar no que fosse preciso; e ao Prof. Dr. Aduino de Souza Ribeiro, pelo incentivo dado quando ingressei no PRODEMA e pela torcida para que eu fizesse um bom trabalho. Aos demais professores da rede PRODEMA, cada qual com sua singularidade, com suas qualidades e até mesmo defeitos, que me fizeram refletir sobre o profissional que queremos e podemos ser, também ficam aqui meu carinho e minha gratidão.

A todos os funcionários do PRODEMA, especialmente à Secretaria, pelo valor de seu trabalho, imprescindível para esse êxito.

Aos colegas, pelos trabalhos, conversas, sorrisos e abraços compartilhados ao longo desses dois anos, meu muito obrigado! Desejo muito sucesso no caminho de cada um de vocês.

Minha gratidão às demais pessoas da família que se alegram (alguns mesmo estando longe) por eu ter concretizado mais essa etapa na minha vida: minha querida avó, meus irmãos, meus tios e meus primos.

Por fim, mas não menos importante, agradeço aos meus amigos pelo companheirismo, pela motivação, pelos momentos de descontração e por me quererem tão bem. Sei que todos vocês, mesmo alguns que estão longe, estavam o tempo todo torcendo por mim.

## RESUMO

Buscando combater a escassez de água em regiões semi-áridas, muitas tecnologias vêm sendo estudadas e testadas, apresentando aspectos positivos e negativos para cada aplicação. Nos últimos anos, o Governo Brasileiro tem buscado atender a demanda de água de comunidades difusas do semi-árido através da instalação de dessalinizadores operando via osmose reversa. No entanto, boa parte dos dispositivos instalados encontra-se fora de uso, devido a problemas de manutenção. O presente estudo procura apontar uma alternativa de produção de água que requer uma operação e manutenção mais simples, particularmente sem o uso de elementos filtrantes. Foi utilizada a destilação solar como abordagem tecnológica, especialmente por esta ir ao encontro das características naturais de insolação da região. O sistema foi proposto visando o abastecimento em escala familiar e consiste basicamente em um concentrador da radiação solar em calha parabólica e um condensador. Através de uma avaliação econômica preliminar, chegou-se a um custo da água de R\$ 30,00/m<sup>3</sup>.

Palavras-chave: Semi-árido brasileiro, dessalinização, destilação solar.

## ABSTRACT

In order to solve scarcity of water in semi-arid regions, many technologies have been studied and tested, presenting positive and negative aspects for each application. In the last years, the Brazilian Government has been trying to supply the water demand of isolated communities of the semi-arid region through the installation of desalination equipments operating through reverse osmosis. However, a good part of the installed devices is out of use, due to maintenance problems. This study tries to point out an alternative of water production which requires simpler operation and maintenance, particularly without the use of filter elements. Solar distillation was used as technologic approach, specially because its characteristics are in agreement with the natural characteristics of insolation of the region. The system was proposed with the objective of supplying a familiar scale water demand and basically consists of a parabolic trough concentrator of solar radiation and a condenser. Through a preliminary economic evaluation, it was achieved a water cost of R\$30,00/m<sup>3</sup>.

Key-words: Brazilian semi-arid region, desalination, solar distillation.

**SUMÁRIO**

	<b>Página</b>
<b>NOMENCLATURA</b>	XII
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	XV
<b>LISTA DE TABELAS</b>	XVI
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b>	01
<b>CAPÍTULO 2 – OBJETIVOS</b>	05
2.1 – OBJETIVO GERAL	06
2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS	07
<b>CAPÍTULO 3 – O SEMI-ÁRIDO E A PROBLEMÁTICA DA ESCASSEZ DE ÁGUA</b>	08
3.1 - A DELIMITAÇÃO DO SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO	09
3.2 - CARACTERIZAÇÃO DO SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO: ASPECTOS FÍSICOS E SÓCIO-AMBIENTAIS	12
3.3 - PROVÍNCIAS HIDROGEOLÓGICAS DO NORDESTE BRASILEIRO E SUA RELAÇÃO COM A ESCASSEZ DE ÁGUA	18
3.4 - CONSIDERAÇÕES SOBRE A DISPONIBILIDADE HÍDRICA COM FOCO NO ESTADO DE SERGIPE	21
3.4.1 - Principais demandas de água no Estado de Sergipe	23
3.4.2 - Pressão sobre os recursos hídricos no Estado de Sergipe	25
3.4.3 - Uso dos recursos hídricos no Estado de Sergipe	26
3.5 - ASPECTOS INSTITUCIONAIS E O DESAFIO DA SUSTENTABILIDADE DO ABASTECIMENTO DE ÁGUA NA REGIÃO DO SEMI-ÁRIDO	29
3.6 - A ESCASSEZ DE ÁGUA E O DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIAS PARA O SEMI-ÁRIDO	33

<b>CAPÍTULO 4 – A DESSALINIZAÇÃO COMO UMA ALTERNATIVA PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA</b>	37
4.1 - AS TENDÊNCIAS DO USO DA DESSALINIZAÇÃO NO MUNDO	38
4.2 - LEVANTAMENTO HISTÓRICO	42
4.3 - A CAPACIDADE MUNDIAL DE DESSALINIZAÇÃO	45
4.4 - PRINCIPAIS PROCESSOS DE DESSALINIZAÇÃO	48
4.4.1 - Processos térmicos	48
4.4.2 - Processos através de membranas	62
4.5 - OS REJEITOS DOS PROCESSOS DE DESSALINIZAÇÃO E A PROBLEMÁTICA DOS IMPACTOS AMBIENTAIS	71
4.5.1 - A destinação dada aos rejeitos de dessalinização em outros países	73
4.5.2 - A destinação dada aos rejeitos de dessalinização no Brasil	76
4.6 - AS PERSPECTIVAS PARA O FUTURO DAS PESQUISAS COM DESSALINIZAÇÃO	80
<b>CAPÍTULO 5 – METODOLOGIA</b>	81
<b>CAPÍTULO 6 – RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	85
6.1 - SELEÇÃO DO PROCESSO TECNOLÓGICO	86
6.2 - SELEÇÃO DO COLETOR DE RAIOS SOLARES	88
6.3 - A ESCOLHA DO MATERIAL	93
6.4 - O SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO PROPOSTO	98
6.5 - ANÁLISE ECONÔMICA	102
<b>CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b>	105
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	109

## NOMENCLATURA

### Letras latinas

$A$  = área

$c$  = calor específico do material

$c_p$  = calor específico da água

CR = grau de concentração

$d$  = taxa de desconto do mercado

$I$  = irradiação

$k$  = condutividade térmica

$l$  = espessura

$L$  = calor latente de vaporização

$\dot{m}$  = fluxo de massa

$N$  = número de anos

$Q$  = quantidade de calor transferido

$\dot{Q}_1$  = variação do fluxo de energia no sistema

$\dot{Q}_2$  = fluxo de energia por radiação

$\dot{Q}_3$  = fluxo de energia liberada ou absorvida na mudança de fase

$\dot{Q}_4$  = fluxo de transferência de energia por condução

$t$  = tempo

$T_a$  = temperatura ambiente

$T_r$  = temperatura do receptor

$U_L$  = coeficiente de perda de calor estacionário

### Letras gregas

$\alpha$  = coeficiente de dilatação linear

$\delta$  = espessura

$\varepsilon$  = eficiência na conversão de energia solar em energia útil

$n$  = eficiência térmica

$n_0$  = eficiência ótica

$\Delta\pi$  = pressão osmótica

$\Delta T$  = diferença de temperatura

### **Abreviaturas**

Ca = cálcio

$\text{Ca}^{2+}$  = íon de cálcio

$\text{CO}_2$  = gás carbônico

$\text{CO}_3^{2-}$  = carbonato

$\text{H}_2\text{S}$  = gás sulfídrico

pH = potencial hidrogeniônico

Na = sódio

$\text{Na}^+$  = íon de sódio

### **Siglas**

ABAS – Associação Brasileira de Águas Subterrâneas

ANA – Agência Nacional de Águas

Codevasf – Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos

CPRM – Serviço Geológico do Brasil

DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra as Secas

EUA – Estados Unidos da América

FUNASA – Fundação Nacional de Saúde

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

ITA – Instituto Tecnológico da Aeronáutica

MED – Destilação de múltiplo efeito

MI – Ministério da Integração Nacional

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MS – Ministério da Saúde

MSF – Destilação *flash* de múltiplo estágio

OGU – Orçamento Geral da União

OMS – Organização Mundial de Saúde

PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S. A.

PNRH – Plano Nacional de Recursos Hídricos

PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

SINGREH – Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SODIS – Sigla para *Solar Water Disinfection* (Desinfecção Solar de Água)

STD – Sólidos Totais Dissolvidos

SUDENE – Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste

UNESCO – Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

VC – Destilação por compressão de vapor

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
Figura 3.1: Delimitação do semi-árido brasileiro	11
Figura 3.2: Classificação dos terrenos encontrados na região Nordeste do Brasil	19
Figura 3.3: Províncias hidrogeológicas do Nordeste brasileiro	19
Figura 3.4: As regiões hidrográficas e a divisão político-administrativa do Brasil	22
Figura 3.5: Participação de cada setor na demanda total em Sergipe (cenário otimista 2025)	24
Figura 3.6: Atendimento por tipo de manancial em Sergipe	27
Figure 4.1: Distribuição global da capacidade de dessalinização instalada por diferentes tecnologias	45
Figura 4.2: Princípio operacional da destilação de múltiplo efeito	50
Figura 4.3: Princípio operacional da destilação por compressão de vapor	53
Figura 4.4: Princípio operacional da destilação <i>flash</i> de múltiplo estágio	57
Figura 4.5: Princípio operacional da destilação solar	59
Figura 4.6: Processos de osmose, equilíbrio osmótico e osmose reversa	62
Figura 4.7: Princípio operacional da eletrodialise	68
Figura 6.1: Curvas típicas de desempenho de coletores solares	89
Figura 6.2: Esquema de um coletor solar em calha parabólica	90
Figura 6.3: Esquema de coletor para concentração da radiação solar com foco linear	91
Figura 6.4: Detalhe de sistemas com foco linear de concentração da radiação solar	91
Figura 6.5: Irradiação média no município de Propriá-SE	92
Figura 6.6: Configuração do dispositivo de dessalinização proposto neste estudo	98
Figura 6.7: Detalhe do coletor de raios solares, mostrando a coleta do rejeito produzido	99

**LISTA DE TABELAS**

	<b>Página</b>
Tabela 3.1: Principais bacias hidrográficas de Sergipe	22
Tabela 3.2: Critérios adotados para análise do grau de pressão sobre os recursos hídricos superficiais	25
Tabela 4.1: Capacidade instalada de dessalinização por país, tomando como base os 11 países com maior capacidade instalada do mundo	46
Tabela 4.2: As potencialidades, as limitações, os avanços alcançados e as perspectivas de melhorias futuras para a destilação de múltiplo efeito	51
Tabela 4.3: As potencialidades, as limitações, os avanços alcançados e as perspectivas de melhorias futuras para a destilação por compressão de vapor	54
Tabela 4.4: As potencialidades, as limitações, os avanços alcançados e as perspectivas de melhorias futuras para a destilação <i>flash</i> de múltiplo estágio	58
Tabela 4.5: As potencialidades, as limitações, os avanços alcançados e as perspectivas de melhorias futuras para a destilação solar	61
Tabela 4.6: As potencialidades, as limitações, os avanços alcançados e as perspectivas de melhorias futuras para a osmose reversa	67
Tabela 4.7: As potencialidades, as limitações, os avanços alcançados e as perspectivas de melhorias futuras para a eletrodialise	70
Tabela 4.8: Principais preocupações ambientais para as diferentes opções de disposição dos resíduos de dessalinização	72
Tabela 6.1: Calor específico de alguns materiais à pressão constante de 1 atm	94
Tabela 6.2: Condutividade térmica de materiais a 27°C	95
Tabela 6.3: Coeficientes de dilatação linear de alguns materiais	96
Tabela 6.4: Potenciais de redução de alguns metais	97
Tabela 6.5: Especificações do coletor solar em calha parabólica	101
Tabela 6.6: Lista dos custos do dispositivo de dessalinização proposto	103

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUÇÃO**

## 1.0 – INTRODUÇÃO

A água é essencial à vida. O homem, além de necessitar da água para seu próprio consumo, é dependente desse recurso para uma infinidade de atividades, nas quais se incluem diversas atividades domésticas, agrícolas e industriais.

A dificuldade de acesso à água de boa qualidade é um problema recorrente no semi-árido brasileiro. Historicamente, soluções paliativas e de caráter emergencial, tais como o abastecimento por carros-pipa, tem sido adotadas quando a situação se torna mais crítica, sobretudo após longos períodos de estio. Essas ações, entretanto, não garantem um fornecimento regular de água para as comunidades beneficiadas, muitas delas com ausência ou dificuldade de acesso a outras fontes de abastecimento de água, ficando dependentes desse fornecimento irregular. Quando se trata de comunidades difusas, o problema se torna ainda mais grave.

Buscando combater este problema, algumas tecnologias não convencionais de manejo da água têm sido implantadas nessas regiões, como por exemplo: o aproveitamento das águas de chuva, o uso de cisternas, a construção de adutoras, entre outras. Estas alternativas apresentam aspectos positivos e negativos para cada aplicação, reforçando a necessidade de serem utilizados critérios para a seleção das tecnologias mais adequadas para cada situação.

A água contendo sais dissolvidos com concentração igual ou acima de 1000mg/L é prejudicial à saúde e inadequada para o abastecimento humano. Muitas comunidades, por falta de outra fonte de água, acabam utilizando água com teores elevados de sais para suprir suas demandas, inclusive para abastecimento humano, o que pode provocar sérios prejuízos à saúde.

Nesse contexto, a dessalinização de águas salgadas e salobras pode cumprir um papel importante no combate à escassez de água em várias regiões ao redor do mundo, especialmente em regiões áridas. Como resultado, tem havido um crescimento no número e na capacidade de processos e plantas de dessalinização. Muitos países no Oriente Médio, e alguns outros ao redor do mundo, já utilizam a dessalinização da água do mar ou salobra como uma solução disponível para seu problema de escassez de água.

Atualmente, uma grande variedade de tecnologias de dessalinização são amplamente utilizadas, a exemplo da destilação *flash* de múltiplo estágio, da destilação de múltiplo efeito e da osmose reversa. No entanto, essas tecnologias são caras para a produção de água em regiões com menos recursos financeiros, sobretudo quando se trata de uma produção em pequena escala. Adicionalmente, o uso de fontes de energia convencionais para dirigir esses processos, a exemplo dos combustíveis fósseis, tem um impacto ambiental altamente negativo para o meio ambiente.

Regiões áridas geralmente apresentam um enorme potencial para utilização de energia solar, que poderia ser melhor aproveitado por métodos especificamente voltados para se beneficiar dessa característica natural, sobretudo nos períodos de maior escassez.

Nesse sentido, a destilação solar poderia se tornar uma alternativa promissora para suprir as necessidades de água de pequenas comunidades com uma tecnologia comparativamente mais limpa e mais simples. Particularmente, onde as condições climáticas são favoráveis e a demanda não é muito alta, ela tem se mostrado apropriada para dessalinização de água.

Ainda que seja uma técnica incremental ao bem-estar das populações, podendo se constituir em uma concreta ferramenta ao desenvolvimento da região semi-árida, deve-se ter em vista o potencial de contaminação da água residuária gerada no processo, altamente salina. Independentemente da eficiência da tecnologia empregada, o sistema sempre produzirá a água residuária, em maior ou menor grau. É necessário, portanto, atentar para os riscos ambientais inerentes ao processo, incluindo a destinação e/ou o uso do rejeito da dessalinização como um aspecto relevante nos estudos que tratam dessa problemática.

Nas últimas décadas, o desempenho dos processos de dessalinização vem se aprimorando sucessivamente. Muitas melhorias dos processos, incluindo aumento da eficiência e diminuição dos custos, tem sido objeto de diversos estudos, a maioria deles enfocando a dessalinização para grandes escalas de produção de água. Só recentemente, alguns estudos focados no abastecimento de água em pequena escala vêm sendo desenvolvidos, e é nessa linha que o presente estudo é proposto.

---

Esse trabalho está estruturado da seguinte forma: no próximo capítulo, os objetivos do estudo são explicitados. Após isso, é feita uma revisão da literatura sobre alguns tópicos pertinentes ao estudo, como a problemática da escassez de água no semi-árido brasileiro e a dessalinização como uma alternativa para solucionar esse problema. Como parte dessa revisão bibliográfica, vários processos tecnológicos para dessalinização são abordados, dentre os quais a destilação solar é escolhida como a mais adequada para os objetivos pretendidos no presente estudo. Em seguida, a metodologia utilizada é apresentada. Por fim, como resultado do estudo, um projeto de sistema de dessalinização em escala familiar é proposto e discutido, e as principais conclusões são apresentadas, acompanhadas de sugestões para pesquisas futuras.

## **CAPÍTULO 2**

### **OBJETIVOS**

## **2.0 – OBJETIVOS**

### **2.1 – OBJETIVO GERAL**

Um dos maiores problemas do semi-árido brasileiro é a escassez de água durante os períodos de estiagem, fato agravado pela presença de grande quantidade de sais dissolvidos nos mananciais disponíveis, provindos naturalmente das rochas que compõem o solo da região e das características de aridez do clima. Essa salinidade torna, muitas vezes, a água disponível imprópria para consumo humano, agricultura e até mesmo para criação de animais.

A solução tecnológica que vem sendo utilizada para contornar esse problema típico de salinização tem sido a instalação de dessalinizadores de água operando via osmose reversa. No entanto, apesar de comprovadamente eficaz do ponto de vista tecnológico, as unidades já instaladas têm apresentado muitos problemas operacionais e de manutenção, de forma que grande parte dos equipamentos se encontra fora de uso e necessitando de recuperação para voltarem a operar adequadamente, o que torna discutível a adequação dessa abordagem tecnológica para a realidade encontrada na região.

Dada a realidade local, com séria escassez de água, elevada insolação e disponibilidade de água salobra, devem ser priorizadas soluções tecnológicas que se beneficiem das particularidades da região para atender as necessidades de produção de água de boa qualidade. Nesse sentido, o presente estudo teve por objetivo geral: Propor um projeto tecnológico para a dessalinização de água salobra via destilação solar, que visa o abastecimento humano em escala familiar, e possa ser utilizado como uma alternativa para complementar a demanda por água doce.

A proposta desse estudo foi centrada em atender, prioritariamente, as populações de baixa renda em comunidades difusas do semi-árido, promovendo a convivência dessas populações com o semi-árido a partir de uma perspectiva de sustentabilidade ambiental. Como as circunstâncias geográficas correspondem às necessidades técnicas

para a destilação solar e por esta ser uma tecnologia simples e capaz de operar com uma energia livre de custos, a mesma tem o potencial de contribuir significativamente no desenvolvimento da região.

## **2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Para que o objetivo geral proposto neste estudo fosse possível, durante a execução desse estudo os seguintes objetivos específicos foram cumpridos:

- Caracterizar o semi-árido e a situação dos recursos hídricos disponíveis na região;
- Descrever o princípio básico de funcionamento e levantar as vantagens e desvantagens dos diversos processos tecnológicos empregados na dessalinização atualmente;
- Levantar os impactos ambientais decorrentes da operação de sistemas de dessalinização e discutir as formas usuais de aproveitamento, tratamento e/ou disposição final dos rejeitos.
- Esquematizar o projeto do dispositivo de dessalinização proposto, com considerações sobre a seleção dos materiais e análise térmica;
- Fazer uma análise econômica preliminar para estimar o custo do dispositivo de dessalinização proposto e da água produzida pelo mesmo.

## **CAPÍTULO 3**

# **O SEMI-ÁRIDO E A PROBLEMÁTICA DA ESCASSEZ DE ÁGUA**

## **3.0 - O SEMI-ÁRIDO E A PROBLEMÁTICA DA ESCASSEZ DE ÁGUA**

### **3.1 - A DELIMITAÇÃO DO SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO**

Em 1996, a demanda hídrica mundial estava estimada em 5.692 km<sup>3</sup>/ano contra uma oferta de 3.745 km<sup>3</sup>/ano, ou seja, a oferta hídrica só atendia cerca de 66% dos usos múltiplos. Mantendo-se as taxas de consumo e considerando um crescimento populacional à razão geométrica de 1,6% a.a., o esgotamento da potencialidade de recursos hídricos pode ser referenciado por volta do ano 2053 (MAIA NETO, 1997).

A despeito de ser o Brasil o maior detentor mundial de água, ao se considerar, em lugar da disponibilidade absoluta de recursos hídricos renováveis, aquela relativa à população dele dependente, o país deixa de ser o primeiro e passa ao vigésimo terceiro do mundo, visto que, enquanto a região Amazônica concentra 80% dos recursos hídricos brasileiros, abrigando 7% da população, na região Nordeste, que abriga 27% da população, estão disponíveis apenas 3,3% desses recursos (PAZ et al, 2000).

Certamente, em qualquer situação fisiográfica, a depleção dos recursos hídricos deve ser avaliada com preocupação, mas, em regiões como o semi-árido do Brasil, a preocupação assume maiores proporções. Nesse cenário, as disponibilidades hídricas precisam ser ampliadas e, para tanto, são necessários investimentos em pesquisa e desenvolvimento tecnológico para exploração racional da água voltadas para o semi-árido brasileiro.

Em 2004, o Ministério da Integração Nacional teve a iniciativa de redelimitar a área geográfica de abrangência do semi-árido brasileiro, fato que decorreu da constatação da inadequabilidade do critério anteriormente adotado, em vigor desde 1989, que levava em conta apenas a precipitação média anual dos municípios dessa região. Com efeito, a Lei nº 7.827, de 27 de dezembro de 1989, definiu como semi-árido (MI, 2005):

“A região inserida na área de atuação da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste - SUDENE, com precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm (oitocentos milímetros), definida em portaria daquela Autarquia” (inciso IV do art. 5º do Capítulo II Dos Beneficiários).

A nova delimitação do espaço geográfico do semi-árido brasileiro tomou por base três critérios técnicos (MI, 2005):

- I. Precipitação pluviométrica média anual inferior a 800 milímetros;
- II. Índice de aridez de até 0,5 calculado pelo balanço hídrico que relaciona as precipitações e a evapotranspiração potencial, no período entre 1961 e 1990; e
- III. Risco de seca maior que 60%, tomando-se por base o período entre 1970 e 1990.

Segundo MI (2005), esses três critérios foram aplicados consistentemente a todos os municípios que pertenciam à área da antiga SUDENE, inclusive os municípios do norte de Minas e do Espírito Santo. Além dos 1.031 municípios já incorporados, passaram a fazer parte do semi-árido outros 102 novos municípios enquadrados em pelo menos um dos três critérios utilizados, totalizando 1.133 municípios (Figura 3.1).

Com essa atualização, a área classificada oficialmente como semi-árido brasileiro aumentou de 892.309,4 km<sup>2</sup> para 969.589,4 km<sup>2</sup>, um acréscimo de 8,66%. Minas Gerais teve o maior número de inclusões na nova lista - dos 40 municípios anteriores, foi para 85, uma variação de 112,5%.

De um total de 75 municípios, Sergipe passou a ter 29 municípios oficialmente incluídos no semi-árido, com a inclusão do município de Macambira. Atualmente ocupa uma área de 11.175,6 km<sup>2</sup>, ou seja, mais de 50% de todo o Estado (22.000 km<sup>2</sup>). A população urbana da região semi-árida sergipana corresponde a 208.908 habitantes, e a rural, a 187.491 habitantes, totalizando 396.399 habitantes em todo o semi-árido sergipano, 22% da população de todo o Estado (1,8 milhão de habitantes) (MI, 2005).

Atualmente, os seguintes municípios fazem parte oficialmente do semi-árido sergipano: Amparo de São Francisco, Aquidabã, Canhoba, Canindé de São Francisco, Carira, Cedro de São João, Cumbe, Feira Nova, Frei Paulo, Gararu, Gracho Cardoso, Itabi, Macambira, Monte Alegre de Sergipe, Nossa Senhora Aparecida, Nossa Senhora

da Glória, Nossa Senhora das Dores, Nossa Senhora de Lourdes, Pedra Mole, Pinhão, Poço Redondo, Poço Verde, Porto da Folha, Propriá, Ribeirópolis, São Miguel do Aleixo, Simão Dias, Telha, Tobias Barreto.



Figura 3.1: Delimitação do semi-árido brasileiro. Fonte: MI (2005).



## **3.2 - CARACTERIZAÇÃO DO SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO: ASPECTOS FÍSICOS E SÓCIO-AMBIENTAIS**

O Brasil é um país de grandes proporções onde cada região configura-se como única, com características particulares e com enormes diferenças físicas, sociais, culturais, populacionais e políticas. Em meio a esse contexto, encontra-se o semi-árido brasileiro, delimitado por áreas dos Estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e Minas Gerais, ocupando uma área de 969.589 km<sup>2</sup> e abrangendo uma população de 20 milhões de habitantes, ou seja, 12,2% da população brasileira (ANA, 2006).

Essa região caracteriza-se por apresentar clima quente e seco, reservas insuficientes de água em seus mananciais, temperaturas elevadas durante todo o ano, forte insolação, altas taxas de evapotranspiração e vegetação típica de caatinga. As chuvas apresentam totais pluviométricos irregulares que, normalmente, são superados pelos elevados índices de evapotranspiração, configurando taxas negativas no balanço hídrico. A irregularidade das chuvas pode chegar a condições extremas, caracterizando períodos críticos de seca. Essas frequentes e prolongadas estiagens são as principais causas do êxodo de parte de sua população.

O semi-árido brasileiro é, todavia, diversificado nos seus recursos naturais e complexos na convivência do homem com o seu clima. Apesar de o regime hídrico irregular se constituir num sério fator limitante para a produção agropecuária, sua fauna e flora são totalmente adaptadas ao clima e ao solo. A vegetação, de caráter xerófilo, é constituída por espécies lenhosas e herbáceas de pequeno ou médio porte, com folhas apresentando cutícula cerosa. Em sua grande maioria, essas espécies são caducifólias, isto é, perdem as folhas no início da estação seca. Muitas apresentam órgãos subterrâneos de reserva hídrica e nutricional e, em grande número, são dotadas de espinhos. Algumas plantas permanecem verdes mesmo em período de estio devido à capacidade de armazenar água em seus caules ou raízes.

De um modo geral, a caatinga vinha sendo descrita na literatura como pobre e de pouca importância biológica. Porém, levantamentos recentes mostram que este

ecossistema possui um considerável número de espécies endêmicas, ou seja, que ocorrem somente nesta região, e que devem ser consideradas como um patrimônio biológico de extremo valor. Ao mesmo tempo em que é um bioma frágil, sob forte pressão degradadora, a caatinga está entre os biomas brasileiros menos protegidos. O baixo nível de proteção é caracterizado pelo pequeno número de áreas de caatinga protegidas públicas e privadas existentes no país.

O Nordeste, em geral, é uma região pobre em descarga dos rios, face às condições climáticas dominantes que provocam a existência de rios temporários e de rios com regime muito irregular, apesar de permanentes. Dentre os rios da região, dois se destacam pela sua extensão e pelo seu volume de água, o São Francisco e o Parnaíba, e são os dois utilizados para a produção de energia elétrica. Rios de menor expressão, mas permanentes, são encontrados no Maranhão e na Bahia, enquanto rios de regime temporários são encontrados na porção nordestina que se estende desde o Ceará até a porção setentrional da Bahia (ANA, 2005a).

Em meio a esse cenário, a situação dos recursos hídricos é caracterizada pelos seguintes déficits:

- Oferta de água insuficiente para o atendimento da demanda para abastecimento humano, devido à distribuição espacial irregular dos recursos hídricos, à baixa produção hídrica dos mananciais nos períodos de estiagem, aos conflitos de uso existentes e à deficiência de investimentos para aproveitamento de novos mananciais;
- Abastecimento intermitente, provocado pela produção de água bruta em quantidades inferiores às demandas, em função da deterioração ou obsolescência dos sistemas de captação, adução e tratamento de água e elevados índices de perdas;
- Ocorrência de águas salobras ou poluídas devido à precária conservação de bacias e mananciais, com implicações negativas no binômio quantidade-qualidade da água.

Para a determinação da semi-aridez, a comparação precipitações/capacidade de evaporação e a distribuição das chuvas durante o ano são tão importantes como as precipitações anuais. Na região dominada pela caatinga, as precipitações são inferiores a 1.000 mm e a evaporação se eleva a 2.000, 2.500 e até 3.000 mm (ANA, 2005a).

Se as chuvas se concentram em um determinado período, provocam a formação de uma estação úmida que se alterna com uma estação seca e o clima se torna tanto mais árido quanto mais prolongada for a estação seca. Para as regiões semi-áridas, a irregularidade de ano para ano, aferida pelos climatologistas como desvios pluviométricos (que podem ser positivos, quando ocorre uma quantidade de chuvas acima do normal, ou negativos, quando essa quantidade é inferior ao normal), é responsável pelas grandes secas. Como esses desvios ocorrem com frequência, dificultam o planejamento para utilização dos recursos naturais.

Os resultados de uma seca dependem da capacidade de resistência e de convivência da população atingida: quanto mais carente e despreparada, maiores serão os reflexos da seca. Na tentativa de resolver o problema de abastecimento de água, tem-se utilizado duas estratégias básicas no interior do Nordeste (CARVALHO, 2000):

- a construção de açudes, visando ao armazenamento da água superficial;
- a perfuração de poços, visando ao aproveitamento da água subterrânea.

Os açudes, devido às extensas superfícies de água expostas ao sol, facilitam a evaporação de grandes quantidades de água. Cada porção de água que é evaporada deixa sobre o solo um determinado volume de sais. Este processo já tem causado a impossibilidade do uso de alguns açudes, devido à existência de elevados teores de salinidade. Outro fator limitante para a utilização de muitos açudes é sua contaminação por fezes humanas e de animais. Apesar desta problemática, esta água é consumida por uma grande parte da população rural do Nordeste, sendo o uso dessa água contaminada uma das causas da alta mortalidade infantil na região (JUCÁ, 2005).

Nessa região, grandes problemas sociais e econômicos se fazem presentes, tais como: pobreza, secas, elevadas taxas de mortalidade infantil e analfabetismo, fome, subnutrição, baixos salários, elevada concentração de renda e de terra. As condições ambientais adversas do semi-árido e a pobreza generalizada propiciam o desmatamento, a prática de irrigação inadequada, o pastoreio excessivo e o sobrecultivo, acelerando o ritmo de degradação do solo e dos recursos hídricos e culminando no processo de desertificação, que já atinge mais de 55% do território semi-árido nordestino. Segundo o Ministério do Meio Ambiente, aproximadamente 181.000 km<sup>2</sup> da região vem sendo afetados seriamente pela desertificação (FALCÃO & OLIVEIRA, 2008).

Em termos populacionais, o semi-árido nordestino possui o maior adensamento populacional em região de semi-árido do mundo. Em períodos de estio, há um aumento no êxodo rural que acarreta, no campo, a desagregação familiar e, na cidade, o crescimento da pobreza, do desemprego e da marginalidade, além de elevar a poluição e os problemas ambientais urbanos.

Não obstante o cenário de adversidade climática e hidrológica somada a solos de baixa fertilidade persiste elevado contingente de população dispersa na região, no meio rural ou em pequenos núcleos (cerca de 30% dos quase 48 milhões de nordestinos), com amplo predomínio dos estratos inferiores de renda. Cabe notar que esse contingente rural se situa bem acima da média nacional, hoje com taxa de urbanização de 81%, e muito mais acima dos números da Região Sudeste, na qual a população rural não chega aos 10%. Quando não rural, a população localiza-se em pequenos núcleos do interior, sem que se verifique nesses núcleos uma malha urbana organizada, em tipologia e hierarquia funcional, capaz de ordenar espacialmente as demandas por serviços públicos essenciais (saúde, educação e moradia, com destaque para saneamento básico) (ANA, 2007).

Sem contar com alternativas de baixo custo para fornecimento de água potável, cumpre reconhecer os limites decorrentes da incipiência das atividades produtivas do semi-árido, acarretando problemas de emprego e renda e restringindo a população rural à mera resistência, quando possibilitada por meios alternativos como sistemas de poços de pequeno porte, barragens subterrâneas e cisternas para captação de águas de chuva.

O quadro incipiente do desenvolvimento regional resulta na manutenção de um verdadeiro “exército rural de reserva”, em equilíbrio instável, sustentado por políticas compensatórias, com elevado potencial de migração para as demais áreas no país (São Paulo, em um passado recente, e metrópoles regionais, atualmente), cuja permanência implica elevados custos sociais, seja para a população em si, sujeita à miséria absoluta e castigada pelas adversidades regionais, seja em termos de gastos governamentais em programas recorrentes de cunho assistencialista (cestas básicas e frentes de emergência) (ANA, 2007).

Analisando a problemática da escassez de água na região semi-árida brasileira, observa-se um descaso histórico no enfrentamento dessa questão. Ao longo das últimas

décadas, poucas foram as tentativas de garantir efetivamente um abastecimento de água regular nas épocas de estiagem. Via de regra, soluções paliativas, de caráter emergencial e temporário, se constituíram nas principais medidas adotadas para suprir a demanda de água da população. Baldes e carros-pipas são ainda freqüentemente empregados para o transporte de água até as comunidades isoladas. Jucá (2005) cita a substituição dessas medidas paliativas por soluções efetivas como uma tarefa de grande prioridade para a melhoria da qualidade de vida no semi-árido brasileiro.

O Estado brasileiro, em especial na região semi-árida, tem longa tradição de intervenção de caráter centralizador e fragmentado no setor hídrico, pois as iniciativas sempre partiram de decisões governamentais de caráter unilateral e, não raro, para atender interesses pontuais, particulares ou setoriais.

Garjulli (2003) argumenta que a política hídrica para a região, em sua fase hidráulica, priorizou a construção de obras, sem garantir o uso público da água acumulada em milhares de açudes, de pequeno e médio porte, que se tornaram "privados", por estarem localizados dentro de propriedades privadas. Quanto aos grandes reservatórios, administrados por órgãos estatais, sua utilização pública foi garantida, sem, contudo, articular esta disponibilidade de água com outras políticas públicas, tais como as políticas agrícolas e agrárias, o que serviu para potencializar a capacidade produtiva de quem já era proprietário de terra. Verifica-se, portanto, a necessidade de serem adotadas medidas mais democráticas para aumentar a disponibilidade de água para a população.

Mais recentemente, com o Programa Água Doce, lançado em 2004, o governo federal assumiu o compromisso de garantir o acesso à água de boa qualidade para a população do semi-árido por meio do estabelecimento de uma política pública permanente. O principal objetivo do programa, presente nos Estados do Nordeste e em Minas Gerais, é garantir água potável a comunidades rurais difusas do semi-árido, por meio de sistemas de dessalinização. As comunidades beneficiadas são escolhidas com base nos índices pluviométricos, de mortalidade infantil, de desenvolvimento humano, e na ausência ou dificuldade de acesso a outras fontes de abastecimento de água potável (MMA, 2009).

A primeira Unidade Demonstrativa do Programa Água Doce foi instalada em abril de 2006 no povoado de Atalho, em Petrolina - PE. O Programa já beneficia mais de 40 mil pessoas em 58 localidades do Nordeste (MMA, 2009). Conforme dados da Associação dos Geógrafos Brasileiros (2008), mais de 3 mil dessalinizadores estavam instalados no semi-árido do Nordeste, operando pelo processo de osmose reversa.

No entanto, alguns autores (FONSECA, 2004; MS, 2003) têm relatado que grande parte dos dessalinizadores instalados encontra-se atualmente parada, necessitando de recuperação desses sistemas. Isso provavelmente se deve ao elevado custo operacional, ao mau uso e à falta de manutenção dos equipamentos instalados, que operam via osmose reversa. Apesar de comprovadamente confiável, essa abordagem tecnológica requer uma manutenção criteriosa, sem a qual a vida útil das membranas utilizadas para a dessalinização da água se torna bastante limitada.

Ainda assim, o Programa Água Doce sinaliza a intenção de recuperar o grande número de equipamentos atualmente parados, ao mesmo tempo em que intenciona a ampliação do número de dessalinizadores (ASSOCIAÇÃO DOS GEÓGRAFOS BRASILEIROS, 2008).

O que se deduz, portanto, é que a problemática dos recursos hídricos no semi-árido brasileiro congrega ambas as frentes: no gerenciamento da oferta (estoques escassos) e na gestão da demanda (eficiência na utilização de um recurso escasso).

A água no Nordeste é um recurso estratégico e um fator vital para o seu desenvolvimento, que ainda está à espera de uma política de decisões mais consistentes e contínuas, que possa aumentar sua oferta, garantir sua qualidade e permitir a formação de uma infra-estrutura que ajude o nordestino a conviver com os efeitos danosos das secas. Nesse sentido, alternativas tecnológicas, que combinem maior facilidade de manutenção e operação e baixos custos de produção de água em qualidade e quantidade satisfatórias, devem ser buscadas e testadas, para que, após sua implantação, seu uso seja continuado, melhorando, efetivamente, a qualidade de vida da população.

### **3.3 - PROVÍNCIAS HIDROGEOLÓGICAS DO NORDESTE BRASILEIRO E SUA RELAÇÃO COM A ESCASSEZ DE ÁGUA**

As condições hidrogeológicas de uma região podem ser determinadas de acordo com a geologia e a fisiografia (morfologia, clima, hidrologia, pedologia e vegetação). A análise da geologia inclui o estudo da litologia, da estrutura e da tectônica que são controladores das condições de ocorrência e movimento das águas subterrâneas. A geologia, como um todo, é o fator predominante para a determinação das estruturas armazenadoras de água e suas características hidrodinâmicas de fornecimento de água (ANA, 2005a).

No aspecto geológico, o Nordeste é constituído por dois tipos estruturais (Figura 3.2): o embasamento cristalino (representado por cerca de 788.358 km<sup>2</sup>, o que corresponde a 70% da região semi-árida e a cerca de 51% da área total do Nordeste) e as bacias sedimentares (CARVALHO, 2000).

No embasamento cristalino, os solos geralmente são rasos, apresentando baixa capacidade de infiltração, alto escoamento superficial e reduzida drenagem natural. As águas subterrâneas apresentam-se armazenadas através de fendas ou fraturas do substrato rochoso e são, na maioria das vezes, salobras. O contato por longo tempo, no subsolo, entre a água e esse tipo de rocha, leva a um processo natural de salinização.

Nas bacias sedimentares, os solos geralmente são profundos, com elevada capacidade de infiltração e boa drenagem natural, características que possibilitam a existência de um grande suprimento de água de boa qualidade no lençol freático que, pela sua profundidade, está totalmente protegido da evaporação (FALCÃO & OLIVEIRA, 2008).

Dentre as províncias hidrogeológicas do Nordeste brasileiro, destacam-se pela extensão a bacia sedimentar do Parnaíba e as bacias costeiras, seguindo-se outras coberturas sedimentares de extensão menor e de várias idades geológicas que se espalham sobre o embasamento cristalino, conforme ilustrado na Figura 3.3 (ANA, 2005a).

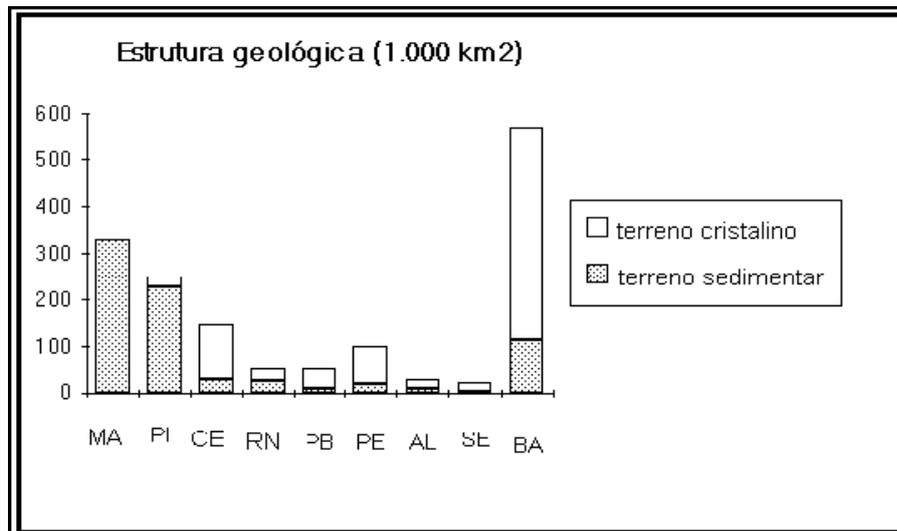


Figura 3.2: Classificação dos terrenos encontrados na região Nordeste do Brasil. Fonte: CARVALHO (2000)



Figura 3.3: Províncias hidrogeológicas do Nordeste brasileiro. Fonte: (ANA, 2005a).

Boa parte das águas subterrâneas do semi-árido apresenta salinidade em decorrência tanto da formação cristalino quanto da aridez dos solos. As características climatológicas e hidrológicas, associadas à conformação do relevo regional (que propicia escoamentos para a vertente atlântica), dão origem a uma rede hidrográfica na qual são recorrentes cursos com nascentes intermitentes, em geral situadas no planalto do sertão semi-árido e nos trechos médios, que começam a estabilizar suas vazões após vencer o agreste, até assumir corpo e volume já próximos de seu deságüe no litoral (ANA, 2007).

Completando esse cenário, as condições climáticas implicam ainda dificuldade de disponibilizar água a partir do simples armazenamento em açudes e reservatórios (não obstante seu expressivo número regional), dada a significativa evaporação potencial, que supera os 2.000 mm anuais.

Sem opção, diversas comunidades rurais nordestinas consomem água com salinidade acima do limite recomendado pela OMS (Organização Mundial de Saúde), que é de 500 ppm. Em muitas comunidades, a única fonte de água é o aquífero cristalino subterrâneo (CARVALHO, 2000).

Nesse ponto, é importante salientar que, segundo estudos da ABAS (Associação Brasileira de Águas Subterrâneas), apesar da deficiência em recursos hídricos superficiais, poderiam ser extraídos do subsolo da região nordestina, sem risco de esgotamento dos mananciais, pelo menos 19,5 bilhões de m<sup>3</sup> de água por ano (40 vezes o volume explorado hoje). Esse fato sinaliza a necessidade de se estudar formas alternativas de tratamento dessa água disponível para garantir um fornecimento regular de água durante todo o ano para a população do semi-árido brasileiro.

### **3.4 - CONSIDERAÇÕES SOBRE A DISPONIBILIDADE HÍDRICA COM FOCO NO ESTADO DE SERGIPE**

Segundo PDS-SAS (2008), a região do denominado “Sertão Sergipano do São Francisco” integra o Polígono das Secas, que constitui a região com os piores indicadores sociais do Brasil.

Em termos fisiográficos, esta região se caracteriza por apresentar precipitações médias anuais em torno de 600 mm, altamente concentradas no tempo e dispersas no espaço. Tal comportamento, face aos elevados índices de evapotranspiração (acima de 2.000 mm anuais), dá como resultado um enorme déficit hídrico (MI, 2005).

O Estado de Sergipe está inserido nas regiões hidrográficas do Atlântico Leste e do São Francisco (Figura 3.4). De acordo com a Resolução nº 32 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, de 15 de outubro de 2003, entende-se por região hidrográfica “o espaço territorial brasileiro compreendido por uma bacia, grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas contíguas, com características naturais, sociais e econômicas homogêneas ou similares, com vistas a orientar o planejamento e o gerenciamento dos recursos hídricos” (CNRH, 2003).

Os recursos hídricos superficiais disponíveis se restringem ao rio São Francisco e, principalmente, ao reservatório de Xingó. Todos os demais contribuintes da bacia são intermitentes e encontram-se com forte comprometimento de qualidade (PDS-SAS, 2008).

O Plano Estadual de Recursos Hídricos de Sergipe divide a área do estado em seis bacias hidrográficas, correspondentes aos principais cursos d’água e seus afluentes, conforme apresentado na Tabela 3.1. Das seis bacias hidrográficas do Estado, a maior delas é constituída de parte da Região Hidrográfica do Rio São Francisco e as outras cinco correspondem às bacias dos Rios Japarutuba, Sergipe, Vaza Barris, Piauí e Rio Real. Deste grupo, com exceção do rio Japarutuba, todos têm parte de suas bacias em áreas do estado da Bahia (ANA, 2005a).



Figura 3.4: As regiões hidrográficas e a divisão político-administrativa do Brasil. Fonte: ANA (2007).

Tabela 3.1: Principais bacias hidrográficas de Sergipe. Fonte: ANA (2005a)

Bacia	Área Total (km <sup>2</sup> )	Área Dentro do Estado (km <sup>2</sup> )
Rio São Francisco	640.276	7.276
Rio Japarutuba	1.722	1.722
Rio Sergipe	3.725	3.673
Rio Vaza Barris	16.260	2.560
Rio Piauí	4.450	4.262
Rio Real	4.798	2.558

Em termos hidrogeológicos, o embasamento cristalino e o comportamento pluviométrico acarretam a predominância de aquíferos com águas francamente salobras, inadequadas para usos menos tolerantes, necessitando, para isso, um tratamento prévio (PDS-SAS, 2008).

Quanto à infra-estrutura sanitária, a situação nas áreas urbanas se afigura pouco satisfatória. O abastecimento de água nas áreas urbanas não estava universalizado em 2000, variando os níveis de cobertura entre 81,3% em Nossa Senhora da Glória e 57,0% em Poço Redondo. Não há, entretanto, tratamento adequado da água em nenhum dos municípios. Nas áreas rurais, apenas Canindé do São Francisco tem suas vilas e povoados abastecidos por rede. Nos demais, o abastecimento é precariamente feito através de poços e cisternas, com água de baixa qualidade para consumo humano (PDS-SAS, 2008).

O esgotamento sanitário, por sua vez, tem uma situação acentuadamente mais crítica, predominando sistemas improvisados e reduzido número de ligações em rede nas áreas urbanas. Nas áreas rurais e na periferia das cidades, a destinação é feita em valas a céu aberto ou nas drenagens naturais, com o agravamento do já elevado nível de comprometimento da qualidade de água dos corpos receptores existentes. Nenhum dos municípios tem sistemas de tratamento de águas residuárias (PDS-SAS, 2008).

Esse contexto acarreta um sério comprometimento da quantidade e da qualidade da água disponível para a população, situação mais agravada na região semi-árida do Estado. Alguns aspectos sobre as principais demandas de água, a pressão sobre os recursos hídricos e os usos dos recursos hídricos no Estado de Sergipe serão abordados a seguir com base num estudo feito recentemente pela ANA (Agência Nacional de Águas), com o objetivo de melhor caracterizar o cenário da situação hídrica do Estado.

### **3.4.1 – Principais demandas de água no Estado de Sergipe**

As demandas de recursos hídricos para abastecimento humano (urbano e rural), dessedentação animal, abastecimento industrial e irrigação, feita pelo estudo da ANA

(2006) tomou como base um horizonte temporal de longo prazo (2025) para um cenário otimista (na hipótese de que sejam materializadas intervenções, tais como redução das perdas dos sistemas de abastecimento de água, gerenciamento da demanda nos pólos de desenvolvimento e aumento da área irrigada com otimização da utilização de água). Verificou-se que (Figura 3.5):

- o total de demanda hídrica em Sergipe atinge cerca de  $13,8 \text{ m}^3/\text{s}$
- as demandas de água para irrigação representam 44% desse total, enquanto o abastecimento humano, 41%, mostrando que a demanda para abastecimento humano aproxima-se do total estimado para a irrigação (em todos os demais Estados, a grande maioria dos recursos hídricos, em 2025, deverá ser utilizada para irrigação, com exceção do Maranhão e Piauí, que apresentam maiores demandas percentuais para abastecimento humano em relação à demanda total estadual).
- o abastecimento das indústrias representa 9% da demanda total estimada e a dessedentação de animais corresponde a 6%.

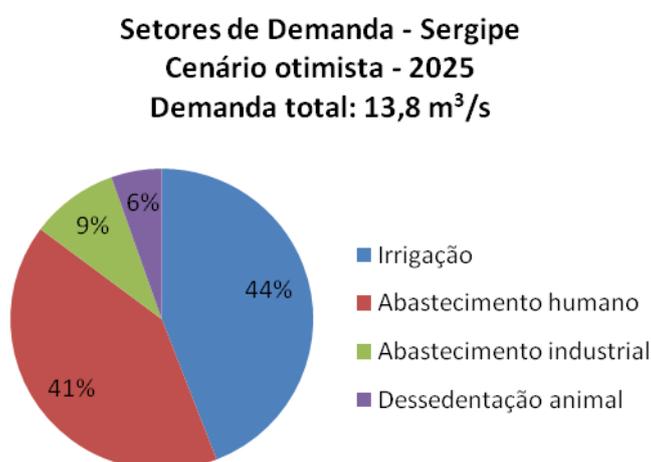


Figura 3.5: Participação de cada setor na demanda total em Sergipe (cenário otimista 2025). Fonte: Adaptado de ANA (2006)

No que se refere à tendência de crescimento populacional até o ano de 2025, a região semi-árida sergipana apresenta, predominantemente, valores correspondentes a

crescimento acentuado (superior a 1,0% a. a.) e moderado (entre 0,1% e 1,0% a.a.) (ANA, 2006).

### 3.4.2 - Pressão sobre os recursos hídricos no Estado de Sergipe

O estudo da ANA (2006) avaliou o grau de pressão sobre os recursos hídricos para cada Unidade de Planejamento da área estudada, mediante os critérios apresentados na Tabela 3.2, sendo:

D (demanda total) = somatória das demandas para abastecimento humano, abastecimento industrial, irrigação e dessedentação animal, em  $m^3/s$ ; e

Q média = descarga média do rio principal da Unidade de Planejamento, em  $m^3/s$ .

Tabela 3.2: Critérios adotados para análise do grau de pressão sobre os recursos hídricos superficiais. Fonte: ANA (2006)

<b>Demanda total / Q média por Unidade de Planejamento</b>	<b>Situação</b>
D/Q < 5%	Água considerada um bem livre, com pouca atividade de gerenciamento sendo praticada
$5\% \leq D/Q \leq 10\%$	Situação ainda confortável, com necessidade de gerenciamento para solução de abastecimentos locais
$10\% < D/Q \leq 20\%$	Atividade de gerenciamento indispensável, com investimentos médios
D/Q > 20%	Situação crítica, exigindo intensa atividade de gerenciamento e grandes investimentos

Considerando o cenário otimista adotado no estudo, até o ano de 2025, verifica-se que a maior parte das áreas situadas no semi-árido sergipano apresentar-se-á crítica,

exigindo gerenciamento e grandes investimentos. Na hipótese de se manter o cenário tendencial (projeção do uso dos recursos seguindo uma trajetória histórica), a pressão sobre os recursos hídricos superficiais será ainda maior.

### **3.4.3 - Uso dos recursos hídricos no Estado de Sergipe**

Historicamente, no Brasil, tem sido dada preferência ao abastecimento com água superficial, a não ser em situações de completa escassez dos mananciais de superfície, em que se parte para procurar as águas subterrâneas. Em geral, a implantação de reservatórios de regularização no semi-árido tem sido o principal instrumento para ativação do seu potencial hídrico e de sustentabilidade hídrica destas regiões, do ponto de vista da oferta. Devido aos altos índices de evaporação existentes e à grande sazonalidade das afluências, observa-se que a capacidade de regularização dos reservatórios nestas regiões apresenta um rendimento médio de 30% a 40% das potencialidades, considerado baixo (ANA, 2005a).

Aos poucos, o planejamento do uso dos recursos hídricos vem mudando e incorporando a idéia de que quando os dois recursos estão presentes (superficiais e subsuperficiais), ambos podem ser utilizados de acordo com suas especificidades.

As águas subterrâneas apresentam vantagens em algumas situações, mas, por outro lado, também possuem restrições de aproveitamento.

Uma das maiores limitações é que bons aquíferos não estão disponíveis em todos os lugares e é preciso um trabalho prévio de prospecção hidrogeológica para identificar as áreas propícias.

Entre as vantagens das águas subterrâneas, está a distribuição em áreas extensas, ao contrário das águas superficiais que são mais concentradas, como, por exemplo, açudes que são construídos em locais fixos ou os rios nos quais a captação se restringe à linha de sua calha. Sendo assim, se uma cidade está localizada sobre um bom aquífero, os poços podem ser feitos nos pontos de maior concentração de demanda, praticamente dispensando o uso de adutoras.

Outra vantagem é que as águas subterrâneas são menos vulneráveis às variações sazonais e podem continuar com o fornecimento regular nos períodos de estiagem prolongada, mesmo quando os mananciais de superfície estão exauridos. Além disso, a água subterrânea é protegida da evaporação que no semi-árido normalmente supera a faixa de 2.000 mm por ano e que esgota rapidamente os recursos hídricos superficiais com pequena lâmina d'água.

A água superficial é muito mais vulnerável à poluição por diversos tipos de vazamentos e derramamentos do que a água subterrânea. No entanto, em termos de hidroquímica, as águas subterrâneas contêm solutos oriundos do solo e subsolo e em locais de grande evaporação, concentram os solutos, aumentando o risco de salinização.

Com relação ao uso dos recursos hídricos, a capacidade de captação dos sistemas produtores existentes fornece uma referência da quantidade de água que pode ser distribuída à população, seja de mananciais de superfície, seja de subterrâneos, ou de ambos.

De acordo com um estudo da ANA (2006), onde foram analisados 56 municípios de Sergipe, verificou-se que quase 66% da população é abastecida por águas de superfície, 12% por águas subterrâneas e 22% por ambos os tipos (Figura 3.6). Desse modo, 34% do abastecimento já envolve a utilização de águas subterrâneas, sinalizando a necessidade do uso dessas águas para suprimento da demanda hídrica pela população.

**Sergipe - municípios atendidos por tipo de manancial  
(municípios considerados: 56)**

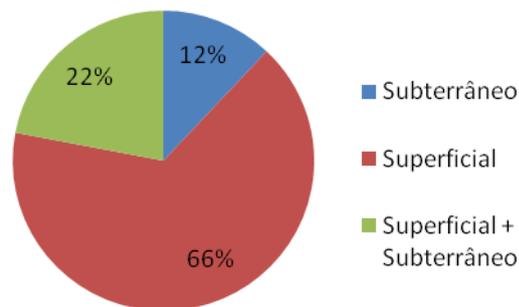


Figura 3.6: Atendimento por tipo de manancial em Sergipe. Fonte: Adaptado de ANA (2006)

Muitos açudes apresentam restrições para abastecimento público devido a processos de eutrofização e salinização. O processo de eutrofização, resultante do nível excessivo de nutrientes da água, está usualmente associado ao uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica e à falta de controle das atividades agrícolas, da drenagem pluvial e do lançamento de esgotos. Na região semi-árida, a salinização nos açudes ocorre devido ao maior consumo de água de um reservatório ser por evaporação. Em locais próximos à costa, isso pode se dar em decorrência do transporte de aerossóis marinhos (ANA, 2006).

Em uma análise de criticidade, verificou-se que a capacidade de atendimento das demandas da população pelos mananciais e sistemas produtores de água existentes, para o cenário de 2025, indica que a maior parte do Estado de Sergipe apresentará situação crítica, com apenas pequena parte do Estado apresentando abastecimento satisfatório no confronto oferta-demanda nos horizontes de planejamento. Isso indica que, caso não sejam adotadas soluções adequadas, grande parte da população ainda não terá garantida a oferta de água para abastecimento humano, mesmo considerando o cenário otimista adotado pelo estudo.

### **3.5 - ASPECTOS INSTITUCIONAIS E O DESAFIO DA SUSTENTABILIDADE DO ABASTECIMENTO DE ÁGUA NA REGIÃO DO SEMI-ÁRIDO**

Em 1992, na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, foi aprovada a Agenda 21, em que se afirmava a inevitabilidade da adoção do planejamento e do manejo integrado dos recursos hídricos. Enfatizava-se ali o escasseamento progressivo do recurso água em escala global e as limitações que essa realidade impunha ao desenvolvimento dos países.

Estima-se que até o ano 2025 o número de pessoas que vivem em países submetidos a grande pressão sobre os recursos hídricos passará dos cerca de 700 milhões atuais para mais de três bilhões (PNUD, 2006). Desde o lançamento da Agenda 21, a realidade do planeta permanece sendo a descrita no relatório do PNUD.

De qualquer forma, apesar de os problemas não terem sido solucionados, a necessidade de mudar modelos mentais para lidar com dinâmicas e questões que se recriam continuamente já é bastante reconhecida, posto que exigem soluções igualmente dinâmicas, capazes de superar as condições adversas presentes e o paradoxo de vivermos num planeta com 70,8% de sua superfície coberta de água e termos disponíveis para consumo apenas 0,3% dos escassos 2,2% de água doce existente (ANA, 2007).

Ocupando quase metade da área da América do Sul, o Brasil detém 60% da bacia amazônica, que escoar cerca de 1/5 do volume de água doce do mundo (ANA, 2007). Dentro do próprio país vivemos o paradoxo de ter, de um lado, a exuberante disponibilidade hídrica na Amazônia e, de outro lado, áreas críticas de indisponibilidade.

A emergência da questão ambiental a partir dos anos 70, a difusão dos princípios do desenvolvimento sustentável nos anos 80 e 90 e a constatação da escassez progressiva do recurso água em escala planetária levaram o Brasil a realizar uma revisão completa das estratégias e do aparelho governamental voltados para a gestão integrada dos recursos hídricos.

São marcos dessa mudança fundamental: a inserção na Constituição Federal de 1988, dentre as competências da União, da obrigação de instituir-se um sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos; a regulamentação e a institucionalização do próprio Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SINGREH, com seu arranjo administrativo, e seus instrumentos de gestão (Lei nº 9.433/97); a criação da Agência Nacional de Águas, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do SINGREH e o lançamento, em 2006, do Plano Nacional de Recursos Hídricos, sendo o Brasil o primeiro país latino-americano a elaborar tal instrumento.

Em relação ao arranjo institucional brasileiro, no âmbito da União, destacam-se as atividades dos seguintes órgãos: Agência Nacional de Águas – ANA – e Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH; Ministério do Meio Ambiente e sua Secretaria de Recursos Hídricos; Ministério das Cidades, especialmente a Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental; Ministério da Saúde, nas ações relacionadas com saneamento, através da Fundação Nacional de Saúde (FUNASA) e Ministério da Integração Nacional, especialmente a Secretaria de Infra-estrutura Hídrica. Outras instituições federais também relevantes são o DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra as Secas), a Codevasf (Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba) e a CPRM – Serviço Geológico do Brasil.

Com relação ao arcabouço institucional e político de recursos hídricos, o governo brasileiro aprovou a Política Nacional de Recursos Hídricos, Lei nº 9.433/1997, para estabelecer um novo arcabouço institucional e instrumentos (por exemplo, o Plano Nacional de Recursos Hídricos – PNRH, direitos e cobrança sobre a água, etc.) para lidar com as questões de gerenciamento integrado de recursos hídricos.

O Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGERH) foi criado pela Lei nº 9.433/1997, com os objetivos principais de coordenar o sistema integrado de gestão dos recursos hídricos e implementar a Política Nacional de Recursos Hídricos. O SINGERH compreende o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), a Agência Nacional de Águas (ANA), os Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos, Comitês de Bacia Hidrográfica, instituições federais, estaduais e municipais que lidam com questões de gestão de recursos hídricos, e agências de

recursos hídricos. Leis similares foram introduzidas em quase todos os Estados (UPGO, 2006).

A Agência Nacional de Águas (ANA) foi criada em julho de 2000, em resposta às crescentes demandas de recursos hídricos por usos conflitantes (agrícola, industrial, urbano e recreativo). O papel da ANA é implementar a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e o planejamento e gestão dos recursos hídricos nacionais, sujeitos aos princípios, diretrizes e instrumentos definidos pela Política Nacional de Recursos Hídricos.

O Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) é composto por representantes das administrações federal e estaduais, representantes ambientais, grupos de usuários da água e representantes da sociedade civil. Um de seus papéis mais importantes é definir diretrizes complementares para a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos (UGPO, 2006).

O foco na gestão de recursos hídricos - talvez o recurso mais vital e estratégico para um futuro sustentável – reflete a importância do tema, a magnitude dos recursos existentes e a complexidade da gestão destes recursos num país como o Brasil – seja pelo seu tamanho continental, seja pelo fato de ser possuidor de um dos maiores patrimônios hídricos disponíveis no mundo.

Em especial, no semi-árido brasileiro, a sustentabilidade do abastecimento de água constitui um desafio dos mais significativos, na medida em que se defronta tanto com as restrições naturais da região, quanto com o baixo poder aquisitivo de grande parte da população, sobretudo daquela que vive nas áreas mais secas.

As dificuldades a superar ainda são enormes e há deficiências estruturais a serem corrigidas, a exemplo de um certo travamento do avanço sócio-ambiental nos processos produtivos. Além das escolhas técnicas, uma das maiores tarefas diz respeito aos compromissos de mobilizar e capacitar a sociedade brasileira para que ela assuma sua cidadania com responsabilidade sócio-ambiental.

Sem prejuízo dos esforços que vêm sendo feitos entre as diversas instituições no sentido de uma ação articulada, o fato é que atualmente ainda se observam iniciativas distintas e não complementares em termos das ações e investimentos em recursos

hídricos e saneamento, principalmente quanto às obras e intervenções realizadas com recursos do Orçamento Geral da União – OGU. Além disto, as instituições financeiras vinculadas ao Governo Federal não seguem, necessariamente, critérios ou prioridades gerais comuns em seus financiamentos para investimentos em recursos hídricos e saneamento (ANA, 2005b).

O desafio da sustentabilidade do abastecimento de água exige, portanto, a identificação de metodologias que considerem as especificidades físicas, culturais, econômicas e políticas de cada bacia, as quais são bastante diferentes em cada região e Estado do país.

Historicamente, as oligarquias rurais detiveram o controle dos órgãos de implementação das políticas de combate a seca e reforçaram, em suas intervenções, a vinculação da propriedade privada da terra e da água (GARJULLI, 2003). Nesse contexto, a questão institucional se apresenta como fundamental para o sucesso de quaisquer alternativas técnicas propostas, dada a necessária ação articulada e integrada entre os atores públicos (União, Estados e municípios) e entre os setores envolvidos, compreendendo tanto a gestão dos recursos hídricos, quanto a gestão do saneamento, especialmente no que se refere ao abastecimento de água.

No entanto, é fundamental observar que a nova concepção de gestão de recursos hídricos não é apenas um conjunto de medidas burocráticas/institucionais, mas traz em seu bojo uma necessária mudança de mentalidade e de atitudes.

A importância da água deve ser considerada em seu espectro mais amplo e como insumo para inúmeras atividades econômicas, variando de suporte vital para a vasta biodiversidade do país até seu uso para melhorar a qualidade de vida e permitir o desenvolvimento em todos os níveis, incluindo o combate à pobreza e a ampliação do acesso à água potável e ao saneamento.

A água não é somente um recurso crítico em termos de segurança humana e ambiental, mas oferece também grandes oportunidades para novos avanços em termos de desenvolvimento sustentável. Nesse sentido, a política de recursos hídricos, implantada em cada Estado e nacionalmente, deve evidenciar a opção de desenvolvimento adotada em cada região, em cada Estado e no país, questão que vai além dos aspectos técnicos, legais e burocráticos.



### **3.6 – A ESCASSEZ DE ÁGUA E O DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIAS PARA O SEMI-ÁRIDO**

O volume total de água na Terra é estimado em 1 bilhão e 600 milhões de  $\text{km}^3$ , estando incluída a água de cristalização quimicamente associada às rochas. Subtraindo esta, o volume restante, avaliado em 1 bilhão e 370 milhões de  $\text{km}^3$ , seria suficiente para formar uma capa de 2.700 metros envolvendo todo o planeta se sua superfície fosse plana (ANA, 2005a).

Esse quadro de aparente abundância assume um aspecto completamente diferente quando se leva em conta que a água salgada dos oceanos, imprestável para a maioria dos usos, corresponde a 97,2% desse volume. Por outro lado, se dos 2,8% restantes, subtrairmos a água presa nas geleiras e sob forma de vapor na atmosfera, consideradas indisponíveis, restarão apenas 8 milhões e 200 mil  $\text{km}^3$  de água doce na fase líquida, que representa apenas 0,6% do total de água do nosso planeta. Pelo fato das águas superficiais serem visíveis, torna-se fácil imaginar que a maior parte dos 8 milhões e 200 mil  $\text{km}^3$  da água doce disponível na Terra esteja distribuída nos rios, lagos e açudes. Entretanto, isso não é correto. Na verdade, pouco mais de 98% desse volume está “escondido” na subsuperfície, representando o que se denomina de água subterrânea (ANA, 2005a).

Praticamente todos os países do mundo, desenvolvidos ou não, utilizam água subterrânea para suprir suas necessidades, seja no atendimento total ou complementar do abastecimento público, seja em outras atividades como irrigação, produção de energia, indústria etc. Essa utilização consistia inicialmente no aproveitamento da água em nascentes e em lençóis freáticos rasos, estes captados através de escavações rudimentares, que com o tempo evoluíram para cacimbas revestidas de pedra e posteriormente também de tijolo. Com o advento da Era Industrial e a evolução dos equipamentos de perfuração, tornou-se possível a construção de poços de melhor qualidade técnica em tempo cada vez menor e com profundidades cada vez maiores (CPRM, 1999).

A UNESCO tem registrado um crescimento acelerado na utilização das águas subterrâneas e conseqüentemente problemas decorrentes da má utilização dos aquíferos em várias partes do planeta. Estima-se em 300 milhões o número de poços perfurados no mundo nas três últimas décadas. A relação em termos de demanda quanto ao uso varia entre os países e nestes, de região para região, constituindo o abastecimento público, de modo geral, a maior demanda individual. A Europa, por exemplo, tem 75% de sua população atendida com água do subsolo, podendo este percentual atingir 90% em alguns países (Suécia, Holanda, Bélgica etc.). Avalia-se que existam no mundo 270 milhões de hectares irrigados com água subterrânea, 13 milhões destes nos Estados Unidos, e 31 milhões na Índia (MEDEIROS, 2001).

Embora se perfurem poços na região nordestina desde o século passado, apenas a partir da década de 60, com a criação da SUDENE, a água subterrânea no Brasil começou a ser tratada como ciência. Na época, a SUDENE, atuando dentro de sua missão, promoveu um reconhecimento hidrogeológico pioneiro da região Nordeste, materializado no Inventário Hidrogeológico Básico do Nordeste, cujas informações ainda são referências até hoje. Esses estudos, que abriram as portas para uma visualização da potencialidade hidrogeológica da região, foram paralisados no início da década de 70 em função da desmobilização da SUDENE como órgão executor (CPRM, 1999).

Mesmo assim, a utilização da água subterrânea aumentou vertiginosamente, principalmente nos locais de maior potencialidade e em função da necessidade de uma fonte de água para a região, imposta pelas suas condições climáticas. O reflexo disso é a contribuição da água subterrânea em parcelas significativas, tanto para o abastecimento público como para usos diversos. Contudo, esse aumento do uso, na maior parte, não foi conduzido através de planejamentos calcados no conhecimento, sendo o resultado de consecutivos programas emergenciais de combate aos efeitos da seca e de esforços isolados de companhias de saneamento (CPRM, 1999).

Tratando-se de uma região semi-árida, a água subterrânea torna-se um recurso estratégico para o desenvolvimento e, nesse sentido, a região ressentiu-se desses 25 anos de estagnação do conhecimento hidrogeológico regional causada pela paralisação das atividades executadas pela SUDENE. Nesse cenário, a CPRM – Serviço Geológico do

Brasil trouxe para si a responsabilidade de dar continuidade aos estudos iniciados pela SUDENE, promovendo o conhecimento necessário para estimular o desenvolvimento socioeconômico da região Nordeste (CPRM, 1999).

A pequena disponibilidade de água superficial aliada à baixa e irregular pluviosidade explica a grande dependência dos habitantes e dos rebanhos da região em relação à água subterrânea. As abordagens usualmente utilizadas para prospecção de água subterrânea ainda carecem de fundamentação técnico-científica, tendo como reflexo uma grande quantidade de poços improdutivos ou salinizados (SANCHEZ, 2003).

Esse contexto, além de proporcionar um segmento antieconômico nos programas de perfuração de poços gera um fator de risco na utilização da água subterrânea desses mananciais. Com base nessa realidade e considerando, em função de sua ampla distribuição, a grande importância regional da água subterrânea em rochas cristalinas, urge a necessidade do desenvolvimento de novas abordagens que possam contribuir efetivamente para aumentar o sucesso dos poços perfurados e das tecnologias utilizadas, ampliando a oferta de água.

As tecnologias adequadas para o uso da água em terras secas devem ter como requisito básico a promoção do desenvolvimento local e devem contribuir para a criação e dinamização de atividades econômicas ligadas a cadeias produtivas baseadas em processos que não degradem o ambiente de forma significativa (VALLS, 2003).

Percebe-se, muitas vezes, a inadequação, para a realidade das zonas secas, dos padrões e modelos convencionais de uso da água, fundamentados na transposição direta de tecnologias de regiões sujeitas a menores restrições hídricas. Um exemplo disto é a irrigação convencional, que apesar de constituir uma prática que tem agregado benefícios à agricultura, quando é empregada sem os cuidados adequados (sistema de drenagem, manejo eficiente, etc.), produz impactos indesejáveis, sobretudo em terras secas. Estudos realizados pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação informam que de 20% a 30% das áreas irrigadas em regiões áridas e semi-áridas necessitam de reforço de drenagem para evitar a salinização (MMA, 2004).

As tecnologias convencionais mais utilizadas para a captação, armazenamento, transporte e uso dos recursos hídricos nas regiões semi-áridas são: açudes, barragens

convencionais, poços, captação direta em cursos d'água, canais a céu aberto, irrigação por aspersão e por gravidade (sulcos, valas e canteiros). Nessas alternativas, significativa quantidade de água é perdida, principalmente pela evaporação e infiltração no solo, questionando-se, em alguns casos, a eficiência da adoção destas tecnologias (SANCHEZ, 2003).

Buscando combater este problema, algumas tecnologias não convencionais de manejo da água também têm sido implantadas nestas regiões, como por exemplo: aproveitamento das águas de chuva, uso de cisternas, dessalinização de águas salobras, reuso de águas residuais tratadas, barragens subterrâneas, uso de aquíferos profundos, adutoras (por gravidade ou com bombeamento), reservatórios subterrâneos / elevados, chafarizes, irrigação localizada de precisão (gotejadores e micro-aspersores), entre outras. Estas alternativas apresentam aspectos positivos e negativos para cada aplicação, reforçando a necessidade de serem utilizados critérios para a seleção das tecnologias de uso da água mais adequadas para cada situação (MEDEIROS, 2001).

A sociedade demorou séculos para se dar conta de que não se pode “combater a seca” e começou a afirmar as possibilidades de “convivência com a seca”. Atores sociais e instituições governamentais vêm testando e implementando ações inovadoras centradas em tecnologias apropriadas para as áreas sujeitas a esta situação. Isto significa não só a possibilidade de viver com dignidade nas terras secas, mas também a oportunidade de - conhecidas, respeitadas, e dinamizadas as condições ambientais e socioeconômicas ali existentes - haver geração sustentável de riqueza para seus habitantes e para o país (CARNEIRO, 2008).

## **CAPÍTULO 4**

# **A DESSALINIZAÇÃO COMO UMA ALTERNATIVA PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA**

## **4.0 - A DESSALINIZAÇÃO COMO UMA ALTERNATIVA PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA**

### **4.1 – AS TENDÊNCIAS DO USO DA DESSALINIZAÇÃO NO MUNDO**

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

Fatores tais como clima, características geológicas, tipos de solos e distância em relação ao mar vão determinar a salinidade das águas naturais. Em regiões áridas ou semi-áridas é comum a salinização das águas, devido à própria constituição natural das mesmas.

O manejo inadequado do solo também pode causar um aumento da salinidade. Áreas irrigadas tornam-se improdutivas devido à má qualidade das águas de irrigação, cujos limites de salinidade são determinados em função dos tipos de cultura, solo e clima. A irrigação com águas contendo sais dissolvidos em concentrações superiores a 2 kg/m<sup>3</sup> causam quedas consideráveis na produção agrícola (SOUZA, 2006).

As águas contendo sais dissolvidos com concentração igual ou acima de 1 kg/m<sup>3</sup> são prejudiciais à saúde e inadequadas para o abastecimento humano. Muitos países no Oriente Médio descobriram que a solução disponível para o problema da escassez de água doce era a dessalinização da água do mar ou salobra. Segundo Souza (2006), só até o final de 1991, já tinham sido instalados em todo o mundo um total de 8.886 unidades de dessalinização com capacidade total de 15.562 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/dia. A proporção de maior capacidade está instalada na Arábia Saudita (24,4%), seguida dos EUA (15,2%), Os Emirados Árabes (10,6%) e Kuwait (9,1%).

Mais recentemente, Wangnick (1998), expondo a situação da dessalinização, afirmou que a capacidade total das mais de 12.000 plantas de dessalinização no mundo,

situadas extensamente em nações ricas em energia, é equivalente a somente 1,6% do total do uso diário de água doce nos Estados Unidos sozinho. Além disso, a produção de água potável nos Estados Unidos por processos de membrana atende menos de 0,5% do total de água potável distribuída.

Entretanto, essa análise negligencia o fato de que a dessalinização pode ter um impacto muito grande localmente. Por exemplo, o Kuwait obtém virtualmente toda sua água doce através da dessalinização (MILLER, 2003).

Uma limitação da utilização dos processos de dessalinização é que eles normalmente exigem quantidades significativas de energia para conseguir a separação do sal. Isso é altamente significativo já que é um custo que poucas áreas que enfrentam escassez de água no mundo podem arcar.

Muitos países no Oriente Médio, por serem ricos em petróleo, investiram bastante dinheiro para instalar e funcionar equipamentos de dessalinização. Infelizmente, muitas nações em desenvolvimento não possuem os recursos financeiros ou energéticos exigidos para instalar e operar grandes plantas de dessalinização (KALOGIROU, 1997a). Melhorias econômicas serão necessárias se a dessalinização quiser ter um impacto em outras áreas que experimentam escassez de água.

Segundo estudos da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS), a disponibilidade de recursos hídricos no subsolo nordestino possibilita a extração de aproximadamente 20 bilhões de metros cúbicos por ano, sem o risco de esgotamento dos mananciais. Este dado motivou o poder público a implementar, em anos anteriores, programas de massificação de perfuração de poços no Nordeste. No entanto, na maioria das vezes, a água produzida nestes poços apresenta índices de salinidade superior a 500 ppm de sólidos totais dissolvidos (STD), sendo considerada salobra (CONAMA, 2005) e, portanto, inapropriada para consumo humano.

Por outro lado, o potencial eólico e/ou solar da região é favorável à aplicação de tecnologias combinadas de dessalinização e energias renováveis para produção de água doce (LIMA, 2006), o que pode tornar interessante o emprego da dessalinização nessas áreas.

A dessalinização pode ser conseguida através várias técnicas. Estas podem ser classificadas nas seguintes categorias: (i) processos térmicos e (ii) processos através de

membranas. Nos processos térmicos, a dessalinização da água salgada é conseguida utilizando uma fonte de energia térmica, que pode ser obtida de uma fonte convencional de combustível fóssil, da energia nuclear ou de uma fonte não convencional, como a energia solar. Nos processos com membrana, a eletricidade é usada para conduzir as bombas de alta pressão ou para a ionização dos sais contidos na água salgada.

Atualmente, os principais processos de dessalinização são:

(i). Processos Térmicos

- Destilação de múltiplo efeito (multi-effect distillation - MED)
- Destilação por compressão de vapor (vapor compression - VC)
- Destilação *flash* de múltiplo estágio (multi-stage *flash* - MSF)
- Destilação solar

(ii). Processos Através de Membranas

- Osmose reversa
- Eletrodialise

A dessalinização envolve vários campos de estudos e possibilita a proposição de diferentes soluções. Até mesmo se um método específico de dessalinização for focado, pode-se ainda ter muitas opções disponíveis em termos de configuração do sistema. Entretanto, a consideração fundamental no desenvolvimento de um sistema para dessalinização de água deve se pautar na escolha do método mais adequado para cada situação, de acordo com os objetivos pretendidos, a fim de atingir um especificado nível de produção e qualidade de água a um mínimo investimento e custo operacional.

Miller (2003) afirma que a escassez de água atual e iminente exigirá a execução de todo o número de medidas de conservação e eficiência. Da perspectiva global, a dessalinização poderá ter somente um impacto pequeno na obtenção de água tratada. Entretanto, em uma base local, a dessalinização (acoplada com outras medidas) deverá desempenhar um papel essencial.

Um aumento acentuado no uso da dessalinização, por outro lado, poderá criar alguns problemas, sendo o mais significativo aquele relativo ao consumo de energia.

Estima-se que a produção de 13 milhões m<sup>3</sup>/dia exigem 130 milhões de toneladas de petróleo por ano (KALOGIROU, 1997a). Mesmo se o petróleo fosse mais extensamente disponível, poderíamos sustentar sua queima na escala necessária para fornecer água doce a todos?

Dada a compreensão atual do papel dos gases de efeito de estufa e do aquecimento global, esse uso de combustíveis fósseis é discutível. Assim, mesmo satisfazendo a demanda de energia necessária para o processo, ainda se teria a poluição ambiental como um problema significativo pela queima de quantidades substanciais de combustíveis fósseis. Felizmente, há muitas partes do mundo que são escassas em água, mas possuem abundância em fontes de energia renováveis que poderiam ser usadas para conduzir processos de dessalinização.

## 4.2 - LEVANTAMENTO HISTÓRICO

A dessalinização é tão antiga quanto é o sistema solar. Parte da água salgada na terra é transformada em vapor através da energia solar, então se formam nuvens que se precipitam como água potável através das chuvas. Os Gregos e Romanos utilizaram a dessalinização usando métodos primitivos. Aristóteles, preocupando-se com o problema da qualidade da água, há 2.300 anos, costumava dizer a seus alunos que "a água salgada, ao passar para vapor, se torna doce e o vapor não produz água salgada depois que se condensa" (SOUZA, 2006).

Os alquimistas árabes já usavam a destilação solar para produzir água potável no século XVI. Em 1593, o navegador Richard Hawkins já usava a destilação solar para obter água potável da água do mar em suas viagens aos mares do sul (DESTEFANI, 2008), mostrando que, desde o século XVI, a dessalinização da água do mar já começava a se tornar importante nas embarcações.

A dessalinização em terra começou a partir do século XVIII e começou a desempenhar papel importante a partir do final dos anos 1940, especialmente em países onde a água potável é escassa como nos países do Golfo Árabe, Estados Unidos, Ilhas do Caribe e algumas áreas da América do Norte (SOUZA, 2006).

Em 1862, Lavoisier usou grandes lentes de vidro para concentrar a energia solar em garrafas de destilação (KALOGIROU, 1997a). Uma década depois, o primeiro destilador solar moderno foi construído em Las Salinas (Chile), por Charles Wilson. Ele consistia de 64 tanques de água (num total de 4.459m<sup>2</sup>) feitos de madeira pintada de negro com coberturas inclinadas, de vidro. Essa instalação foi usada para suprir 20 mil litros de água potável por dia para animais que trabalhavam nas minas. Após a abertura da região pela chegada da ferrovia, a instalação foi sendo deteriorada até o fim de sua operação em 1912, 40 anos após sua construção (DESTEFANI, 2008).

O uso de concentradores da radiação incidente na destilação solar foi ainda relatado por Pasteur (1928), que focalizou os raios solares em uma caldeira de cobre contendo água. O vapor gerado na caldeira era conduzido a um condensador onde a água destilada era acumulada (KALOGIROU, 1997a).

Nos anos 40, durante a Segunda Guerra Mundial, vários estabelecimentos militares, em regiões áridas, necessitaram de água para suprir suas tropas. A potencialidade que a dessalinização oferecia ficou evidenciada e trabalhos foram prosseguidos após a guerra em vários países. Um dos mais concentrados esforços foi levado a termo pelo Governo Americano, através da criação do *Office of Saline Water* (OSW), no princípio dos anos 50, e suas organizações sucessoras, como o *Office of Water Research and Technology* (OWRT). O Governo Americano financiou seu desenvolvimento por mais de 30 anos, despendendo cerca de 300 milhões de dólares no processo. Esse dinheiro ajudou a concretizar muito da investigação básica e desenvolvimento de diferentes tecnologias para dessalinização das águas do mar e salobra (SOUZA, 2006).

No final da década de 60, unidades de até 8.000 metros cúbicos por ano começaram a se instalar em várias partes do mundo. Essas unidades, a maioria operando por processos térmicos, foram usadas para dessalinizar água do mar; porém, nos anos 70, os processos de membranas comerciais começaram a surgir e ser empregados (DESTEFANI, 2008).

Originalmente, o processo de destilação foi usado para dessalinização de água salobra. No entanto, essa técnica era dispendiosa e inibiu o seu desenvolvimento para o tratamento da água. Quando a eletrodialise foi introduzida, permitiu dessalinizar água salobra muito mais economicamente e muitas aplicações foram então encontradas. Similarmente, a osmose reversa foi originalmente empregada para dessalinização de águas salobras; no entanto, o processo provou ser adequado também para dessalinizar água do mar (SOUZA, 2006).

Nos anos 80, a tecnologia de dessalinização tornou-se um empreendimento totalmente comercial (KALOGIROU, 1997a). A tecnologia beneficiou-se das experiências operacionais alcançadas com as unidades construídas e operadas nas décadas anteriores. Uma variedade de tecnologias de dessalinização foi desenvolvida através dos anos e, baseadas nos seus sucessos comerciais, podem ser classificadas como mais e menos importantes processos de dessalinização. Nas últimas décadas, vários estudos têm sido realizados no sentido de melhorar o desempenho, a segurança e a viabilidade econômica das diversas técnicas de dessalinização existentes.

Uma das inovações mais importantes foi o avanço da tecnologia das membranas, onde a osmose reversa surgiu como uma alternativa aos métodos de destilação por processos térmicos (BRUGGEN, 2003). O progresso na osmose reversa vem diminuindo as demandas por energia para um nível mais aceitável, fato que abriu a possibilidade de um método confiável de dessalinização, resultando em um mercado crescente de dessalinização por membranas.

Nos últimos 20 anos, a dessalinização se tornou um método confiável e conveniente para produção de água em muitas regiões áridas ao redor do mundo.

No Brasil, as primeiras experiências com destilação solar foram realizadas em 1970, sob a supervisão do ITA - Instituto Tecnológico da Aeronáutica. Em 1987, a PETROBRAS iniciou o seu programa de dessalinização de água do mar para atender suas plataformas marítimas, usando o processo da osmose reversa, tendo esse processo sido usado pioneiramente 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 Ipirá (DESTEFANI, 2008).

Países mais desenvolvidos tecnicamente têm investido maciçamente em pesquisas de dessalinização, destacando-se Inglaterra, EUA, França, Israel, Índia, Japão e Alemanha. Atualmente existem 7.500 unidades em operação no Golfo Pérsico, Espanha, Malta, Austrália e Caribe convertendo 4,8 bilhões de metros cúbicos de água salgada em água doce, por ano. O custo, ainda alto, está em torno de US\$ 2,00 o metro cúbico. As grandes unidades, semelhantes às refinarias de petróleo, encontram-se no Kuwait, Curaçao, Aruba, Guernsey e Gibraltar, abastecendo-os totalmente com água retirada do mar (DESTEFANI, 2008).

No século 21, o maior novo desafio em dessalinização é a diminuição do custo da água tratada para um nível aceitável para qualquer região árida no mundo, e a otimização de processos que ofereçam um método sustentável para solucionar o problema da escassez de água em combinação com o problema das fontes de energia (BRUGGEN, 2003).

### 4.3 - A CAPACIDADE MUNDIAL DE DESSALINIZAÇÃO

A aplicação das principais tecnologias de dessalinização ao redor do mundo, de acordo com um estudo feito em 1998, é mostrada na Figura 4.1.

Os processos de destilação *flash* de múltiplo estágio e de osmose reversa são os mais bem sucedidos comercialmente para produção de grandes quantidades de água doce a partir da água do mar. Com isso, correspondem a mais de 85% do total. Embora a capacidade seja dividida aproximadamente igualmente entre os processos por membrana e os processos térmicos, tendências sugerem que os processos por membrana estejam dominando o mercado atualmente (MILLER, 2003).

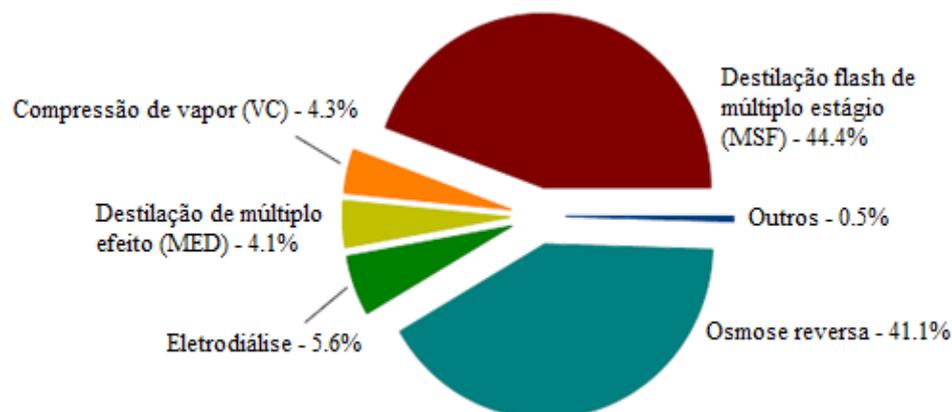


Figura 4.1: Distribuição global da capacidade de dessalinização instalada por diferentes tecnologias. Fonte: adaptado de Wangnick (1998).

A distribuição da capacidade instalada de dessalinização por país é mostrada na Tabela 4.1. Em 1998, os 11 países superiores correspondiam a mais de 75% da capacidade global. Não surpreendentemente, 6 desses 11 países estão situados no Oriente Médio. Os processos térmicos são dominantes nesta região por duas razões: abundância de recursos energéticos e uma confiança histórica na dessalinização que precede o advento das modernas membranas (MILLER, 2003).

Os Estados Unidos ocupam o segundo lugar na capacidade de dessalinização instalada, após somente a Arábia Saudita. O crescimento da dessalinização nos EUA

está fortemente ligado aos avanços na tecnologia de membrana durante as décadas passadas. Em particular, o advento dos processos de membrana conduziu ao tratamento de águas salinas que não poderiam ser economicamente tratadas através de meios térmicos (MILLER, 2003).

Tabela 4.1: Capacidade instalada de dessalinização por país, tomando como base os 11 países com maior capacidade instalada do mundo. Fonte: adaptado de Wangnick (1998).

País	Capacidade total <sup>3</sup> (m <sup>3</sup> /dia)	Produção global (%)	Destilação <i>flash</i> de múltiplo estágio	Destilação de múltiplo efeito	Destilação por compressão de vapor	Osmose reversa	Eletrodiálise
Arábia Saudita	5,253,200	25,9	<b>65,7</b>	0,3	1,2	31	1,9
EUA	3,092,500	15,2	1,7	1,8	4,5	<b>78</b>	11,4
Emirados Árabes Unidos	2,164,500	10,7	<b>89,8</b>	0,4	3,0	6,5	0,2
Kuwait	1,538,400	7,6	<b>95,5</b>	0,7	0,0	3,4	0,3
Japão	745,300	3,7	4,7	2,0	0,0	<b>86,4</b>	6,8
Líbia	683,300	3,4	<b>67,7</b>	0,9	1,8	19,6	9,8
Qatar	566,900	2,8	<b>94,4</b>	0,6	3,3	0,0	0,0
Espanha	529,900	2,6	10,6	0,9	8,7	<b>68,9</b>	10,9
Itália	518,700	2,6	<b>43,2</b>	1,9	15,1	20,4	19,2
Barém	309,200	1,5	<b>52,0</b>	0,0	1,5	41,7	4,5
Oman	192,000	0,9	<b>84,1</b>	2,2	0,0	11,7	0,0
<b>Total</b>	<b>15,594,500</b>	<b>76,9</b>					

Países árabes ricos em petróleo – Kuwait, Qatar, Barém, Arábia Saudita, Emirados Árabes Unidos – constituem os cinco dos nove países com menos água per capita. Cerca de 90% de suas fontes de água provêm da água do mar, além de dependerem fortemente de aquíferos de água subterrânea para complementar suas

poucas fontes renováveis de água. Essa produção representa cerca de dois terços da água dessalinizada em todo o mundo (CHAIBI, 2000).

Levando em consideração que as plantas de dessalinização instaladas nesses países são abastecidas com petróleo, o qual esses países possuem em abundância, e uma população crescente, a escassez de água será ampliada e, eventualmente, eles terão que colocar sua gestão de água em um caminho sustentável.

## 4.4 - PRINCIPAIS PROCESSOS DE DESSALINIZAÇÃO

Um dispositivo de dessalinização essencialmente efetua a separação da água salina em dois fluxos: um com baixa concentração de sais dissolvidos (o fluxo de água doce) e outro contendo os sais dissolvidos remanescentes (o concentrado ou salmoura). Nessa sessão, os principais processos empregados atualmente serão descritos.

### 4.4.1 - Processos térmicos

A maior parte da água dessalinizada no mundo é produzida com calor para destilar a água do mar e obter água doce. Para isso ser feito economicamente, nas estações típicas de dessalinização o ponto de ebulição é controlado por ajuste da pressão da água que está sendo destilada (SOUZA, 2006).

A destilação, em suma, é o processo pelo qual a água é levada à temperatura de ebulição e, em seguida, é condensada, pelo resfriamento do vapor. Para reduzir significativamente a quantidade de energia necessária, alguns dos processos de destilação usualmente adotam múltiplas ebulições em sucessivos estágios, cada qual operando a uma temperatura e pressão menores.

Diferentes arranjos caracterizam os tipos de processos de destilação. Os principais processos são: destilação de múltiplo efeito (MED), compressão de vapor (VC), destilação *flash* de múltiplo estágio (MSF) e destilação solar. Dentre esses, os mais comercialmente usados são: destilação *flash* de múltiplo estágio, destilação de múltiplo efeito e compressão de vapor.

#### 4.4.1.1 - Destilação de múltiplo efeito (MED)

O processo de destilação mais antigo é a destilação de múltiplo efeito (MED) (SEMIAT, 2000), muito eficiente do ponto de vista termodinâmico (OPHIR & LOKIEE, 2005). As primeiras plantas foram instaladas nos anos 50 (MILLER, 2003).

O processo se baseia na evaporação da água salina pela transferência do calor produzido na condensação do vapor (Figura 4.2). O vapor produzido dessa forma é usado em um passo (ou “efeito”) subsequente, que opera em uma pressão e uma temperatura ligeiramente menores, de modo que a energia do vapor condensado é usada para evaporação adicional da água no efeito seguinte (KALOGIROU, 1997a).

Assim como no processo *flash* de múltiplo estágio (MSF), a destilação de múltiplo efeito acontece em uma série de recipientes e utiliza o princípio de redução de pressão interna nos vários efeitos. Isto permite à água se submeter à ebulição múltipla sem suprimento de calor adicional após o primeiro efeito. Apenas no primeiro efeito um vapor primário, gerado independentemente do processo de destilação, é usado (SOUZA, 2006).

Em uma planta de destilação de múltiplo efeito, a água salina entra no primeiro efeito e a sua temperatura é elevada até o ponto de ebulição após ser pré-aquecida nos tubos. A água é então vaporizada sobre a superfície dos tubos evaporadores numa lâmina fina para promover ebulição e evaporação rápida. Os tubos são aquecidos pelo vapor através de um aquecedor, ou de outra fonte, que é condensado durante o processo de transferência de calor. O condensado do vapor é reciclado para reutilização. Apenas uma porção de água aplicada aos tubos do primeiro efeito é evaporada (KALOGIROU, 1997a).

A água remanescente é levada para o segundo efeito, onde é novamente aplicada a uma série de tubos. Estes tubos são, por sua vez, aquecidos pelo vapor criado no primeiro efeito. Este vapor é condensado formando o produto água doce, enquanto libera calor para evaporar uma porção de água remanescente no próximo efeito. Isto continua pelos vários efeitos (KALOGIROU, 1997a).

O número de efeitos que pode ser obtido varia de 8 a 16. Um número alto de efeitos aumenta a eficiência do processo por aumentar a área de transferência de calor (BRUGGEN, 2003). Todavia, esse aumento também aumenta os custos da planta (KHAWAJIA et al, 2008). O número de efeitos é limitado pela temperatura máxima de 120°C (a temperatura superior máxima da água salina no primeiro efeito, acima da qual a corrosão ocorre) e pela diferença de temperatura com a água no último efeito (OPHIR & LOKIEE, 2005).

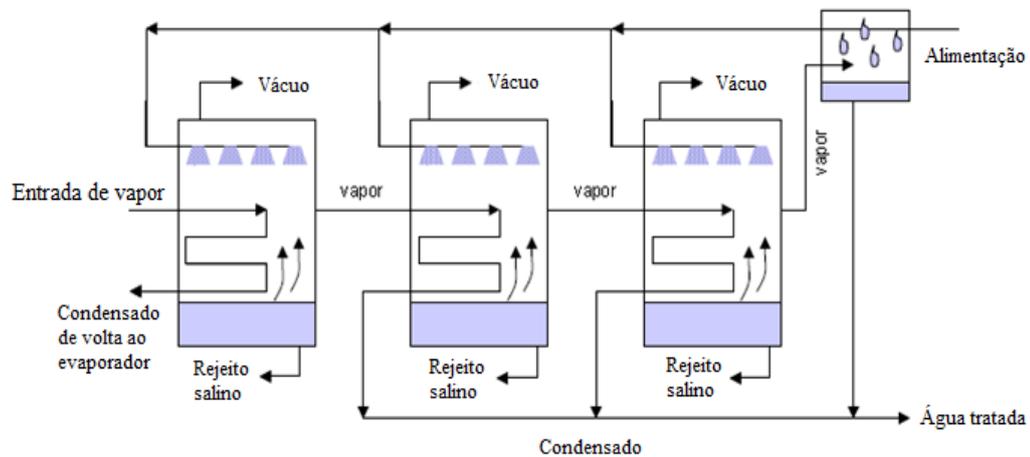


Figura 4.2: Princípio operacional da destilação de múltiplo efeito. Fonte: MILLER (2003)

O consumo de potência de uma planta de destilação de múltiplo efeito (MED) é significativamente menor do que de uma planta *flash* de múltiplo estágio (MSF), e a relação do desempenho da planta MED é tipicamente maior do que de uma planta de MSF. Conseqüentemente, o processo MED é mais eficiente do que o MSF de um ponto de vista termodinâmico e de transferência térmica. O consumo específico de potência do processo MED está abaixo de  $1,8 \text{ kWh/m}^3$  de destilado, significativamente abaixo do consumo do processo MSF, de  $4 \text{ kWh/m}^3$  típicos (KHAWAJIA et al, 2008).

Os maiores problemas com MED estão relacionados à precipitação de sais nas superfícies dos tubos de transferência de calor e à corrosão dos materiais em contato com a água salina, principalmente nos trocadores de calor. Isto porque a água salina fica em contato intenso com a superfície de troca de calor, o que acontece, por exemplo, quando se emprega um evaporador de tubo vertical (BRUGGEN, 2003).

Os tubos de um evaporador de tubo vertical possuem vários metros de comprimento e poucos centímetros de diâmetro (cerca de 5 cm). O líquido circula entre as paredes dos tubos. A taxa de fluxo da lâmina d'água que passa é alta o bastante para obter um fluxo turbulento. Entretanto, isto realça a corrosão dentro dos tubos, de modo que a vida útil destes evaporadores é relativamente curta (BRUGGEN, 2003).

O processo MED ainda não é amplamente utilizado, mas ganhou atenção devido ao melhor desempenho térmico comparado ao MSF. Plantas mais novas têm sido projetadas para limitar problemas com incrustações de sais nas superfícies dos tubos de transferência de calor. Como cada estágio funciona em uma pressão sucessivamente mais baixa, isso permite que a planta seja configurada para uma alta temperatura ( $>90^{\circ}\text{C}$ ) ou uma baixa temperatura ( $<90^{\circ}\text{C}$ ) de operação. A temperatura máxima de ebulição na planta de baixa temperatura pode ser tão baixa quanto  $55^{\circ}\text{C}$ , o que ajuda a reduzir problemas de corrosão e incrustação (BUROS, 2000).

A Tabela 4.2 resume as potencialidades e as limitações do uso da destilação de múltiplo efeito, assim como aponta os avanços já alcançados e as perspectivas de melhorias futuras.

Tabela 4.2: As potencialidades, as limitações, os avanços alcançados e as perspectivas de melhorias futuras para a destilação de múltiplo efeito.

<b>Vantagens / Potencialidades</b>	<b>Desvantagens / Limitações</b>	<b>Avanços alcançados / perspectivas de melhorias futuras</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Muito eficiente termodinamicamente;</li> <li>- Permite à água se submeter à ebulição múltipla sem suprimento de calor adicional após o primeiro efeito;</li> <li>- O consumo de potência é significativamente menor e a relação do desempenho é tipicamente maior do que de uma planta de destilação MSF</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necessita de um aquecedor, ou de outra fonte, para aquecer os tubos evaporadores;</li> <li>- Um número alto de efeitos é uma medida da eficiência do processo, porém também aumenta os custos da planta;</li> <li>- Apresenta problemas de precipitação de sais nas superfícies dos tubos de transferência de calor e à corrosão dos materiais em contato com a água salina, principalmente nos trocadores de calor, de modo que a vida útil destes é relativamente curta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Plantas mais novas têm sido projetadas para limitar problemas com incrustações de sais nas superfícies dos tubos de transferência de calor</li> </ul>

#### 4.4.1.2 - Destilação por compressão de vapor (VC)

O processo por compressão de vapor (VC) se baseia na redução da pressão como força motriz para a evaporação. A destilação por compressão de vapor é uma variação da destilação de múltiplo efeito, baseada na compressão do vapor gerado pela água evaporada, ao invés da condensação, de modo que o calor latente do vapor possa ser eficientemente reutilizado no processo de evaporação. Tecnicamente, é um processo mais complexo (BRUGGEN, 2003).

A destilação por compressão de vapor é geralmente utilizada para unidades de dessalinização de pequena e média escala (MILLER, 2003). São comumente construídos para produção de água em uma faixa de até 3000 m<sup>3</sup>/dia. O consumo da unidade de maior potência é aproximadamente 8 kWh/m<sup>3</sup> de água produzida. As unidades de compressão de vapor são frequentemente usadas em *resorts*, indústrias, e locais de perfuração onde a água doce não está prontamente disponível (BUROS, 2000)

O calor para evaporação da água vem da compressão do vapor muito mais do que da troca direta de calor a partir do vapor produzido em um aquecedor. As plantas que utilizam esse processo são geralmente desenhadas para tirar vantagem do princípio de redução da temperatura do ponto de ebulição através da redução de pressão (MILLER, 2003).

Em um processo de destilação por compressão de vapor, a água a tratar é pré-aquecida a uma temperatura de 60 a 100°C pela troca de calor com a condensação do destilado e com o rejeito salino. Para dar a partida e garantir as condições de operação normal, um pré-aquecedor é alimentado externamente. O processo pode ser único ou com vários efeitos. O vapor produzido em cada efeito é comprimido antes de entrar no condensador e realizar a troca de calor no evaporador (KALOGIROU, 1997a).

Dois métodos primários são utilizados tanto para condensar vapor quanto para produzir calor suficiente para evaporar a água salina que chega (SOUZA, 2006): mecanicamente (por meio de um compressor mecânico) ou por termo-compressão (através de um jato de vapor).

O compressor mecânico é comumente operado eletricamente, permitindo o uso exclusivo de energia elétrica para produzir água através da destilação. Na unidade de compressão através de um jato de vapor, também chamado de termo-compressor, um

orifício no jato de vapor cria e extrai vapor de água do recipiente principal, criando uma pressão ambiente mais baixa neste. O jato de vapor comprime o vapor de água extraído. Esta mistura é condensada nas paredes do tubo para fornecer energia (calor de condensação) para evaporar a água salina que é aplicada no lado externo das paredes do tubo no recipiente. A Figura 4.3 mostra um esquema simplificado do processo. O destilado e o rejeito salino são descarregados através de um trocador de calor (SOUZA, 2006).

As unidades com compressor mecânico variam tipicamente no tamanho até aproximadamente 3.000 m<sup>3</sup>/dia, enquanto as unidades com termo-compressor podem variar no tamanho até 20.000 m<sup>3</sup>/dia. Os sistemas com compressor mecânico têm geralmente um único estágio, enquanto os sistemas com termo-compressão possuem diversos estágios. Esta diferença advém do fato de que os sistemas mecânicos apresentam o mesmo consumo de potência específica (potência/unidade de água produzida) independente do número de estágios, enquanto a eficiência térmica de sistemas com termo-compressão é aumentada com estágios adicionais (MANDANI et al, 2000). Assim a vantagem principal de adicionar efeitos a um sistema com compressor mecânico é simplesmente aumento de sua capacidade.

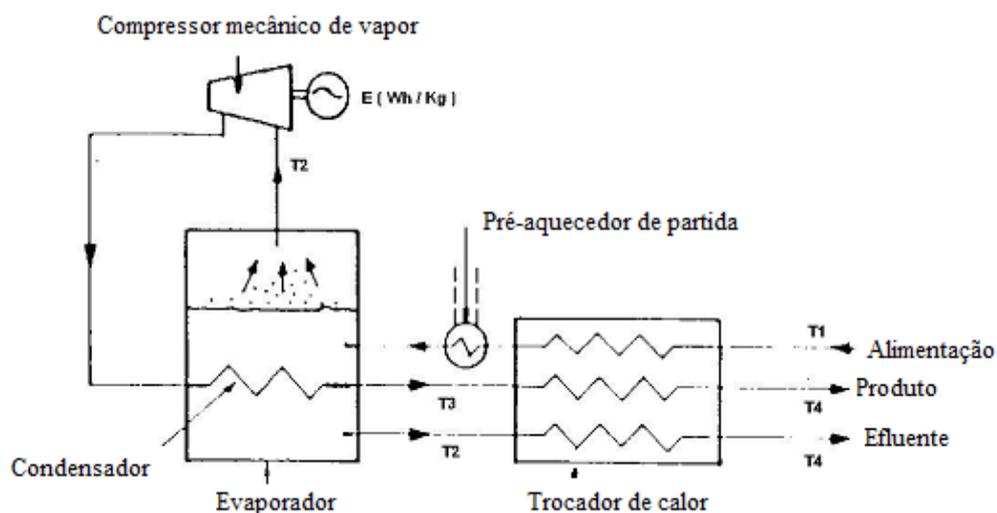


Figura 4.3: Princípio operacional da destilação por compressão de vapor. Fonte: SOUZA (2006)

Apesar da vantagem do princípio de redução da temperatura do ponto de ebulição através da redução de pressão utilizado na destilação por compressão de vapor, os principais problemas presentes na destilação de múltiplo efeito continuam presentes, como a incrustação de sais nas superfícies dos tubos de transferência de calor e a corrosão de materiais, necessitando também de algumas medidas para reduzir esses problemas.

A Tabela 4.3 resume as potencialidades e as limitações do uso da destilação por compressão de vapor, assim como aponta os avanços já alcançados e as perspectivas de melhorias futuras.

Tabela 4.3: As potencialidades, as limitações, os avanços alcançados e as perspectivas de melhorias futuras para a destilação por compressão de vapor.

<b>Vantagens / Potencialidades</b>	<b>Desvantagens / Limitações</b>	<b>Avanços alcançados / perspectivas de melhorias futuras</b>
- A redução da temperatura do ponto de ebulição através da redução de pressão se constitui na sua maior vantagem	- Geralmente utilizada para unidades de dessalinização de pequena e média escala; - Para dar a partida e garantir as condições de operação normal, um pré-aquecedor é alimentado externamente	- Os principais problemas presentes na destilação MED continuam presentes, como a precipitação de sais nas superfícies dos tubos de transferência de calor e a corrosão de materiais

#### **4.4.1.3 - Destilação *flash* de múltiplo estágio (MSF)**

A resposta tecnológica aos problemas das destilações de múltiplo efeito e por compressão de vapor nos anos 60 foi o desenvolvimento da destilação *flash* de múltiplo estágio (MSF), onde um princípio diferente de destilação é usado.

A destilação MSF consiste em uma série de câmaras onde a evaporação da água salina resulta da pressão aplicada e não da troca de calor com o vapor de condensação (BRUGGEN, 2003).

Em 1953, a marinha dos EUA já havia construído uma planta MSF de 189 m<sup>3</sup>/dia com 5 estágios. Em 1957, quatro unidades, cada uma com capacidade de 2.271 m<sup>3</sup>/dia, foram instaladas no Kuwait (KHAWAJIA et al, 2008).

Atualmente, as unidades MSF são amplamente utilizadas no Oriente Médio (em particular, na Arábia Saudita, nos Emirados Árabes Unidos e no Kuwait) e correspondem a mais de 40% da capacidade de dessalinização mundial (MILLER, 2003). A planta *Saline Water Conversion Corporation's Al-Jubail* na Arábia Saudita é atualmente a maior planta do mundo com uma capacidade de 815.120 m<sup>3</sup>/dia (KHAWAJIA et al, 2008).

No processo MSF, a fração de vapor obtida é condensada pela troca de calor com a água salina, o que resulta em um pré-aquecimento eficaz. O contato entre a superfície de troca de calor e a água salina é limitado, o que significa que os problemas de corrosão são evitados. O processo é mais confiável e mais fácil de operar do que a destilação de múltiplo efeito, e tem uma vida útil mais longa (KALOGIROU, 1997a).

Durante o processo, a água salina é aquecida em um recipiente chamado de aquecedor de água salina. Isto é feito geralmente condensando-se o vapor em uma série de tubos que passam através do recipiente que, por sua vez, aquece a água salina. Esta água aquecida flui então para outro recipiente, denominado de estágio, onde a pressão é tal que a introdução súbita da água aquecida faz com que esta ferva rapidamente, quase explodindo ou transformando-se rapidamente em vapor (daí o nome *flash*). Geralmente, apenas uma pequena parcela desta água é convertida em vapor. Dependendo da pressão mantida neste estágio, a ebulição irá continuar apenas até o ponto em que a água resfria (SOUZA, 2006).

O vapor gerado pelo *flashing* é convertido em água doce através da condensação em tubos de troca de calor que correm através de cada estágio. Os tubos são resfriados através da entrada de água que vai para o aquecedor de água salina. Isto, por sua vez, aquece a água de forma que a quantidade de energia térmica necessária no aquecedor para aumentar a temperatura da água salina seja reduzida (SOUZA, 2006).

De forma resumida, uma planta MSF consiste na entrada de calor, na recuperação de calor e nas seções da rejeição de calor. Embora comumente se use um

aditivo para o controle de incrustações, uma dose ácida pode igualmente ser utilizada (KHAWAJIA et al, 2008).

O evaporador é feito de múltiplos estágios, tipicamente contendo 19 - 28 estágios nas grandes plantas modernas de MSF (SOMMARIVA, 1996). Um aumento no número de estágios fornece uma área maior de troca de calor, o que melhora a eficiência da planta, mas, por outro lado, também aumenta seu custo (KHAWAJIA et al, 2008).

As plantas MSF geralmente operam em temperaturas da ordem de 90-120°C, dependendo do método selecionado de controle das precipitações de sais nas superfícies do equipamento. Operando a planta em temperaturas mais altas, próximas aos limites de 120°C, há um aumento da eficiência, mas, também, do potencial para a formação de incrustações e corrosão acelerada de superfícies de metal em contato com a água salina (AL-AHMAD & ALEEM, 1993).

A água dessalinizada produzida pelo processo MSF contém tipicamente 2 - 10 ppm de sólidos dissolvidos. Conseqüentemente, para potabilização dessa água, um pós-tratamento de remineralização pode ser requerido. A quantidade de vapor de água formado depende em grande parte da pressão mantida em cada estágio. A taxa de produção de água pelo processo aumenta com a diminuição da temperatura da água salina porque a faixa do *flash* (tipicamente uma faixa total de 50-75°C) aumenta com diminuições na temperatura da água salina (KHAWAJIA et al, 2008).

A Figura 4.4 mostra esquematicamente o processo de evaporação *flash* para  $n$  estágios: a água a ser tratada passa por uma seqüência de trocadores de calor, nos quais a temperatura é progressivamente acumulada, por condensação do vapor produzido nas correspondentes câmaras de expansão (*flash*), atingindo de 80 a 110°C. Depois de aquecimento suplementar entre 90 e 120°C por uma fonte externa de vapor, a água salina é expandida consecutivamente através de um número  $n$  de estágios, contendo trocadores de calor, onde sua pressão de vapor é progressivamente reduzida (KALOGIROU, 1997a).

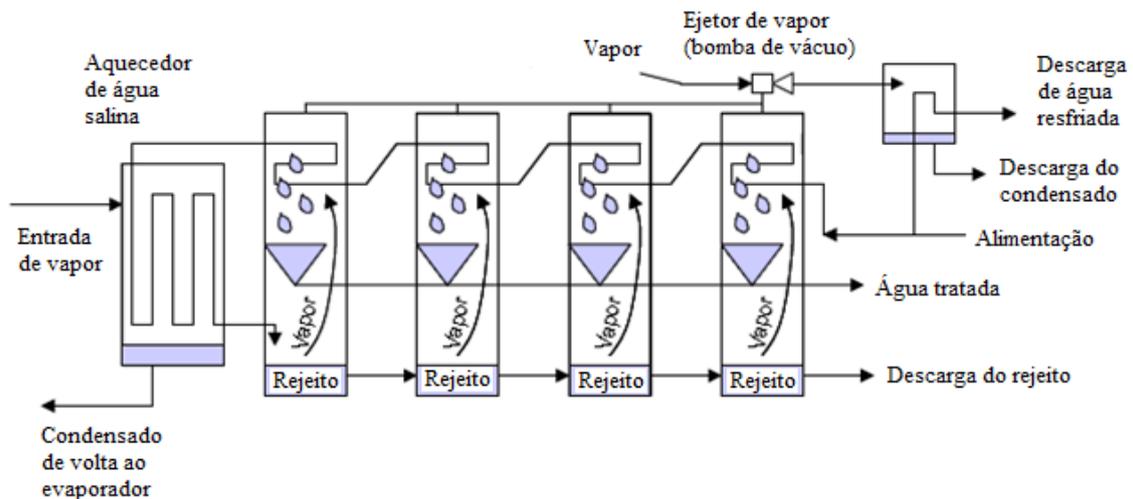


Figura 4.4: Princípio operacional da destilação *flash* de múltiplo estágio. Fonte: BRUGGEN (2003)

O custo total da destilação MSF é mais elevado do que para o processo MED, principalmente por causa da relação de desempenho mais baixa. Avaliações recentes indicam um custo unitário de 1,00 US\$/m<sup>3</sup> para o processo MED, e 1,40 US\$/m<sup>3</sup> para MSF (BRUGGEN, 2003).

Nos últimos anos, o desenvolvimento de ligas novas tem permitido controlar os problemas de corrosão de um modo mais eficiente. Os materiais usados atualmente nos dispositivos de destilação são de aço inoxidável ou ligas de cobre-níquel (OLDFIELD & TODD, 1999).

A Tabela 4.4 resume as potencialidades e as limitações do uso da destilação *flash* de múltiplo estágio, assim como aponta os avanços já alcançados e as perspectivas de melhorias futuras.

Tabela 4.4: As potencialidades, as limitações, os avanços alcançados e as perspectivas de melhorias futuras para a destilação *flash* de múltiplo estágio.

<b>Vantagens / Potencialidades</b>	<b>Desvantagens / Limitações</b>	<b>Avanços alcançados / perspectivas de melhorias futuras</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- O contato entre a superfície de troca de calor e a água salina é limitado, o que significa que os problemas de corrosão e de erosão são evitados;</li> <li>- O processo é mais confiável, mais fácil de operar e tem uma vida útil mais longa do que a destilação MED</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Um aumento no número de estágios melhora a eficiência da planta, mas também aumenta seu custo;</li> <li>- Em temperaturas mais altas, aumenta a precipitação de sais e corrosão acelerada de superfícies em contato com a água salina;</li> <li>- O custo total é mais elevado do que no processo MED</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O desenvolvimento de ligas novas tem buscado controlar os problemas de corrosão e erosão de um modo mais eficiente</li> </ul>

#### 4.4.1.4 - Destilação solar

Posto que o custo da energia é o maior componente do custo de operação de uma planta de dessalinização (KHAWAJIA et al, 2008), o desenvolvimento de um método sustentável de dessalinização exige a minimização do consumo de energia e, igualmente, o uso de fontes de energia renováveis que possam permitir que países menos desenvolvidos tenham acesso a quantidades suficientes de água tratada. Diferentes opções utilizando energias alternativas podem ser sugeridas; no entanto, os sistemas baseados na energia solar estão entre as opções mais realísticas (BRUGGEN, 2003).

Os destiladores solares geralmente imitam uma parte do ciclo hidrológico natural, em uma escala bem menor, no qual a água salina é aquecida pelos raios solares de forma a propiciar a produção de vapor de água, que é então condensado em uma superfície fria e o condensado coletado como produto (Figura 4.5). Geralmente, uma cobertura inclinada de vidro ou de plástico cobre o reservatório. Um reservatório preto pode absorver mais eficientemente a energia (MILLER, 2003). A evaporação ocorre na faixa de 60°C (KALOGIROU, 2007a).

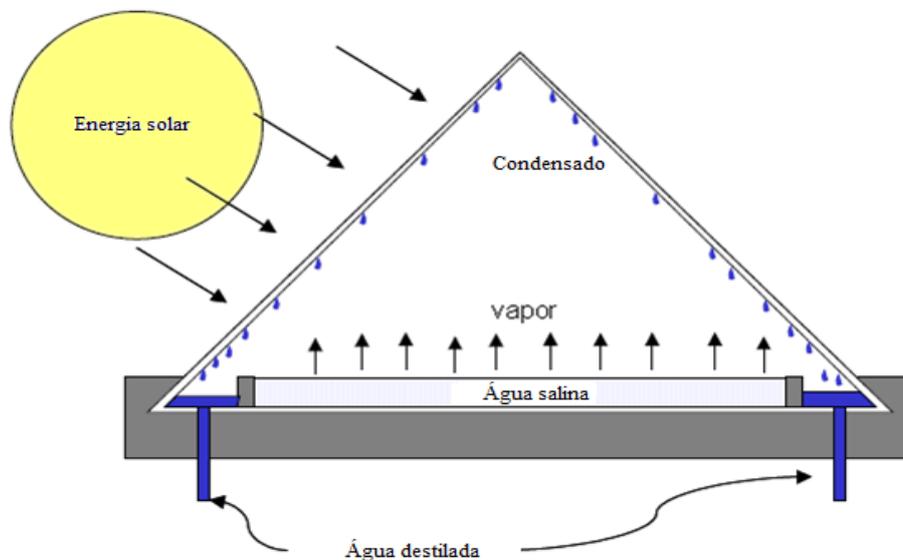


Figura 4.5: Princípio operacional da destilação solar. Fonte: MILLER (2003)

Esse processo é similar a uma estufa solar de plantas e vegetais: ele atua como uma armadilha de calor porque a cobertura é transparente à luz solar, mas é opaca à radiação infravermelha que emana da água quente. A cobertura armazena todo o vapor, impede perdas e, ao mesmo tempo, impede o vento de alcançar a água e resfriá-la.

A energia térmica é livre de custos. Somente para bombear a água, energia adicional pode ser necessária. A manutenção e a operação desse método consistem em prevenir a formação de crostas causada pela secagem do reservatório (SOUZA, 2006).

No Nordeste do Brasil, esse processo pode se tornar uma aplicação especialmente promissora, posto que a região é provida dos melhores índices de radiação solar do país, que é um fator importante para o bom funcionamento do destilador. Nessa região, as áreas mais afetadas são aquelas cuja probabilidade de se encontrar água subterrânea com qualidade e quantidade suficientes é muito baixa. Geralmente, quando se consegue uma vazão razoável, a água é salobra (KOTAKA et al, 2004).

No entanto, os destiladores solares possuem eficiência típica menor que 50%, por utilizarem menos de 50% da radiação solar incidente (SPIEGLER & EL-SAIED, 1994). Uma regra empírica geral é que aproximadamente  $1 \text{ m}^2$  da terra produzirá 4 litros

de água doce por dia (BUROS, 2000), um valor considerado baixo quando há necessidade de produção de grandes volumes de água tratada.

Sistemas de destilação solar apresentam baixos custos de operação e manutenção, mas requerem grandes áreas e investimento inicial relativamente alto. No entanto, eles são a melhor solução para áreas remotas e comunidades pequenas em regiões áridas e semi-áridas com escassez de água (CHAIBI, 2000).

Para diminuir o custo da água produzida, é importante usar materiais de construção baratos e ao mesmo tempo resistentes às condições climáticas, já que os custos de instalação tendem a ser mais elevados do que outros métodos. Modificações nos destiladores para aumentar a eficiência, tais como inclinação para o sol, experimentam um aumento de energia incidente de aproximadamente 16% (SPIEGLER & EL-SAIED, 1994).

A literatura tem apontado um futuro limitado para a destilação solar para aplicações em grande escala. Dentre as principais dificuldades apontadas, estão a necessidade de grandes áreas e os custos de instalação. No entanto, em áreas isoladas, onde o combustível é caro, a terra é barata, e a incidência solar é elevada, essa aplicação se torna especialmente promissora. Adicionalmente, sistemas para abastecimento humano em pequena escala são extremamente simples de se operar, e poderiam ter seu uso bastante difundido em partes subdesenvolvidas do mundo (MILLER, 2003).

À medida que a escassez de água se tornar mais crítica, um mercado doméstico poderá ser desenvolvido para sistemas menores, por exemplo, para tratar e também reciclar a água doméstica. As melhorias deverão se basear nos materiais e na construção para diminuir custos e suportar vários anos de exposição ao ambiente natural (KALOGIROU, 2007a).

No caso do Brasil, particularmente, alguns resultados apresentados em pesquisas recentes (SENS et al, 2004) apontam a produção de água potável através de destilação solar como um método viável e interessante, visto que não consome energia elétrica, pode ser implantada em locais isolados e não produz efluente líquido com alta concentração salina que dificulta a sua disposição, o que ocorre com outros processos de dessalinização. Essa tecnologia pode gerar rejeitos na forma sólida, que podem ser aproveitados na alimentação animal.

Adicionalmente, a energia solar também atua na desinfecção da água. Estudos empregando a tecnologia SODIS (sigla em inglês para *Solar Water Disinfection*) têm apontado a aplicação da energia solar em regiões menos favorecidas em infra-estrutura e recursos financeiros, como áreas rurais de países em desenvolvimento, para a desinfecção de águas captadas em poços ou mananciais superficiais, cujas características sejam sanitariamente duvidosas.

Aplicações da energia solar para dessalinização e geração de energia simultaneamente vêm sendo propostas em vários estudos (ZHAO et al, 2009) e podem contribuir para viabilizar o emprego da destilação solar em regiões com déficits de água e de eletricidade.

A Tabela 4.5 resume as potencialidades e as limitações do uso da destilação solar, assim como aponta os avanços já alcançados e as perspectivas de melhorias futuras.

Tabela 4.5: As potencialidades, as limitações, os avanços alcançados e as perspectivas de melhorias futuras para a destilação solar.

<b>Vantagens / Potencialidades</b>	<b>Desvantagens / Limitações</b>	<b>Avanços alcançados / perspectivas de melhorias futuras</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- A energia solar é livre de custos;</li> <li>- A manutenção e a operação são simples;</li> <li>- Sistemas para abastecimento humano em pequena escala poderiam ter seu uso bastante difundido em partes subdesenvolvidas do mundo;</li> <li>- Pode ser implantada em locais isolados;</li> <li>- Não produz efluente líquido com alta concentração salina que dificulta a sua disposição</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Possuem eficiência típica menor que 50%;</li> <li>- Tem uma produção considerada baixo e necessita de áreas grandes quando há necessidade de produção de grandes volumes de água tratada;</li> <li>- Os custos da instalação tendem a ser mais elevados do que outros métodos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Um mercado doméstico poderá ser desenvolvido para sistemas menores. As melhorias deverão se basear nos materiais e na construção para diminuir custos e de modo que os dispositivos possam estar expostos por vários anos ao ambiente natural</li> </ul>

## 4.4.2 - Processos através de membranas

Na natureza, as membranas desempenham um importante papel na separação dos sais. Isto inclui tanto os processos de diálise quanto de osmose que ocorrem no corpo. Na dessalinização, as membranas são utilizadas em dois processos comercialmente importantes: a osmose reversa e a eletrodialise. Ambos os processos utilizam a capacidade das membranas em diferenciar e separar seletivamente sais e água. Entretanto, as membranas são utilizadas diferentemente em cada um desses processos.

### 4.4.2.1 - Osmose reversa

A osmose reversa, também chamada de hiperfiltração (LIMA, 2006), é um processo forçado, contrário ao fenômeno natural da osmose. Este consiste em água fluindo, espontaneamente, através de uma membrana semipermeável, de um compartimento de água pura para outro contendo uma solução concentrada de sais, até a pressão osmótica ( $\Delta\pi$ ) ser alcançada, no ponto onde o sistema alcança seu equilíbrio osmótico.

Aplicando pressão no compartimento contendo solução concentrada de sais, maior do que a pressão osmótica, a água é forçada a fluir no sentido oposto. Esta inversão no sentido do fluxo espontâneo da água é chamada osmose reversa. A Figura 4.6 ilustra o processo.

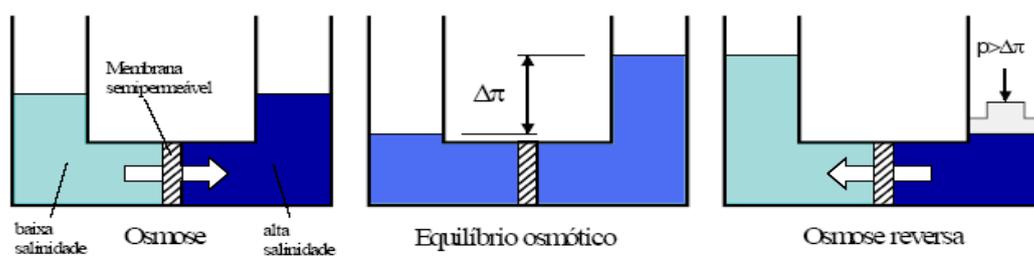


Figura 4.6: Processos de osmose, equilíbrio osmótico e osmose reversa. Fonte: LIMA (2006).

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

As membranas, portanto, são usadas nesse método como uma barreira de separação física, baseada nas diferenças de tamanho e difusão das partículas em solução (KALOGIROU, 1997a).

Na prática, a água salina é bombeada para um recipiente fechado onde é pressurizada contra a membrana. Como uma parte da água passa através da membrana, a água remanescente aumenta a concentração de sal. Ao mesmo tempo, uma parte desta água é escoada sem passar através da membrana. Sem este escoamento controlado, a água pressurizada continuaria a aumentar a concentração de sal, criando problemas como precipitação de sais supersaturados e aumento da pressão osmótica através das membranas. A quantidade de água escoada para ser consumida neste fluxo de salmoura varia de 20 a 70% do fluxo de alimentação, dependendo da quantidade de sal da água de abastecimento. Uma bomba de alta pressão fornece a pressão necessária para permitir à água passar pela membrana e ter os sais rejeitados (SOUZA, 2006).

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

Por ser um processo forçado, grande quantidade de energia é requerida para operar a bomba de alta pressão utilizada para vencer a pressão osmótica natural. Com o avanço do controle da polimerização, utilizada na síntese de filmes de porosidade controlada, o desenvolvimento tecnológico na produção das membranas de osmose reversa foi dominado pelos polímeros orgânicos. Esse avanço tecnológico possibilitou a redução na espessura da película filtrante, a qual diminuiu consideravelmente a resistência à filtração e, conseqüentemente, o consumo de energia. Essa diminuição no consumo de energia acarretou um importante avanço, comparado com outros processos

de dessalinização (SOUZA, 2006). Bruggen (2003) estima o custo da osmose reversa em 0,80 US\$/m<sup>3</sup>.

A membrana deve ser capaz de suportar a queda de toda a pressão através dela. A estratégia operacional adotada para que a membrana seja submetida a condições seguras é a imposição do ponto de operação dentro de uma janela operacional. Uma ferramenta computacional, denominada ROSA (*Reverse Osmosis System Application*), foi desenvolvida para simulação da operação do sistema, (FEDRIZZI, 1997). Os resultados da simulação ROSA determinam os limites de operação da membrana.

As membranas semipermeáveis são frágeis e variam em sua capacidade de passar água doce e rejeitar a passagem de sais. Nenhuma membrana é perfeita na sua capacidade de rejeição de sais, de forma que uma pequena quantidade de sais passa através da membrana e aparece na água tratada (KOTAKA et al, 2004).

Os íons possuem uma baixa difusão em uma matriz de polímero e, conseqüentemente, quase não fluem através da membrana de osmose reversa. A água resultante tem uma concentração de sólidos totais dissolvidos entre 100 e 500 mg/L, o que é um pouco mais elevada do que a concentração obtida com a destilação, mas ainda baixa o bastante ou até demasiado baixa para finalidades de abastecimento humano, necessitando de uma etapa de remineralização para sua potabilização, assim como os já referidos processos térmicos (KHAWAJIA et al, 2008).

Segundo Lima (2006), os sistemas de osmose reversa podem ser acionados por máquinas de combustão interna ou elétrica, alimentadas por combustíveis fósseis ou fontes renováveis, respectivamente. Na zona rural, especificamente em pequenas comunidades remotas não atendidas pela rede elétrica de distribuição, onde o potencial eólico e/ou solar é satisfatório, é interessante a aplicação de tecnologias combinadas de osmose reversa e fontes renováveis.

É recomendável evitar os motores de combustão interna, pela dificuldade de transporte e armazenamento dos combustíveis, alto nível de ruído e emissão de gases poluentes. No caso de utilização de bateria, isso aumenta o custo inicial e operacional. A necessidade de armazenamento, considerando as características de intermitência e imprevisibilidade das fontes renováveis (principalmente a eólica), deve ser observada.

É importante salientar que a aplicação da osmose reversa na dessalinização de água é uma história de contínuas melhorias no processo. Considerando que as pressões necessárias nas primeiras unidades de osmose reversa eram da ordem de 120 bar, a introdução de membranas compostas de película fina permitiu que os sistemas operassem em uma pressão significativamente mais baixa – abaixo de 60 bar (BRUGGEN, 2003). Hoje em dia, pressões ainda mais baixas são buscadas pela aplicação da osmose reversa de baixa pressão, e mesmo pela nanofiltração em alguns casos.

Uma tendência em materiais de membrana é o desenvolvimento de membranas resistentes a biofilmes (“sujeiras”) presentes na água bruta, causa principal da perda do desempenho em unidades de dessalinização de osmose reversa e que resulta em um significativo encurtamento da vida útil da membrana.

As membranas de osmose reversa são sensíveis ao pH, a oxidantes, a vários produtos orgânicos, às algas, às bactérias e a particulados e outros contaminantes. O procedimento tradicional que é usado para lidar com esse problema (chamado de *biofouling*) é melhorar o sistema de pré-tratamento, etapa que vem se tornando muito importante por ter um impacto significativo no custo da osmose reversa (MILLER, 2003).

Um pré-tratamento típico inclui cloração, coagulação, adição de ácido, filtragens múltiplas, etc. O tipo de pré-tratamento a ser usado depende largamente das características da água de alimentação, do tipo de membrana utilizada, da configuração do sistema e da qualidade da água produzida (KHAWAJIA et al, 2008).

Um procedimento adicional para lidar com o *biofouling* é a modificação dos materiais da membrana a fim fazê-los mais resistentes a esses biofilmes. Nesse sentido, os fabricantes de membranas vêm melhorando constantemente as membranas disponíveis comercialmente. Há pelo menos duas medidas para redução desse problema (KALOGIROU, 1997a):

- O desenvolvimento de membranas que resistem à adesão e à acumulação de biofilmes;
- O desenvolvimento de membranas que são mais resistentes à degradação pelo cloro, de modo que a água de alimentação possa ser desinfetada para matar organismos tais como algas sem diminuir a vida da membrana.

No que se refere ao aumento da eficiência energética do processo de osmose reversa, várias estratégias são recomendadas, como a necessidade de métodos melhorados de recuperação de energia, especialmente para sistemas pequenos. Adicionalmente, o diferencial de membranas que mantêm taxas elevadas de fluxo com baixa pressão é desejado (MILLER, 2003).

Dentre as operações de pós tratamento geralmente requeridas para complementar o processo, estão incluídas a remoção de gases dissolvidos (CO<sub>2</sub> e, eventualmente, H<sub>2</sub>S), ajuste do pH através da adição de sais de Ca ou de Na, adição de cal e desinfecção (KHAWAJIA et al, 2008).

Atualmente, os EUA possuem a segunda maior capacidade de dessalinização mundial, utilizando principalmente o processo de osmose reversa para tratar águas salobras e salgadas (MILLER, 2003). No Brasil, a osmose reversa também é o processo mais utilizado no semi-árido para sanar o problema das águas salobras.

Fonseca et al (2004) constatou que, somente no Rio Grande do Norte, existiam 226 unidades de dessalinização instaladas até o ano de suas pesquisas e existia a previsão de instalação de novas unidades, todas utilizando a tecnologia da osmose reversa. Diante dos resultados das análises físico-químicas na água, a osmose reversa se mostrou eficaz e atendendo as exigências da Portaria 518/04 (MS, 2004). No entanto, o autor também verificou a inviabilidade de aplicação dessa tecnologia para pequenas comunidades devido ao elevado custo operacional.

Algumas desvantagens operacionais e econômicas do processo de osmose reversa para aplicação no semi-árido brasileiro também foram apontadas pelo Ministério da Saúde (MS, 2003), tais como: a necessidade de bomba de alta pressão para fazer passar a água através das membranas, o que requer um alto consumo de energia; a necessidade de lavagem química periódica das membranas, cujo custo é elevado; a geração de uma grande quantidade de efluente líquido com alta concentração de sais, cujo impacto ambiental deve ser considerado.

A Tabela 4.6 resume as potencialidades e as limitações do uso da osmose reversa, assim como aponta os avanços já alcançados e as perspectivas de melhorias futuras.

Tabela 4.6: As potencialidades, as limitações, os avanços alcançados e as perspectivas de melhorias futuras para a osmose reversa.

<b>Vantagens / Potencialidades</b>	<b>Desvantagens / Limitações</b>	<b>Avanços alcançados / perspectivas de melhorias futuras</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eficiência comprovada;</li> <li>- O avanço tecnológico possibilitou a redução na espessura das membranas, o que diminuiu consideravelmente o consumo de energia, acarretando uma importante vantagem, comparada com outros processos de dessalinização</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requer uma bomba de alta pressão para permitir à água passar pela membrana;</li> <li>- Biofilmes presentes na água bruta podem causar perda do desempenho e encurtamento da vida útil da membrana;</li> <li>- Gera uma grande quantidade de efluente líquido com alta concentração de sais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A aplicação da osmose reversa na dessalinização de água é uma história de contínuas melhorias no processo. Os fabricantes de membranas vêm melhorando constantemente as membranas disponíveis comercialmente</li> </ul>

#### 4.4.2.2 – Eletrodiálise

Os constituintes iônicos desenvolvidos em uma solução salina tais como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{CO}_3^{2-}$  estão dispersos na água, neutralizando eficazmente suas cargas individuais. Quando são colocados eletrodos ligados a uma fonte externa de corrente contínua como uma bateria e um recipiente de água salina, a corrente elétrica é transportada através da solução, com os íons tendendo a migrar para o eletrodo de carga oposta. É neste princípio que se baseia o funcionamento da eletrodiálise (KALOGIROU, 1997a).

Para dessalinizar a água, as membranas devem ser colocadas entre um par de eletrodos e permitir a passagem de cátions ou ânions, mas não de ambos. Estas membranas são arrumadas alternadamente com uma membrana seletiva de ânions seguida de uma membrana seletiva de cátions. Uma chapa espaçadora que permite à água fluir pela face da membrana é colocada entre cada par de membranas. Um

espaçador estabelece um canal que transporta água como produto, enquanto o próximo carrega água salina (Figura 4.7).

Como os eletrodos estão carregados e a água salina flui ao longo do espaçador em ângulos retos para os eletrodos, os ânions na água são atraídos e desviados na direção dos eletrodos positivos. Isto dilui o conteúdo de sal da água no canal. Os ânions passam através da membrana seletiva de ânions, mas não podem passar além da membrana seletiva de cátions, que bloqueia seu trajeto e prende o ânion na água salgada. De forma semelhante, os cátions sob a influência do eletrodo negativo movem-se na direção oposta através da membrana seletiva de cátion para o canal de concentrado no outro lado. Aqui os cátions são aprisionados porque a próxima membrana é seletiva de ânions e evita mais movimento na direção do eletrodo (KALOGIROU, 1997a).

A unidade básica de eletrodialise consiste de vários pares (centenas) de células juntas a eletrodos na parte externa e é referida como um perfilado de membranas. A água passa simultaneamente em caminhos paralelos através de todas as células para proporcionar um fluxo contínuo de água dessalinizada e outro de água salina para emergir no perfilado. Dependendo do desenho do sistema, produtos químicos podem ser adicionados ao fluxo de água, para reduzir o potencial de formação crostas (SOUZA, 2006).

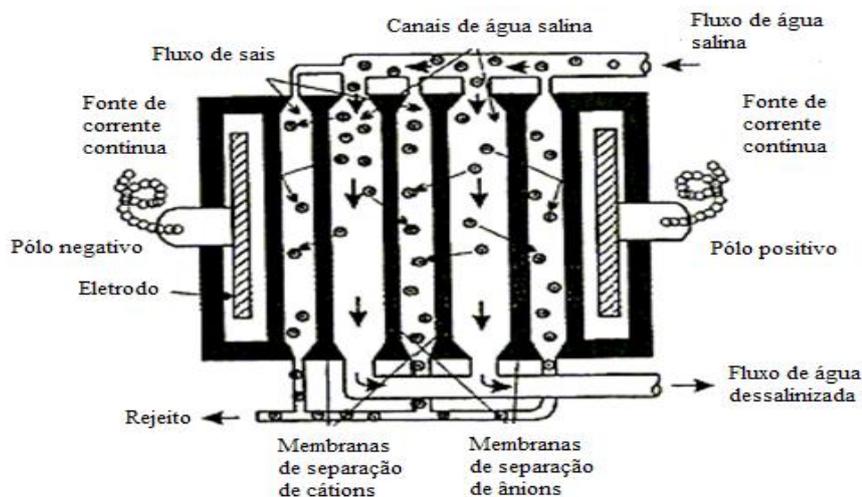


Figura 4.7: Princípio operacional da eletrodialise (JUCÁ, 2005)

Assim como as membranas de unidades de osmose reversa, as membranas de unidades de eletrodialise são sujeitas à formação de biofilmes e, assim, algum pré-tratamento da água de alimentação é geralmente necessário (KALOGIROU, 1997a). A precipitação de sais pode ser facilitada no processo de eletrodialise pelas mudanças no pH que ocorrem perto das membranas em consequência do transporte de  $H^+$  e de íons do  $OH^-$  (SPIEGLER & EL-SAIED, 1994).

Desde que não há um fluxo de água através das membranas, a eletrodialise pode tratar águas com um nível mais alto de sólidos totais do que a osmose reversa. Entretanto, sólidos não iônicos (por exemplo, sílica) não são concentrados pelo processo (BUROS, 2000).

Um processo chamado de reversão da eletrodialise foi desenvolvido para ajudar a eliminar o problema de biofilmes na membrana. No processo de reversão da eletrodialise, a polaridade da membrana é invertida diversas vezes por hora, com o efeito de trocar os canais de água salina e os de água doce, provocando a quebra e a lavagem dos depósitos de biofilme (BUROS, 2000).

As membranas de separação utilizadas na eletrodialise são produzidas com tratamentos químicos em materiais poliméricos como o polietileno. O desenvolvimento na fabricação das membranas vem buscando o aumento de sua vida útil e capacidade de separação e a diminuição do consumo de energia, alcançando bons resultados nesse sentido. Atualmente, o processo apresenta um consumo de energia da ordem de 1,5 a 2,0 kWh/m<sup>3</sup> de água tratada, e tende a ser econômico quando usado em água salobra, particularmente, em salinidades de até 5.000 ppm (JUCÁ, 2005).

Para a eletrodialise, muitas das melhorias nas membranas de osmose reversa são igualmente aplicáveis. Entretanto, essas melhorias farão pouco para aumentar a eficiência energética devido ao fato de que as demandas de energia são uma função da concentração da solução. Melhorias para diminuir fenômenos de polarização poderiam ajudar nesta consideração (MILLER, 2003).

Desde que a força motriz utilizada pela eletrodialise para a separação é um campo elétrico, esse método é somente capaz de remover os componentes iônicos da solução, ao contrário da osmose reversa ou dos processos de destilação. Como na osmose reversa, a energia exigida para separar os íons da solução aumenta com o

aumento da concentração; assim, a eletrodialise se limita geralmente a águas com salinidade de somente alguns mil ppm de sólidos dissolvidos (KALOGIROU, 1997a).

A Tabela 4.7 resume as potencialidades e as limitações do uso da eletrodialise, assim como aponta os avanços já alcançados e as perspectivas de melhorias futuras.

Tabela 4.7: As potencialidades, as limitações, os avanços alcançados e as perspectivas de melhorias futuras para a eletrodialise.

<b>Vantagens / Potencialidades</b>	<b>Desvantagens / Limitações</b>	<b>Avanços alcançados / perspectivas de melhorias futuras</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Como não há um fluxo de água através das membranas, a eletrodialise pode tratar águas com um nível mais elevado de sólidos totais do que a osmose reversa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- As membranas de unidades de eletrodialise também são sujeitas a biofilmes;</li> <li>- Esse método só é capaz de remover os componentes iônicos da solução, ao contrário da osmose reversa ou dos processos de destilação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Um processo de reversão da eletrodialise foi desenvolvido para ajudar a eliminar os biofilmes na membrana (a polaridade é invertida com o efeito de trocar os canais de água salina e doce, provocando a lavagem dos biofilmes</li> <li>- Muitas das melhorias nas membranas de osmose reversa são igualmente aplicáveis</li> </ul>

## 4.5 – OS REJEITOS DOS PROCESSOS DE DESSALINIZAÇÃO E A PROBLEMÁTICA DOS IMPACTOS AMBIENTAIS

Ainda que seja uma técnica incremental ao bem-estar das populações de regiões semi-áridas, podendo se constituir em uma concreta ferramenta no desenvolvimento dessas regiões deve-se ter em vista o potencial de contaminação da água residuária gerada no processo, altamente salina e de poder poluente elevado.

O resíduo da dessalinização reflete as características da água salina (mesma composição em um nível maior de concentração) e, independentemente da eficiência da tecnologia empregada, o sistema sempre produzirá a água residuária, em maior ou menor grau. É necessário, portanto, que os riscos ambientais decorrentes do processo sejam também abordados, incluindo a destinação e/ou o uso do rejeito da dessalinização como um aspecto relevante nos estudos que tratam dessa problemática.

Atualmente, o grande desafio é a dessalinização de águas sem agredir o meio ambiente. Para minimizar os possíveis impactos ambientais causados pela dessalinização, o Ministério do Meio Ambiente (MMA) tem desenvolvido ações para o estudo de alternativas de aproveitamento do rejeito. Os estudos estão centralizados, praticamente, em três linhas de pesquisa: extração de sais minerais por evaporação; formação de meio líquido para o cultivo de tilápias (que são espécies de peixes extremamente resistentes a ambientes salinos); e cultivo irrigado com plantas halófitas (a exemplo da *Atriplex nummularia*), que necessitam de águas com teores salinos elevados para se desenvolver (MATOS, 2006). No entanto, outras aplicações vêm surgindo e sendo testadas em diversos estudos.

As preocupações ambientais associadas com a eliminação dos resíduos são centradas nos impactos advindos da contaminação das águas superficiais e subterrâneas, da erosão e salinização do solo, da alteração da flora e da proliferação de microrganismos, algas e insetos pelo alto nível de salinidade do resíduo (MATOS, 2006).

Os métodos de disposição final empregados, como a injeção em poços, despejo no solo, lançamento em lagoas e em outros corpos de água superficiais, descarga junto a

efluentes de esgoto e uso de lagoas de evaporação são preocupantes e, muitas vezes, feitos de forma inadequada. A Tabela 4.8 lista algumas preocupações ambientais referentes a cada uma das práticas de descarte mais comumente adotadas.

Tabela 4.8: Principais preocupações ambientais para as diferentes opções de disposição dos resíduos de dessalinização. Adaptada de FATH (1998)

<b>Opção de descarte</b>	<b>Preocupação ambiental</b>
Águas superficiais	Contaminação da água receptora
Sistema de esgoto	Eventual contaminação e problemas no sistema de tratamento
Descarte no solo	Contaminação e erosão do solo (provoca descompactação da estrutura do solo) e das águas subterrâneas
Injeção em poços	Contaminação de aquíferos de águas sobrejacentes devido a vazamentos nos poços
Lagoas de evaporação	Contaminação de aquíferos de águas sobrejacentes devido a vazamentos na lagoa e prejuízos à fauna que é atraída

Dentre as opções citadas, as lagoas de evaporação são as mais apropriadas para um clima relativamente quente, seco, com taxas de evaporação elevadas e baixo custo da terra. Elas são usadas para concentrar em um nível ainda maior os sais e para posterior secagem para cristalização, opção conhecida na literatura como “descarga zero”. O concentrado se transforma em um sólido seco como resultado de uma secagem completa ou tratamento adicional. Fath (1998) cita a recuperação de sais através desse processo como uma boa opção para reutilização da grande quantidade de sais de interesse concentrados que compõem os resíduos de dessalinização.

Outras abordagens técnicas podem envolver (PORTO et al, 2001):

- Processamento adicional através de tratamento ou mistura para remover ou diluir os componentes de interesse;
- Mudança dos materiais e reagentes químicos utilizados para materiais não tóxicos e não corrosivos;

- Redução do impacto do efluente na água receptora, com o uso de difusores para promover uma diluição mais rápida.

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

#### **4.5.1 – A destinação dada aos rejeitos de dessalinização em outros países**

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

A emissão em águas superficiais é o método mais comum de disposição dos rejeitos de dessalinização, sendo usada para todos os tamanhos de projeto em operação no mundo. Ainda que os custos dessa prática sejam relativamente baixos, deve-se ter em vista o impacto sobre a vida aquática, nos rios e mares receptores, devendo-se atentar para que essa emissão seja compatível com as águas receptoras, podendo haver necessidade de diluição.

Das grandes estruturas instaladas no mundo para dessalinização de águas marítimas, a principal destinação do rejeito é seu retorno ao mar. Considerando-se o poder de diluição dos oceanos, essa alternativa poderia ser considerada ideal. Porém, o impacto da emissão do rejeito, apesar de produzir pouco efeito no oceano como um todo, tem grande potencial para prejudicar o ecossistema costeiro, sendo necessário considerar a fragilidade de cada ecossistema antes do retorno do rejeito ao mar. Para Einav et al (2002), os prejuízos aos ecossistemas marinhos se devem não só à alta

concentração do rejeito mas, também, à presença de compostos químicos que podem ter sido utilizados no pré-tratamento da água, etapa comum nas grandes estruturas de dessalinização.

Em particular, nos EUA, que ocupam o segundo lugar do mundo em capacidade de dessalinização instalada, Mickley (2004a) afirma que os rejeitos de dessalinização estão sendo dispostos principalmente nas águas superficiais (rios e oceanos), nos esgotos e em poços profundos, mas também se dispõe o rejeito, em menor grau, no solo e em tanques de evaporação.

No caso dos esgotos, um dos principais destinos dos rejeitos de dessalinização de águas salobras nos EUA, a destinação depende do volume e da composição do rejeito, pois pode prejudicar o tratamento de esgoto. Esse descarte requer o pagamento de impostos, além de etapas de pré-diluição, pré-tratamento e uma tubulação de acesso (MICKLEY, 2004a).

A injeção do rejeito em poços profundos, como praticada na Flórida, fica restrita, em viabilidade econômica, aos grandes projetos de dessalinização e depende das características hidrogeológicas específicas de cada terreno (Mickley, 2004b).

Segundo Mickley (2004a), as tendências para instalações de médio e grande portes nos EUA são: diminuir as destinações para os rios, para os esgotos e para o solo, e aumentar as destinações para os oceanos, para os poços profundos e para tanques de cristalização de sais.

Para instalações de pequeno porte, localizadas comumente no interior do continente, o autor conclui que, em virtude dos custos econômicos, a destinação do rejeito para oceanos e para poços profundos fica inviável, sendo tendência continuarem as emissões nos rios, nos esgotos e no solo, sendo apontada a possibilidade de uso de tanques de evaporação e cristalização de sais.

Nesse ponto, é importante salientar que, mesmo em países desenvolvidos como os EUA, a destinação dos rejeitos, muitas vezes, ainda é feita priorizando-se os custos econômicos, em detrimento dos custos para o meio ambiente e para a sociedade como um todo. Especificamente, a emissão do rejeito em águas superficiais e nos esgotos se constitui apenas em um deslocamento do problema para longe do local de sua produção,

razão pela qual usuários a jusante desses pontos de descarte devem relutar em aceitar o rejeito, até mesmo após sua diluição.

Sobre o uso de tanques de evaporação para reduzir e concentrar o rejeito, uma questão apontada nos estudos é que isso faz concentrar também elementos como selênio, boro e metais pesados em níveis tóxicos. Ong et al (1995) atentam para o fato de que esses tanques abrigam, freqüentemente, uma cadeia alimentar, a partir da qual elementos tóxicos podem se concentrar em peixes e invertebrados e contaminar aves aquáticas (HOTHEM & OHLENDORF, 1989).

Glenn et al (1998) também consideram que os tanques de evaporação podem atrair e prejudicar a vida selvagem. Hayes & Kipps (1992) apontam como alternativa para a redução desses problemas o uso de tanques de evaporação sob condições controladas.

Ahmed et al (2003) confirmaram a viabilidade técnica de se tratar rejeitos de dessalinização por osmose reversa em instalações de estrutura simples, usando a tecnologia de cristalização de sais. Com base em sua análise, concluiu-se que vários tipos de sais, incluindo gesso, cloreto de sódio, hidróxido de magnésio, cloreto de cálcio, carbonato de cálcio e sulfato de sódio, podem ser produzidos. Esses produtos foram considerados de alta qualidade e são demandados por indústrias variadas. No entanto, os autores afirmam que um estudo de viabilidade se faz necessário antes de se decidir cristalizar sais das águas de rejeito.

A utilização de bacias de percolação, apesar de permitir a recarga dos aquíferos subterrâneos, também aumenta sua concentração química, não sendo recomendada para disposição do rejeito (MICKLEY, 2004a).

A utilização do rejeito para irrigação é usada principalmente para pequenos volumes (até 4 m<sup>3</sup>/dia) nos EUA. Mickley (2004b) afirma que essa prática requer muita disponibilidade de terra e uma diluição prévia para diminuir a salinidade, além de ser limitada pelo clima e pelas taxas de absorção do solo. O rejeito pode ser aplicado em substituição à água de melhor qualidade, aumentando a conservação desta para outros fins. Áreas de lazer, como gramados, parques e campos de golfe, além de espaços abertos e cinturões verdes de preservação ambiental, poderiam ser irrigados.

Riley et al (1997) consideraram o cultivo de plantas halófitas a melhor opção para dispor o rejeito de osmose reversa. Conforme Glenn et al (1998), a halófito *Atriplex nummularia* tem os atributos desejáveis de uma cultura cicladora de rejeito: alto uso da água para maximizar a absorção, alta tolerância aos sais para minimizar a fração de lixiviação e elevada produtividade de biomassa, com utilidade forrageira. Esses autores afirmam que águas hipersalinas, com salinidades superiores a 40.000 mg/L, têm sido usadas para irrigar, com sucesso, plantas halófitas.

#### **4.5.2 - A destinação dada aos rejeitos de dessalinização no Brasil**

No semi-árido nordestino, quase na totalidade dos casos, o rejeito da dessalinização não está recebendo qualquer tratamento. Via de regra, os cursos d'água e o solo são os principais meios para a disposição desse rejeito.

Os trabalhos disponíveis na literatura quase sempre abordam a destinação do rejeito da dessalinização para águas marítimas e aqueles que abordam o rejeito oriundo de águas subterrâneas, longe do mar, se relacionam a grandes volumes (SOARES, 2006). Ambas as situações diferem da atual realidade da dessalinização no semi-árido brasileiro, onde se dessaliniza volumes menores de águas salobras. Nesse sentido, alternativas mais adequadas à realidade local devem ser propostas e estudadas.

No Estado do Ceará, Pessoa (2000) verificou que, somente em Canindé, em 25% das localidades estudadas foram observados problemas de erosão e salinidade nos solos que recebem os rejeitos. Pinheiro & Callado (2008), considerando 79 comunidades também no Estado do Ceará, verificaram que 20% usam os rejeitos sem qualquer fundamentação técnico-científica ou econômica para o seu uso; segundo eles, motivados pela absoluta falta de água de boa qualidade, as comunidades utilizam os rejeitos para a lavagem de roupa e automóveis, trazendo impactos ambientais negativos ao meio ambiente.

Nos referidos estudos, constatou-se que predomina a disposição dos rejeitos para terrenos próximos ao sistema e para os cursos d'água (60%), sendo esta a forma mais usual de descarte. Segundo os autores, o retorno do rejeito para o poço, verificado em

9,5% das comunidades, pode ser interessante, mas, para isso, ainda é preciso aprofundar pesquisas sobre os limites de salinidade que permitem essa eventual reciclagem.

Amorim et al (2008a), avaliando os efluentes líquidos para a criação da tilápia (*Oreochromis* sp.) em águas com condutividades elétricas variando de 9,46 a 12,7dS/m, observaram, após seis meses, que a sobrevivência da espécie foi de 91,50%, valor este dentro dos padrões normais de cultivo (cerca de 85%), indicando que as condições ecológicas do reservatório foram boas, permitindo, inclusive, a reprodução dos indivíduos; constataram, também, o ganho de peso (de 3,2 para 276,73g por indivíduo), e que este ganho só não foi maior em virtude de não ter sido realizada renovação do efluente nos tanques durante o cultivo.

Os autores concluem que o cultivo de tilápias traz, como conseqüências positivas, a alta qualidade do pescado em relação ao sabor e à aparência do peixe além da possibilidade de ofertar alimento de bom valor nutritivo às populações do semi-árido, sendo uma alternativa com grandes potencialidades de viabilidade econômica, mas cuja escala de exploração depende do potencial de produção de rejeito por dia.

Nesse ponto, deve-se ressaltar que a exploração da tilápia (*Oreochromis* sp.) e do camarão (*Panaeus vannamei*) têm sido as alternativas mais sugeridas em diversos estudos; entretanto, é preciso atentar que essa prática não pode ser considerada como uma de adequada destinação final para os rejeitos de dessalinização, como os estudos equivocadamente têm afirmado, mas sim uma prática de reaproveitamento, na qual, após esgotada a vida útil dos tanques de criação, os rejeitos persistem necessitando de uma adequada destinação final.

Amorim et al. (2008b) reforçam a relação em cadeia dos impactos dos rejeitos de dessalinização na contaminação dos mananciais, do solo, da fauna e da flora da região, alertando ainda que os sais depositados na superfície do solo podem ser transportados pela ação dos ventos ou pela água de escoamento superficial e salinizar áreas relativamente mais distantes. Eles argumentam que o sódio dos sais, por exemplo, podem substituir o cálcio nos sítios de troca de cátions, causando a dispersão dos colóides do solo, contribuindo para redução de sua condutividade hidráulica. Conseqüentemente, a vegetação da área pode ser prejudicada devido à deterioração das características físico-químicas dos solos e aos efeitos negativos dos sais sobre a fisiologia das plantas. Com a destruição do estrato herbáceo, os rebanhos e os animais

silvestres podem ser significativamente prejudicados pela falta da pastagem natural e de abrigo.

Como alternativa mais adequada, os referidos autores apontaram o uso da evaporação solar para a cristalização dos sais dissolvidos, reduzindo o volume dos efluentes líquidos e transformando-os em produto sólido, o que reduz o contato com o solo e facilita o manuseio.

A obtenção de sais cristalizados decorre da evaporação da água e por intermédio da precipitação dos sais, quando estes atingem seus pontos de solubilidade. Os autores observaram o predomínio dos sais sódicos, seguidos dos magnesianos e, por último, dos cálcicos. Mesmo considerando as impurezas nos sais que se cristalizaram e que podem tornar proibitivo o consumo, são recomendados estudos de viabilidade devido à importância fundamental desses sais, não apenas para o setor de suplementação mineral humana e animal mas, também, no industrial, principalmente pela predominância do Cloreto de Sódio (NaCl).

Uma outra linha de pesquisa em desenvolvimento no Brasil consiste no emprego de espécies halófitas, dentre as quais a erva-sal (*Atriplex nummularia*) é uma das mais importantes.

A erva-sal foi introduzida no Nordeste brasileiro na década de 30; todavia, só recentemente esta planta vem despertando um maior interesse de pesquisadores brasileiros. Por ser originário de regiões áridas, o gênero *Atriplex* se destaca por conseguir produzir e manter uma fitomassa abundante, mesmo em ambientes de alta aridez e salinidade, adaptando-se muito bem a regiões com precipitação ao redor de 100 a 250 mm/ano (PORTO et al, 2001).

Esses autores notaram produção de matéria seca de 9.436 kg/ha no cultivo da erva-sal no Nordeste brasileiro, computando a retirada de 1.145 kg/ha de sais, o que correspondeu, considerando-se a aplicação de 29.117 kg/ha de sais aplicados no solo via irrigação com água de rejeito, a uma eficiência de extração de apenas 3,93%. No entanto, a despeito da baixa eficiência registrada para um ciclo de 378 dias, os autores ressaltam que outros estudos com a erva-sal precisam ser conduzidos.

Em outra linha de pesquisa, Soares (2003), averiguando a influência de águas salinas no crescimento de mudas cítricas, observou que o rejeito prejudicou o

desenvolvimento radicular e o acúmulo de matéria seca das plantas, em comparação com plantas irrigadas com água dessalinizada; entretanto, mudas de laranjeira, uma das espécies mais sensíveis aos sais, puderam ser produzidas, sinalizando a alternativa de se produzir, mediante a irrigação com o rejeito, mudas de plantas ornamentais, florestais e frutíferas, as quais, quando comercializadas, expedirão consigo os íons acumulados no substrato de cultivo potencializando, assim, a diluição dos sais no ambiente. Além da exportação dos sais, esta prática permitiria maior geração de divisas para a comunidade.

Nesse ponto, é importante salientar que, se essa alternativa se comprovar viável, projetos públicos relacionados ao paisagismo e ao reflorestamento, por exemplo, poderiam pagar pela aquisição das plantas. A partir dessa idéia, pode-se vislumbrar a alternativa de se produzir mudas e plantas em recipientes, assumindo-se um manejo cuidadoso com as águas reutilizadas, com lixiviação mínima ou nula, e de acordo com as disponibilidades regionais de tipos de substrato e de espécies de interesse comercial ou ecológico. Além da tolerância aos sais e da demanda por um mercado consumidor na escolha das espécies se deveriam priorizar o alto consumo de água pelas plantas, pois quanto maior o consumo de água, maior também a quantidade de sais aplicada no recipiente e, portanto, maior seria a extração/exportação de sais pelas plantas.

## **4.6 - AS PERSPECTIVAS PARA O FUTURO DAS PESQUISAS COM DESSALINIZAÇÃO**

Durante as últimas duas décadas, muito progresso foi feito nos processos de dessalinização, que conduziram a uma significativa redução de custos para produção de água. Isto conduziu a uma aceitação e a um crescimento mais elevados por parte da indústria no mundo inteiro, particularmente em regiões áridas do mundo.

Entretanto, os custos ainda permanecem elevados para muitos países com poucos recursos para custear essas tecnologias. Conseqüentemente, há uma necessidade de enfatizar e revitalizar a pesquisa e o desenvolvimento em melhorias tecnológicas que possam conduzir a uma maior redução de custos na produção de água por processos de dessalinização. O objetivo final é disponibilizar água adequada de uma forma barata para todas as regiões que enfrentam escassez, mas dispõem de poucos recursos financeiros.

Embora as atuais tecnologias já sejam consideradas bem desenvolvidas, há espaço para melhorias na eficiência, confiabilidade, simplicidade e custos de investimento. Conseqüentemente, esforços de pesquisa devem ser dirigidos para o melhoramento das tecnologias atualmente utilizadas, assim como para a investigação de novas tecnologias.

A adoção de tecnologias de dessalinização tem um potencial extremamente relevante em regiões semi-áridas como o Nordeste brasileiro, posto que pode oferecer água de um modo relativamente independente das variações periódicas de precipitação. Essa importância se reflete no aumento gradual da quantidade de trabalhos que vêm sendo desenvolvidos por diversas instituições de pesquisa, universidades e indústrias, no sentido de melhorar constantemente as tecnologias e reduzir os custos da dessalinização.

**CAPÍTULO 5**  
**METODOLOGIA**

## 5.0 – METODOLOGIA

Para se atingir os objetivos propostos neste estudo, as seguintes etapas foram cumpridas:

**- Caracterização do semi-árido e da situação dos recursos hídricos disponíveis na região.**

Para isso, foram levantados dados disponibilizados por diversos órgãos públicos que se relacionam com o assunto, tais como o MMA (Ministério do Meio Ambiente), a ANA (Agência Nacional de Águas), a SEMARH (Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos), entre outros. Além desses dados, informações publicadas em artigos científicos foram elencadas para complementar a caracterização da área focada por este estudo. Informações tais como aspectos físicos e sócio-ambientais da área, oferta e demanda de recursos hídricos, principais usos da água pela população, entre outras, foram analisadas no contexto do objetivo proposto. Deu-se uma ênfase maior ao Estado de Sergipe, na tentativa de abordar melhor a realidade local e suas particularidades.

**- Pesquisa sobre a legislação pertinente ao assunto.**

Aspectos institucionais e normativos relacionados com a questão tratada nesse estudo foram abordados nessa etapa.

**- Descrição do princípio básico de funcionamento dos diversos processos tecnológicos empregados na dessalinização atualmente.**

Essa etapa foi feita através de uma pesquisa bibliográfica sobre o assunto, por meio de artigos técnicos publicados em periódicos relacionados com a temática desse estudo. As potencialidades, as limitações e a aplicabilidade das principais tecnologias usadas atualmente foram relacionadas. Essa etapa foi essencial na escolha da destilação solar como a abordagem teórica mais adequada para o sistema de dessalinização proposto neste trabalho.

**- Levantamento dos impactos ambientais decorrentes da operação de sistemas de dessalinização e discussão das formas usuais de aproveitamento, tratamento e/ou disposição final dos rejeitos.**

Nessa etapa, foram enfatizados os impactos ambientais decorrentes dos processos de dessalinização e foi focado o que vem sendo feito no Brasil e no restante do mundo em relação aos rejeitos dos processos de dessalinização. Foram pesquisados vários estudos que tratam dessa problemática para serem abordados nessa etapa.

**- Descrição detalhada do dispositivo de dessalinização proposto, com considerações sobre a seleção do processo tecnológico, seleção dos materiais, configuração do sistema e análise térmica do processo.**

Para a seleção do processo tecnológico, vários aspectos foram levados em conta, de acordo com a sua adequação para a aplicação pretendida nesse estudo, no qual um sistema de dessalinização em pequena escala para um uso descentralizado é desejável. Esses aspectos foram listados e discutidos no capítulo seguinte, justificando a escolha da destilação solar como abordagem tecnológica desse estudo.

A seleção dos materiais se deu através da teoria sobre aspectos relacionados aos diversos materiais usualmente empregados e sua eficiência na transmissão de calor. Para a escolha, foram analisados aspectos tais como: calor específico, condutividade térmica, área de contato, dilatação térmica e susceptibilidade à corrosão.

A configuração do sistema e uma análise térmica preliminar do processo, que envolveu a escolha do coletor solar mais adequado para a aplicação pretendida, incluíram alguns aspectos da teoria sobre a variação do fluxo de energia no sistema, que serão abordados no capítulo seguinte.

Para o projeto do dispositivo de dessalinização proposto, foram utilizados os índices de radiação solar da série histórica do município de Propriá, um município típico do semi-árido sergipano. Esses dados foram disponibilizados pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia).

**- Análise econômica preliminar para estimação do custo do dispositivo de dessalinização e da água produzida pelo mesmo.**

Essa etapa foi feita com base na metodologia descrita em Kalogirou (1997b), que leva em conta o valor do dinheiro ao longo do tempo.

**CAPÍTULO 6**  
**RESULTADOS E DISCUSSÃO**

## 6.0 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 – SELEÇÃO DO PROCESSO TECNOLÓGICO

Durante o estágio de projeto, um processo tecnológico apropriado para uma aplicação particular deve ser selecionado. Há um número de considerações que conduziram à escolha da destilação solar como o processo tecnológico mais adequado para a aplicação pretendida nesse estudo, no qual um sistema de dessalinização em pequena escala para um uso descentralizado é desejável. Algumas delas são listadas a seguir:

- A destilação solar pode produzir água para consumo humano sem uso de eletricidade, sem produtos químicos e sem uso de elementos filtrantes.
- Constitui uma tecnologia relativamente simples.
- Usa a energia solar, que é livre de custos, e aproveita o potencial das condições de insolação no seu processo tecnológico, contribuindo para a viabilização do seu emprego na região foco desse estudo.
- A operação e a manutenção, fundamental para que qualquer sistema de dessalinização funcione adequadamente, são simples e de baixo custo, e não requerem trabalhadores especializados.
- A demanda de água de um consumo familiar, proposta do presente estudo, está em conformidade com a escala de aplicabilidade do processo.
- Pode ser instalada próxima ao local onde há demanda de água e onde a água de alimentação encontra-se disponível, diminuindo custos significativos com o transporte da água de alimentação até o dispositivo de dessalinização e deste até a comunidade atendida.
- Produz um rejeito relativamente mais sólido que os outros processos, o que facilita sua disposição e/ou seu aproveitamento para alimentação animal, importante atividade da região focada nesse estudo.

Os métodos convencionais de dessalinização, tais como destilação flash de múltiplo estágio, destilação de múltiplo efeito, destilação por compressão de vapor e

osmose reversa, são de confiança na escala de produção de água de 100 a 50.000 m<sup>3</sup>/dia (MÜLLER-HOLST et al, 1998). Eles não são apropriados para regiões com pouca infraestrutura ou para regiões descentralizadas por causa de sua necessidade permanente de manutenção qualificada e fornecimento de eletricidade.

Em áreas com riscos de poluição, os processos de destilação são preferíveis para a dessalinização porque a água é fervida, o que assegura que a água produzida seja pouco susceptível de conter microrganismos prejudiciais à saúde.

Fath (1998) aponta como promissora o uso da destilação solar especialmente quando as condições climáticas são favoráveis e a demanda não é muito grande, o que vai ao encontro das comunidades difusas do semi-árido brasileiro. Adicionalmente, há uma certa coincidência entre a demanda sazonal e diária de água e a disponibilidade de radiação solar. A demanda aumenta durante o verão, quando a disponibilidade solar é mais elevada.

A principal desvantagem da destilação solar é o rendimento comparativamente mais baixo, o que requer grandes áreas (KALOGIROU, 1998). No caso do semi-árido brasileiro, há disponibilidade de terra para a implantação desse processo, portanto, a princípio, esse fato não acarretaria um impedimento ao seu uso na região.

Deve-se notar, entretanto, que a energia solar está disponível somente pela metade do dia. Isto implica que o processo opera somente durante a metade do tempo disponível, a menos que algum dispositivo de armazenamento seja usado para operar o sistema durante os períodos de baixa insolação e à noite (KALOGIROU, 1997a).

No dispositivo de dessalinização proposto nesse estudo, não foi incluído nenhum dispositivo de armazenamento, geralmente caro. O desempenho de um sistema de destilação solar acompanha as fases do tempo, isto é, durante os períodos de estio (verão no semi-árido), a produção do sistema está no seu auge. Como o período de maior necessidade de água coincide com o período de melhor desempenho do sistema, foi considerado que, a princípio, um aumento do número de horas em operação para além do tempo em que o sol brilha, aumentaria significativamente o custo do sistema.

## 6.2 – SELEÇÃO DO COLETOR DE RAIOS SOLARES

No dispositivo proposto, foi escolhido um coletor de raios solares com concentração da radiação incidente. Geralmente, coletores que concentram a radiação exibem algumas vantagens em comparação ao tipo convencional “em placa”. As principais são:

- A água a ser aquecida pode atingir mais altas temperaturas em um sistema com concentração da radiação incidente quando comparado com um sistema em placa com a mesma superfície coletora de energia solar. Isto significa que uma maior eficiência térmica pode ser alcançada.

- As superfícies refletoras exigem menos material em um coletor que concentra radiação.

- Devido à área relativamente menor do coletor por unidade de energia solar coletada, ele é geralmente economicamente mais viável.

A principal desvantagem é que as superfícies refletoras podem perder sua capacidade de refletir com o tempo e, por isso, exigem uma limpeza periódica.

Como a vantagem mais importante de um coletor com concentração da radiação incidente é a sua eficiência térmica, esta será mais analisada.

A eficiência térmica de um coletor com concentração é definida como a relação da energia útil entregue pela radiação incidente no concentrador. Isto pode ser calculado por um balanço de energia no receptor, que é dado por:

$$n = n_0 - \left( \frac{U_L (T_r - T_a)}{ICR} \right) \quad (6.1)$$

Onde:  $n$  = eficiência térmica,  $n_0$  = eficiência ótica,  $U_L$  = coeficiente de perda de calor estacionário ( $W/m^2K$ ),  $T_r$  = temperatura média do receptor (K),  $T_a$  = temperatura ambiente (K),  $I$  = irradiação ( $W/m^2$ ),  $CR$  = grau de concentração.

Da equação, pode-se concluir que a eficiência de um coletor com concentração de radiação depende da eficiência ótica ( $n_0$ ) que é determinada pelas propriedades óticas dos vários materiais usados na construção do coletor e na magnitude das perdas de calor, como indicado pelo segundo termo na Equação 6.1. A vantagem de coletores que concentram a radiação é que as perdas de calor são inversamente proporcionais ao grau de concentração.

As mesmas relações se aplicam para um coletor em placa, no qual  $CR = 1$ . O pequeno termo de perdas de calor na Equação 6.1 para um coletor que concentra radiação leva a uma pequena inclinação da curva típica de desempenho do coletor, o que não se aplica para coletores em placa: Kalogirou (1998) compara as curvas típicas de desempenho de um coletor em placa e um coletor em calha parabólica, que concentra radiação (Figura 6.1).

Analisando o gráfico, conclui-se que a eficiência de coletores em calha parabólica continua alta à medida que aumenta a temperatura da água. Conseqüentemente, para um valor de  $\Delta T/I$  de cerca de 0,1, coletores em calha parabólica trabalham em uma eficiência de cerca de 62%, enquanto coletores em placa, em cerca de 10%. Isso claramente sugere que os coletores em calha parabólica possuem uma eficiência térmica bem maior e, por isso, são preferidos para a geração de vapor porque altas temperaturas podem ser obtidas sem nenhuma degradação séria da eficiência do coletor.

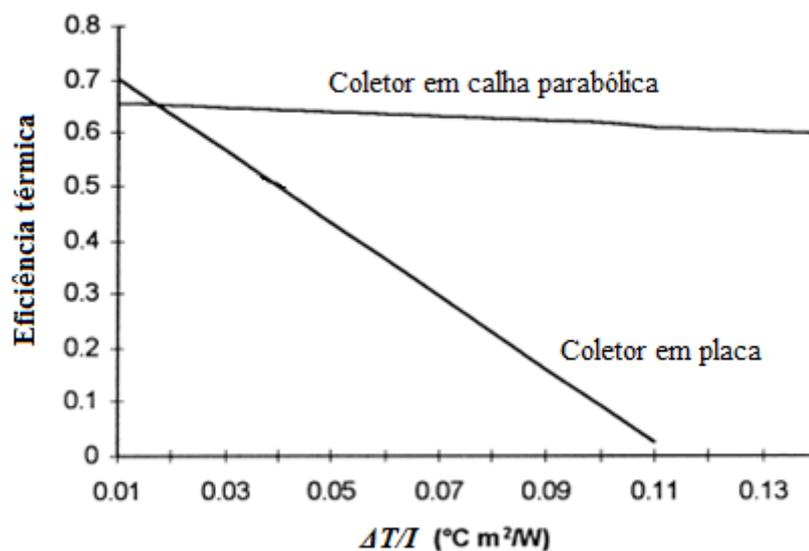


Figura 6.1: Curvas típicas de desempenho de coletores solares (KALOGIROU, 1998).

A Figura 6.2 mostra o esquema de um coletor solar em calha parabólica. Uma superfície refletora (a) concentra a radiação solar em um receptor cilíndrico (b). O fluido é aquecido enquanto circula no receptor.

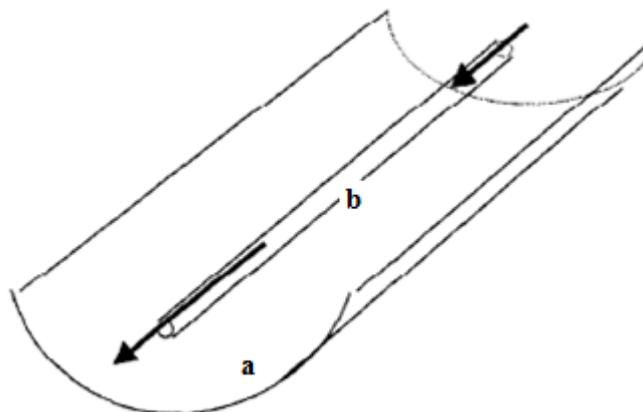


Figura 6.2: Esquema de um coletor solar em calha parabólica.

De forma mais detalhada, uma superfície refletora que intercepta a luz do sol concentra a radiação para produzir altas temperaturas que são usadas para dessalinização de água. Esses sistemas usam uma espécie de calha de espelhos e tubos de absorção da radiação, geralmente feitos de metal, para converter a luz do sol em calor utilizável. A água flui através desses tubos de absorção, dispostos linearmente ao longo do foco das calhas espelhadas, e os tubos transmitem o calor para a mesma (Figuras 6.3 e 6.4). As calhas são normalmente dispostas para interceptar a luz solar ao longo de um eixo, predominantemente norte-sul.

A quantidade de energia diária que entra no sistema é definida pelo tamanho do coletor de raios solares. A tecnologia solar de concentração dos raios através de um coletor em calha parabólica fornece um sistema de alta confiança para alcançar temperaturas máximas de operação da ordem de 380°C (GARCÍA-RODRÍGUEZ et al, 2002). Normalmente, concentrações médias - entre 15 e 40 vezes - são atingidas (KALOGIROU, 1998).

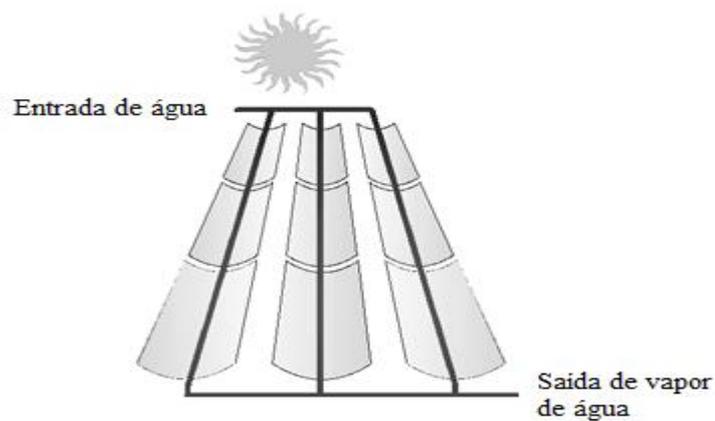


Figura 6.3: Esquema de coletor para concentração da radiação solar com foco linear.



Figura 6.4: Detalhe de sistemas com foco linear de concentração da radiação solar (TRIEB et al, 2009).

Odeh et al (1998) modelaram calhas parabólicas, obtendo eficiências de aproximadamente 70% para feixes de radiação entre 600 e 800 W/m<sup>2</sup>. Os autores propuseram o uso da geração direta de vapor a partir da própria água salina como fluido de transferência térmica e recomendaram uma inclinação da linha central de 8° para melhorar o fluxo bifásico.

Para se projetar um coletor solar, García-Rodríguez e Gómez Camacho (1999) recomendam o conhecimento das condições climáticas da área, especialmente as estimativas de radiação média. Nesse estudo, foi escolhido o município de Propriá para as estimativas de irradiação usadas no projeto do coletor solar, em razão do município se situar no semi-árido sergipano e por possuir uma série histórica de 30 anos de dados disponibilizados pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) (Figura 6.5).

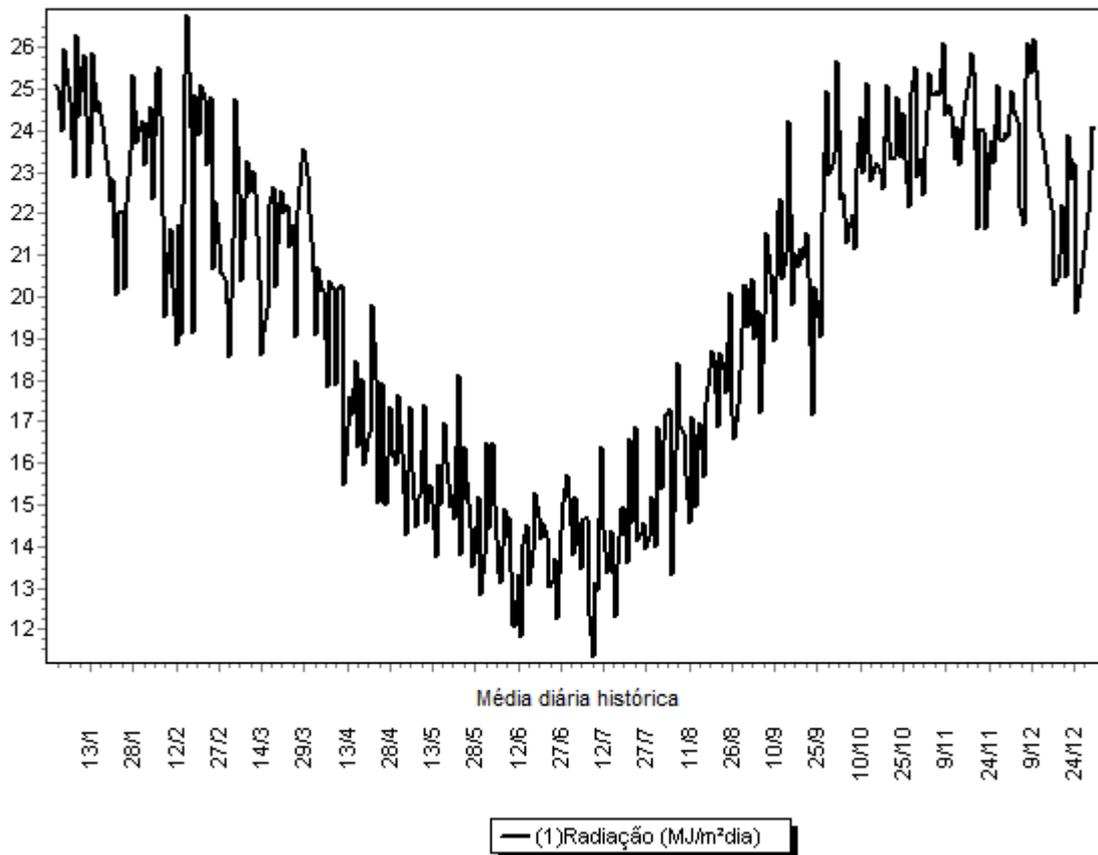


Figura 6.5: Irradiação média no município de Propriá - SE. Fonte: INMET (2009).

### 6.3 – A ESCOLHA DO MATERIAL

No dispositivo de dessalinização, o material por onde a água circula deve permitir uma boa transmissão de energia, facilitando as trocas de calor. A melhor opção é certamente um metal sólido, já que em geral os metais são os que possuem maior facilidade de transmissão e dissipação de energia térmica.

Para uma melhor transmissão de energia, devem ser levados em conta alguns aspectos em relação ao material usado e suas formas, tais como:

- Calor específico
- Condutividade térmica
- Área de contato
- Dilatação térmica
- Susceptibilidade à corrosão

Além desses aspectos, a capacidade térmica molar, definida como a quantidade de energia necessária para aumentar em um grau a temperatura de um mol de um material, também é uma grandeza importante, pois a mesma representa a capacidade do material de absorver calor do meio circundante. Como, freqüentemente, utiliza-se para essa grandeza o calor específico (que é a capacidade térmica por unidade de massa), essa última foi adotada para a escolha do material neste estudo.

O calor específico nos indica o quanto de energia uma massa do material tem que receber para variar a sua temperatura em  $x^{\circ}\text{C}$  (Tabela 6.1). Tomando como exemplo o alumínio, de calor específico de  $0,22 \text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$ , tem-se que: para esquentar uma massa de 1 grama de alumínio em  $1^{\circ}\text{C}$ , é preciso que se forneça  $0,22 \text{ cal}$  de energia. Para o cobre, essa quantidade de energia necessária cai para  $0,094 \text{ cal}$  e, para a prata, cai para  $0,056 \text{ cal}$ .

Tabela 6.1: Calor específico de alguns materiais à pressão constante de 1 atm (RESNICK et al, 2009).

<b>Material</b>	<b>c (cal/g.°C)</b>
<b>Alumínio</b>	0,22
<b>Ferro</b>	0,11
<b>Cobre</b>	0,094
<b>Prata</b>	0,056
<b>Vidro</b>	0,16

O desejável na escolha do material é que o calor flua mais facilmente. Analisando o calor específico isoladamente, nota-se que a prata esquentando (e, conseqüentemente, também esfria) mais facilmente. No entanto, essa análise não basta para escolher a prata pelo seu baixo calor específico. É preciso que os aspectos de condutividade térmica também sejam analisados.

A condutividade térmica é uma propriedade física dos materiais que é descrita como a habilidade dos mesmos de conduzir calor. A quantidade de calor que atravessa, por exemplo, uma parede, por segundo, depende dos seguintes fatores:

- é diretamente proporcional à condutividade térmica ( $k$ );
- é diretamente proporcional à área da parede ( $A$ );
- é diretamente proporcional à diferença de temperaturas entre o interior da habitação ( $T_2$ ) e o exterior ( $T_1$ );
- é inversamente proporcional à espessura ( $L$ ) da parede.

$$\dot{Q} = k A \frac{\Delta T}{L} \quad (6.2)$$

Onde:

$Q$  = quantidade de calor transferido ( $W = J/s$ )

$k$  = condutividade térmica ( $W/mK$ )

$A$  = área ( $m^2$ )

$\Delta T$  = diferença de temperatura entre a fonte quente e a fonte fria (K)

$L$  = espessura (m)

Desse modo, a tabela de condutividade térmica deve ser considerada como uma das mais importantes na análise de um condutor de calor, pois nos diz o quanto eficientemente um material conduz energia térmica (Tabela 6.2).

Essa tabela nos indica que o vidro possui uma condutividade térmica considerada muito baixa, sendo inadequado para os propósitos pretendidos no projeto, enquanto, entre os metais, o alumínio, o cobre e a prata possuem melhor condutividade térmica do que o ferro.

Tabela 6.2: Condutividade térmica de materiais a 27°C (RESNICK et al, 2009).

<b>Material</b>	<b>Condutividade térmica</b> (W/m.K)
<b>Alumínio</b>	237
<b>Ferro</b>	80,3
<b>Cobre</b>	398
<b>Prata</b>	426
<b>Vidro</b>	0,72-0,86

Além da análise sobre a composição do material, outro fator importante para maximizar a condução térmica é a área de contato que o mesmo deverá possuir com a água. Uma função expressa a taxa de condução térmica, definida por:

$$P = Q/t \quad (6.3)$$

Em que  $Q$  é a quantidade de energia e  $t$  é o tempo, que pode ser reescrita como:

$$P = k A \frac{\Delta T}{l} \quad (6.4)$$

Onde  $k$  = condutividade térmica (W/mK)  $A$  = área ( $m^2$ ),  $\Delta T$  = diferença de temperatura da fonte quente e da fonte fria (K) e  $l$  = espessura (m). Matematicamente, quanto maior a área  $A$ , maior será  $P$  e maior será a taxa de condução térmica, assim como quanto menor a espessura  $L$ , maior será  $P$ . Ou seja, o ideal é que se tenha uma maior área de contato com a água e uma espessura reduzida do material.

Outro aspecto que também deve ser levado em consideração na escolha do material é a sua dilatação. Apesar de não ser um problema muito comum, ao se manter uma temperatura de média para alta, um aumento de pressão pode ser ocasionado, o que pode danificar o material e diminuir sua vida útil.

O coeficiente de dilatação linear depende de cada material. Com ele podemos comparar qual material dilata ou contrai mais em relação a outro: quanto maior for o coeficiente de dilatação linear, mais facilidade o material terá para aumentar seu tamanho, quando esquentado, ou diminuir seu tamanho, quando esfriado (Tabela 6.3).

Tabela 6.3: Coeficientes de dilatação linear de alguns materiais (RESNICK et al, 2009).

<b>Material</b>	<b>Coeficiente de dilatação linear <math>\alpha</math> (<math>^{\circ}C^{-1}</math>)</b>
<b>Alumínio</b>	$2,4 \cdot 10^{-5}$
<b>Ferro</b>	$1,2 \cdot 10^{-5}$
<b>Cobre</b>	$1,7 \cdot 10^{-5}$
<b>Prata</b>	$1,9 \cdot 10^{-5}$
<b>Vidro</b>	$0,9 \cdot 10^{-5}$

Quanto menor o coeficiente de dilatação, menor a dilatação e menores as chances de problemas de pressão. A partir dos dados da Tabela 6.3, nota-se que os materiais em questão possuem coeficientes de dilatação praticamente da mesma ordem de grandeza.

Há ainda uma questão muito importante a ser considerada na escolha do material e que diz respeito à corrosão. Posto que o mesmo ficará em contato direto com a água salobra, e considerando o ambiente extremamente corrosivo causado por soluções salinas, quanto menos corrosivo esse material, maior a vida útil do equipamento. A corrosão é medida a partir dos potenciais de redução dos materiais. Quanto mais negativo o potencial de redução de um material, mais sujeito à corrosão é o mesmo (Tabela 6.4).

Tabela 6.4: Potenciais de redução de alguns metais (RESNICK et al, 2009).

<b>Material</b>	<b>Potencial de redução <math>E^o</math> (Volt)</b>
<b>Alumínio</b>	-1,66
<b>Ferro</b>	-0,44
<b>Cobre</b>	+0,34
<b>Prata</b>	+0,80

O alumínio e o ferro são mais sujeitos à corrosão do que a prata e o cobre, sendo, por isso, inadequados para ficarem em contato com a água salobra.

A partir do conjunto das considerações referidas acima, conclui-se que a prata seria bem vinda na transmissão de calor para a água, porém seu custo seria mais alto e não seria muito mais eficiente em relação ao cobre, o que justifica a escolha do cobre como o material mais adequado para constituir os tubos por onde passará a água. O ideal é que o tubo do coletor solar seja pintado de preto, de modo a aumentar a absorção de calor pelo mesmo.

No que se refere à superfície refletora da calha do coletor solar, o material escolhido deve ter uma boa capacidade refletora e alta resistência à corrosão, fator importante a ser considerado para garantir uma maior vida útil do equipamento. Adicionalmente, deve ser um material que facilite a limpeza periódica da superfície do mesmo, importante para sempre garantir uma boa capacidade refletora, já que o mesmo ficará ao ar livre, exposto às intempéries do clima. Para tanto, chapas de alumínio seriam a escolha mais adequada para a aplicação e a durabilidade pretendidas pelo dispositivo de dessalinização.

## 6.4 – O SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO PROPOSTO

Um sistema de destilação solar pode consistir em dois dispositivos separados – o coletor solar e o destilador – ou em um sistema integrado. O primeiro caso é considerado um processo de destilação solar indireto e o segundo, um processo de destilação solar direto (GARCÍA-RODRÍGUEZ et al, 2002).

Para a aplicação pretendida nesse estudo, foi escolhido um processo de destilação solar direto, no qual o vapor é gerado no coletor de raios solares (geração direta de vapor).

O sistema proposto foi idealizado para abastecimento descentralizado de água em escala familiar e dirigido somente por energia solar, sem necessidade do uso de outras fontes de energia. De acordo com a Organização das Nações Unidas, cada pessoa necessita de cerca de 110 litros de água por dia para atender as necessidades de consumo e higiene. Considerando as demandas de água de uma família de 5 pessoas, o dessalinizador proposto nesse estudo toma como base uma produção de 550 litros de água por dia, ou seja,  $0,55\text{m}^3/\text{dia}$ . Kalogirou (1997b) classifica como escala doméstica a produção de 0,25 a  $1,3\text{ m}^3/\text{dia}$ .

A configuração do sistema proposto é mostrada na Figura 6.6:

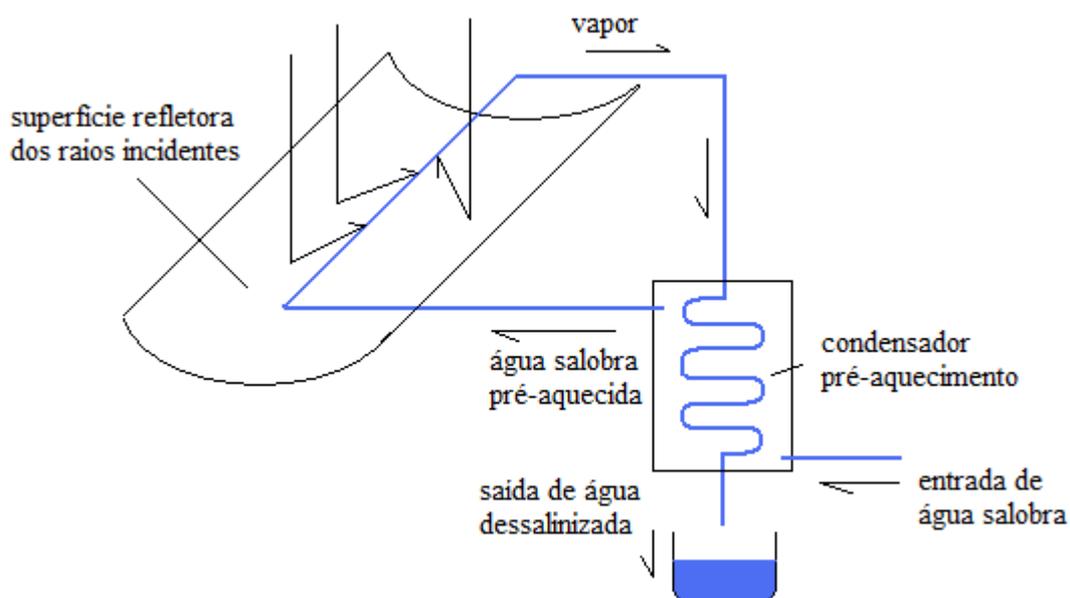


Figura 6.6: Configuração do dispositivo de dessalinização proposto neste estudo.

No sistema proposto, o calor latente de evaporação é usado para pré-aquecer a água de alimentação e ao mesmo tempo condensar o vapor para produzir a água destilada. O sistema funciona da seguinte maneira: a água salobra pré-aquecida passa para o coletor de raios solares. No coletor, os raios são concentrados e focados ao longo da linha por onde passa a água a ser destilada, que é desse modo aquecida até formar vapor. O vapor segue para o condensador, onde sofre uma mudança de fase de volta ao estado líquido quando é resfriado, produzindo a água destilada. O calor liberado quando o vapor condensa é transferido para a água de alimentação que circula através do condensador antes de entrar no coletor de raios solares e reiniciar o processo descrito.

O rejeito é coletado ao final do concentrador de raios solares (Figura 6.7). Conforme recomendado por Odeh et al (1998), uma inclinação da linha central de  $8^\circ$  melhora o fluxo bifásico ao longo do coletor. A direção da linha em que a água passa deve seguir a direção norte-sul do sol, de modo a obter um melhor aproveitamento da radiação enquanto o sol estiver brilhando.

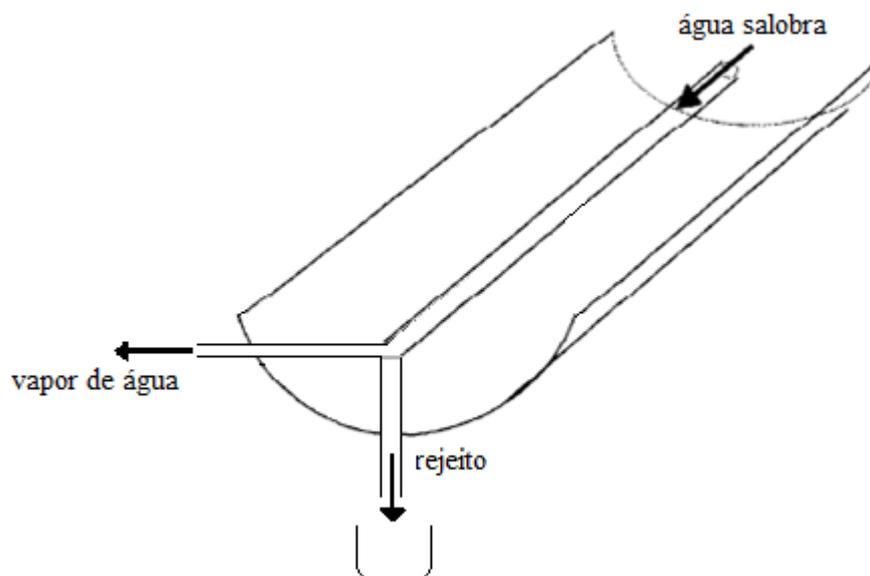


Figura 6.7: Detalhe do coletor de raios solares, mostrando a coleta do rejeito produzido.

Para o cálculo da área do coletor solar e do condensador, as seguintes equações foram utilizadas:

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}c_p\Delta T \quad (6.5)$$

$$\dot{Q}_2 = I\varepsilon A \quad (6.6)$$

$$\dot{Q}_3 = \dot{m}L \quad (6.7)$$

$$\dot{Q}_4 = kA\Delta T/\delta \quad (6.8)$$

Onde:

$\dot{Q}_1$  = variação do fluxo de energia no sistema

$\dot{Q}_2$  = fluxo de energia por radiação

$\dot{Q}_3$  = fluxo de energia liberada ou absorvida na mudança de fase

$\dot{Q}_4$  = fluxo de transferência de energia por condução

$\dot{m}$  = fluxo de massa

$c_p$  = calor específico da água (4.186J/kg°C)

$\Delta T$  = diferença de temperatura

$I$  = irradiação média

$\varepsilon$  = eficiência na conversão de energia solar em energia útil (0,45)

$A$  = área

$L$  = calor latente de vaporização da água (2.257kJ/kg)

$k$  = condutividade térmica do cobre (398W/mK)

$\delta$  = espessura do tubo de cobre (2mm)

Para uma produção de  $0,55 \text{ m}^3$  de água por dia, é necessária uma área do coletor solar de  $20,5 \text{ m}^2$  e uma área do condensador de  $3,3 \text{ m}^2$ . Admite-se que a água entra no dispositivo a uma temperatura de  $25^\circ\text{C}$ , atinge uma temperatura de  $105^\circ\text{C}$  ao final do coletor e sai do sistema a uma temperatura de  $25^\circ\text{C}$ . A insolação média considerada foi a do município de Propriá, de  $20.000 \text{ kJ/m}^2/\text{dia}$ . A eficiência térmica em termos de produção diária por  $\text{m}^2$  é de aproximadamente  $23 \text{ L/m}^2$ . As especificações do coletor solar estão resumidas na Tabela 6.5.

Tabela 6.5: Especificações do coletor solar em calha parabólica.

Área	$20,5 \text{ m}^2$
Abertura do coletor	$1,5 \text{ m}$
Comprimento	$8,7 \text{ m}$
Distância focal	$0,375 \text{ m}$

## 6.5 - ANÁLISE ECONÔMICA

Dado que os resultados de qualquer análise econômica dependem fortemente das suposições iniciais e do procedimento de cálculo e, devido à inexistência de um procedimento comum para a análise, muitas diferenças são geralmente encontradas nos cálculos de custo para uma mesma tecnologia.

O método empregado para a análise econômica é o descrito em Kalogirou (1997b), que leva em conta o valor do dinheiro no tempo.

Os processos solares são geralmente caracterizados por um preço inicial elevado e por baixos custos de operação (KALOGIROU, 1997b). Assim, o problema econômico básico é o de comparar um investimento conhecido inicial com os custos de operação futuros estimados. Os custos da produção de água destilada, conseqüentemente, dependem prioritariamente da produtividade do dispositivo, vida útil, custo de instalação, custo da terra e custo de operação e manutenção. Nessa análise econômica, os seguintes aspectos são importantes:

- O custo dependente da área. Multiplicando este custo pela área do coletor de raios solares juntamente com as outras partes componentes do sistema (no caso, o condensador de água destilada) dá uma estimativa do custo relativo ao tamanho do sistema.
- O custo das partes que compõem o sistema. Esta é a parte do custo relativa ao coletor de raios solares, ao condensador e outras partes complementares, como tanque coletor de água, por exemplo.
- O custo de instalação, que envolve a mão-de-obra.
- O período de análise econômica. Isto é equivalente à vida útil do sistema, tomada como 10 anos.
- A taxa de desconto anual do mercado. Este parâmetro é usado para estimar o valor atual de uma despesa, supondo que o valor do dinheiro aumenta com o passar do tempo. Para os cálculos, foi assumido um valor de 10%.
- O custo com a manutenção do sistema, na qual deve-se atentar para a limpeza da superfície do coletor solar e para problemas de corrosão na superfície dos tubos devido à salinidade da água circulante. Müller-Holst et al (1998) diz que uma

manutenção técnica de 3 dias duas vezes por ano é suficiente. Esse custo anual foi estimado em 10% do custo inicial do sistema.

Os parâmetros usados na análise econômica estão listados na Tabela 6.6. Os preços do cobre utilizado para a condução da água por meio dos “tubos” e do alumínio utilizado na chapa refletiva do coletor solar foram tomados no mês de outubro de 2009. Na conversão de moedas, foi considerado que US\$ 1 é equivalente a R\$2,00.

Tabela 6.6: Lista dos custos do dispositivo de dessalinização proposto.

Estrutura da calha parabólica	R\$200,00	Estimativa do custo total das partes que compõem o sistema	R\$1.700,00
Material refletivo (chapa de alumínio)	R\$4,00/kg	Custo total da área	R\$318,00
Condução por meio dos “tubos” (cobre)	R\$12,00/kg	Custo da mão-de-obra (instalação)	R\$300,00
Custo dependente da área	R\$12,00/m <sup>2</sup>	Operação e manutenção a cada ano	10% do custo inicial
Área estimada do coletor	20,5m <sup>2</sup>	Período de análise	10 anos
Área estimada das partes complementares	6m <sup>2</sup>	Taxa de desconto do mercado	10%

Na análise feita por Kalogirou (1997b), parâmetros adicionais para o cálculo incluem os custos do bombeamento do sistema, da eletricidade e do combustível, não aplicáveis para o sistema em questão.

A análise é feita anualmente. O valor atual do custo anual do sistema é expresso por:

$$\text{Valor atual} = \text{Custo anual do sistema} / (1+d)^N \quad (6.9)$$

Onde  $d$  = taxa de desconto do mercado e  $N$  = número de anos.

O sistema é considerado para operar 6 dias na semana e 50 semanas por ano. Desta simples análise de custo, foi encontrado um custo da água destilada obtida através do sistema de dessalinização proposto de R\$30,00/m<sup>3</sup>.

O preço da água destilada produzida pode ser compensado se forem levadas em conta as vantagens ambientais do uso da energia solar (por exemplo, a redução das emissões de CO<sub>2</sub> e toda a cadeia de impactos que envolvem a utilização de energias convencionais: infra-estrutura necessária para geração, distribuição, etc.).

Se a análise considerar o aumento do preço das energias convencionais ao longo dos anos, a exemplo do aumento do preço dos combustíveis fósseis, a água produzida a partir do uso da energia solar, livre de custos, pode tornar-se mais competitiva.

Do ponto de vista econômico, um melhoramento considerável na eficiência do sistema poderia ser alcançado por uma operação contínua, já que isto evitaria perdas térmicas durante os períodos de paralisação e períodos de baixa eficiência ao reiniciar o sistema. No entanto, há que se considerar o preço de um dispositivo de armazenamento de energia, geralmente caro.

**CAPÍTULO 7**  
**CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

## 7.0 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Com esse estudo, pretendeu-se dar uma contribuição aos estudos sobre a problemática da escassez de água no semi-árido brasileiro, apontando uma alternativa para complementar o atendimento das demandas de produção de água dessalinizada, especialmente voltada para comunidades difusas da região, em grande parte desprovidas ou dependentes de um abastecimento irregular de água.

Como, nos últimos anos, o governo tem implantado sistemas de dessalinização via osmose reversa nessas regiões e tem-se verificado problemas freqüentes com boa parte dos dispositivos instalados, procurou-se oferecer uma abordagem tecnológica alternativa, através do emprego da destilação solar, um sistema mais simples tecnologicamente.

Algumas conclusões desse estudo são resumidas a seguir:

- A dessalinização é uma técnica muito avançada, que inclui tecnologias de eficiência comprovada e utilizadas em várias partes do mundo, especialmente para maiores escalas de produção. No entanto, os métodos usualmente empregados não são apropriados para regiões com pouca infra-estrutura ou para regiões descentralizadas por causa de sua necessidade permanente de manutenção qualificada e fornecimento de eletricidade. Nessas regiões, a destilação solar pode vir a se tornar uma alternativa promissora para um fornecimento regular de água.
- A destilação solar tem a vantagem de aproveitar o potencial de insolação da região em seu processo tecnológico, com uma energia livre de custos. Isso significa uma grande vantagem em relação a outras tecnologias e pode vir a viabilizar seu emprego na região semi-árida brasileira, já que suas exigências vão ao encontro das características naturais dessa região.
- O maior custo da destilação solar está no preço inicial elevado. No entanto, em termos operacionais, seus custos são significativamente menores em relação a outras tecnologias, nas quais a manutenção e a operação são mais complexas e requerem trabalhadores especializados.

- Por ser uma tecnologia simples, que imita o ciclo natural da água em uma escala menor, é uma tecnologia de fácil entendimento e assimilação por parte dos usuários, o que pode contribuir para o emprego de mão-de-obra local na sua operação e manutenção, já que na região semi-árida brasileira não há grande disponibilidade de mão-de-obra qualificada pelo histórico déficit educacional da região. Isso pode trazer benefícios significativos, se comparado com outros sistemas, nos quais erros de operação podem danificá-los e até inutilizá-los (especialmente, em sistemas com membranas), aumentando os custos consideravelmente.

- O projeto do dispositivo de dessalinização proposto pode atender uma demanda familiar de água doce e garantir um abastecimento regular para populações difusas, principalmente nos períodos de maior escassez, quando o sistema atinge seu auge. Isso acabaria com a dependência dessas comunidades de um abastecimento irregular através de soluções paliativas e emergenciais, tais como o abastecimento por carros-pipa.

Como em nenhum estudo é possível abranger todos os aspectos que envolvem o desenvolvimento e/ou a melhoria de processos, são sugeridos alguns novos estudos visando à implementação futura de um dispositivo deste em campo, a saber:

- Tomando como base o atendimento em uma escala familiar, os custos do equipamento e da água produzida ainda encontram-se relativamente altos. Pesquisas complementares são necessárias para se chegar a um custo que possa competir com outras tecnologias.

- Há a necessidade de dados experimentais para complementar esse estudo. Um dispositivo de dessalinização, em escala laboratorial, precisa ser instalado para avaliação dos aspectos abordados e para levantar informações importantes sobre os demais aspectos que envolvem a dessalinização de água, que não foram incluídos nesse estudo preliminar.

- Além dos aspectos técnicos, também é desejável considerar o aspecto educativo em regiões semi-áridas. Informações sobre a dessalinização poderiam ser incluídas na educação da comunidade local para se criar e difundir uma preocupação e interesse entre os cidadãos sobre o desafio da escassez de água.

O abastecimento regular de água na região semi-árida brasileira tem sido, historicamente, uma demanda de ordem social, ambiental e econômica, muitas vezes

---

indevidamente atendida. Esse estudo procurou apontar uma alternativa que envolve o desenvolvimento e/ou a melhoria de processos para complementar o atendimento dessa demanda. No entanto, devido à complexidade e magnitude do problema, a continuidade dos estudos ainda se faz necessária para que essa demanda seja suprida e, assim, possa haver uma melhora significativa na qualidade de vida da população da região semi-árida, facilitando seu convívio com a seca.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

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*, 158 (1-3) (2003) 109-117.

AL-AHMAD, M.; ALEEM, F. A. A. Scale formation and fouling problems effect on the performance of MSF and RO desalination plants in Saudi Arabia, *Desalination*, 93 (1-3) (1993) 287-310.

AMORIM, M. C. C.; PORTO, E. R.; SILVA JÚNIOR, L. G. A. *Alternativas de reuso dos efluentes da dessalinização por osmose inversa: evaporação solar e meio líquido para cultivo de tilápia koina (Oreochromis sp.)*. Disponível em: <http://www.cepis.ops-oms.org/indexpor.html>. Acesso em: Out 2008a.

AMORIM, M. C. C.; PORTO, E. R.; SILVA JÚNIOR, L. G. A. *Evaporação solar como alternativa de reuso dos efluentes da dessalinização por osmose inversa*. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Disponível em: <http://www.cepis.org.pe/bvsaidis/aresidua/i-007.pdf>. Acesso em: Out 2008b.

ANA – Agência Nacional de Águas. *Elaboração do Atlas de Obras Prioritárias para a Região Semi-árida: Diagnóstico do Panorama Atual da Oferta de Água*. Consórcio Engercops/ Projetc/ Geoambiente / Riverside. Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos. Brasília, 2005a. 113p.

ANA – Agência Nacional de Águas. *Elaboração do Atlas de Obras Prioritárias para a Região Semi-Árida: Arranjo Institucional*. Consórcio Engecorps/ Projetc/ Geoambiente/ Riverside. Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos. Brasília, 2005b. 120 p.

ANA – Agência Nacional de Águas. *Atlas Nordeste: abastecimento urbano de água: alternativas de oferta de água para as sedes municipais da Região Nordeste do Brasil e do Norte de Minas Gerais*. Agência Nacional de Águas: Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos: Consórcio Engecorps/ Projetc/ Geoambiente/ Riverside Technology. Brasília, 2006. 80 p.

ANA – Agência Nacional de Águas. *Geo Brasil: recursos hídricos: componente da série de relatórios sobre o estado e perspectivas do meio ambiente no Brasil*. Ministério

do Meio Ambiente; Agência Nacional de Águas; Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. Brasília, 2007. 264 p.

ASSOCIAÇÃO DOS GEÓGRAFOS BRASILEIROS. *Embrapa utiliza rejeito de dessalinizadores para criar peixes e caprinos*. Disponível em: <http://geocities.yahoo.com.br/agbcg/dessali.htm>. Acesso em: Set 2008.

BRUGGEN, B. VAN DER. Desalination by distillation and by reverse osmosis - trends towards the future, *Membrane Technology*, volume 2003 (2). 2003, p. 6 - 9.

BUROS, O. K. *The ABCs of Desalting*, Second ed. International Desalination Association, Topsfield, MA, USA, 2000.

CARNEIRO, A. P. *Indicadores de eficiência sócio-econômica-ambiental do uso da água em terras secas da iberoamérica*. Disponível em: [http://www.ualg.pt/5cigpa/comunicacoes/Artigo\\_5cigpa\\_vfinal.doc](http://www.ualg.pt/5cigpa/comunicacoes/Artigo_5cigpa_vfinal.doc). Acesso em: fev 2008.

CARVALHO, P. C. M. Água potável via energia solar. *Ciência Hoje*, v. 27, n. 158, Rio de Janeiro, 2000, p.72 - 74.

CHAIBI, M. T. An overview of solar desalination for domestic and agriculture water needs in remote arid areas. *Desalination* 127 (2000) 119-133.

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos. *Resolução nº 32* – Institui a divisão hidrográfica nacional. Brasília, 2003.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução nº 357* - Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, 2005.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial. Ministério de Minas e Energia. *Programa de Água Subterrânea para o Semi-Árido Brasileiro*. Diretrizes Programáticas 2000 a 2003. Brasília, 1999.

DESTEFANI, A.; CORRÊA, C. T.; BEHLING, E. E.; BAIFUS, W. C. *Destilador solar*. Disponível em: [www.caaq.ufsc.br/anais\\_mct/saude/saude5.pdf](http://www.caaq.ufsc.br/anais_mct/saude/saude5.pdf). Acesso em: Nov 2008.

EINAV, R.; HAMSSIB, K.; PERIYB, D. The footprint of the desalination processes on the environment. *Desalination*, 152 (1-3) (2002) 141-154.

FALCÃO, R. B. de M.; OLIVEIRA, A. P. da S. *Projeto Água Subterrânea no Nordeste do Brasil*. Disponível em: <http://proasne.net/desenvolvimentosustentavel2.html>. Acesso em: mai 2008.

FATH, H. E. S. Solar distillation: a promising alternative for water provision with free energy, simple technology and a clean environment. *Desalination* 116 (1998) 45-56.

FEDRIZZI, M.C. *Fornecimento de água com sistemas de bombeamento fotovoltaicos: dimensionamento simplificado e análise de competitividade para sistemas de pequeno porte*. Dissertação apresentada ao Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, 1997.

FONSECA, A. L. da. *Dessalinizador para obtenção de água em pequenas comunidades, com utilização da tecnologia de troca iônica e energias alternativas*. Relatório parcial apresentado à Funasa. Brasília, Fundação Nacional de Saúde, 2004.

GARCÍA-RODRIGUEZ, L.; GÓMEZ CAMACHO, C. Thermoeconomic analysis of a solar parabolic trough collector distillation plant. *Desalination* 122 (1999) 215-224.

GARCÍA-RODRÍGUEZ, L.; PALMERO-MARRERO, A. I.; GÓMEZ-CAMACHO, C. Comparison of solar thermal Technologies for applications in seawater desalination. *Desalination* 142 (2002) 135-142.

GARJULLI, R. Os recursos hídricos no semi-árido. *Ciência e Cultura*, n. 4, vol.55, São Paulo, 2003.

GLENN, E. P; THOMPSON, T. L.; MIYAMOTO, S. Halophyte crops and a sand-bed solar concentrator to reduce and recycle industrial, desalination and agricultural brines. *Desalination Research and Development Program Report N° 35*, 1998.

- HAYES, D.; KIPPS, J. Salt-gradient solar ponds from concentrated subsurface agricultural drainage waters of the San Joaquin Valley, California. *Desalination*, 88 (1-3) (1992) 301-309.
- HOTHEM, R.; OHLENDORF, H. Contaminants in foods of aquatic birds at Kesterton Reservoir, California, 1985. *Environmental Contamination and Toxicology*, New York, v.18, n.6 (1989), 773-786.
- HURTADO, P.; KAST, M. Experimental study of direct in-situ generation line focus solar collector. SERI, 1984.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: [inmet.gov.br](http://inmet.gov.br). Acesso em: Set 2009.
- JUCÁ, S. C. S. Obtenção de água potável utilizando eletrodialise solar. *Vértices*, v. 7, n. 1/3, jan./dez. 2005.
- KALOGIROU, S. Survey of solar desalination system and system selection. *Energy* 22 (1) (1997a) 69-81.
- KALOGIROU, S. Economic analysis of a solar assisted desalination system. *Renewable Energy* 12 (4) (1997b) 351-367.
- KALOGIROU, S. Use of parabolic trough solar energy collectors for sea-water desalination. *Applied Energy* 60 (1998) 65 - 88.
- KHAWAJIA, A. D.; KUTUBKHANHA, I. K.; WIEB, J. M. Advances in seawater desalination technologies. *Desalination* 221 (2008), p. 47-69.
- KOTAKA, F.; GADOTTI, R. F.; LEITE, C. M. B. *Tema I - Programa de Pesquisas da Funasa: Análise da Linha de Pesquisas Sobre Avaliação de Tecnologias de Baixo Custo para Potabilização de Água Salobra*. Brasília, Fundação Nacional de Saúde, 2004.
- LIMA, J. V. *Viabilidade Técnica de um Sistema de Dessalinização Autônomo, sem Bateria, Acionado por Energias Renováveis*. Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica, março 2006.

MAIA NETO, R. F. Água para o desenvolvimento sustentável. *A Água em Revista*, Belo Horizonte, v.9, p.21-32, 1997.

MANDANI, F.; ETTOUNEY, H.; EL-DESSOUKY, H. LiBr H<sub>2</sub>O absorption heat pump for single-effect evaporation desalination process. *Desalination* 128 (2000) 161.

MATOS, J. F. Solução oxidante gerada a partir da eletrólise de rejeitos de dessalinizadores de água. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.11, n.2, Rio de Janeiro, 2006.

MEDEIROS, Y. P. Seleção de tecnologias limpas utilizadas no controle e prevenção dos recursos hídricos do semi-árido do Estado da Bahia. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2001, Aracaju. *Anais*. Aracaju: ABRH, 2001.

MI - Ministério da Integração Nacional. Secretaria de Políticas de Desenvolvimento Regional. Nova delimitação do Semi-Árido Brasileiro, 2005. Disponível em [www.mi.gov.br](http://www.mi.gov.br). Acesso em: mai 2008.

MICKLEY, M. C. Desalination concentrate management and issues in the United States, 2004a. Disponível em: <http://www.twdb.state.tx.us/Desalination/Desal/proceedings/Mickley.pdf>. Acesso em: jul. 2009.

MICKLEY, M. C. Membrane concentrate disposal: practices and regulation. Denver: U.S. Department of the Interior. (*Desalination and Water Purification Research and Development Program Report N°69*), 2004b. Disponível em: <http://www.usbr.gov/pmts/water/media/pdfs/report069.pdf>. Acesso em: jul 2009.

MILLER, J. E. Review of water resources and desalination technologies. *SAND* 2003-0800. Albuquerque, 2003. 52 p.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca*. PAN-BRASIL. Brasília, 2004.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano. Programa Água Doce*. Disponível em:

[www.mma.gov.br/sitio/index.php?ido=conteudo.monta&idEstrutura=212](http://www.mma.gov.br/sitio/index.php?ido=conteudo.monta&idEstrutura=212). Acesso em: Nov 2009.

MS - MINISTÉRIO DA SAÚDE. *Edital de convocação nº 001/2003*. Fundação Nacional de Saúde. Brasília, 2003.

MS - MINISTÉRIO DA SAÚDE. *Portaria nº 518* - Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Brasília, 2004.

MÜLLER-HOLST, H.; ENGELHARDT, M.; HERVE, M.; SCHÖLKOPF, W. Solarthermal seawater desalination systems for decentralized use. *Renewable Energy* 14 (1-4) (1998) 311-318.

ODEH, S. D.; MORRISON, G. L.; BEHNIS, M. *Solar Energy* 62 (6) (1998) 395.

OLDFIELD, J.W.; TODD, B. Technical and economic aspects of stainless steels in MSF desalination plants. *Desalination* 124 (1-3), 1999, p. 75 - 84.

ONG, C.; TANJI, K.; DAHLGREN, R.; SMITH, G.; QUEK, A. Water quality and trace element evapoconcentration in evaporation ponds for agricultural waste water disposal. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Washington, v.43, n.7, p.1941-1947. 1995.

OPHIR, A.; LOKIEE, F. Advanced MED process for most economical sea water desalination, *Desalination*, 182 (1-3) (2005) 187-198.

PAZ, V. P. da S.; TEODORO, R. E. F.; MENDONÇA, F. C. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.4, n.3, p.465-473, 2000.

PDS-SAS. *Programa de desenvolvimento sustentável do semi-árido sergipano (BR-11012)*. *Informe de viabilidade ambiental e social*. Disponível em: [www.iadb.org/idbdocs.cfm?docnum=598951](http://www.iadb.org/idbdocs.cfm?docnum=598951). Acesso em: out 2008.

PESSOA, L. C. C. *Análise de desempenho e do impacto ambiental dos dessalinizadores por osmose reversa*. Fortaleza: UFC, 2000. 94p. Dissertação Mestrado.

PINHEIRO, J. C. V.; CALLADO, S. M. G. *Avaliação de desempenho dos dessalinizadores do Ceará*. Disponível em: <http://www.bnb.gov.br/progEventosBN/projForum>. Acesso em: Out 2008.

PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. Relatório do Desenvolvimento Humano. *A água para lá da escassez: poder, pobreza e a crise mundial da água*. Brasília, 2006. p. 51-52.

PORTO, E. R.; AMORIM, M. C. C. de; 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*, Campina Grande, v.5, n.1, p.111-114, 2001.

RESNICK, R.; WALKER, J.; HALLIDAY, D. *Fundamentos de Física - Vol.2 - Gravitação, Ondas, Termodinâmica*. Editora Ltc. 8ª Ed., 2009. 310p.

RILEY, J. J.; FITZSIMMONS, K. M.; GLENN, E. P. Halophyte irrigation: an overlooked strategy for management of membrane fraction concentrate. *Desalination*, 110 (1997) p.197-211.

SANCHEZ, R. G. Indicadores y tecnologías apropiadas de uso sustentable del agua en tierras secas de Iberoamérica: condiciones actuales del Ecuador. *El agua en Iberoamérica: Aspectos de la problemática de las tierras secas*, Buenos Aires - Argentina, CYTED XVII, 2003. p. 105-118.

SEMIAT, R. Desalination: present and future. *Water International* 25 (1), 2000. p. 54 - 65.

SENS, M. L.; SOARES, C.; ANDRADE, C. O. de, LUCA, F. V. de; BÖEL, H. R. *Produção de água potável através da destilação solar natural*. Relatório final apresentado à Funasa. Brasília, Fundação Nacional de Saúde, 2004.

SOARES, T. M. *Desenvolvimento de três porta-enxertos cítricos utilizando águas salinas*. Piracicaba: ESALQ/USP. Dissertação Mestrado. Piracicaba, 2003. 94p.

SOARES, T.M. et al. Destinação de águas residuárias provenientes do processo de dessalinização por osmose reversa. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, n.3, Campina Grande, 2006.

SOMMARIVA, C. The 72 MIGD multi-stage flash distillation plant at Al Taweelah, Abu Dhabi, UAE, *Desalination, Water Reuse*, 6 (1) (1996) 30–36.

SOUZA, L. F. Dessalinização como fonte alternativa de água potável. *Norte Científico*, v. 1, n. 1, dezembro, 2006.

SPIEGLER, K. S.; EL-SAYED, Y. M. A Desalination Primer, *Balaban Desalination Publications*, Santa Maria Imbaro, Italy (1994).

TRIEB, F.; MÜLLER-STEINHAGEN, H.; KERN, J.; SCHARFE, J.; KABARITI, M.; TAHER, A. A. Technologies for large-scale seawater desalination using concentrated solar radiation. *Desalination* 235 (2009) 33-43.

UGPO - Unidade de Gerenciamento das Obras do Proágua do Ministério da Integração Nacional. *Avaliação ambiental e arcabouço para o gerenciamento ambiental*. Brasília, 2006. 47 p.

VALLS, J. X. Globalización e insostenibilidad. In: *Ecología y economía para un desarrollo sostenible*. 1a ed. Valencia: Universidad de Valencia, 2003. p. 87-100.

WANGNICK, K. 1998 *IDA Worldwide Desalting Plants Inventory*. Report N°15 Topsfield, MA, 1998.

ZHAO, Y.; AKBARZADEH, J.; ANDREWS, J. Simultaneous Desalination and Power Generation Using Solar Energy. *Renewable Energy* 34 (2009), 401-408.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)