

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA  
IEE**

**DANIEL JORDÃO DE MAGALHÃES ROSA**

**SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DOMICILIARES DE  
DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO: UM  
ESTUDO DE SUA VIABILIDADE E CONFIGURAÇÕES**

**SÃO PAULO  
2013**

DANIEL JORDÃO DE MAGALHÃES ROSA

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DOMICILIARES DE DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA  
PARA CONSUMO HUMANO: UM ESTUDO DE SUA VIABILIDADE E  
CONFIGURAÇÕES

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (Escola Politécnica / Faculdade de Economia e Administração / Instituto de Energia e Ambiente / Instituto de Física) para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Zilles

Coorientadora: Dr<sup>a</sup> Maria Cristina Fedrizzi

Versão Corrigida

(Versão Original disponível na Biblioteca da Unidade que aloja o programa e na Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP)

SÃO PAULO  
2013

**AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.**

### **FICHA CATALOGRÁFICA**

Rosa, Daniel Jordão de Magalhães.

Sistemas fotovoltaicos domiciliares de dessalinização de água para consumo humano: Um estudo de sua viabilidade e configurações / Daniel Jordão de Magalhães Rosa, orientador Roberto Zilles, coorientadora Maria Cristina Fedrizzi. São Paulo, 2013.

117 f.: il.; 30 cm.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Energia – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013

1.Abastecimento de Água 2.Sistemas Fotovoltaicos 3.Dessalinização por Osmose Reversa

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA**  
**IEE**

**DANIEL JORDÃO DE MAGALHÃES ROSA**

*“Sistemas fotovoltaicos domiciliares de dessalinização de água para consumo humano: Um estudo de sua viabilidade e configurações”*

Tese defendida e aprovada pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Roberto Zilles – PPGE/USP  
*Orientador e Presidente da Comissão Julgadora*

Prof. Dr. Adnei Melges de Andrade - PPGE/USP

Prof. Dr. Murilo Tadeu Werneck Fagá - PPGE/USP

Prof. Dr. Federico Bernardino Morante Trigo - UFABC

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Edila Arnaud Ferreira Moura - UFPA

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço antes de tudo ao professor Roberto Zilles e à Maria Cristina Fedrizzi, pelo apoio, confiança e orientação, tão necessários para o desenvolvimento deste trabalho. Aos colegas do LSF, pelo companheirismo e auxílio prestado sempre que foi preciso, especialmente o Teddy, que bastante me ajudou com a instalação e operação dos equipamentos. À Agência Nacional de Águas, por viabilizar a continuidade de minha formação acadêmica. À minha família, em especial minha mãe - Maria Cristina Jordão de Magalhães, pelo de sempre: amor e apoio incondicional e irrestrito. E à Carolina Bernardes, por toda ajuda, compreensão e incentivo e por ser essa pessoa tão especial em minha vida.

## RESUMO

ROSA, Daniel Jordão de Magalhães. **Sistemas fotovoltaicos domiciliares de dessalinização de água para consumo humano: Um estudo de sua viabilidade e configurações.** 2013. 109 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013

Grande parte da população rural do Semiárido brasileiro sofre com problemas de acesso à água de qualidade. A exploração da água subterrânea representa uma das principais alternativas para o abastecimento dessa parcela da população, mas muitas vezes os poços perfurados encontram-se longe da rede elétrica. A região apresenta abundante recurso solar e, assim, essa dificuldade poderia ser contornada com a utilização de sistemas fotovoltaicos de bombeamento. Mas, além da questão da energia para o funcionamento dos sistemas de bombeamento, pelo fato da maior parte do Semiárido estar localizada sobre escudo cristalino, muitos poços apresentam água com altos níveis de salinidade, o que inviabiliza a utilização desses mananciais para o fornecimento de água potável ou faz com que a população rejeite seu consumo, por conta do gosto. O presente trabalho tem como objetivo verificar se a adaptação de sistemas de dessalinização de pequeno porte disponíveis comercialmente a sistemas fotovoltaicos domiciliares pode potencializar a difusão dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento em poços de água com alto teor de sais dissolvidos e se essa opção pode representar uma alternativa de fornecimento de água para a população rural de áreas com problemas de salinização dos mananciais de abastecimento. A opção analisada consiste em um sistema duplo de fornecimento de água, com tratamento do tipo “ponto de uso” da água para consumo humano. Foi verificado que os sistemas de dessalinização atualmente disponíveis no mercado podem funcionar acoplados a geradores fotovoltaicos e utilizados para fornecimento de água potável a partir de água salobra.

Palavras-chave: Abastecimento de Água, Sistemas Fotovoltaicos, Dessalinização, Osmose Reversa

## ABSTRACT

ROSA, Daniel Jordão de Magalhães. **Household photovoltaic desalination systems for drinking water production: a study of its viability and settings.** 2013. 109 f. Doctorate Thesis - Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013

Much of the rural population of the Brazilian Semiarid region suffers from problems related to access of improved water quality. The exploitation of ground water is the main alternative for water supply solutions regarding this population, but often the boreholes are away from power lines. The region has abundant solar source and therefore this problem could be overcome with the use of photovoltaic pumping systems. Beyond the issue of energy for operation of the borehole systems, considering that most of the semiarid region is located on crystalline shield, many boreholes have water with high level of salinity, which hinder their use for drinking water supply solutions, as the population rejects the water because of its taste. This study aims to determine whether the adaptation of commercially available small household desalinization systems adapted to photovoltaic systems can enhance the diffusion of photovoltaic pumping systems of boreholes with high concentrations of dissolved salt, by proposing this water supply solution as an alternative for water supply systems in rural areas with problems of salinization of the main water sources. The proposed technical solution consists of a dual water supply system with the use a point of use water treatment for human consumption. It was found that desalination systems available on the market can operate coupled to photovoltaic generators and used to supply drinking water from brackish water.

Keywords: Water Supply, Photovoltaic Systems, Desalination, Reverse Osmosis

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Área de abrangência do Semiárido brasileiro .....	22
Figura 2 - Mapa do projeto de transposição/integração do Rio São Francisco .....	23
Figura 3 – Localização do escudo cristalino no Semiárido brasileiro .....	64
Figura 4 - Foto da unidade de destilação solar da Ilha de Patmos – Grécia .....	68
Figura 5 – Diagrama esquemático do processo de eletrodialise.....	69
Figura 6 - Diagrama esquemático do processo de osmose .....	70
Figura 7 - Diagrama esquemático do processo de osmose reversa .....	71
Figura 8 - Diagrama esquemático simplificado de um sistema de osmose reversa .....	73
Figura 9 - Diagrama Esquemático do funcionamento de uma bomba Clark .....	74
Figura 10 – Sistema de dessalinização da água do mar instalado em Fernando de Noronha ..	79
Figura 11 – Esquema da unidade demonstrativa do sistema de produção integrado do Projeto Água Doce .....	80
Figura 12 – Foto do sistema de osmose reversa Evolution RO-0220, da Permution – Soluções em Água.....	86
Figura 13 – Foto da parte superior do equipamento de dessalinização, com a tampa aberta...87	
Figura 14 – Filtro para particulados, para pré-tratamento - Filtro Rápido Permution FR 500.88	
Figura 15 - Diagrama esquemático hidráulico simplificado do equipamento de osmose reversa com a inclusão de pré-filtro de particulados.....	88
Figura 16 – Equipamento montado em bancada .....	89
Figura 17 – Diagrama esquemático do Sistema Fotovoltaico de Dessalinização .....	91
Figura 18 – Componentes do Sistema Fotovoltaico de Dessalinização em sua primeira configuração .....	92
Figura 19 – Detalhe do equipamento, mostrando sistema de aquisição de dados, disjuntores, controlador de carga e interruptor horário .....	93
Figura 20 – Diagrama esquemático do Sistema Fotovoltaico de Dessalinização configurado para teste de operação por período prolongado .....	94
Figura 21 – O Sistema Fotovoltaico de Dessalinização configurado para testes de funcionamento de longo período .....	94
Figura 22 – Variação do fluxo de permeado ao longo de 2.300 horas de operação.....	97
Figura 23 – Resultados dos testes de remoção de coliformes .....	98
Figura 24 – Esquema simplificado para instalação do equipamento em campo .....	100

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Poços cadastrados no SIAGAS e situação dos mesmos .....	54
Tabela 2 – Sistemas de bombeamento fotovoltaico adquiridos até o ano de 2002 .....	58
Tabela 3 – Dados do SIAGAS em relação ao SDT das águas dos poços que tiveram esse parâmetro determinado, em consulta realizada em outubro/2010 .....	66
Tabela 4 - Dados do SIAGAS em relação à condutividade elétrica das águas dos poços que tiveram esse parâmetro determinado .....	67
Tabela 5 – Valores de SDT obtidos em alguns dos sistemas instalados pelo Programa Água Doce .....	81
Tabela 6 – Dados obtidos para diferentes concentrações na água de entrada .....	96

## LISTA DE SIGLAS

ABAS - Associação Brasileira de Águas Subterrâneas  
ANA - Agência Nacional de Águas  
ASA - Articulação Semiárido Brasileiro  
BIRD - Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento  
CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos  
CENTRAL - Central de Associações Comunitárias para Manutenção de Sistemas de Abastecimento de Água  
CODEVASF - Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba  
COMPESA - Companhia Pernambucana de Saneamento  
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente  
CONVIVER - Programa de Desenvolvimento Integrado e Sustentável do Semiárido  
COP3 - Terceira Conferência das Partes da Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação  
CPATSA - Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido  
CPRM - Serviço Geológico do Brasil  
DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra as Secas  
DSA - Declaração do Semiárido  
Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrater - Empresa Brasileira de Assistência Técnica e Extensão Rural  
FBB - Fundação Banco do Brasil  
FGEB - Fundação Grupo Esquel Brasil  
FIDA - Fundo Internacional de Desenvolvimento Agrícola  
FUNASA - Fundação Nacional da Saúde  
GWSP - Global Water System Project  
ICID - Conferência Internacional sobre Impactos de Variações Climáticas e Desenvolvimento Sustentável em Regiões Semiáridas  
IEE - Instituto de Energia e Ambiente  
IFOCS - Inspeção Federal de Obras Contra as Secas  
IICA - Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura  
INTERÁGUAS - Programa de Desenvolvimento do Setor Água  
IOCS - Inspeção de Obras Contra as Secas  
IPEA - Fundação Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

IPTU - Imposto Predial Territorial Urbano

JBIC - Japan Bank International Cooperation

LSF - Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos

MCIDADES - Ministério das Cidades

MDS - Ministério do Desenvolvimento Social e Combate à Fome

MI - Ministério da Integração Nacional

MMA - Ministério do Meio Ambiente

MS - Ministério da Saúde

OMS - Organização Mundial da Saúde

ONG - Organização não governamental

ONU - Organização Das Nações Unidas

P1+2 - Programa Uma Terra e Duas Águas

P1MC - Programa Um Milhão de Cisternas

PAA - Programa de Aquisição de Alimentos

PAD - Programa Água Doce

PAN/Brasil - Programa Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca

PAPP - Programa de Apoio ao Pequeno Produtor

PCPR - Projeto de Combate à Pobreza Rural

PDRI - Programa de Desenvolvimento Rural Integrado

PDSA - Plano Estratégico de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido

PNAA - Programa Nacional de Acesso à Alimentação

PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

POLONORDESTE - Programa de Desenvolvimento de Áreas Integradas do Nordeste

PROÁGUA/Semiárido - Subprograma de Desenvolvimento Sustentável de Recursos Hídricos para o Semiárido Brasileiro

PROCANOR - Programa de Apoio às Populações Pobres das Zonas Canavieiras do Nordeste

PRODEEM - Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios

PROHIDRO - Programa de Aproveitamento de Recursos Hídricos do Nordeste

PROJETO NORDESTE - Programa de Desenvolvimento da Região Nordeste

PROJETO SERTANEJO - Programa Especial de Apoio ao Desenvolvimento da Região Semiárida do Nordeste

PROMATA - Programa de Apoio ao Desenvolvimento Sustentável a Zona da Mata de Pernambuco

PRONAF - Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar  
PROSAR - Programa Saúde e Saneamento Básico  
PROTERRA - Programa de Redistribuição de Terras e Estímulos à Agroindústria do Norte e Nordeste  
RDH - Relatório de Desenvolvimento Humano  
SBPC - Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência  
SDR - Secretaria de Desenvolvimento Regional  
SDT - Total de Sólidos Dissolvidos  
SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas  
SIH - Secretaria de Infraestrutura Hídrica  
SINGREH - Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos  
SISAR - Sistema Integrado de Saneamento Rural  
SISNAMA - Sistema Nacional de Meio Ambiente  
SPE - Sistemas de Ponto de Entrada  
SPP - Sistemas de Pequeno Porte  
SPU - Sistemas de Ponto de Uso  
SRH - Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente  
SSAR - Sistemas Simplificados de Abastecimento Rural  
SUDENE - Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste  
UNICEF - Fundo das Nações Unidas para a Infância  
WCED - World Commission on Environment and Development

Ah - Ampère-hora  
c.a. - Corrente alternada  
c.c. - Corrente contínua  
kWh - Quilowatt-hora  
mca - Metros de coluna d'água  
V - Volt  
W - Watt  
Wh - Watt-hora  
Wp - Watt-pico  
 $\mu\text{S/cm}$  – microsiemens por centímetro

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	14
1 A QUESTÃO DO ABASTECIMENTO DE ÁGUA .....	18
1.1 Potabilidade da água e a relação entre saúde e o acesso à água .....	18
1.2 Déficit e desigualdades internas no acesso à água no Brasil .....	19
1.3 A região do Semiárido .....	20
1.4 Sistemas alternativos de abastecimento fora das grandes redes .....	25
1.5 Mananciais de abastecimento para sistemas descentralizados .....	27
1.6 Requisitos mínimos da quantidade de água.....	28
1.7 Requisitos mínimos da qualidade da água.....	29
2 POLÍTICAS PÚBLICAS E O ACESSO À ÁGUA NO SEMIÁRIDO .....	31
2.1 Histórico .....	33
2.2 Programa Água Doce - PAD .....	45
2.3 Programa Um Milhão de Cisternas - P1MC.....	48
2.4 Programa Uma Terra e Duas Águas - P1+2 .....	49
2.5 Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Água - Água para Todos.....	50
2.6 Programa de Desenvolvimento do Setor Água – INTERÁGUAS .....	51
3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO .....	53
3.1 Energia para o bombeamento de água de poços.....	53
3.2 Geração fotovoltaica.....	55
3.3 Bombeamento fotovoltaico.....	57
4 SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO POR OSMOSE REVERSA.....	62
4.1 Salinidade e potabilidade da água .....	62
4.2 Opções para dessalinização da água .....	67
4.3 O fenômeno da osmose reversa .....	70
4.4 O Equipamento de osmose reversa.....	72
4.5 Consumo de energia para dessalinização por osmose reversa .....	74
4.6 Problemas com a membrana.....	76
4.8 Sistemas de dessalinização em operação no Brasil .....	78
5 MATERIAIS, MÉTODOS E PROCEDIMENTOS TÉCNICOS .....	82
6 RESULTADOS OBTIDOS .....	96
6.1 Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico Domiciliar de Dessalinização de Água para consumo humano.....	98

7	CONCLUSÕES .....	102
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	108

## INTRODUÇÃO

*Alcançamos uma meta importante, mas não podemos parar por aqui. O nosso próximo passo deve ser chegar às pessoas que são mais difíceis de alcançar, os mais pobres e mais desfavorecidos. A Assembleia Geral das Nações Unidas já reconheceu a água potável e o saneamento como direitos humanos, o que significa que temos de assegurar que todas as pessoas tenham acesso aos mesmos<sup>1</sup>.*

A água é um recurso natural dos mais preciosos e sua disponibilidade em quantidade e qualidade adequadas é condição fundamental para a vida como a conhecemos e, portanto, para a sobrevivência do ser humano. A falta de acesso da população à água em quantidade e qualidade adequadas é responsável por graves problemas nutricionais, sanitários e econômicos. Diversas doenças, como diarreias e disenterias, enterobíase, febres entéricas, infecções enteroviróticas, hepatite A, leptospirose e poliomielite, estão relacionadas ao consumo de água com qualidade inadequada. Já uma quantidade insuficiente de água pode resultar na procura por fontes alternativas de abastecimento, muitas vezes apresentando águas de baixa qualidade. Além disso, esse problema pode levar a deficiências na higiene e também à reservação da água em vasilhames impróprios e, portanto, vulneráveis à contaminação e procriação de vetores. A resolução A/RES/64/292 da Assembleia Geral da Organização das Nações Unidas – ONU, adotada em 28 de julho de 2010, reconhece o direito à água potável como um direito humano que é essencial para o pleno gozo da vida e de todos os direitos humanos, além de lançar um apelo aos Estados e organizações internacionais para prover recursos financeiros, capacitação e transferência de tecnologia, através de assistência e cooperação internacional, em particular para os países em desenvolvimento, a fim de ampliar esforços para garantir o fornecimento de água potável para todos (ONU, 2010a). A partir dessas recomendações, a resolução A/HRC/15/9 do Conselho de Direitos Humanos da ONU afirma que os Estados têm a responsabilidade primária de garantir a plena realização do direito à água potável, assegurando o fornecimento regular e seguro de água potável com especial atenção às pessoas pertencentes a grupos vulneráveis e grupos marginalizados (ONU, 2010b).

No Brasil, os problemas relacionados à falta de acesso à água também estão presentes. Mesmo com a ampliação dos serviços de saneamento apresentada nos últimos anos, boa parcela da população ainda carece da garantia de fornecimento de água e sofre as

---

<sup>1</sup> Ban Ki-moon, Secretário-geral da Organização das Nações Unidas – ONU, ao comentar o fato do mundo ter alcançado a meta do Objetivo de Desenvolvimento do Milênio de reduzir para metade a proporção de pessoas sem acesso a água potável segura. (UNICEF, 2012).

consequências desse problema. Esse problema ocorre em todo o território nacional, mas a maior parcela da população sujeita a esse grave problema está concentrada na região do Semiárido. Essa região corresponde a uma vasta área do território nacional que, em quase 1 milhão de quilômetros quadrados, reúne 1.133 municípios onde vivem cerca de 20 milhões de pessoas. A área do Semiárido se estende pelos Estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Minas Gerais, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe e sua população rural representa 44% do total de seus habitantes. O Semiárido apresenta mananciais com escassas reservas de água e temperaturas elevadas durante todo ano, com baixas amplitudes térmicas, forte insolação e altas taxas de evapotranspiração que, em geral, superam os totais pluviométricos. As chuvas apresentam grande irregularidade e não ultrapassam uma média de 900 mm, ocorrendo frequentes e prolongados eventos de seca. O consumo médio diário de água por habitante do Semiárido é menor do que a média nacional, sendo também concentrado nas regiões urbanas. Dessa maneira, grande parte da população rural da região, muitas vezes dispersa pelo território, ainda não tem acesso confiável ao abastecimento de água potável, problema que afeta de maneira mais grave a população de baixa renda.

Para prover o fornecimento de água para essa população, muitas vezes é necessária a utilização de soluções descentralizadas, visto que os sistemas centrais de abastecimento não são eficientes para atender uma população que não esteja concentrada em núcleos rurais de maior porte ou aglomerações urbanas. Nos últimos anos, diversas iniciativas buscaram desenvolver soluções para o problema, dentro de um contexto de convivência com o Semiárido e aproveitamento das potencialidades hídricas locais. Nesse contexto, vale destacar os projetos que envolvem a captação da água de chuva e reservação da mesma em cisternas para aproveitamento durante o período de seca. Mas, historicamente, as principais estratégias utilizadas para enfrentar o problema do acesso à água na região foram a construção de açudes para o armazenamento da água superficial e a perfuração de poços, visando o aproveitamento da água subterrânea.

A opção pela construção e utilização de açudes está relacionada a inúmeros problemas como a grande perda de água por evaporação, devido às extensas lâminas d'água expostas ao sol e ao vento, a salinização da água armazenada causada por essa evaporação e também a contaminação da água por dejetos humanos e de animais.

Por outro lado, existe um grande potencial de aproveitamento de mananciais subterrâneos, que representam uma alternativa para o fornecimento de água para a população dispersa do Semiárido. Por conta disso, existe uma grande quantidade de poços tubulares perfurados na região. Mas, em geral, esses poços foram construídos sem acompanhamento de profissional

habilitado e sem registros adequados de suas características, o que contribuiu para que boa parte deles encontra-se fora de operação. Assim, apenas colocando em funcionamento os poços já perfurados, seria possível proporcionar um aumento na oferta de água para a população da região, mas para tanto, é necessário saber quais os problemas que impedem ou dificultam a colocação dos poços em funcionamento e em condições de fornecer água de qualidade adequada. A carência de energia elétrica para a instalação dos conjuntos motobombas e a qualidade da água em termos de salinidade são alguns dos principais problemas encontrados.

A maioria dos poços não instalados e fora de operação está localizada a distâncias maiores que 1 km da rede elétrica e, dessa maneira, passa a ser interessante a utilização de fontes alternativas de energia para a instalação e funcionamento dos sistemas de bombeamento. Nesse sentido, a utilização do bombeamento fotovoltaico surge como boa opção, principalmente ao se considerar a abundância de recurso solar disponível para a região do Semiárido.

Por outro lado, em termos geológicos, cerca de 70% da região do Semiárido encontra-se sobre escudo cristalino e os aquíferos dessa área caracterizam-se por uma baixa qualidade de suas águas para o consumo humano, que costumam apresentar altos teores de sais dissolvidos.

Nesse caso, mesmo que sistemas fotovoltaicos de bombeamento possam solucionar o problema da oferta de água a partir dos mananciais subterrâneos, para que a população rural dispersa do semiárido possa consumir a água retirada dos poços, é necessário que se utilize sistemas de dessalinização para sua potabilização, com a retirada do excesso de sais.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo verificar a seguinte hipótese: A adaptação de sistemas de dessalinização de pequeno porte disponíveis comercialmente a sistemas fotovoltaicos domiciliares pode potencializar a difusão dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento em poços de água com alto teor de sais dissolvidos. Essa opção pode proporcionar uma nova alternativa de fornecimento de água potável para a população rural de áreas com problemas de salinização dos mananciais de água.

Foi realizada extensa pesquisa bibliográfica, de maneira a embasar o estudo e análise dessa hipótese. Um sistema de dessalinização de pequeno porte foi adquirido, adaptado através do acoplamento a um sistema fotovoltaico autônomo e testado em diversas condições e por período prolongado, com a concomitante coleta de dados.

O texto foi dividido em sete capítulos, sendo que o capítulo I contextualiza a questão do abastecimento de água, sua potabilidade e problemas decorrentes da falta de acesso a água,

com foco na região do Semiárido. O capítulo I trata também dos sistemas descentralizados de abastecimento de água e de seus requisitos mínimos de qualidade e quantidade.

O capítulo II discute o acesso à água no Semiárido e introduz o tema das políticas públicas, traçando um histórico das relacionadas à questão do saneamento e abastecimento de água na região.

Por sua vez, o capítulo III aborda a tecnologia de bombeamento fotovoltaico, suas características e aplicações.

Já o capítulo IV trata da questão da salinidade das águas, das alternativas para promover a dessalinização e do conceito e tecnologia de dessalinização por osmose reversa, com suas principais particularidades.

O capítulo V foi elaborado com a apresentação dos materiais, métodos e procedimentos utilizados, além da concepção de um sistema fotovoltaico domiciliar de dessalinização por osmose reversa e seu funcionamento.

No capítulo VI, são discutidos os resultados obtidos e é realizado o dimensionamento de um sistema fotovoltaico domiciliar de dessalinização de água para consumo humano capaz de atender uma família de tamanho médio da zona rural do Semiárido.

Finalmente, o capítulo VII apresenta as conclusões do estudo e considerações a respeito da viabilidade de adoção dessa tecnologia como mais uma alternativa para as políticas públicas que visam garantir o fornecimento de água potável para a população rural dispersa do Semiárido.

## 1 A QUESTÃO DO ABASTECIMENTO DE ÁGUA

### 1.1 Potabilidade da água e a relação entre saúde e o acesso à água

O ser humano precisa de água para viver e a disponibilidade de água potável em quantidade suficiente é condição fundamental para sua sobrevivência. Os seres vivos necessitam de um veículo que facilite as reações fisiológicas, atuem no transporte de nutrientes e que também sirva para regular a temperatura do corpo. A água satisfaz completamente a estes requisitos, encontrando-se presente em proporções elevadas na constituição de todos os animais, inclusive no homem, onde atinge cerca de 75% de seu peso (FUNASA, 2006). Podemos entender água potável como sendo a água para consumo humano que não ofereça riscos à saúde e cujos parâmetros microbiológicos, físicos, químicos e radioativos atendam ao padrão de potabilidade, geralmente definido pelo Ministério da Saúde de cada país (BERNARDO; DANTAS, 2005). A falta de acesso da população à água de boa qualidade é responsável por graves problemas nutricionais, sanitários e econômicos. A relação entre a incidência de doenças e a falta de acesso à água em quantidade e qualidade adequadas é bem conhecida e pessoas sem acesso ao abastecimento de água adequado e seguro correm maior risco de adquirir doenças transmitidas pela água. Em geral, os maiores riscos associados ao consumo de água de qualidade inadequada estão ligados à presença de micro-organismos como vírus, protozoários, bactérias e larvas. Mas poluentes químicos também podem trazer sérios riscos, tanto os de origem antropogênica como os oriundos das atividades agrícola ou industrial, quanto os de origem natural como a ocorrência natural de arsênico e flúor em alguns países. Estima-se que, no ano de 2004, mais de 1,7 milhão de mortes foram causadas por problemas relacionados à má qualidade da água consumida e problemas de higiene e saneamento, o que equivale a 3,1 % de todos os óbitos ocorridos no ano, no mundo. Desse total, 90 % das mortes foram de crianças, a maior parte causada por diarreia (ASHBOLT, 2004).

Dados do Relatório de Desenvolvimento Humano - RDH divulgado em 2006 pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD e intitulado “A Água para lá da Escassez: Poder, Pobreza e a Crise Mundial da Água” indicam que aproximadamente 1,1 bilhão de pessoas no mundo não têm acesso à água potável, no seu dia a dia (PNUD, 2006). Esse problema causa, em média, a morte diária de cerca de 4,6 mil crianças no mundo. O relatório afirma que “Água limpa e saneamento estão entre os mais eficientes remédios

*preventivos para reduzir a mortalidade infantil*”. Esse tema tem sido a tônica de diversas instâncias internacionais como a Conferência Internacional da Água e Desenvolvimento Sustentável de 1992, realizada em Dublin, a Assembléia do Milênio, organizada pela Organização das Nações Unidas - ONU em 2000 e a Conferência Internacional de Água Doce, realizada na Alemanha no ano de 2001. É importante salientar que o documento elaborado pela Assembléia do Milênio - a Declaração do Milênio determinou como meta a ser cumprida até 2015 “... *reduzir para metade a percentagem de pessoas que não têm acesso a água potável ou carecem de meios para o obter*” (PNUD, 2000). Essa meta foi alcançada no ano de 2012, mas pelo menos 11% da população mundial continua a não ter acesso seguro à água potável, o que corresponde a quase 800 milhões de pessoas (UNICEF, 2012).

Algumas das doenças que estão associadas à falta ou deficiência no saneamento básico e que poderiam ser controladas através do acesso à água de boa qualidade (FUNASA, 2010) são:

- Diarréias e disenterias (Amebíase, Balantidíase, Cólera, Criptosporidíase, Diarréia por *Escherichia coli*, Diarréia por rotavírus, Enterite campylobacteriana, Giardíase, Himenolepíase, Salmonelose, Shigelose e Yersinose);
- Enterobíase;
- Febres entéricas (Febre tifóide e Febre paratifóide);
- Infecções enteroviróticas;
- Hepatite A;
- Leptospirose;
- Poliomielite.

Existe também uma relação direta e recíproca entre a pobreza e a falta de acesso a um suprimento de água potável. A falta de um suprimento de água confiável, além de impedir que as pessoas possam usufruir adequadamente do acesso aos serviços públicos e dos direitos humanos, faz com que elas precisem dispendir grande tempo e energia para obter água para sua sobrevivência. Por outro lado, a baixa renda faz com que as famílias não tenham recursos para investir em soluções alternativas para a captação de água.

## **1.2 Déficit e desigualdades internas no acesso à água no Brasil**

No Brasil, a questão do acesso à água assume enorme importância, pois segundo o relatório final da Fundação Nacional de Saúde - FUNASA “Impactos na Saúde e no Sistema Único de Saúde Decorrentes de Agravos Relacionados a um Saneamento Ambiental Inadequado”

(FUNASA, 2010), em período compreendido nos anos de 1996 a 1999 foram registrados 17.719 óbitos por diarreias em menores de um ano no país, correspondendo a uma média de 14 óbitos/dia. A região nordeste foi a que apresentou as maiores taxas de mortalidade infantil por diarreias e maiores proporções de mortalidade por diarreias. Em 2003, cerca de 30% da população ainda não tinha acesso confiável ao abastecimento de água potável, problema que afeta de maneira mais grave a população de baixa renda (MEJIA et al., 2003). Nas últimas décadas, o Brasil realizou uma grande ampliação de seus sistemas de abastecimento, mas dados do PNUD de 2006 indicavam que 17% da população do país ainda não tinham acesso à água potável, o que corresponde a quase 29 milhões de brasileiros (PNUD, 2006).

### **1.3 A região do Semiárido**

A deficiência na cobertura do abastecimento de água é um problema que não está restrito apenas às regiões do país com recursos hídricos reduzidos, mas é na região do Semiárido que se concentra a maior parte da população brasileira que vive sujeita à falta recorrente de água de boa qualidade e aos problemas decorrentes dessa carência. O Semiárido pode ser considerado o domínio morfoclimático das caatingas brasileiras, constituindo um dos três espaços semiáridos da América do Sul, a mais homogênea do ponto de vista fisiográfico, ecológico e social, dentre elas. Esse domínio apresenta uma delimitação quase que coincidente com os extremos do local de ocorrência da vegetação de caatinga e com as áreas que apresentam cursos d'água periódicos e intermitentes, ou seja, os chamados rios temporários. O domínio morfoclimático das caatingas brasileiras é também fortemente caracterizado pela grande presença e dispersão da população por seu território (AB`SABER, 2012). Historicamente, a população residente na região semiárida do Brasil, em especial a população rural, vive boa parte do ano em situação de estresse hídrico, conceito que usualmente considera nessa condição a população que dispuser de uma quantidade de água nos mananciais da região inferior a  $1.000 \text{ m}^3/\text{ano}$  por habitante. Mas esse conceito foi proposto para regiões de clima árido com relativo desenvolvimento econômico e não deve ser utilizado de forma indiscriminada para qualquer zona climática e atividades econômicas preponderantes na área em análise (REBOUÇAS, 2003). Assim, pode-se conceituar estresse hídrico como uma situação em que a população vive com uma demanda de água por habitante maior do que a capacidade de oferta dos mananciais próximos. Dessa maneira, o Semiárido é uma região que apresenta problemas para garantir a segurança hídrica de sua população, ou

seja, sem garantia de que “*cada pessoa tenha acesso à água potável suficiente a um custo acessível para levar uma vida saudável e produtiva e que a população vulnerável seja protegida contra os riscos relacionados à água*” (GWSP, 2012). A região caracteriza-se por apresentar reservas insuficientes de água em seus mananciais e temperaturas elevadas durante todo ano, com baixas amplitudes térmicas, forte insolação e altas taxas de evapotranspiração. As chuvas, que ocorrem com enorme irregularidade temporal e territorial apresentam totais pluviométricos anuais relativamente baixos e geralmente superados pela evapotranspiração, o que resulta em taxas negativas no balanço hídrico. Podem-se encontrar áreas com precipitações caracterizadas pela isoietas de 400 mm, no Seridó e sertão da Paraíba, penetrando em território baiano desde o cotovelo do Rio São Francisco até a área chamada Raso da Catarina, onde são encontrados os trechos subdesérticos do Nordeste (ANA, 2005a). Além disso, há uma grande irregularidade das chuvas, causando frequentes e prolongados períodos de seca, em grande medida responsáveis pelo êxodo de parte de sua população (ANA, 2006). Para efeito da destinação de políticas públicas e recursos para a região, o governo federal realizou uma delimitação da região, criando a figura da região conhecido como Semiárido. A atualização mais recente dessa delimitação foi realizada em 2005, com base nas conclusões de um Grupo de Trabalho Interministerial instituído no ano anterior (PEREIRA JUNIOR, 2007). Foi determinada a sobreposição de três critérios técnicos e todos os municípios que tiveram seu território total ou parcialmente atendendo um desses critérios foram integralmente incluídos como integrantes da área delimitada. Os três critérios utilizados foram os seguintes:

1. Precipitação pluviométrica média anual inferior a 800 milímetros (isoietas de 800 mm);
2. 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;
3. Déficit hídrico em pelo menos 60% do tempo, tomando-se por base o período entre 1970 e 1990.

A utilização de isoietas para delimitação do Semiárido foi o critério usado nas demarcações realizadas anteriormente, existindo dados disponíveis em séries históricas confiáveis para sua aplicação.

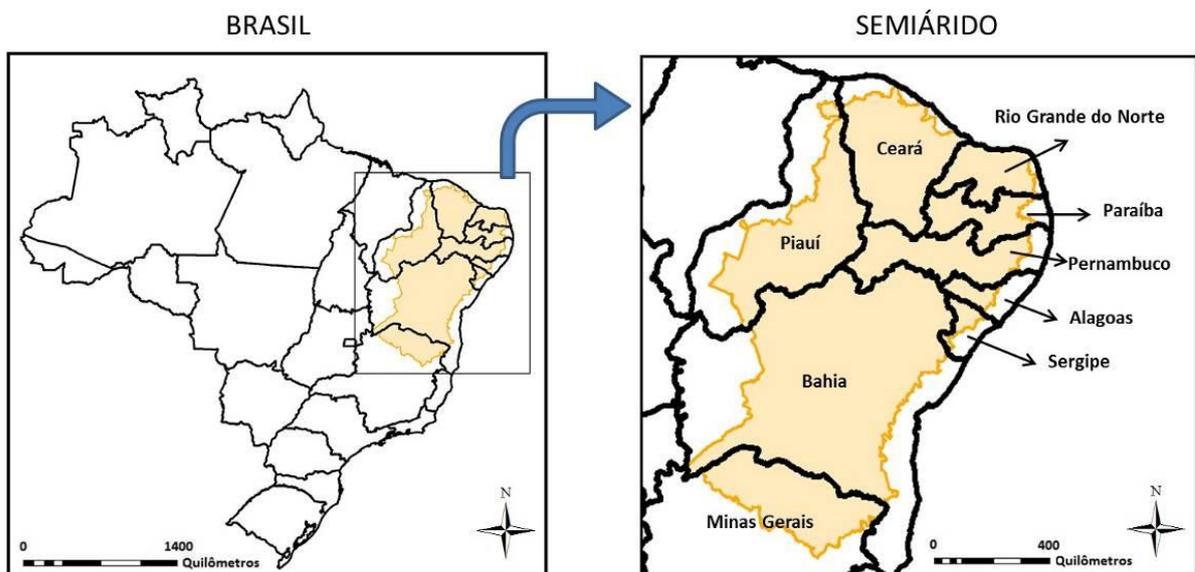
Já o índice de aridez é calculado considerando as precipitações e as temperaturas para a determinação da evapotranspiração potencial e posterior cálculo da relação entre a precipitação anual e a evapotranspiração potencial anual. Evapotranspiração é considerada a evaporação do solo e plantas úmidas, somada à transpiração das plantas, enquanto evapotranspiração potencial é o valor de referência que considera a evapotranspiração de uma

extensa superfície totalmente coberta por vegetação rasteira, em crescimento ativo e sem restrição hídrica. As classes de variação para este índice são (CONAMA, 1997):

- Hiperárido  $< 0,05$
- Árido  $0,05 - 0,20$
- Semiárido  $0,21 - 0,50$
- Subúmido seco  $0,51 - 0,65$
- Subúmido e úmido  $> 0,65$

Déficit Hídrico é o resultado do balanço hídrico em que o valor de precipitação é menor do que a evapotranspiração. Para seu cálculo, foi utilizado um modelo de balanço hídrico diário, a partir da estimativa dos valores de evaporação potencial. Foram consideradas semiáridas as áreas que apresentaram, no período de 1970-1990, déficit hídrico em pelo menos 60% do tempo.

Assim, a região do Semiárido brasileiro recebeu sua atual delimitação (**Figura 1**) ocupando uma área de 976.743 km<sup>2</sup> distribuídos entre os Estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Minas Gerais, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe. Na região do Semiárido encontram-se 1.133 municípios, e vive uma população de 20 milhões de habitantes, ou seja, cerca de 12,2% da população brasileira. Desses 20 milhões, 56% correspondem à população urbana e 44% à população rural.



**Figura 1 – Área de abrangência do Semiárido brasileiro**

No Brasil, consome-se em média 190 litros de água por dia por habitante, mas há uma extrema desigualdade desse valor de região para região. A seguir, são apresentados dados do

PNUD de 2004 que trazem o consumo diário de água por habitante em cada estado brasileiro com território total ou parcialmente na área do Semiárido (PNUD, 2004):

- Minas Gerais: 143,44 L/habitante.dia;
- Rio Grande do Norte: 115,84 L/habitante.dia;
- Sergipe: 114,10 L/habitante.dia;
- Ceará: 113,84 L/habitante.dia;
- Paraíba: 112,08 L/habitante.dia;
- Bahia: 111,53 L/habitante.dia;
- Piauí: 107,33 L/habitante.dia;
- Alagoas: 107,23 L/habitante.dia;
- Pernambuco: 85,14 L/habitante.dia.

Como se pode observar, todos os estados apresentam valores abaixo da média nacional. Diversas ações vêm sendo realizadas com o intuito de proporcionar o acesso à água aos habitantes do Semiárido. O Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional, por exemplo, é um ambicioso e custoso projeto do Governo Federal que visa “assegurar oferta de água, em 2025, a cerca de 12 milhões de habitantes de 390 municípios do Agreste e do Sertão dos estados de Pernambuco, Ceará, Paraíba e Rio Grande do Norte” (BRASIL, 2004). A **Figura 2** traz um mapa com a localização do projeto, seus eixos de integração, adutoras e bacias de recepção.



Figura 2 - Mapa do projeto de transposição/integração do Rio São Francisco  
Fonte: (Brasil, 2010)

Mas a questão do acesso à água deve ter um enfoque diferenciado para os habitantes do meio rural do Semiárido, principalmente para a população dispersa. Dentro da realidade dessa região, também há uma grande desigualdade no consumo médio diário de água por habitante. O consumo se concentra nas grandes cidades, o que faz com que o consumo diário médio da população rural em cada estado seja menor do que a média estadual apresentada.

O Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA divulgou, com base na Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios realizada em 2007, que “*as desigualdades no acesso aos serviços de água também são gritantes entre os habitantes das áreas urbanas e das zonas rurais*” e que a água de rede geral está disponível para menos de 28% dos moradores do campo (IPEA, 2008). As grandes distâncias até a rede pública de água elevam os preços, pois as famílias acabam por depender dos intermediários que fazem o transporte da água em carros pipa. De acordo com trabalho realizado por José Boaventura Teixeira, existem localidades em que a população pobre paga de cinco a 10 vezes mais que a população rica pela água consumida (BRASIL, 2011a).

Em 2007, foi publicada no Diário Oficial da União a Lei nº 11.445, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico (BRASIL, 2007a). Em seu artigo 3º, essa lei define saneamento básico como conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais de abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, drenagem e manejo das águas pluviais urbanas. Já o artigo 2º da referida lei traz que os serviços públicos de saneamento básico serão prestados com base em diversos princípios fundamentais, dentre os quais podemos destacar:

- Universalização do acesso, integralidade e disponibilidade de todos os serviços e atividades de saneamento básico definido na lei, bem como atendimento em quantidade e qualidade suficientes às necessidades dos cidadãos, sem nenhuma discriminação;
- Adoção de métodos, técnicas e processos que levem em conta as características locais e regionais;
- Eficiência e sustentabilidade econômica dos serviços e seu atendimento;
- Controle social: participação organizada da sociedade civil.

Já no artigo 48º, está explicitado que cabe à União, na Política Nacional de Saneamento Básico, ficar atenta a uma série de diretrizes, dentre outras:

- Prioridade para as ações que promovam a equidade social e territorial no acesso ao saneamento;
- Melhoria da qualidade de vida e das condições ambientais e de saúde pública;

- Garantia de meios adequados para o atendimento da população rural dispersa, levando em conta suas características econômicas e sociais;
- Fomento ao desenvolvimento científico e tecnológico, à difusão dos conhecimentos acumulados e à adoção de tecnologias apropriadas.

Dentre os objetivos da Política Nacional de Saneamento Básico constantes no art. 49º, alguns merecem destaque:

- Contribuir para o desenvolvimento nacional, redução das desigualdades, geração de renda e emprego, e inclusão social;
- Priorizar ações de saneamento básico para populações de baixa renda;
- Diminuir e/ou evitar os impactos ambientais relacionados ou decorrentes da execução dos serviços e obras de saneamento.

#### **1.4 Sistemas alternativos de abastecimento fora das grandes redes**

Pode-se considerar que existem dois tipos de solução para o abastecimento de água, além da possibilidade de utilização de combinações entre elas (FUNASA, 2006):

- Solução coletiva;
- Solução individual.

A solução coletiva aplica-se, em áreas urbanas e áreas rurais com população mais concentrada. A solução individual aplica-se, normalmente, em áreas rurais de população dispersa. Em áreas urbanas e densamente povoadas, o princípio da economia de escala geralmente favorece soluções centrais de abastecimento, distribuição e tratamento de água. Já o atendimento da população rural com os sistemas de saneamento tradicionais e de maior porte apresenta grandes dificuldades. Um dos complicadores que dificultam esse atendimento é o fato da população rural estar localizada em pequenos aglomerados com poucos habitantes e, muitas vezes, dispersa no território, aumentando em muito o custo de implantação e dificultando a manutenção dos sistemas de distribuição a partir de um sistema central de tratamento. Além disso, como as comunidades rurais estão afastadas dos grandes centros urbanos, muitas vezes, sofrem com uma reduzida capacidade de gestão das infraestruturas de abastecimento de água a partir de um sistema central de tratamento. No caso da implantação de sistemas centralizados é grande o risco do mesmo falhar devido a problemas na gestão ou por conta da manutenção não especializada. Assim, é necessário lançar mão de soluções alternativas de abastecimento de água para o consumo humano, ou seja, modalidades de

abastecimento de água distinta do sistema central de abastecimento, incluindo, entre outras alternativas, fontes, poços comunitários, distribuição por veículo transportador, etc. (BERNARDO; DANTAS, 2005). Nas comunidades rurais que não contam com esses sistemas centrais de abastecimento, sistemas descentralizados podem ser a única maneira de melhorar a qualidade de água obtida a partir de fonte contaminada ou com qualidade imprópria para consumo.

Podemos dividir os Sistemas Descentralizados em Sistemas de Pequeno Porte, Sistemas de Ponto de Entrada e Sistemas de Ponto de Uso (PETER-VERBANETS et al., 2009). Sistemas de Pequeno Porte – SPP são sistemas maiores do que as outras duas modalidades de Sistemas Descentralizados, mas com capacidades menores do que as apresentadas pelos sistemas centralizados. Normalmente, os SPP tratam a água consumida por várias famílias ou mesmo por uma comunidade e apresentam uma capacidade de tratamento entre 1.000 e 10.000 L/dia. Já os Sistemas de Ponto de Entrada – SPE são sistemas que tratam toda a água fornecida a uma residência e cujas capacidades de tratamento são da ordem de 100 a 150 L/dia por morador. Por sua vez, Sistemas de Ponto de Uso - SPU constituem os sistemas de menor porte dentre as 3 categorias apresentadas e visam o tratamento apenas da água utilizada para beber e cozinhar. Em geral, em uma residência com 5 moradores, um SPU deve tratar algo em torno de 40 L/dia. Sistemas de Ponto de Uso, em geral, são utilizados para tratamento caseiro de água em esquemas de sistemas duplo de abastecimento, onde os moradores têm acesso a dois tipos de água: água potável para beber e cozinhar e água com uma qualidade inferior, para uso geral.

Um exemplo de Sistemas de Pequeno Porte são os chamados Sistemas Simplificados de Abastecimento Rural - SSAR, compostos de uma captação em manancial superficial ou subterrâneo preferencialmente com potabilidade natural, seguido por transporte, reservação e distribuição através de chafariz (ORRICO, 2003). Esses sistemas podem representar um avanço em termos de segurança hídrica da população rural, mas por outro lado, podem apresentar riscos de contaminação da água nas etapas de transporte e reservação. Em casos onde a fonte de abastecimento de água está afastada das residências, é comum se observar que a qualidade microbiológica da água consumida dentro dos domicílios seja menor do que no ponto de distribuição, com a ocorrência de contaminação durante a coleta, transporte e armazenamento da água (Wright et al., 2004). Os Sistemas de Ponto de Entrada, por outro lado, podem eliminar a possibilidade de contaminação durante o transporte, mas também apresentam a necessidade da reservação da água, no caso, em reservatórios domiciliares. Assim, trazem também o risco de contaminação da água nos reservatórios utilizados. Esse

risco costuma ser causado pela ausência ou inadequação das tampas dos reservatórios, sedimentação de material em seu fundo e falta de limpeza periódica adequada. Em pesquisa realizada em uma cidade do Pará, por exemplo, verificou-se que a contaminação por coliformes fecais nos reservatórios domiciliares analisados, variou entre 60% e 80% (LIMA; BERNARDES, 2001). Já em estudo realizado na cidade de Petrolina-PE, foi analisada a qualidade bacteriológica da água de 14 cisternas rurais, tendo sido constatada a presença de coliformes e inadequação da água para consumo humano em todas as cisternas (AMORIM; PORTO, 2001).

Dessa maneira, um sistema duplo instalado nas residências com a água potável sendo fornecida através de Sistemas de Ponto de Uso pode constituir uma boa solução para o abastecimento de água para a população rural do Semiárido. Nesse caso, a água captada é fornecida à residência para uso geral e parte da mesma é tratada para sua potabilização.

### **1.5 Mananciais de abastecimento para sistemas descentralizados**

Existem diversas opções para a captação de água. Historicamente, além de iniciativas como o Programa 1 Milhão de Cisternas Rurais desenvolvido pela Agência Nacional de Águas e Aliança para o Semiárido e que busca, dentre outros objetivos, garantir a um milhão de famílias rurais mais carentes da região a superação de suas carências de água potável através do aproveitamento da água de chuva, as principais alternativas utilizadas para captação de água na região têm passado por duas estratégias principais:

- Construção de açudes, visando o armazenamento da água superficial;
- Perfuração de poços, visando o aproveitamento da água subterrânea.

A opção pela construção e utilização de açudes apresenta inúmeros problemas como uma grande perda de água pela evaporação, já que as extensas superfícies dos açudes ficam expostas ao sol e ao vento, salinização da água armazenada causada por essa evaporação e também a contaminação da água por dejetos humanos e de animais. Assim, muitas vezes, a água encontrada nos açudes não está em conformidade com os padrões determinados pela Organização Mundial da Saúde – OMS e, mesmo assim, ainda é consumida por grande parte da população rural do Nordeste. Além disso, é comum a população ter de percorrer longas distâncias para buscar a água dos açudes o que, além de ser trabalhoso e consumir bastante tempo, traz o risco de contaminação da água no transporte da mesma em recipientes inadequados ou mesmo em sua reservação para uso posterior.

Assim, a utilização da água de poços representa uma excelente alternativa para captação de água para Sistemas Descentralizados de Abastecimento. De acordo com dados da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas – ABAS, pelo menos 19,5 bilhões de metros cúbicos de água poderiam ser extraídos por ano do subsolo nordestino sem o risco de esgotamento dos mananciais (SBPC, 1995). Com apenas 5% desse montante potencial, seria possível fornecer cerca de 134 litros diários de água por habitante do Semiárido, considerando uma população de 20 milhões de habitantes.

## **1.6 Requisitos mínimos da quantidade de água**

A água para consumo doméstico é utilizada, em geral, para as seguintes atividades:

- Beber;
- Cozinhar;
- Higiene pessoal
- Lavagem de roupas e utensílios;
- Limpeza da casa;
- Descarga dos aparelhos sanitários;
- Rega de jardins;
- Outros usos.

Apesar do fato de se considerar que a necessidade mínima de água para a sobrevivência do ser humano é de 5 litros diários, o RDH – 2006 defende como direito humano mínimo 20 litros diários de água limpa por pessoa para satisfazer as necessidades básicas como matar a sede, cozinhar e fazer a higiene pessoal. Ao incluir atividades como lavar a roupa e demais atividades de limpeza doméstica, esse volume sobe para 50 litros, no mínimo. Se for também incluída a quantidade de água necessária para se desenvolver atividades produtivas como o cultivo de hortaliças ou para a dessedentação do gado, essa quantidade sofre outro considerável acréscimo. Para se determinar a quantidade mínima de água potável necessária para abastecer com água para beber e cozinhar uma família média rural do Semiárido, é necessário se conhecer o tamanho médio das famílias rurais e também o consumo médio de água por habitante dessa região. Em 2007, o Catálogo de Indicadores de Monitoramento dos Programas do Ministério de Desenvolvimento Sustentável (BRASIL, 2007b) verificou que o tamanho médio das famílias beneficiárias do Programa Bolsa Família na zona rural da região Nordeste do país é igual a 4,43. Assim, no presente trabalho, foi considerado um tamanho

médio de família igual a 5 pessoas. Uma família constituída por um casal e 3 filhos e para o caso de maior consumo (mulher amamentando e homem que desenvolva trabalhos manuais, exposto ao sol), deve consumir diariamente entre 22 L e 32,5 L para beber e cozinhar, dependendo das atividades desenvolvidas pelos filhos (HOWARD; BARTRAM, 2003). Em um estudo de campo feito no meio rural do Semiárido (JALFIM, 2001), verificou-se um consumo médio de água para beber e cozinhar de 6 L/pessoa.dia. Dessa maneira, conclui-se que os requisitos mínimos de quantidade de água para atender às necessidades de água potável para beber e cozinhar de uma família média rural do Semiárido é de 30 litros diários de água potável.

### **1.7 Requisitos mínimos da qualidade da água**

Os vários usos da água implicam e são condicionados em diferentes requisitos de qualidade para a mesma. As águas com pior qualidade permitem apenas os usos menos exigentes, enquanto as com maior qualidade permitem a existência de usos mais exigentes. No Brasil é adotado o enquadramento dos corpos hídricos por classes de qualidade, definidas através de um pacto da sociedade e da articulação entre o Sistema Nacional de Meio Ambiente – SISNAMA e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SINGREH. O enquadramento faz com que os padrões de qualidade estabelecidos para cada classe sejam formados pelos padrões mais restritivos dentre todos os usos contemplados naquela classe. Assim, foram estabelecidas classes de qualidade para as águas doces, salobras e salinas (CONAMA, 2005), buscando assegurar às águas qualidade compatível com os usos mais exigentes a que forem destinadas. O enquadramento dos corpos d'água não deve ser entendido como uma simples classificação, mas também como um instrumento de planejamento, devendo estar baseado tanto no seu estado atual quanto nos níveis de qualidade que deveriam possuir ou ser de maneira a atender às necessidades estabelecidas (ANA, 2007). O enquadramento determina também o tipo de tratamento necessário para cada classe de água que possa ser destinada ao abastecimento para consumo humano.

A água destinada para consumo humano deve ser potável e a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde – MS, publicada em 2011, trata do padrão de potabilidade e dos procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano. Essa portaria traz as definições de sistemas de abastecimento de água, soluções alternativas de abastecimento e soluções alternativas individuais de abastecimento e estabelece que “*toda água destinada ao*

*consumo humano, distribuída coletivamente por meio de sistema ou solução alternativa coletiva de abastecimento de água, deve ser objeto de controle e vigilância da qualidade da água” e que “toda água destinada ao consumo humano proveniente de solução alternativa individual de abastecimento de água, independentemente da forma de acesso da população, está sujeita à vigilância da qualidade da água”* (BRASIL, 2011b). As definições adotadas pela portaria são as seguintes:

- Sistema de abastecimento de água para consumo humano: instalação composta por um conjunto de obras civis, materiais e equipamentos, desde a zona de captação até as ligações prediais, destinada à produção e ao fornecimento coletivo de água potável, por meio de rede de distribuição;
- Solução alternativa coletiva de abastecimento de água para consumo humano: modalidade de abastecimento coletivo destinada a fornecer água potável, com captação subterrânea ou superficial, com ou sem canalização e sem rede de distribuição;
- Solução alternativa individual de abastecimento de água para consumo humano: modalidade de abastecimento de água para consumo humano que atenda a domicílios residenciais com uma única família, incluindo seus agregados familiares;
- Controle da qualidade da água para consumo humano: conjunto de atividades exercidas regularmente pelo responsável pelo sistema ou por solução alternativa coletiva de abastecimento de água, destinado a verificar se a água fornecida à população é potável, de forma a assegurar a manutenção desta condição;
- Vigilância da qualidade da água para consumo humano: conjunto de ações adotadas regularmente pela autoridade de saúde pública para verificar o atendimento a esta portaria, considerados os aspectos socioambientais e a realidade local, para avaliar se a água consumida pela população apresenta risco à saúde humana.

A água potável deve estar em conformidade com os padrões microbiológico, físico-químico, organoléptico, de turbidez e radioativo, estabelecidos nos anexos da Portaria nº 2.914 do MS, cabendo às Secretarias de Saúde dos Municípios exercerem a vigilância da qualidade da água em sua área de competência, com o acompanhamento das Secretarias de Saúde dos Estados e do Ministério da Saúde.

## 2 POLÍTICAS PÚBLICAS E O ACESSO À ÁGUA NO SEMIÁRIDO

Políticas Públicas são ações suscitadas pelo Estado voltadas a atender determinadas necessidades públicas, ou seja, o conjunto de atividades dos governos federal, estadual ou municipal que atuam diretamente ou através de delegação e que influenciam a vida dos cidadãos. As Políticas Públicas podem ser de caráter social, como as relacionadas com educação, emprego, habitação, renda, saneamento, saúde, etc., macroeconômicas como, por exemplo, as ligadas a temas cambiais, industriais e monetárias, ou ainda podem tratar de questões agrícolas, científicas, culturais, etc. O ciclo das Políticas Públicas é concebido como o processo de formulação, implantação, acompanhamento e avaliação (GELINSKI; SEIBEL, 2008). Pode-se classificar as políticas públicas em quatro tipos (LOWI, 1972): distributivas, regulatórias, redistributivas e constitutivas. As políticas constitutivas, também chamadas de estruturadoras, são as que “*determinam as regras do jogo e com isso a estrutura dos processos e conflitos políticos, isto é, as condições gerais sob as quais vêm sendo negociadas as políticas distributivas, redistributivas e regulatórias*” (FREY, 2000). Partindo dessa classificação elaborada por Theodor Lowi, podem-se considerar os seguintes critérios para definir o tipo de atuação das políticas públicas (TEIXEIRA, 2002):

1. Em relação à natureza ou grau da intervenção:
  - a. Estruturais – buscam interferir em relações estruturais como renda, emprego, propriedade, etc. Dois exemplos de políticas estruturais são a definição do valor do salário mínimo e os incentivos para aumentar a produção industrial do país e a geração de empregos;
  - b. Conjunturais ou emergenciais – objetivam combater uma situação imediata, de maneira sintomática. Programas de caráter assistencialista de combate à fome que forneçam alimento, mas não ataquem as causas da fome são exemplos de políticas conjunturais.
2. Quanto à abrangência dos possíveis benefícios:
  - a. Universais – para todos os cidadãos, ou seja, são encaradas como direitos da população. O Sistema Único de Saúde - SUS, por ter como diretriz a universalidade do acesso de toda a população aos seus serviços, pode ser incluído nessa categoria;
  - b. Segmentais – para um segmento da população, caracterizado por um fator determinado (idade, condição física, gênero etc.). A obrigatoriedade da educação

fundamental para toda a população em idade escolar e a gratuidade no transporte coletivo público urbano para maiores de 65 anos podem ser considerados exemplos desse tipo de política;

- c. Fragmentadas – destinadas a grupos sociais dentro de cada segmento. Visando atender a obrigatoriedade do ensino fundamental de toda a população em idade escolar, o Programa Bolsa-Escola está direcionado à população de baixa renda e, por isso, é um exemplo de uma política fragmentada.
3. Quanto aos impactos que podem causar aos beneficiários, ou ao seu papel nas relações sociais:
- a. Distributivas – visam distribuir benefícios relacionados ao oferecimento de serviços do estado e equipamentos, em geral financiados pela sociedade por meio de um orçamento público. Correm o risco de sofrer instrumentalização pelo clientelismo. Alguns exemplos de políticas distributivas são as limpezas de córregos, a pavimentação e iluminação pública de ruas e a oferta de equipamentos para deficientes físicos, como cadeiras de rodas;
  - b. Redistributivas – visam redistribuir recursos entre os grupos sociais: buscando certa equidade. Retiram recursos de um grupo para beneficiar outros, o que pode provocar conflitos. A reforma agrária e a progressividade na cobrança de impostos como o IPTU são exemplos de políticas redistributivas;
  - c. Regulatórias – visam definir regras e procedimentos que regulem o comportamento dos atores, buscando atender interesses gerais da sociedade.

O caráter e o conteúdo das Políticas Públicas são dependentes da relação entre a sociedade civil e o Estado. A definição de Estado é alvo de muita discussão e diversas concepções podem ser utilizadas, dependendo do foco e dos objetivos de cada estudo. Para o presente trabalho, pode-se considerar Estado como o conjunto das instituições responsáveis pela organização, administração e controle social de uma nação, com poder soberano para governar um povo dentro de um determinado território. Por outro lado, pode-se definir Sociedade Civil como tudo aquilo que não é Estado, dentro de uma nação, ou seja, a esfera das relações sociais não reguladas pelo Estado (BOBBIO, 1986). Pela definição empregada, estão incluídas aí todas as instituições e organizações cívicas em que cada indivíduo pode se associar ou se desligar por livre e espontânea vontade, como por exemplo: sindicatos e demais entidades profissionais, clubes cívicos, sociais e esportivos, cooperativas, corporações, instituições políticas, movimentos religiosos, grupos de defesa de interesses comuns, movimentos populares, etc.

Assim, definindo-se os conceitos de Estado e de Políticas Públicas, é possível se discutir o papel das mesmas no Desenvolvimento Sustentável das áreas rurais do Semiárido Brasileiro. Desenvolvimento Sustentável pode ser entendido como o desenvolvimento que “*atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade das gerações futuras atenderem as suas próprias necessidades*”. Esse conceito está expresso no documento conhecido como Relatório Brundtland – Nosso Futuro Comum, elaborado pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, em 1987. O documento frisa ainda que se deve atender “*sobretudo as necessidades essenciais dos pobres do mundo, que devem receber a máxima prioridade*” (WCED, 1991). Assim, o Desenvolvimento Sustentável é o modelo de desenvolvimento que, reconhecendo o caráter finito dos recursos naturais e a desigualdade social existente, leva em consideração a conexão entre sociedade, economia e meio ambiente para buscar um crescimento econômico que aconteça concomitantemente e em equilíbrio com a inclusão social e a proteção ambiental.

## **2.1 Histórico**

Para se entender a situação em que se encontram as áreas rurais do Semiárido e o papel que o Estado pode exercer na proposição e implantação de Políticas Públicas visando melhorias na qualidade de vida da população e o desenvolvimento sustentável da região, é necessário traçar um histórico das ações do Estado em relação à seca no sertão do Semiárido.

Segundo os registros históricos, é grande o número de secas ocorridas na região hoje conhecida como Nordeste brasileiro. De 1559 a 2011, está registrada a ocorrência de 72 secas na região sendo que, dessas, 40 foram secas anuais e 32 plurianuais. Esse conjunto de eventos de seca totalizou 112 anos de seca, o que corresponde a mais de 24 % do total de anos no período (CARVALHO, 2012). Como as informações relativas aos dois primeiros séculos da colonização portuguesa no Brasil são fragmentárias e, provavelmente, subestimam a incidência das secas no período, pode-se fazer uma análise apenas para os séculos XVIII, XIX e XX. Esses dados indicam que houve 85 anos de secas durante esses 300 anos (GOMES, 2001), o que corresponde a 28 % de anos com incidência do fenômeno. Uma das secas mais catastróficas foi a ocorrida entre os anos de 1877 e 1879 que possivelmente deixou mais de 500 mil mortos, além de ter causado grande mortandade do gado. Durante o período do império, esse foi o episódio de seca de maior impacto e, para muitos historiadores, pode ser considerada a pior seca registrada para a região, que marcou o início da sistematização do

socorro, principalmente na forma da distribuição de alimentos. Pela primeira vez, o então governo imperial procurou se utilizar de racionalidade e sistematizar o enfrentamento do problema, nomeando uma comissão de cientistas para realização de estudos e propostas. Nos eventos de seca seguintes, como a seca de 1888-1889, a do ano 1898, as ocorridas no início do século, ocorreu a continuidade das intervenções emergenciais do governo, com foco principal na facilitação da emigração dos flagelados, além da distribuição de alimentos e criação de frentes de trabalho provisórias. Nas secas seguintes, além das ações já mencionadas, o governo iniciou a prática da criação de “campos de concentração”, locais onde os flagelados eram reunidos para receberem alimento e se abrigarem e que, devido às condições insalubres, acabavam tornando-se locais para propagação de doenças e epidemias. No século XX, severos eventos de seca continuaram a acontecer e a gravidade das mesmas passa a ser divulgada em todo o país. As obras contra a seca realizadas através do alistamento da população em frentes de trabalho e o auxílio aos flagelados tornam-se mecanismos para as elites dominantes locais conseguirem recursos, obras e outros benefícios. Criou-se, através da prática de políticas públicas distributivas e assistenciais, o que se convencionou chamar de “indústria das secas”. Assim, passa a ocorrer a manipulação política da seca, com a apropriação da condição de carência e fragilidade da região pelo discurso político, tornando a perpetuação dessa condição um fator estratégico para a manutenção do poder político e econômico.

Em 1909, buscando uma ação governamental mais permanente na luta contra os efeitos da seca, o governo republicano criou a primeira instituição federal com atuação no Nordeste, a Inspetoria de Obras Contra as Secas – IOCS, que deu grande ênfase a estudos cartográficos, perfuração de poços, construção de estradas e açudes públicos, além de fornecer subsídios para financiar a construção de açudes particulares. Isso foi um marco que representou uma mudança de abordagem na busca de soluções para os problemas relacionados à seca, a passagem da fase humanitária para a fase hidráulica. Em 1919, o IOCS sofreu reestruturação e teve o nome trocado para Inspetoria Federal de Obras Contra as Secas – IFOCS. Nessa época, também se destaca a realização de extenso estudo hidrológico, baseado em dados de numerosas estações pluviométricas e fluviométricas que haviam sido instaladas na região. No ano de 1936, foi definido o Polígono das Secas, espaço instituído como base para as ações de apoio governamental às vítimas das secas e que teve sua área redefinida e ampliada, 16 anos depois. Em 1945, o IFOCS teve o nome mudado para Departamento Nacional de Obras Contra as Secas – DNOCS que, em 1963, foi transformado em uma autarquia federal. Até o final da década de 1950, quando foi criada a Superintendência do Desenvolvimento do

Nordeste – SUDENE, essa foi a única instituição governamental federal responsável pelo socorro às populações flageladas e executora de obras de engenharia na região, tendo construído açudes, estradas, pontes, portos, ferrovias, campos de pouso, hospitais e usinas hidrelétricas, além da implantação de redes de energia elétrica e telegráficas.

Representando uma mudança de abordagem para o desenvolvimento regional, da mesma maneira que foi a criação do Banco do Nordeste do Brasil – BNB, em 1952, mas também como uma das respostas à seca de 1958, no ano seguinte ocorreu a criação da SUDENE, autarquia com o objetivo de promover e coordenar o desenvolvimento da região. Foi definida como sua área de atuação os estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia, além do norte de Minas Gerais. A SUDENE também assumiu a responsabilidade pela realização de alterações na definição da área do Polígono das Secas.

No final da década de 50, surge a denúncia da “indústria da seca”, quando Antonio Callado publicou uma série de reportagens revelando que latifundiários da região estavam transformando os problemas decorrentes da seca em um grande negócio (CABRAL, 2011), com a repercussão e utilização política da calamidade oriunda da seca para conseguir verbas para a construção de açudes, sistemas de irrigação e estradas que, mesmo realizados com investimento público para beneficiar toda uma população rural, acabavam construídos em grandes propriedades privadas, atendendo a uma elite que utilizava essas obras justamente para fortalecer seu poder.

Antes de 1959, podemos caracterizar as ações do Estado no enfrentamento da problemática das secas e de suas consequências para a população rural como predominantemente assistenciais e emergenciais. Entre 1960 e 1970, essas ações passaram a ser acompanhadas de ações programadas e centralizadas no âmbito da SUDENE enquanto que, a partir de 1970, as ações passam a ser implantadas por vários outros organismos federais, além da SUDENE e passa a haver decisiva interferência das orientações dos organismos internacionais de financiamento, que impunham programas tecnicamente bem elaborados, mas que muitas vezes fracassavam por traduzirem receitas importadas, que não estavam baseadas na realidade e anseios da população da região (CHACON, 2007). Buscava-se a diminuição das diferenças socioeconômicas existentes entre o Nordeste e o Centro-Sul, com o desenvolvimento do setor industrial do Nordeste, o que fortaleceu a classe empresarial da região. Buscava-se também a modernização do setor agrícola, o que pode ser representado pelos Programas de Desenvolvimento Rural Integrado – PDRI, programas ligados à Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura – FAO e financiados pelo Banco Mundial. Apesar de

não ocorrer mais as grandes mortandades que caracterizaram muitas das secas dos séculos anteriores, os pequenos agricultores e a população rural de baixa renda continuou a sofrer com os problemas relacionados às frequentes secas e a servir como justificativa para as ações emergenciais e a manutenção da chamada indústria da seca. Muitos projetos com foco no desenvolvimento da região datam dessa época, como o Programa de Redistribuição de Terras e Estímulos à Agroindústria do Norte e Nordeste – PROTERRA, o Programa Especial de Apoio ao Desenvolvimento da Região Semiárida do Nordeste – PROJETO SERTANEJO, o Programa de Desenvolvimento de Áreas Integradas do Nordeste – POLONORDESTE, o Programa de Aproveitamento de Recursos Hídricos do Nordeste – PROHIDRO e o Programa de Apoio às Populações Pobres das Zonas Canavieiras do Nordeste – PROCANOR. Em geral, essas intervenções do Estado beneficiaram pouco os trabalhadores rurais e contribuíram para a manutenção das relações de produção existentes na região (CHALOULT, 1985). Isso se deu pelos seguintes motivos:

- Os pequenos agricultores e os trabalhadores rurais não tiveram participação efetiva na elaboração, planejamento e execução desses programas;
- Não se atacou devidamente dois dos principais problemas da região, a estrutura fundiária e o acesso aos recursos hídricos;
- Faltou uma verdadeira integração e articulação entre os diversos programas e instituições responsáveis.

Grande parte dos recursos era utilizada na burocracia das agências executoras (PARREIRAS, 2007) e o que restava para as ações finais, muitas vezes era desviado para os grandes proprietários de terra e aplicados para outras funções que não as originalmente planejadas e que beneficiariam os pequenos e médios agricultores e pecuaristas (FREITAS, 2010). Os principais beneficiados por esses programas, ao invés dos pequenos e médios produtores rurais, foram os grandes latifundiários da região, que se beneficiam tanto dos recursos como da mão de obra dos sertanejos nas frentes de serviço.

Nos anos 1980, o Banco Mundial sugeriu que fosse discutida a possibilidade de se integrar os diversos programas com a implantação de um único programa de desenvolvimento rural para a região. Assim, foi criada uma Comissão Interministerial encarregada de articular as diversas instituições, definir diretrizes gerais e supervisionar o processo de elaboração desse novo projeto de desenvolvimento e, em 1985, foi criado o Programa de Desenvolvimento da Região Nordeste – PROJETO NORDESTE, que previa a execução de diversos subprogramas. Dentre eles, podemos destacar o Programa de Apoio ao Pequeno Produtor – PAPP, financiado pelo Banco Mundial e que tinha como objetivo “*propiciar a elevação dos níveis de emprego e*

*renda dos pequenos produtores agropecuários, pelo aumento da produção e da produtividade”* (BRASIL, 1985), entendendo por pequeno produtor rural, aquele que tenha como fonte predominante de rendimento familiar o desenvolvimento de atividades econômicas em propriedades cuja superfície total não ultrapasse 100 hectares. Projetos de Combate à Pobreza Rural – PCPRs foram desenvolvidos nos Estados do Nordeste baseados nas demandas de associações comunitárias, financiando pequenos projetos comunitários como pequenos sistemas de eletrificação, abastecimento de água, casa de farinha, etc. O Programa de Irrigação também sofreu um grande impulso, nessa época e, mesmo beneficiando principalmente os grandes proprietários de terras, apresentou alguns sucessos isolados. Mesmo com a continuidade das ações emergenciais, as políticas públicas de caráter mais permanentes estavam cada vez mais presentes. Por outro lado, ocorria uma competição entre essas duas estratégias, com as verbas e recursos humanos dos programas permanentes sendo transferidos para os de emergência nas épocas de estiagem, o que trazia ineficiência na obtenção dos resultados esperados (CHACON, 2007).

Por sua vez, visando o desenvolvimento energético, o resgate social e o aumento da cidadania para a população rural do país, um decreto de 1994 criou o Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios – PRODEEM, coordenado pelo Ministério das Minas e Energia. Dentre seus objetivos, destacam-se a instalação de microssistemas energéticos de produção e uso locais em comunidades carentes isoladas não servidas por rede elétrica, destinados a apoiar o atendimento das demandas sociais básicas e também o aproveitamento das fontes de energia descentralizadas para suprimento aos pequenos produtores, aos núcleos de colonização e às populações isoladas (BRASIL, 1994). Para cumprir estes objetivos, o PRODEEM utilizou largamente a energia solar fotovoltaica em sistemas de bombeamento de água e para energização de escolas e postos de saúde e, assim, difundiu a tecnologia fotovoltaica no meio rural do país (FEDRIZZI, 2003). Apesar de sua importância, o programa apresentou algumas falhas, em geral decorrentes da baixa participação dos usuários no processo de introdução da tecnologia, baixa capacitação dos instaladores, falhas na determinação das reais demandas da população e falta de um planejamento que assegurasse a realização de ações de manutenção e reposição. O PRODEEM pode ser considerado um projeto pioneiro e, como tal, permitiu um aprendizado e a realização de estudos e análises que propiciaram uma evolução nos procedimentos para a instalação de sistemas fotovoltaicos em localidades isoladas, viabilizando uma maior difusão dessa tecnologia no meio rural.

Nesse período após a redemocratização do país, organizações da sociedade civil e algumas instituições públicas de pesquisa e extensão, como a Empresa Brasileira de Pesquisa

Agropecuária - Embrapa e a Empresa Brasileira de Assistência Técnica e Extensão Rural – Embrater, passaram a aprofundar os estudos com a ideia de que é possível e necessário conviver com o Semiárido e que essa convivência deve se dar através da difusão de tecnologias alternativas e incorporação de conhecimentos locais, da utilização de espécies e variedades de culturas e animais resistentes às condições locais e do aproveitamento dos potenciais econômicos e ecológicos que o próprio Semiárido oferece. Uma nova concepção de desenvolvimento rural passou a ocorrer buscando uma maior participação dos atores representativos dos diversos segmentos da população local, ao mesmo tempo em que a questão ambiental ganhou importância, havendo um crescente fortalecimento dos movimentos sociais que defendiam a preservação do meio ambiente e um combate mais intenso aos problemas causadores de desigualdades setoriais, sociais e regionais. Em 1993, com o apoio dos governos estaduais e federal e como resultante das discussões ocorridas durante a realização da Conferência Internacional sobre Impactos de Variações Climáticas e Desenvolvimento Sustentável em Regiões Semiáridas - ICID, realizada em Fortaleza no ano de 1992, o Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura – IICA e a Fundação Grupo Esquel Brasil – FGEB coordenaram a formulação do Projeto Áridas. Esse projeto *“desenvolveu um conceito de desenvolvimento sustentável ampliado para atender às especificidades do Nordeste desde a preservação de seus frágeis ecossistemas até a inclusão de questões relacionadas à pobreza, à debilidade institucional e à descontinuidade das políticas públicas de desenvolvimento”* (BUARQUE; TAVARES, 2008). O Projeto Áridas contou também com a colaboração de diversas ONGs e recebeu recursos do segmento de Estudos do PAPP, provenientes de financiamento do Banco Mundial ao Governo Federal e resultou na publicação de cerca de 50 relatórios técnicos abordando os maiores problemas e propostas para a reorientação da ação do governo federal na região, com ênfase à questão da variabilidade climática e seu efeito sobre a economia, a população e o meio ambiente. Uma das principais preocupações do projeto foi a elaboração de uma metodologia para a consolidação de um corpo de ideias e princípios que servissem como fundamento para futuros projetos de desenvolvimento sustentável para a região (MCKAUGHAN, 2008).

A metodologia de planejamento para o desenvolvimento sustentável desenvolvida no âmbito do Projeto Áridas apresenta um componente técnico e outro participativo. O primeiro deve gerar estudos com informações descritivas, a sugestão de indicadores de desenvolvimento sustentável e recomendações de estratégias para alcançar as metas estabelecidas, enquanto o segundo deve reunir os resultados dos fóruns participativos, produzindo um quadro abrangente de planejamento com metas para o futuro e estratégias prioritárias. O elemento

participativo é fundamental, pois permite a obtenção de legitimidade de todo processo aos olhos dos atores e partes interessadas. Os passos principais da metodologia são os seguintes:

1. Definição de parâmetros, abrangência do projeto, atores envolvidos e recursos disponíveis. Nesse passo, devem ser determinadas as questões mais importantes a serem abordadas e estratégias para o envolvimento das diversas instituições que podem integrar o projeto;
2. Organização de Equipes Técnicas e Fóruns Participativos;
3. Realização de Pesquisa de Diagnóstico, que devem definir as variáveis principais a serem analisadas, indicadores de sustentabilidade e áreas de vulnerabilidade, além de verificar a existência de ações já ocorridas e tirar lições das mesmas;
4. Coordenação das Atividades Participativas, que devem permitir que os participantes discutam suas prioridades de desenvolvimento e negociem diferentes valores ou pontos de vista.
5. Elaboração de Projetos, considerando o cenário de futuro tendencial e suas vulnerabilidades;
6. Definição do Futuro Desejado em conjunto pelas equipes técnicas e participantes representativos da sociedade civil;
7. Integração dos Resultados dos estudos e das atividades participativas, de maneira a permitir uma comparação entre o cenário de futuro tendencial e o futuro desejado e a percepção das áreas de maior urgência;
8. Delineamento de Estratégias, considerando que o processo de planejamento do desenvolvimento sustentável deve ser realista e preciso em suas determinações;
9. Plano Atual de Discussão e Negociação, com a apresentação dos resultados das atividades do projeto, relatórios e recomendações para conhecimento e discussão.

Assim, os trabalhos do Projeto Áridas estabeleceram novas bases conceituais para as políticas públicas para o Semiárido, com uma perspectiva de sustentabilidade e de participação social, tornando-se referência para elaboração de políticas de desenvolvimento sustentável dentro da região. O programa Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca – PAN/Brasil representou uma importante aplicação dessa metodologia. Outros trabalhos marcados por processos participativos de planejamento, gestão e controle social foram desenvolvidos com o intuito de apoiar o combate à pobreza e o desenvolvimento rural sustentável com o conceito de convivência com o Semiárido. Um bom exemplo é o Projeto Dom Hélder Câmara, que foi coordenado pelo Ministério do Desenvolvimento Agrário a partir de em 2001, contando com empréstimo viabilizado pelo Fundo Internacional de

Desenvolvimento Agrícola – FIDA e com doação do Fundo Mundial para o Meio Ambiente – GEF.

Estava em curso uma mudança de paradigma: a questão não era mais o combate à seca, mas sim, o desenvolvimento e apropriação de técnicas e conhecimento para a convivência com o Semiárido. Não se trata mais apenas de programas emergenciais e de ações de combate à pobreza. Deve-se buscar o desenvolvimento sustentável com base na convivência com qualidade de vida no Semiárido brasileiro, o que requer políticas públicas permanentes e apropriadas (SILVA, 2003).

Ao mesmo tempo, ocorria um processo de reforma do Estado, com o discurso de ter como objetivo o redirecionamento de sua ação reguladora na economia de mercado e na área social com intuito de alcançar qualidade e produtividade do serviço público, buscando o controle dos resultados e baseando-se na descentralização. A reforma foi caracterizada pelo ajuste fiscal, abertura comercial, privatização de empresas estatais e flexibilização do mercado de trabalho. O setor privado e as organizações não governamentais – ONGs passaram a ter cada vez mais importância, enquanto o Estado passa a ter um caráter menos intervencionista e mais regulador, com a transferência de responsabilidade do Estado para o mercado ou o chamado “terceiro setor” e o repasse de recursos públicos para o âmbito privado. A Constituição Federal de 1988, ao estabelecer princípios para a prática da democracia participativa, trouxe grande crescimento para o campo de ação da cidadania e do controle social.

Em 1997, com a promulgação da Lei nº 9.433, é estabelecida uma nova política para os recursos hídricos que busca a descentralização dos processos decisórios através do fortalecimento das práticas de participação social e a criação de Comitês de Bacia, espaços que devem “*promover o debate das questões relacionadas a recursos hídricos e articular a atuação das entidades intervenientes*” (BRASIL, 1997). Os comitês de bacia são órgãos colegiados consultivos e deliberativos de gerenciamento, que possibilitam uma maior participação no processo de negociação entre as diferentes demandas sociais. Os comitês devem contar com a participação de representantes do governo, da sociedade civil e dos usuários de água e atuar como fórum de decisão no âmbito de cada bacia hidrográfica, que passa a ser considerada a unidade territorial para o planejamento, gerenciamento e implantação da Política Nacional de Recursos Hídricos. Importante ação iniciada em 1998, o Subprograma de Desenvolvimento Sustentável de Recursos Hídricos para o Semiárido Brasileiro – PROÁGUA/Semiárido foi um projeto que, ao desenvolver ações estruturantes e promover o fortalecimento das instituições envolvidas com a gestão de recursos hídricos na região do Semiárido, buscou “*garantir a ampliação da oferta de água de boa qualidade, com*

*a promoção do uso racional desse recurso, de tal modo que sua escassez relativa não continue a constituir impedimento ao desenvolvimento sustentável da região”* (ANA, 2005b). Com financiamentos do Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento – BIRD e do Japan Bank International Cooperation – JBIC, além de recursos da União e dos Estados da região e coordenado pela Agência Nacional de Águas – ANA e pela Secretaria de Infraestrutura Hídrica do Ministério da Integração Nacional – SIH/MI, o PROÁGUA/Semiárido seguiu uma filosofia descentralizadora de ações e gestão participativa dos sistemas, apresentando diversos resultados positivos como a construção de sistemas de abastecimento de água em cidades e áreas rurais e a construção de Sistemas Simplificados de Abastecimento de Água, beneficiando cerca de 930.000 habitantes da região com essas ações. A preocupação principal, nesse sentido, mais do que a reservação de água, foi a sua distribuição, de maneira a aumentar o acesso da população a esse recurso fundamental à vida. Com isso, um dos resultados fundamentais alcançados foi a redução dos índices de doenças de veiculação hídrica e da mortalidade infantil nas comunidades beneficiadas. É importante salientar que aproximadamente metade da população beneficiada pelas ações desse programa vive em comunidades isoladas ou em pequenas aglomerações urbanas de 20 mil a 50 mil habitantes, onde cerca de 50% dessas famílias sobreviviam com renda mensal menor do que um salário mínimo. Além disso, o programa elaborou diversos estudos ambientais e de disponibilidade hídrica, realizou o treinamento de representantes das Associações de Usuários de Água e de técnicos do Sistema Nacional de Recursos Hídricos, dentre outras ações. O êxito do PROÁGUA/Semiárido fez com que, em 2006, acontecesse sua expansão para o restante do país, com a criação do PROÁGUA/Nacional.

No campo do saneamento rural, surgem no Nordeste brasileiro programas com parcerias entre governo, instituições financeiras internacionais e companhias de saneamento, em que os sistemas de água e esgoto implantados deveriam ser gerenciados pelas associações de moradores locais. Os programas pioneiros foram o realizado no Ceará, o Sistema Integrado de Saneamento Rural – SISAR e o realizado na Bahia, a Central de Associações Comunitárias para Manutenção de Sistemas de Abastecimento de Água – CENTRAL. Logo se seguiram o Programa Saúde e Saneamento Básico – PROSAR, no Piauí e o Programa de Apoio ao Desenvolvimento Sustentável a Zona da Mata de Pernambuco – PROMATA. Esses programas visavam não somente a expansão dos serviços de saneamento, mas também novas formas de organização da população, com o estímulo ao processo participativo e à criação, organização e desenvolvimento das associações de moradores. A Lei do Saneamento Básico promulgada em 2007, além de reconhecer o saneamento básico como um dever da União,

autorizou e previu a prestação dos serviços públicos de saneamento básico por cooperativas ou associações em localidades *“de pequeno porte, predominantemente ocupada por população de baixa renda, onde outras formas de prestação apresentem custos de operação e manutenção incompatíveis com a capacidade de pagamento dos usuários”* (BRASIL, 2007a). Assim, ganhou cada vez mais força o novo paradigma para as políticas públicas direcionadas às questões do Semiárido, que indicam não mais o “combate à seca”, mas a convivência com a mesma e também um envolvimento cada vez maior da sociedade civil. Instituições de pesquisas como a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa, através do Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido – CPATSA, aprofundaram seus estudos e consolidaram a ideia de “convivência com o Semiárido”, oferecendo alternativas e tecnologias para a população viver no meio rural com dignidade e sustentabilidade. Diversas ONGs, como a Diaconia, a Cáritas Diocesana e a Articulação Semiárido Brasileiro – ASA, que é um fórum que engloba mais de mil entidades da sociedade civil organizada, desenvolveram em parceria com o poder público um conjunto de experiências para obtenção e reservação de água para consumo humano, produção de alimentos, uso doméstico e dessedentação animal. Assim, diversos projetos e ações buscando o equacionamento das questões relativas ao acesso à água e ao desenvolvimento sustentável da região do Semiárido passam a ser realizados através de esforços colaborativos das diversas esferas do poder público e de órgãos não governamentais. Essas ações têm como base as ideias agrupadas na Declaração do Semiárido – DSA, documento elaborado por organizações integrantes da ASA durante a Terceira Conferência das Partes da Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação – COP3, realizada em Recife no ano de 1999 e que tem como alguns de seus fundamentos a atuação da sociedade civil, o manejo sustentável dos ecossistemas e a quebra do monopólio da terra, água e meios de produção.

Em 2005, sob a coordenação do Ministério da Integração Nacional – MI, foi lançado o Plano Estratégico de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido – PDSA, que faz um diagnóstico dos problemas encontrados no Semiárido, um resumo das ações e programas executados e o panorama das ações em andamento na região. O PDSA busca articular as diversas ações derivadas de distintos Projetos e Programas destinados ao Semiárido, tendo como objetivo geral o crescimento econômico regional sustentável, com inclusão social e redução das desigualdades entre o Nordeste Semiárido e o restante do país, além de discutir a questão do financiamento e a importância do acompanhamento contínuo das ações que integram as políticas públicas estabelecidas para a região (BRASIL, 2005). Ao mesmo tempo em que era elaborado e lançado o PDSA, foi formulado o Programa de Desenvolvimento Integrado e

Sustentável do Semiárido – CONVIVER, buscando “*diminuir a vulnerabilidade da região, aumentando sua autonomia mediante a inserção produtiva de seus habitantes de forma sustentada e articulada com ações de combate à pobreza, de promoção de segurança alimentar e de infraestrutura hídrica*” (BRASIL, 2009a). O CONVIVER tem como público alvo cerca de 22 milhões de pessoas residentes na região do Semiárido e é desenvolvido por meio de uma ação coordenada entre o Ministério da Integração Nacional e outros ministérios, em articulação com governos estaduais e municipais das áreas afetadas pela seca, com ênfase na execução de projetos de aproveitamento de recursos hídricos, tendo como estratégia de implantação a criação de instâncias locais para a definição de prioridades, fiscalização e avaliação sobre os resultados dos programas. Ou seja, as ações devem se iniciar através de iniciativas de organização social e gestão participativa, capacitação, estruturação e organização de arranjos produtivos locais.

Os últimos anos foram caracterizados por inúmeras ações de políticas públicas coordenadas pelo governo federal, de gestão descentralizada e compartilhada entre a União, estados e municípios e que vêm apresentando importantes resultados na luta contra a miséria e na melhoria da qualidade de vida da população rural, no contexto da convivência com o Semiárido dentre os quais, podemos citar:

- Bolsa Família: programa de transferência direta de renda que beneficia famílias em situação de pobreza e de extrema pobreza em todo o país. A transferência de renda promove o alívio imediato da pobreza, enquanto os condicionantes para o repasse reforçam o acesso a direitos sociais básicos nas áreas de educação, saúde e assistência social. Ações e programas complementares buscam propiciar aos beneficiários conseguir superar a situação de vulnerabilidade. O Programa Bolsa Família foi criado em 2004, com o intuito de unificar os procedimentos de gestão e execução das ações de transferência de renda de programas anteriores criados entre os anos de 2001 e 2003, como o Programa Nacional de Renda Mínima vinculada à Educação - Bolsa Escola, o Programa Nacional de Renda Mínima vinculada à Saúde - Bolsa Alimentação, o Programa Nacional de Acesso à Alimentação - PNAA e Programa Auxílio-Gás;
- O Programa de Aquisição de Alimentos - PAA: programa que busca promover o acesso a alimentos em quantidade, qualidade e regularidade necessárias à população em situação de insegurança alimentar e promover a inclusão social e econômica no campo por meio do fortalecimento da agricultura familiar. Esse programa resultou de uma reformulação do PNAA e tem como meta o beneficiar tanto fornecedores quanto

consumidores de alimentos, pois a aquisição de alimentos é feita diretamente de agricultores familiares ou de suas organizações, estimulando os processos de agregação de valor à produção;

- Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar – PRONAF: programa que financia projetos individuais ou coletivos que gerem renda aos agricultores familiares, com baixas taxas de juros. Esses financiamentos podem ser destinados para o custeio da safra, atividades agroindustriais, investimento em máquinas, equipamentos ou infraestrutura. Um de seus principais componentes é o conhecido como Garantia-Safra, que é um seguro para agricultores familiares com baixa renda familiar mensal e que garante uma renda mínima às famílias que perderam sua safra por motivo de seca ou excesso de chuvas;
- Programa Luz para Todos: programa que busca a universalização do acesso e uso da energia elétrica no campo, acabando com a exclusão elétrica no país através da extensão desse serviço para mais milhões de pessoas do meio rural. O programa trabalha com a ideia de que o acesso à energia elétrica é um vetor de desenvolvimento social e econômico, contribuindo para a redução da pobreza e aumento da renda familiar facilitando a integração dos programas sociais do governo federal, além do acesso a serviços de saúde, educação, abastecimento de água e saneamento. Muitos beneficiados recebem desconto de 100 % na tarifa de energia, enquanto os demais são beneficiados pela Tarifa Social, de acordo com o consumo de energia. Atenção especial é destinada à população que vive de forma isolada. Propiciar a implantação de sistemas de bombeamento de água para consumo próprio e irrigação de cultura de subsistência é um dos grandes benefícios desse programa.

Para que os programas de elevação da renda e erradicação da pobreza obtenham sucesso, é de fundamental importância que se garanta o suprimento sustentável de água da população. Existe uma relação direta entre a pobreza e a inconstância do abastecimento de água potável. Muitas vezes, a falta de acesso à água potável em quantidade e de qualidade adequadas é não apenas um indicador de pobreza, mas sua própria causa (MUGAMBI; KEBREAB, 2006). Nesse sentido, um bom aproveitamento dos recursos hídricos disponíveis é de fundamental importância, representando soluções sustentáveis e adaptadas à região. Dependendo das condições de cada local, pode-se elencar uma série de alternativas para o aproveitamento de mananciais que permitam oferecer segurança hídrica para a população e condições dignas para a convivência com o Semiárido, além do aproveitamento da água de mananciais

subterrâneos e da construção de açudes. Dentre essas alternativas, podemos citar (ASA, 2008):

- Captação e reservação da água de chuva em cisternas rurais;
- Barragens subterrâneas construídas em áreas de baixio e leitos de riachos, garantindo a presença de água nos meses secos em poços escavados no leito da barragem;
- Barragens sucessivas construídas no leito de rios, permitindo aumentar o nível de água nos poços escavados nos baixios próximos ou mesmo a perenização de rios temporários;
- Implantação de Barreiros Trincheira de Lona, de maneira a reservar água para ser usada em irrigações de pequena escala e para dar de beber aos animais;
- Construção de pequenos açudes sucessivos, conhecidos como barraginhas, de maneira a segurar a água das enxurradas e garantir sua infiltração no solo. Ao mesmo tempo em que ajuda a aumentar o nível da água dos poços, isso diminui os danos causados pelas enxurradas.

Em relação às políticas públicas para o abastecimento de água da população rural do Semiárido, também estão em andamento diversos programas, que vêm aumentando o acesso dessa população à água em quantidade e qualidade adequadas, propiciando o crescimento da segurança hídrica das pessoas que vivem nessa região.

## **2.2 Programa Água Doce - PAD**

Resultando do resgate e aperfeiçoamento do Programa Água Boa, implantado em 1996 pela Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente – SRH para desenvolver técnicas de dessalinização da água, foi lançado em 2004 o Programa Água Doce – PAD. Elaborado de forma participativa durante o ano de 2003, o PAD é coordenado pela Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano do Ministério do Meio Ambiente, em um arranjo institucional que conta com a parceria de instituições federais, estaduais e municipais, além de organizações da sociedade civil, buscando contribuir para a garantia de acesso à água de boa qualidade e em quantidade adequada para a população do Semiárido. O PAD tem como objetivo *“o estabelecimento de uma política pública permanente de acesso à água de boa qualidade para o consumo humano, promovendo e disciplinando a implantação, a recuperação e a gestão de sistemas de dessalinização ambiental e socialmente sustentáveis para atender, prioritariamente, as populações de baixa renda em localidades difusas do*

*Semiárido*” (BRASIL, 2012a). Em relação ao Programa Água Boa, o PAD incorporou cuidados com a destinação dos concentrados salinos gerados no processo de dessalinização, previsão de manutenção preventiva e gestão dos sistemas de dessalinização, de maneira a evitar impactos ambientais negativos, a perda na qualidade das águas tratadas e a desativação de equipamentos.

Entre os anos de 2005 e 2009, ocorreu a fase de consolidação do programa. Nessa etapa, dentre outros objetivos, buscou-se a descentralização da operação com o estímulo à participação dos estados nas atividades do programa e o desenvolvimento de pesquisas que aprofundassem o conhecimento da utilização dos equipamentos de dessalinização e aproveitamento do rejeito, atividade em que a Embrapa/CPATSA desempenhou importante papel. As principais atividades desenvolvidas nessa etapa foram:

- Estruturação das coordenações estaduais;
- Execução de atividades de mobilização social e sustentabilidade ambiental;
- Capacitação de técnicos nos Estados e de operadores nas comunidades;
- Compra de equipamentos;
- Otimização de sistemas produtivos;
- Implantação de unidades demonstrativas;
- Celebração de convênios.

Em 2009, após a etapa de consolidação, o PAD foi implantado, estruturado em seis componentes:

- Gestão: visa dar treinamento e suporte administrativo e técnico para implantação do Programa, com apoio ao gerenciamento, formação de recursos humanos, consolidação de centros de referência e realização de diagnósticos técnicos e ambientais, além da operacionalização e manutenção dos sistemas;
- Estudos/Pesquisas/Projetos: busca o aperfeiçoamento dos sistemas e o desenvolvimento de soluções para aproveitamento de concentrados, como sua utilização na irrigação de plantas halófitas<sup>2</sup> forrageiras locais e na criação de peixes como a tilápia rosa;
- Sustentabilidade Ambiental: esse componente, coordenado pela Embrapa Meio Ambiente, tem como objetivo a avaliação de riscos socioambientais das comunidades

---

<sup>2</sup> Plantas halófitas são as que apresentam tolerância e realizam seu ciclo de vida em ambientes com elevada concentração salina, enquanto as plantas que apresentam decréscimo de produção e crescimento com a elevação da concentração salina são conhecidas como glicófitas. Já as miohalófitas são as plantas que toleram a salinidade do solo até certo limite, a partir do qual passam a se comportar como glicófitas.

de maneira a escolher quais podem ser atendidas pelo programa. Além disso, realiza o monitoramento da qualidade ambiental com o foco na salinidade do meio e também oficinas de treinamento sobre manutenção e cuidados para manter a qualidade da água dessalinizada nas comunidades;

- Mobilização Social: componente que tem como um de seus principais objetivos contribuir para o estabelecimento de bases sólidas de cooperação e participação social na gestão dos sistemas de dessalinização, buscando garantir o funcionamento dos dessalinizadores a longo prazo. Esse trabalho passa pelo reconhecimento e respeito às estruturas de organização social e identificação das lideranças locais;
- Sistema de Dessalinização: esse componente tem como objetivos instalar novos sistemas de dessalinização e restaurar equipamentos de dessalinização já instalados e que se encontram quebrados, ou funcionando precariamente. Nos dois casos, são instalados tanques de contenção do concentrado gerado no processo, a fim de evitar sua destinação inadequada.
- Unidade de Aproveitamento do Concentrado: esse componente tem como objetivo a escolha e utilização de tecnologias adequadas para o aproveitamento do rejeito em sistemas produtivos locais, tanto em Unidades Demonstrativas quanto em Unidades Produtivas. Um sistema de produção integrado foi desenvolvido pela Embrapa/CPATSA e conta com a aquicultura em tanques onde ocorreu a reservação do concentrado e o aproveitamento do efluente desses tanques, enriquecido pela matéria orgânica do estrume dos peixes, na irrigação de plantas halófitas para a produção de feno. No caso é utilizada a da Erva-Sal (*Atriplex numulária*), que produz forragem utilizada para a engorda de caprinos e ovinos.

O PAD já instalou e recuperou diversos sistemas de dessalinização, beneficiando várias comunidades. A água é obtida de poços tubulares com água salobra ou salina, tratada nos dessalinizadores para a produção de água potável, que é distribuída à comunidade através de chafarizes, com a recomendação de garantia de fornecimento de cinco litros diários por pessoa. Deve haver especial cuidado para evitar a contaminação da água após a coleta e durante o transporte e o armazenamento.

### 2.3 Programa Um Milhão de Cisternas - P1MC

O Programa Um Milhão de Cisternas - P1MC resultou de uma proposta elaborada pela Articulação Semiárido Brasileiro – ASA, em 1999, para a construção de cisternas de placas para o armazenamento da água de chuva captada nos telhados das residências. Cada cisterna tem capacidade de armazenamento de 16.000 litros e é capaz de abastecer uma família de até cinco pessoas, no período de seca. Em 2001, foi firmada parceria entre a ASA e o Ministério do Meio Ambiente – MMA, para o desenvolvimento de projeto piloto para a construção das primeiras 500 cisternas e a Agência Nacional de Águas financia a construção de 12.400 sistemas. Em 2003, por meio da Secretaria Nacional de Segurança Alimentar e Nutricional – SESAN, o Ministério do Desenvolvimento Social e Combate à Fome – MDS passou a apoiar e financiar o programa. A meta do P1MC é beneficiar com água potável para beber e cozinhar cerca de cinco milhões de pessoas da região semiárida, formando uma infraestrutura descentralizada de abastecimento com capacidade para 16 bilhões de litros de água. O público alvo do programa são as famílias residentes de forma permanente na área rural, com renda até meio salário mínimo por membro da família, que não tenham acesso ao sistema público de abastecimento de água e estejam inscritas no Cadastro Único para Programas Sociais do Governo Federal. As cisternas tem um custo médio de cerca de R\$ 2.800,00 (BRASIL, 2013a)<sup>3</sup> e são construídas com placas de cimento pré-moldadas feitas pela própria comunidade. Como contrapartida, as famílias beneficiadas ajudam na construção, que é feita por pedreiros locais, formados e capacitados pelo P1MC.

A execução do P1MC é coordenada pela ASA, em parceria com o governo federal, governos estaduais e municípios, além de agências de cooperação, empresas privadas, pessoas físicas e ONGs, como a Diaconia. Além de promover a democratização do acesso à água, o P1MC busca provocar mudanças sociais, sanitárias, políticas e econômicas na região semiárida, como a diminuição da incidência de doenças como verminoses e diarreias, o fim da necessidade das pessoas caminhar grandes distâncias em busca de água e mesmo o fortalecimento da autoestima e a cidadania da população.

Do início do programa até setembro de 2013, já foram construídas mais de 550 mil sistemas financiados pelo MDS. Mas a questão não se encerra com a construção das cisternas. São necessários cuidados no que diz respeito à qualidade da água armazenada. Nesse sentido,

---

<sup>3</sup> No mesmo número do Diário Oficial da União (Nº 240, publicado em 11 de dezembro de 2013), estão publicadas também instruções operacionais que trazem os seguintes custos médios para outras Tecnologias Sociais de Acesso à Água: Cisterna Calçadão de 52 mil litros = R\$ 12.400,00; Barreiro Trincheira Familiar = R\$ 8.250,00; Barragem Subterrânea = R\$ 13.400,00.

Agentes Comunitárias de Saúde do município são responsáveis para dar apoio e orientação. A recomendação do programa PIMC é que o tratamento da água seja feito fora da cisterna, pingando-se duas gotas de hipoclorito em cada litro de água colocada em potes e filtros, dentro de casa. Para o caso de impossibilidade da realização da cloração, as famílias são orientadas a ferver a água e fazer a sua filtração em filtro de barro com velas. Mesmo assim, as cisternas precisam receber cuidados. Na construção, estas devem ter sua face externa pintada, de preferência na cor branca e sua localização deve ser distante de galinheiros, currais e fossas. Periodicamente, devem ser realizadas limpezas e verificações da presença de rachaduras e problemas com as tampas das cisternas, que deve contar com telas para proteção de todas as áreas de entrada ou saída. Da mesma maneira, devem ser feitas limpezas e manutenção periódica do sistema de coleta. É aconselhada a adoção do procedimento de descarte da primeira descarga, jogando-se fora os primeiros litros de água de chuva coletados, após os períodos de estiagem. Também são necessários cuidados com a operação de retirada da água da cisterna, evitando-se o uso de baldes e cordas utilizados também para outros fins. Por fim, o procedimento ideal sugere a realização de um processo de filtração antes do tratamento da cloração, de maneira a evitar a presença de matéria orgânica na água, pois essa pode reagir com o cloro, originando produtos carcinogênicos conhecidos como trihalometanos.

#### **2.4 Programa Uma Terra e Duas Águas - P1+2**

Com o objetivo de, através do acesso e manejo sustentáveis da terra e da água para produção de alimentos, promover a segurança alimentar e nutricional e a geração de emprego e renda às famílias agricultoras, o Programa Uma Terra e Duas Águas - P1+2 foi implantado no ano de 2007. O P1+2 é uma realização da ASA, em parceria com o Ministério do Desenvolvimento Social e Combate à Fome - MDS e tem também como princípio fomentar a construção de processos participativos de desenvolvimento rural no Semiárido brasileiro. O próprio nome do programa já traz seus conceitos principais, a terra para produção e o abastecimento por dois tipos de água: – a água potável, para consumo humano e a água para produção de alimentos. As famílias a serem atendidas pelo programa são escolhidas de acordo com uma série de critérios sociais, além da verificação de características locais como solo e formação rochosa, tipo de produção e formas de manejo. O P1+2 pode ser considerado uma segunda fase do PIMC, em que as cisternas de 16 mil litros seriam a “primeira água”, a água para consumo

humano. Garantida a água para beber e cozinhar, a "segunda água" é a que vai servir para a produção na lavoura e para matar a sede dos animais. Para tanto, o P1+2 prevê a construção de cisternas-calçadão com capacidade de armazenar 52 mil litros de água de chuva e, dependendo das condições locais, de outras opções para o fornecimento de água para a produção como barragens subterrâneas, cisternas-enxurrada, barraginhas, bombas d'água populares, barreiros trincheira, tanques de pedra, etc.

O programa, que conta também com ações de intercâmbios entre agricultores e técnicos de diferentes localidades, capacitação de pedreiros das comunidades e sistematização do conhecimento através de um processo coletivo de recuperação e registro de práticas locais de convivência com o Semiárido, já construiu 14.050 mil cisternas-calçadão, 1.575 cisternas-enxurrada, 660 barragens subterrâneas, 631 tanques de pedra, 502 bombas d'água popular, 2.214 barreiros trincheira e 963 barraginhas, de 2007 a julho de 2013 (ASA, 2013).

## **2.5 Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Água - Água para Todos**

Como parte Integrante do programa do governo federal conhecido como Plano Brasil Sem Miséria, o Programa Água para Todos é um conjunto de ações do Governo Federal que busca universalizar o amplo acesso e uso de água para populações que não dispõem desse serviço público essencial. Mantendo parcerias e convênios que caracterizaram os programas P1MC e P1+2, o Programa Água para Todos incorporou e fortaleceu esses programas, buscando acelerar a universalização do acesso à água para consumo humano e para a produção em áreas rurais, através da instalação de cisternas, sistemas simplificados de abastecimento de água, kits de irrigação e barreiros, dependendo das especificidades de cada região. O programa dá continuidade às ações e segue os requisitos dos programas P1MC e P1+2, com a diferença da opção pela utilização de cisternas de polietileno. Apesar de essa opção poder implicar um menor envolvimento das comunidades na implantação dos sistemas, a justificativa é de que as cisternas de polietileno são mais duráveis e de instalação mais rápida, além de possibilitar um maior número de instalações do que seria possível fazer apenas com as cisternas de placas. Por outro lado, seu custo é quase o dobro do das cisternas de placas, ficando por volta de R\$ 5.000,00 considerando-se a instalação completa (BRASIL, 2013b).

O Programa Água para Todos tem como prioridade o atendimento à população em situação de extrema pobreza, observando as seguintes diretrizes (BRASIL, 2011c):

- Fomento à ampliação da utilização de tecnologias, infraestrutura e equipamentos de captação e armazenamento de águas pluviais;
- Fomento à implantação de infraestrutura e equipamentos de captação, reservação, tratamento e distribuição de água, oriunda de corpos d'água, poços ou nascentes e otimização de seu uso;
- Articulação das ações promovidas pelos órgãos e instituições federais com atribuições relacionadas às áreas de segurança alimentar, saúde e meio ambiente, infraestrutura hídrica e de abastecimento público de água e regulação do uso da água.

A gestão do programa, que conta com recursos federais, estaduais e de organismos internacionais de financiamento é realizada pelo Ministério do Desenvolvimento Social e Combate à Fome – MDS, Ministério do Meio Ambiente – MMA, Ministério das Cidades – MCIDADES, Fundação Banco do Brasil - FBB, Ministério da Saúde – MS, Fundação Nacional da Saúde – FUNASA, Agência Nacional de Águas - ANA e Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba – CODEVASF, com a coordenação da Secretaria de Desenvolvimento Regional do Ministério da Integração Nacional - SDR/MI.

## **2.6 Programa de Desenvolvimento do Setor Água – INTERÁGUAS**

O Programa de Desenvolvimento do Setor Água – INTERÁGUAS busca melhorar a articulação e coordenação das ações relacionadas à questão hídrica no país, com foco no planejamento, gestão, fortalecimento institucional e na elaboração de estudos e projetos. Apesar de possuir abrangência nacional, o programa destina atenção especial para as regiões mais carentes e áreas e temas onde a água é forte condicionante para o desenvolvimento sustentável, de maneira a contribuir para a redução das desigualdades regionais. O INTERÁGUAS teve início em 2012 e tem um prazo de execução de cinco anos, contando com recursos do Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento - BIRD e uma contrapartida nacional oriunda do Ministério do Meio Ambiente - MMA, Ministério das Cidades - MCIDADES e Ministério da Integração Nacional - MI, além da Agência Nacional de Águas – ANA, que são os executores nacionais do programa, que tem dentre seus objetivos a melhoria do acesso e da eficiência dos serviços de água no país, com ênfase especial a *“áreas onde as questões da vulnerabilidade dos pobres à água e os riscos são maiores, especialmente no nordeste”* (ANA, 2010). O programa é dividido em cinco componentes,

sendo que o 3º Componente - Abastecimento de Água e Saneamento é o que prevê ações mais diretamente relacionadas ao saneamento e à problemática da universalização do acesso à água, como a elaboração de projetos de saneamento, estudos de abordagem inovadora para expansão dos serviços em áreas carentes, divulgação de boas práticas e também disseminação tecnológica (BRASIL, 2012b).

### 3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO

#### 3.1 Energia para o bombeamento de água de poços

Os sistemas de bombeamento necessitam de energia para conseguirem elevar a água dos poços até seu reservatório. Existem diversas opções de fonte de energia para tanto, cada qual mais adequada para as características de cada poço, como altura manométrica, vazão de bombeamento, capital disponível, etc. Assim, por exemplo, pode-se utilizar a queima de combustível, energia mecânica de origem animal ou eólica, eletricidade, etc. Para os sistemas de bombeamento com maior rendimento, a utilização de energia elétrica é uma boa opção, desde que a mesma esteja disponível. Esse pode ser um problema em áreas rurais pois essas, devido à baixa densidade populacional, características de demanda, limitado poder aquisitivo da população e necessidade de grandes investimentos em redes de distribuição, há uma dificuldade na expansão da eletrificação tradicional. Assim, uma alternativa seria a utilização de sistemas descentralizados com geração fotovoltaica, eólica, diesel ou ainda sistemas híbridos. A opção por diesel traz inconvenientes como a necessidade frequente de compra e transporte de combustível, além da emissão de poluentes.

Estima-se que existam em todo o Nordeste mais de 150.000 poços tubulares perfurados, muitas vezes construídos sem acompanhamento de profissional habilitado e sem registros adequados de perfis construtivos, qualidade da água, vazões, etc. (CPRM, 2001). A partir desse diagnóstico, o Serviço Geológico do Brasil – CPRM definiu como prioridade fazer um amplo cadastramento dos poços existentes na região. Assim, em 2003, em um trabalho realizado em convênio com o Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios - PRODEEM, foram estudados o número, a distribuição e as características, além de ser feito um diagnóstico da situação dos poços existentes nos estados do nordeste do Brasil, região em que se encontra a maior parte da região semiárida (CPRM; PRODEEM, 2003). O objetivo do programa era “*Localizar poços não instalados ou paralisados no Semiárido brasileiro para promover o aumento da oferta de água utilizando bombeamento com energia gerada através de células fotoelétricas (energia solar)*”. Os poços tubulares cadastrados e estudados totalizavam 21.662, dentre os quais, somente pouco mais da metade se encontrava em operação. Mais de 3.700 poços se encontravam paralisados e outros 3.651 poços ainda não haviam sido instalados, enquanto 2.331 estavam abandonados (**Tabela 1**).

**Tabela 1 – Poços cadastrados no SIAGAS e situação dos mesmos<sup>4</sup>**

Fonte: (CPRM; PRODEEM, 2003)

Estado	Número de Poços Cadastrados				
	Em operação	Paralisados	Não Instalados	Abandonados	Total
<b>AL</b>	803	411	253	279	<b>1.746</b>
<b>BA</b>	1.323	413	609	314	<b>2.659</b>
<b>CE</b>	229	95	156	45	<b>525</b>
<b>PB</b>	3.509	1.112	937	487	<b>6.045</b>
<b>PE</b>	2.417	790	352	422	<b>3.981</b>
<b>PI</b>	1.604	218	396	246	<b>2.464</b>
<b>RN</b>	1.934	563	688	448	<b>3.633</b>
<b>SE</b>	139	120	260	90	<b>609</b>
<b>Total</b>	<b>11.958</b>	<b>3.722</b>	<b>3.651</b>	<b>2.331</b>	<b>21.662</b>

O estudo também mostrou que apenas cerca de 29% dos poços não instalados estudados estão a menos de 100 metros da rede de distribuição de eletricidade e pouco mais de 20% deles estão a uma distância entre 100 metros e 1 km, enquanto mais da metade desses poços estão a uma distância de mais de 1 km da rede elétrica. Dessa maneira, passa a ser interessante a utilização de fontes alternativas de energia elétrica para a instalação e funcionamento das bombas. Nesse sentido, a utilização do bombeamento fotovoltaico surge como boa opção, principalmente para a região do Semiárido, que apresenta abundante recurso solar disponível, de acordo com dados do Atlas Solarimétrico do Brasil (GRUPO FAE-DEN-UFPE, 1997). Nos sistemas fotovoltaicos de bombeamento, a energia elétrica necessária para o funcionamento das bombas é fornecida por geradores fotovoltaicos adequadamente dimensionados e instalados no local.

<sup>4</sup> O diagnóstico realizado adotou para critério de classificação a seguinte definição: Os poços classificados como “em operação” foram aqueles que estavam funcionando normalmente. Os classificados como “paralisados” estavam temporariamente sem funcionar, devido a problemas relacionados à manutenção ou quebra de equipamentos. Os “não instalados” representam aqueles poços que foram perfurados e tiveram um resultado positivo, mas no entanto, ainda não haviam sido equipados com sistemas de bombeamento e distribuição. E, por fim, os “abandonados” representam os poços que não apresentaram possibilidades de produção de água, como os poços secos e obstruídos (CPRM, 2005).

### 3.2 Geração fotovoltaica

A geração fotovoltaica se aproveita das características dos materiais semicondutores em relação às suas bandas de energia – banda de condução, bandas de valência e bandas proibidas. O comportamento elétrico dos sólidos depende diretamente da configuração de suas bandas de energia e das características das bandas proibidas. A banda de valência é o mais alto dos intervalos de energias eletrônicas que seriam preenchidos pelos elétrons à temperatura de zero absoluto. Já a banda de condução é o próximo intervalo de energia eletrônica permitido acima da banda de valência e onde os elétrons são considerados elétrons livres. Já as bandas proibidas são os intervalos de energia eletrônica entre as bandas de valência e bandas de condução e que não podem ser ocupados pelos elétrons. Quanto maior for a banda proibida entre a banda de valência e a banda de condução, maior será a característica isolante do material. Nos semicondutores, entre a banda de valência e a banda de condução, há uma banda proibida relativamente pequena, de forma que bastam pequenas quantidades de energia térmica ou mesmo a excitação causada por um fóton para promover elétrons à banda de condução.

O semicondutor mais comumente utilizado para a fabricação de módulos fotovoltaicos é o Silício. Os semicondutores são dopados com elementos doadores de elétrons, como o fósforo (dopante n) e elementos receptores de elétrons, como o boro (dopante p) e arrançados em células fotovoltaicas de maneira a formarem uma junção entre eles (junção p-n) e, conseqüentemente, uma diferença de potencial. O semicondutor que recebeu o dopante n possui elétrons fracamente ligados, de maneira que o fornecimento de relativamente pouca energia possibilita a geração de elétrons livres que, com a presença de condutores arrançados ligando as duas partes, gera uma corrente elétrica em corrente contínua. Essas células são arrançadas em módulos de maneira a se obter a tensão e corrente desejadas (LORENZO, 1994). O conjunto de módulos, conexões, proteções, suportes, etc. constitui um gerador fotovoltaico.

A geração fotovoltaica pode se dar em usinas fotovoltaicas, que são sistemas de grande porte e que, integradas a uma rede de distribuição, produzem uma grande quantidade de energia elétrica em um único local, podendo ser consideradas um mercado em expansão. Nos últimos anos, diversos novos parques de geração foram instalados e, atualmente, China, Alemanha, Estados Unidos, Índia e Espanha são os líderes mundiais em potencial instalado. As usinas fotovoltaicas costumam injetar na rede elétrica o total de sua produção.

Já os sistemas menores podem ser conectados à rede, a exemplo das usinas fotovoltaicas, ou sistemas isolados e autônomos, localizados no próprio local de consumo. Os sistemas conectados à rede apresentam a particularidade de que, nos momentos em que o consumo é maior do que a geração, a demanda é atendida com a complementação da energia da rede elétrica convencional, enquanto que, nos momentos em que o consumo é menor do que a geração, a energia sobressalente é entregue à rede elétrica. Para tanto, são utilizados inversores para transformar em corrente alternada a energia gerada em corrente contínua. O primeiro registro de uma residência em que foi instalado um sistema de geração fotovoltaica conectado à rede data de 1978, na Universidade do Texas (LORENZO, 1994). A utilização dessa opção depende de regras e regulamentação estabelecidas na legislação do setor elétrico de cada país.

Já os sistemas isolados, são normalmente instalados em áreas sem acesso à rede elétrica convencional, geralmente zonas rurais. Neste caso, é necessário realizar a acumulação da energia gerada nas horas de sol para sua utilização posterior, como nos períodos noturnos. Assim, um sistema de geração fotovoltaica isolado inclui geradores fotovoltaicos, acumuladores de energia como baterias eletrolíticas de chumbo-ácido e um controlador de carga, podendo atender uma residência ou mesmo uma pequena comunidade, com a instalação de minirrede de distribuição.

A geração fotovoltaica ocorre nas chamadas células fotovoltaicas, mas a unidade básica comercial de geração fotovoltaica é conhecida como módulo ou painel fotovoltaico. Este tem como função isolar do exterior, proteger e fazer um arranjo entre diversas células fotovoltaicas, de maneira a ajustar os níveis de tensão e corrente aos valores desejados, além de proporcionar rigidez mecânica ao conjunto. A aquisição de um módulo fotovoltaico é feita em termos de sua tensão e potência nominal. A potência nominal de um módulo solar fotovoltaico é a potência de pico obtida sob condição padrão de teste<sup>5</sup>, com intensidade de radiação incidente perpendicular à superfície igual a  $1.000 \text{ W/m}^2$ . Assim, os módulos são caracterizados pelo valor de sua potência nominal, cuja unidade é expressa em watt-pico – Wp.

Já as baterias eletrolíticas utilizadas em sistemas isolados são caracterizadas por sua tensão e carga. A carga da bateria pode ser considerada a sua capacidade de fornecer determinada corrente por um período de tempo e é expressa em ampère-hora – Ah. Definida a tensão necessária, as baterias eletrolíticas são adquiridas em termos de sua carga em Ah.

---

<sup>5</sup> As condições padrão determinam uma temperatura da junção da célula fotovoltaica =  $25^\circ\text{C}$ , admitindo uma variação de  $\pm 2^\circ\text{C}$ ; intensidade de radiação perpendicular à superfície =  $1000 \text{ W/m}^2$  e espectro solar = AM1,5.

### 3.3 Bombeamento fotovoltaico

A utilização de sistemas isolados de geração fotovoltaica destinados ao funcionamento de sistemas de bombeamento oferece a vantagem da eliminação das baterias do sistema, o que acarreta em diminuição do custo do sistema e eliminação dos problemas relacionados à reposição e descarte das mesmas. Nesse caso, com o correto dimensionamento do sistema de geração e das caixas d'água para acumulação da água bombeada e a utilização de conversor de frequência para adaptar o funcionamento do motor à geração fotovoltaica, a energia não é mais acumulada em baterias. Ao invés de acumular carga em baterias para viabilizar o funcionamento da bomba por mais tempo do que as horas de maior disponibilidade do recurso solar, acumula-se a água bombeada em reservatórios elevados, para uso posterior.

Diversos projetos institucionais já realizaram a instalação de sistemas de bombeamento fotovoltaico no Brasil. Segundo Fedrizzi (2003), os primeiros sistemas que se utilizaram dessa tecnologia foram instalados em 1981, mas só a partir de 1994 começou a acontecer um grande aumento do número de sistemas instalados. Em grande parte, isso se deu em função da criação do PRODEEM, Programa para o Desenvolvimento da Energia nos Estados e Municípios, tendo como principal objetivo *“Atender comunidades isoladas, não supridas de energia elétrica pela rede convencional, utilizando fontes renováveis locais em base autossustentável, de modo a promover o desenvolvimento social e econômico dessas localidades. A ação é direcionada para o atendimento energético de escolas, postos de saúde, centros comunitários, bombeamento d'água, etc.”* (BRASIL, 2002). A **Tabela 2** apresenta um levantamento dos sistemas de bombeamento fotovoltaico adquiridos até o ano de 2002 para serem instalados em comunidades rurais no Brasil.

**Tabela 2 – Sistemas de bombeamento fotovoltaico adquiridos até o ano de 2002**

Fonte: (FEDRIZZI, 2003)

<b>Instituição/Projeto</b>	<b>Unidades</b>	<b>Potência kWp</b>
De 1981 a 1984	150	93
MME-PRODEEM Fase I	42	77,9
MME-PRODEEM Fase II	179	212,6
MME-PRODEEM Fase III	224	164,5
MME-PRODEEM Fase Emerg.	800	235,2
MME-PRODEEM Fase IV	1.240	539,5
MCT-PTU / RDSM	29	4,5
MS-FUNASA	39	31,1
Cooperação Internacional	54	38,4
Gov. Bahia	62	34,8
Gov. Minas Gerais	168	125,5
Pref. Rio do Soto e Belém	6	5,4
Uso Privado	298	28,3
<b>Total</b>	<b>3.291</b>	<b>1.590,7</b>

A utilização da energia fotovoltaica continua em franca expansão, mas nos últimos anos, os maiores responsáveis por essa expansão, em termos de potência, foram os sistemas conectados à rede (ANEEL, 2008). Mesmo assim, sistemas isolados continuam a ser instalados no país, para o atendimento em regiões isoladas. A partir do ano de 2003, há uma lacuna nas publicações e literatura sobre o tema, no que diz respeito ao agrupamento e sistematização de dados que permitisse saber o total de sistemas de bombeamento fotovoltaico adquiridos após o ano de 2002. Sistemáticamente sistemas de bombeamento fotovoltaico vem sendo instalados no país, através de ONGs e da iniciativa privada, mas não existe um registro/catalogação dos mesmos. Um dos poucos exemplos de projeto institucional é o P & D CELPE 43-1111/2011, com sete sistemas de bombeamento fotovoltaico no município de Serra Talhada, no estado do Pernambuco (CELPE, 2013). Um dos entraves para

uma maior difusão dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento para o atendimento da população rural que vive afastada da rede de distribuição de energia é justamente a qualidade da água a ser bombeada. No caso de boa parte dos poços do Semiárido, um dos principais problemas encontrados está relacionado aos altos teores de sais dissolvidos na água.

O bombeamento fotovoltaico tem como principais vantagens, em relação à utilização de bombas a diesel:

- Utilizar um recurso renovável de energia;
- Autonomia em relação ao recurso energético;
- Suprimir constantes gastos com compra e transporte de combustível;
- Evitar a emissão de gases poluentes na geração;
- Eliminar a emissão de ruídos no gerador.

Comparando-se com a utilização de bombas a diesel, essa opção apresenta um alto custo de investimento inicial, mas analisando-se para toda a vida útil de cada projeto, o bombeamento fotovoltaico torna-se economicamente competitivo. É indicado para localidades não atendidas pela rede elétrica convencional, tanto mais quanto maior for a distância entre o poço e a rede de distribuição de energia elétrica e entre o poço e os pontos de venda de diesel.

Fedrizzi (2003) também realizou levantamento e análise dos principais problemas relacionados ao abastecimento de água a populações rurais remotas, com a utilização da tecnologia de bombeamento solar fotovoltaico. O diagnóstico indica que, em sua grande maioria, os problemas técnicos que ocorrem nesse tipo de sistema não estão relacionados diretamente ao gerador fotovoltaico, mas sim aos demais componentes elétricos e hidráulicos, além de problemas ocasionados pela deficiência na limpeza da bomba. O trabalho discute também questões referentes ao planejamento e à implantação de projetos de bombeamento fotovoltaico para o abastecimento de comunidades rurais dispersas, passando por questões como os arranjos institucionais relacionados à aquisição dos equipamentos e à construção de uma infraestrutura local, bem como aspectos organizacionais de introdução, uso e gestão da nova tecnologia. Conclui dizendo que, como condição básica para a sustentabilidade desses projetos ao longo do tempo, seja dada importância a todas as etapas de sua implantação, conhecendo-se as peculiaridades da população local, estudando as características do manancial disponível, proporcionando a organização, a capacitação e a participação dos usuários em todas as etapas do projeto, levantando corretamente a demanda e a expectativa de crescimento da mesma e estimando a demanda reprimida, realizando um correto

dimensionamento e configuração do sistema e comprovando as características dos equipamentos a serem instalados.

Um dos problemas mais graves encontrados nos sistemas de bombeamento fotovoltaico instalados no Brasil no âmbito dos programas institucionais dos Governos Federal, Estaduais e Municipais, é o fato de que os sistemas são comprados em forma de pacotes e “kits” padronizados. Essa prática prejudica a otimização do dimensionamento dos equipamentos. A vantagem dessa prática é a redução dos custos iniciais do projeto, mas em contrapartida, é grande a probabilidade de aumentar os custos a médio e longo prazo e ainda reduzir sua vida útil. Esses kits apresentam componentes específicos importados e de difícil aquisição no mercado nacional, o que dificulta a manutenção e encarece enormemente a reposição de peças e pode fazer com que um sistema de bombeamento fotovoltaico fique inoperante por longos períodos, além de diminuir a confiança dos usuários nessa tecnologia.

Assim, é recomendável buscar soluções em que se utilize nesses sistemas equipamentos mais padronizados como os desenvolvidos para a rede elétrica convencional. Nesse sentido, uma opção é a substituição dos equipamentos de condicionamento de potência tradicionais dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento por conversores de frequência que, por sua vez, irá proporcionar o uso de motobombas convencionais.

Visando aprofundar o estudo dessa questão, Brito (2003) realizou ensaios para diferentes conjuntos de motobombas e conversores de frequência. Cada combinação foi testada tendo como referência o ponto ótimo de operação de cada motobomba, verificando-se o rendimento médio (%) e a produção diária de água ( $m^3/\text{dia}$ ), em função da altura manométrica total (mca) e da irradiação diária ( $kWh/m^2$ ). Os resultados obtidos foram comparados em termos técnicos e econômicos com os obtidos para sistemas fotovoltaicos de bombeamento convencionais. A conclusão é que os sistemas de bombeamento fotovoltaicos com conversor de frequência apresentam um rendimento global semelhante ao de um sistema de bombeamento fotovoltaico convencional equivalente, mas apresentam a vantagem de utilizar equipamentos desenvolvidos para a operação com a rede elétrica comum, sendo que esses equipamentos representam uma tecnologia muito mais madura do que os equipamentos desenvolvidos exclusivamente para aplicações com a fonte fotovoltaica de energia.

Assim, pode-se concluir que um sistema de bombeamento fotovoltaico dotado de um conversor de frequência que possibilite a utilização de bombas centrífugas amplamente disponíveis no mercado nacional é mais adequado para a instalação e operação em localidades remotas do que um sistema de bombeamento fotovoltaico convencional importado. Tais sistemas apresentam-se como uma excelente alternativa para o bombeamento de água nos

poços distantes da rede de distribuição de energia localizados, por exemplo, na região rural do Semiárido brasileiro, área com abundância de radiação solar.

O Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo - LSF-IEE/USP, dentro do qual se desenvolveu o presente projeto de pesquisa, já atuou em diversos projetos que envolveram a instalação de sistemas fotovoltaicos de bombeamento, como os trabalhos desenvolvidos em comunidades ribeirinhas do oeste do Amazonas, assentamentos rurais da região do Pontal do Paranapanema e em comunidades caiçaras do Vale do Ribeira, essas duas últimas, no estado de São Paulo. Além disso, é comum que programas de eletrificação rural, como o PRODEEM e o Luz para Todos se utilizem de sistemas fotovoltaicos para o atendimento da população que vive em comunidades rurais isoladas, incluindo sistemas de bombeamento. A tecnologia de bombeamento fotovoltaico está tecnicamente consolidada e constitui uma das principais opções para o abastecimento de água em comunidades remotas.

## 4 SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO POR OSMOSE REVERSA

### 4.1 Salinidade e potabilidade da água

Outra questão a ser analisada quando se pretende utilizar a água de poços, é a salinidade da mesma, especialmente nos poços perfurados em embasamento cristalino ou próximos a zonas costeiras. Como se sabe, a água ingerida pelo ser humano deve possuir sais minerais para cumprir corretamente seu importante papel fisiológico. Mas quando a concentração de sais ultrapassa certo limite, a água passa a ser imprópria para o consumo e sua ingestão pode causar sérios problemas à saúde. A Resolução CONAMA nº 357 dispõe sobre a classificação dos corpos de água e traz as seguintes definições, em relação à salinidade (CONAMA, 2005):

I - águas doces: águas com salinidade igual ou inferior a 0,5 ‰ (500 mg/L);

II - águas salobras: águas com salinidade superior a 0,5 ‰ (500 mg/L) e inferior a 30 ‰ (30.000 mg/L);

III - águas salinas: águas com salinidade igual ou superior a 30 ‰ (30.000 mg/L).

Já em termos de sólidos totais dissolvidos - SDT, o anexo X da Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde estabelece como padrão de aceitação para consumo humano um limite máximo de 1.000 mg/L (BRASIL, 2011b).

Todas as águas naturais encontradas nos mananciais de abastecimento possuem, em maior ou menor grau, um conjunto de sais dissolvidos. Em geral, as águas subterrâneas possuem teores mais elevados de sais do que as águas superficiais, resultado da solubilização dos materiais presentes no solo e nas rochas. Alguns fatores determinam a quantidade e os tipos de sais presentes na água subterrânea, dentre os quais podemos citar:

- Clima da região;
- Meio percolado pela água;
- Tipo e velocidade do fluxo subterrâneo;
- Fonte de recarga do aquífero.

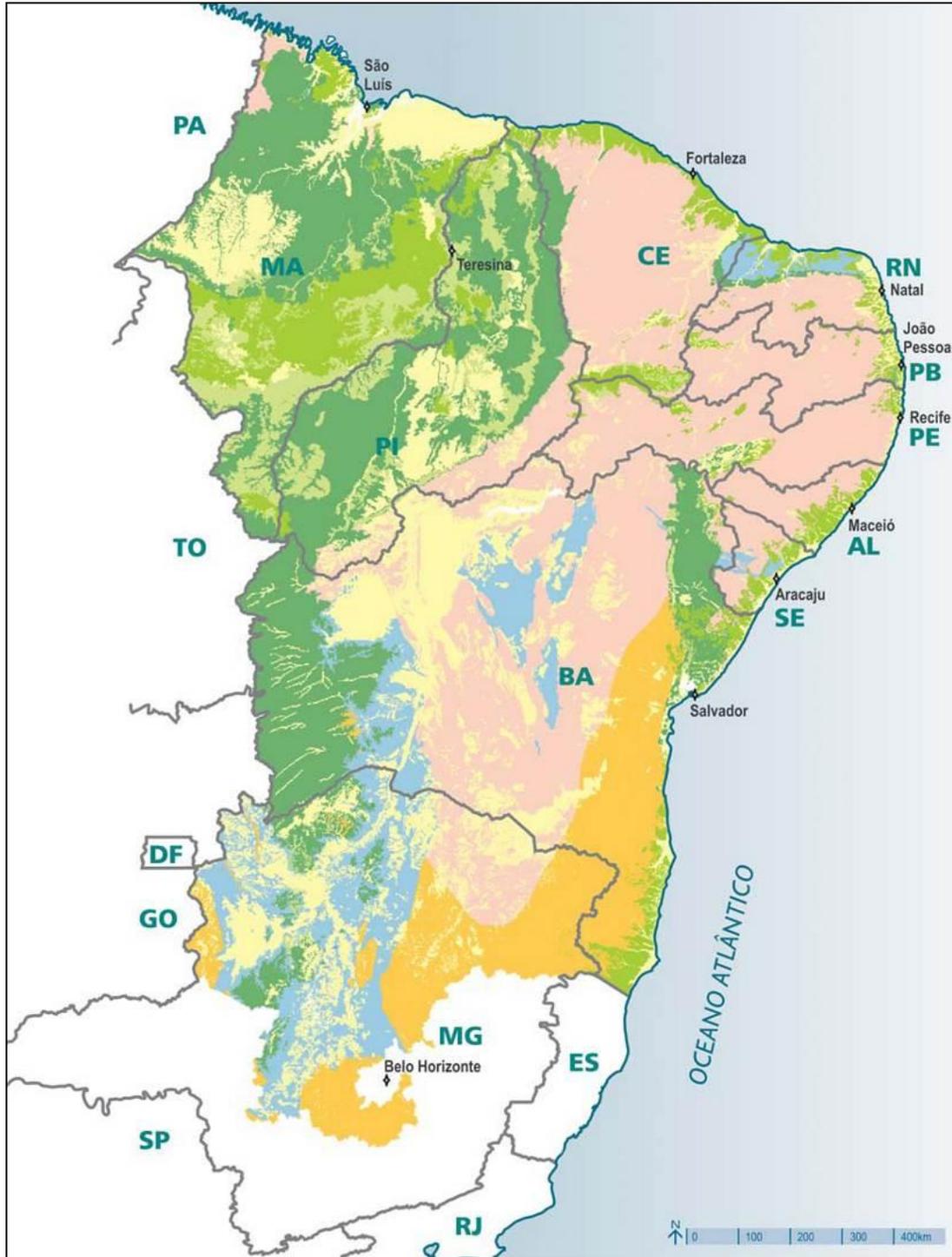
Nas áreas que apresentam elevado índice pluviométrico, ocorre uma maior recarga dos aquíferos e, portanto, uma maior renovação das águas subterrâneas e diluição dos sais. Já, em climas áridos e semiáridos, os baixos índices pluviométricos e os altos índices de evaporação levam a uma maior salinização do solo, causando também maior salinidade das águas que entram em contato com esse meio. O que impede uma salinização ainda maior do solo é o fato

de que, ao contrário de outras regiões semiáridas do mundo em que rios e bacias hidrográficas convergem para depressões fechadas, no Semiárido brasileiro a maior parte dos cursos d'água chegam ao mar, em algum período do ano (AB`SABER, 2012). Em terrenos cristalinos, pode acontecer também a salinização das águas que entram em contato com os feldspatos presentes nas rochas. No caso de uma renovação deficiente da água, como o que acontece no Semiárido onde, em geral, os solos são rasos e apresentam pequena capacidade de infiltração e alto escoamento superficial, esse efeito é potencializado (FEITOSA et al., 2008).

Rochas cristalinas, em termos gerais e em oposição ao conceito de rochas sedimentares, são o conjunto de rochas formado pelas rochas ígneas intrusivas, como o granito, rochas ígneas extrusivas, como o basalto e rochas metamórficas, como o mármore e a ardósia. Em terreno cristalino, as águas subterrâneas ocorrem preenchendo as zonas de fraqueza das rochas (fendas e fraturas) formando um aquífero fissural (COSTA et al., 2006). O aquífero fissural não apresenta parâmetros hidrodinâmicos constantes, devido às suas descontinuidades, precária homogeneidade e forte anisotropia. Nesses aquíferos, em geral, as zonas de fratura são as de maior interesse para a locação de poços.

Como a região do Semiárido brasileiro encontra-se em grande parte sobre o escudo cristalino, essa questão assume grande importância. O escudo cristalino do Semiárido brasileiro, mesmo reconhecido como de baixo potencial hidrogeológico e com problemas de salinização, tem um papel muito importante no abastecimento de sua população rural com água para consumo e uso na pecuária, principalmente nas regiões mais afastadas dos sistemas de abastecimento das cidades e dos grandes reservatórios superficiais presentes na região.

Na **Figura 3**, as regiões assinaladas com as cores rosa e laranja compõem o Domínio Fraturado Cristalino. A região assinalada com a cor rosa corresponde à área desse domínio onde se encontram os maiores problemas de salinização das águas. A área do Semiárido que se sobrepõe ao escudo cristalino é de 701.000 km<sup>2</sup>, sendo caracterizada por poços que apresentam uma vazão individual média de menos de 3 m<sup>3</sup>/h, profundidades entre 40 e 80 m e reservas exploráveis totais de 43,1 m<sup>3</sup>/s, ou seja, cerca de 155.000 m<sup>3</sup>/h (ANA, 2006).



**Figura 3 – Localização do escudo cristalino no Semiárido brasileiro**

Fonte: adaptado de (ANA, 2006)

Por conta dos problemas de salinização frequentemente encontrados nos poços perfurados em terreno cristalino do Semiárido brasileiro, o trabalho realizado pela CPRM em conjunto com o PRODEEM (CPRM; PRODEEM, 2003), também realizou um diagnóstico das concentrações de sais encontradas na água dos poços estudados. De 15.338 poços cuja água teve teor de sais determinado, 5.120 apresentaram água com uma concentração de sais entre 500 e 1.500 mg/L,

ou seja, água salobra. Outros 6.367 apresentaram uma concentração de sais ainda maiores que 1.500 mg/L. Apenas 3.851 poços contavam com água doce, o que corresponde a cerca de 25% dos poços estudados. Consequentemente, 75% dos poços apresentaram água com teor de sais que a caracterizam como água salobra ou salgada. Com isso, passa a ser importante o estudo de alternativas para a redução da salinidade, de maneira que a população possa ser beneficiada pela água desses poços.

Buscando a sistematização dos dados obtidos relativos aos poços perfurados e com a necessidade de se criar e manter um Cadastro Nacional de Poços contendo um banco de dados atualizado sobre os poços existentes no Brasil, o Serviço Geológico do Brasil - CPRM desenvolveu o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS. O SIAGAS visa proporcionar, dentre outros benefícios, subsídios e informações *“para ações que garantam a recuperação de poços desativados, aumentando a oferta hídrica nas regiões carentes e a integração das bases de dados de água, socioeconômica e de saúde, visando o direcionamento de políticas integradas para melhoria da qualidade de vida nas regiões do Programa Fome Zero”* (PEIXINHO; OLIVEIRA, 2004). Em dezembro de 2006, através da Moção nº 38, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH recomendou aos órgãos estaduais gestores de recursos hídricos, às secretarias de governos estaduais responsáveis pela gestão de recursos hídricos, à Secretaria de Recursos Hídricos do Ministério do Meio Ambiente, à Agência Nacional de Águas - ANA e aos usuários dos recursos hídricos subterrâneos, *“que promovam a adoção do SIAGAS como base nacional compartilhada para a armazenagem, o manuseio, o intercâmbio e a difusão de informações sobre águas subterrâneas”*. O SIAGAS possui versão online de acesso gratuito para realização de consultas e pesquisas.

Assim, em pesquisa realizada no SIAGAS no dia 27 de outubro de 2010, foi feita uma filtragem dos dados em termos de sólidos totais dissolvidos - SDT e condutividade elétrica da água de poços localizados no Semiárido brasileiro. Ambos os parâmetros são indicativos da salinidade da água. Muitos poços não tiveram esses parâmetros determinados, enquanto muitos outros tiveram análises ou apenas do SDT ou apenas da condutividade elétrica da água. Os dados foram filtrados para poços com SDT acima de 500 mg/L e condutividade elétrica acima de 835  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , ou seja, valores que indicam uma salinidade acima do mínimo para a água ser considerada salobra. Os dados sobre SDT dos poços que tiveram esse parâmetro determinado estão apresentados na **Tabela 3** enquanto os dados relativos à condutividade elétrica estão apresentados na **Tabela 4**.

**Tabela 3 – Dados do SIAGAS em relação ao SDT das águas dos poços que tiveram esse parâmetro determinado, em consulta realizada em outubro/2010**

<b>Estado</b>	<b>SDT &lt;= 500 mg/L</b>	<b>SDT &gt; 500 mg/L</b>	<b>Total de poços com parâmetro determinado</b>
<b>Alagoas</b>	128	27	<b>155</b>
<b>Bahia</b>	2.407	2.804	<b>5.211</b>
<b>Ceará</b>	305	785	<b>1.090</b>
<b>Maranhão</b>	0	0	<b>0</b>
<b>Paraíba</b>	17	112	<b>129</b>
<b>Pernambuco</b>	368	748	<b>1.116</b>
<b>Piauí</b>	9.406	2.004	<b>11.410</b>
<b>Rio Grande do Norte</b>	51	70	<b>121</b>
<b>Sergipe</b>	31	24	<b>55</b>
<b>Minas Gerais – Bacia do Jequitinhonha</b>	0	0	<b>0</b>
<b>TOTAL</b>	<b>12.713</b>	<b>6.574</b>	<b>19.287</b>

A análise da **Tabela 3** mostra que, dos poços que tiveram análise de SDT, pouco mais de 34% apresentaram SDT acima de 500 mg/L. Mas a maior parte das análises foi realizada no Piauí (74% das análises), estado cuja maior parte da área se encontra fora do Escudo Cristalino e, portanto, apresenta menos problemas de salinidade. Se excetuarmos o Piauí dessa análise, teríamos 7.877 poços analisados e 4.750 deles apresentando SDT acima de 500 mg/L, o que corresponde a mais de 60% dos poços. O estado do Maranhão também está fora do Escudo Cristalino e, inclusive, não tem qualquer área de seu território sobre a área do Semiárido, mas não foi realizada qualquer análise de SDT nesse estado.

**Tabela 4 - Dados do SIAGAS em relação à condutividade elétrica das águas dos poços que tiveram esse parâmetro determinado**

<b>Estado</b>	<b>Condutividade Elétrica <math>\leq 835 \mu\text{S/cm}</math></b>	<b>Condutividade Elétrica <math>&gt; 835 \mu\text{S/cm}</math></b>	<b>Total de poços com parâmetro determinado</b>
<b>Alagoas</b>	229	219	<b>448</b>
<b>Bahia</b>	3.442	5.473	<b>8.915</b>
<b>Ceará</b>	3.587	6.073	<b>9.660</b>
<b>Maranhão</b>	5.628	449	<b>6.077</b>
<b>Paraíba</b>	2.589	6.436	<b>9.025</b>
<b>Pernambuco</b>	3.202	5.237	<b>8.439</b>
<b>Piauí</b>	16.150	3.082	<b>19.232</b>
<b>Rio Grande do Norte</b>	1.903	3.270	<b>5.173</b>
<b>Sergipe</b>	1.221	390	<b>1.611</b>
<b>Minas Gerais – Bacia do Jequitinhonha</b>	1.258	234	<b>1.492</b>
<b>TOTAL</b>	<b>39.209</b>	<b>30.863</b>	<b>70.072</b>

Já a análise da **Tabela 4** traz que, dos poços que tiveram análises de condutividade elétrica, aproximadamente 44% apresentaram condutividade elétrica acima dos  $835 \mu\text{S/cm}$ . Da mesma maneira que foi feito com a análise dos dados de SDT, se o Piauí e o Maranhão forem excluídos dessa análise, teríamos 44.763 poços analisados e 27.332 apresentando condutividade elétrica acima dos  $835 \mu\text{S/cm}$ , o que corresponde a cerca de 61% dos poços.

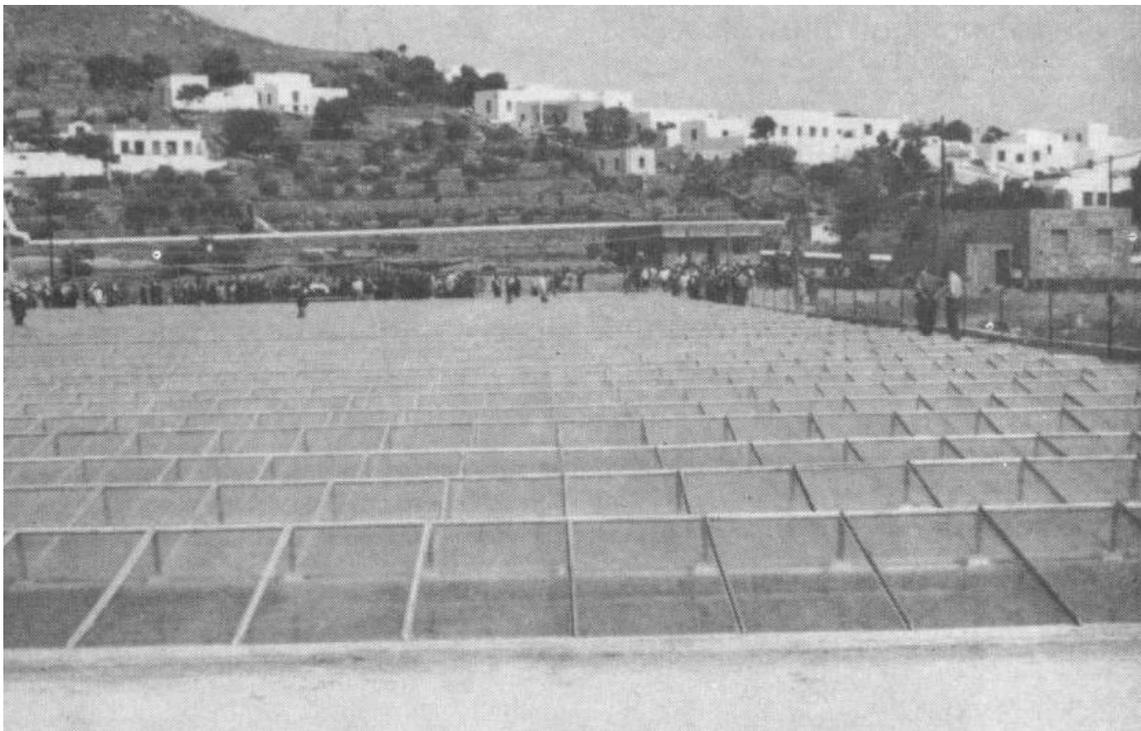
Assim, analisando-se tanto os dados de SDT quanto os de condutividade, que são coerentes entre si, pode-se concluir que cerca de 60% dos poços analisados apresentaram água com salinidade acima do mínimo para ser considerada água doce.

#### **4.2 Opções para dessalinização da água**

O processo de dessalinização é a solução para que a água dos poços que apresentem teor de sais acima do limite estabelecido pela OMS possa ser consumida pela população. Nas últimas décadas, muito se tem pesquisado e desenvolvido a respeito de sistemas de dessalinização. A

dessalinização pode se dar de diversas formas, dentre processos térmicos e processos por membrana.

Os processos térmicos são baseados na mudança de estado da água e, dentre eles, podemos destacar a destilação convencional, a destilação por efeito múltiplo ou por aplicação de baixas pressões e o congelamento. No caso da destilação, deve-se atentar ao fato de que sais minerais devem ser adicionados à água destilada obtida, pois essa é imprópria para o consumo. Os processos térmicos para dessalinização de água são altamente energo-intesivos, mas também podem ser adaptados para se utilizarem de recursos energéticos renováveis, como é o caso da destilação solar (**Figura 4**).



**Figura 4 - Foto da unidade de destilação solar da Ilha de Patmos – Grécia**

Fonte: (PINA, 2004)

Um destilador solar convencional funciona quando a radiação solar atravessa uma cobertura transparente que fecha um espaço situado sobre um tanque pouco profundo da água a ser dessalinizada. A radiação solar aquece a água a uma temperatura superior a da cobertura e esse gradiente térmico, mais o gradiente associado à pressão do vapor dentro do destilador provocam a evaporação da água e posterior condensação do vapor de água sobre a superfície da parte interior da cobertura transparente. O condensado escorre até canaletas de coleta, que a transporta até o depósito da água destilada. Uma das desvantagens dos destiladores solares é a necessidade de grandes áreas para seu funcionamento. Usualmente, para países tropicais,

encontram-se produções médias diárias de água entre três e cinco litros por metro quadrado (PINA, 2004).

Já os processos de membrana são baseados na capacidade dessas membranas separarem seletivamente os sais da água. De uma maneira geral, podemos entender uma membrana como uma barreira que separa duas fases e que restringe total ou parcialmente o transporte de uma ou várias espécies químicas presentes. (HABERT et al., 2006). Dentre os processos de separação por membranas, podemos destacar a eletrodialise e a osmose reversa. A eletrodialise se fundamenta na passagem da água por um recipiente contendo dois pólos alimentados por energia elétrica, além de sucessivas membranas semipermeáveis. Sob a influência do campo elétrico, os íons positivos e negativos das moléculas de sal dissociadas migram para os respectivos polos sendo separados da água pela ação das membranas (Figura 5).

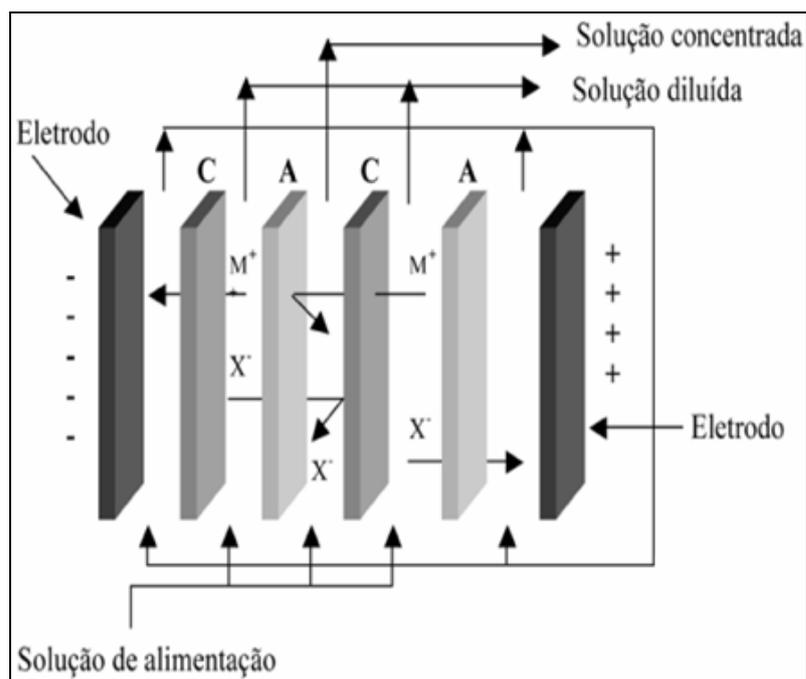


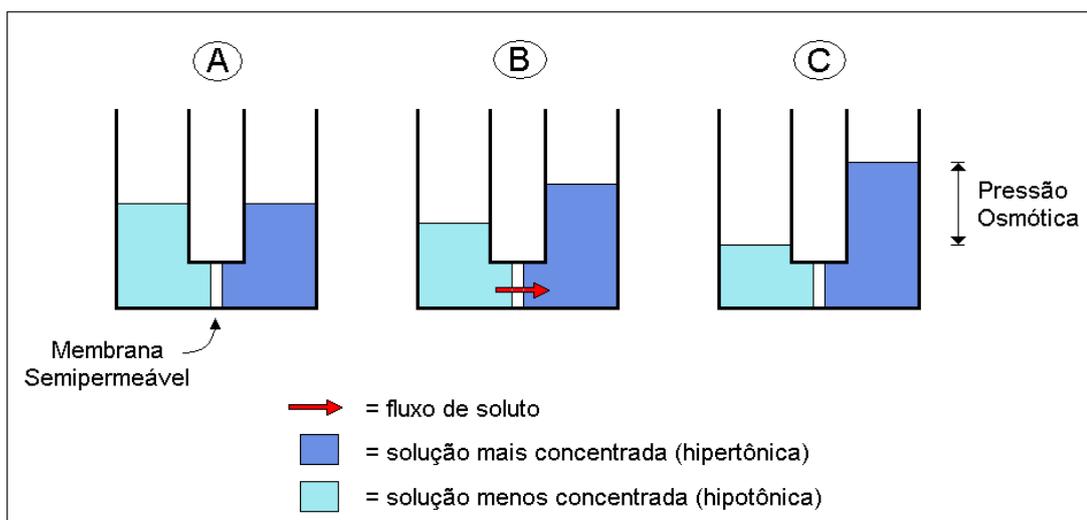
Figura 5 – Diagrama esquemático do processo de eletrodialise

Já na osmose reversa, o processo se baseia em pressurizar a água a ser tratada, fazendo-a passar através da membrana semipermeável, separando a água do soluto. A osmose reversa e a eletrodialise apresentam a vantagem de não necessitarem de aquecimento, além de poderem ser ajustados para oferecer como produto água com teor de sais adequado para o consumo humano. Os processos de dessalinização por membrana vêm encontrando cada vez mais competitividade e isso, em grande parte, pode ser explicado pela crescente utilização de membranas semipermeáveis em aplicações industriais que, por sua vez, vem proporcionando

uma contínua redução de custos causada pela maior escala de produção das membranas e pelo crescente desenvolvimento tecnológico. Os sistemas de dessalinização de menor escala empregam processos de membrana semelhantes aos utilizados em aplicações industriais ou de grande escala (PETER-VERBANETS et al., 2009), o que facilita a utilização dessa tecnologia em escala não industrial, como em pequenos sistemas de dessalinização para comunidades e residências do meio rural do Semiárido.

### 4.3 O fenômeno da osmose reversa

A osmose é um fenômeno natural que ocorre quando duas soluções de concentrações diferentes são separadas por uma membrana semipermeável, ou seja, uma membrana que dá passagem a moléculas de água, mas impedem a passagem de outras moléculas. Como o potencial químico da água em uma solução é menor do que no estado puro, haverá uma passagem da água pura através da membrana, sempre do meio hipotônico (menos concentrado em soluto) para o meio hipertônico (mais concentrado em soluto). Na **Figura 6**, está apresentado um esquema representativo do fenômeno da osmose. Em A, temos uma situação inicial onde duas soluções aquosas com concentrações diferentes encontram-se separadas por uma membrana semipermeável. Em B, pode-se observar a passagem do soluto do meio hipotônico para o meio hipertônico. Em C, o equilíbrio é alcançado e a diferença entre a pressão de cada coluna de solução representa a pressão osmótica.



**Figura 6 - Diagrama esquemático do processo de osmose**

A pressão osmótica de uma solução aquosa pode ser calculada por:

$$\Pi = i \times \frac{C}{M} \times R \times T \quad (1)$$

Onde:

$\Pi$  = pressão osmótica (MPa)

$i$  = número de íons produzidos na ionização do soluto

$C$  = concentração do soluto (g/L)

$M$  = massa molecular do soluto

$R$  = constante universal dos gases ( $8,3145 \times 10^{-3} \text{ l.MPa.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ )

$T$  = temperatura (Kelvin)

Pela fórmula apresentada, pode-se concluir que, para uma mesma temperatura e mesmo conjunto de sais dissolvidos na água, a pressão osmótica irá variar proporcionalmente com a concentração de sais.

Na osmose reversa, o fluxo osmótico normal é invertido através da aplicação de uma pressão do lado da solução mais concentrada maior do que a pressão osmótica (**Figura 7**), ou seja, a osmose reversa ocorre se  $\Delta P > \text{Pressão Osmótica}$ . Na **Figura 7**, em C está representada a situação em que  $\Delta P = \text{Pressão Osmótica}$ .

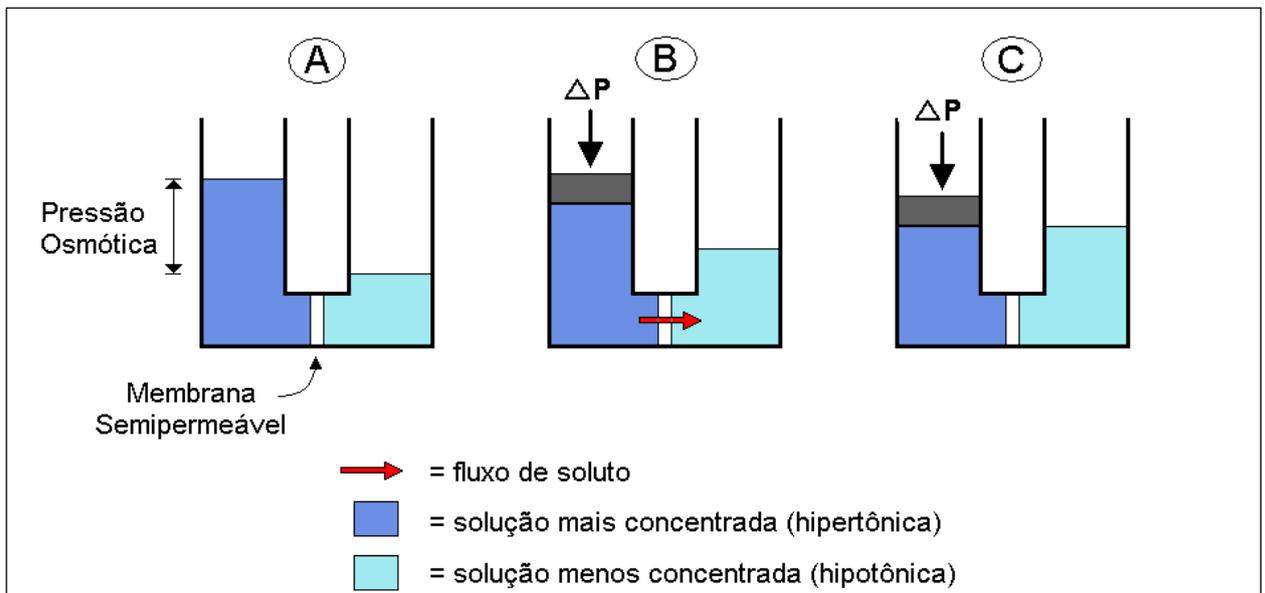


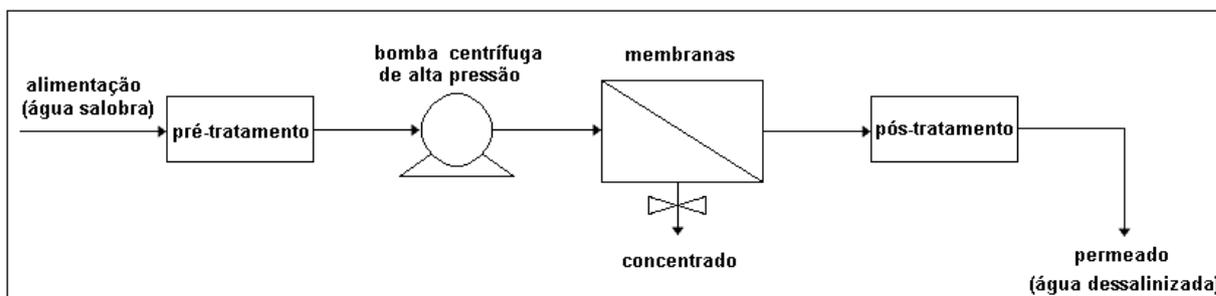
Figura 7 - Diagrama esquemático do processo de osmose reversa

#### 4.4 O Equipamento de osmose reversa

A osmose reversa é um processo que se utiliza da pressão hidráulica como força motriz para promover a separação e assim, uma bomba deve manter uma elevada pressão da água a ser dessalinizada, forçando a passagem da água através de uma membrana, que retém os solutos em quase sua totalidade (IGLESIAS, 1999). As pressões de trabalho variam entre 4 e 80 bar. As membranas utilizadas na osmose reversa apresentam poros com diâmetro menor que 0,001  $\mu\text{m}$ , sendo adequadas para reter até mesmo os íons monovalentes e, dessa maneira, podem ser consideradas membranas densas, ao invés de porosas. Assim, o mecanismo de separação não pode ser entendido como uma simples filtração, mas sim um processo de natureza difusiva que depende também da afinidade das diferentes espécies com o material da membrana, ou seja, um processo de adsorção/difusão. (HABERT et al., 2006). A osmose reversa é um processo contínuo em que o fluxo de alimentação é tangencial à membrana e em que nem todo o fluido de alimentação atravessa a membrana, produzindo um fluxo de concentrado e outro de permeado, que é a água dessalinizada. É necessária uma atenção especial com a deposição do concentrado, por causa de seus altos teores de sais que podem, por exemplo, causar a salinização do solo.

As membranas mais amplamente utilizadas para a osmose reversa são membranas poliméricas do tipo *thin film composite* (filme fino composto) e constituídas por uma camada suporte mais porosa e espessa de polisulfona obtida pelo processo de inversão de fases, sobre a qual se polimeriza uma camada ativa ultrafina de poliamida. A unidade operacional na qual as membranas são mantidas para uso é conhecida como módulo e é constituída pela membrana, a estrutura para suportar as pressões de trabalho e dispositivos de entrada e saída. Os módulos devem ser compactos e fornecer a maior superfície de membranas por unidade de volume e são projetados para assegurar a vazão de circulação da água a ser dessalinizada, além de evitar vazamentos. Na osmose reversa, geralmente são utilizadas membranas enroladas em espiral, ou seja, membranas planas enroladas ao redor de um tubo perfurado, com a utilização de espaçadores para formar os canais de escoamento e aumentar a turbulência do fluxo, de maneira a diminuir problemas de formação de depósitos sobre a membrana. Algumas das principais características que diferenciam os módulos de membranas enroladas em espiral dos demais tipos de módulos (de placas planas, de fibra oca e tubulares), são o alto grau de empacotamento das membranas (tipicamente, 1.000 metros quadrados de membrana por metro cúbico de módulo) e o fato do volume de fluido mantido no interior do módulo ser baixo. Um sistema completo de osmose reversa é composto pelos módulos arranjados em

vasos de pressão, bombas de alta pressão (preferencialmente bombas centrífugas), válvulas, tubulações, medidores de vazão, medidores de pressão, medidores de temperatura e dispositivos de segurança, além dos sistemas de pré-tratamento e pós-tratamento. Na **Figura 8**, pode-se ver um diagrama esquemático simplificado de um sistema de osmose reversa.



**Figura 8 - Diagrama esquemático simplificado de um sistema de osmose reversa**

As pressões envolvidas nesse tipo de sistema variam de 4 a 80 bar ou mesmo valores superiores, dependendo das condições de trabalho, principalmente a concentração da água de alimentação. Os fluxos típicos de água através da membrana variam de 15 a 25 litros por hora por metro quadrado de membrana (15 a 25 L/h.m<sup>2</sup>). Os consumos específicos de energia por metro cúbico de água dessalinizada produzida a partir de água salobra são da ordem de 0,2 a 4 kWh/m<sup>3</sup>, dependendo das características da água de entrada e das taxas de recuperação aplicadas (informação verbal)<sup>6</sup>.

Uma alternativa para se reduzir o consumo de energia de sistemas de dessalinização de médio e grande porte é a utilização de sistemas de recuperação de energia. Como o fluxo de concentrado dos módulos de dessalinização apresenta pressões elevadas, alguns dispositivos foram desenvolvidos para a recuperação dessa energia, de maneira a reduzir a potência da bomba de alta pressão. Uma das alternativas mais indicadas é o acoplamento de uma bomba Clark à saída do concentrado. Basicamente, o funcionamento de uma bomba Clark se baseia no movimento de ida e volta dentro de um cilindro de dois pistões solidamente ligados por uma haste e um mecanismo de válvulas internas que direciona o fluxo de concentrado alternadamente entre os dois lados do cilindro (THOMPSON, 2003). A **Figura 9** ilustra o funcionamento de uma bomba Clark em 3 etapas:

<sup>6</sup> Mierzwa, J.C., 2010. Notas de Aula da Disciplina: Processos de Separação por Membranas para Tratamento de Águas e Efluentes, USP, São Paulo-SP.

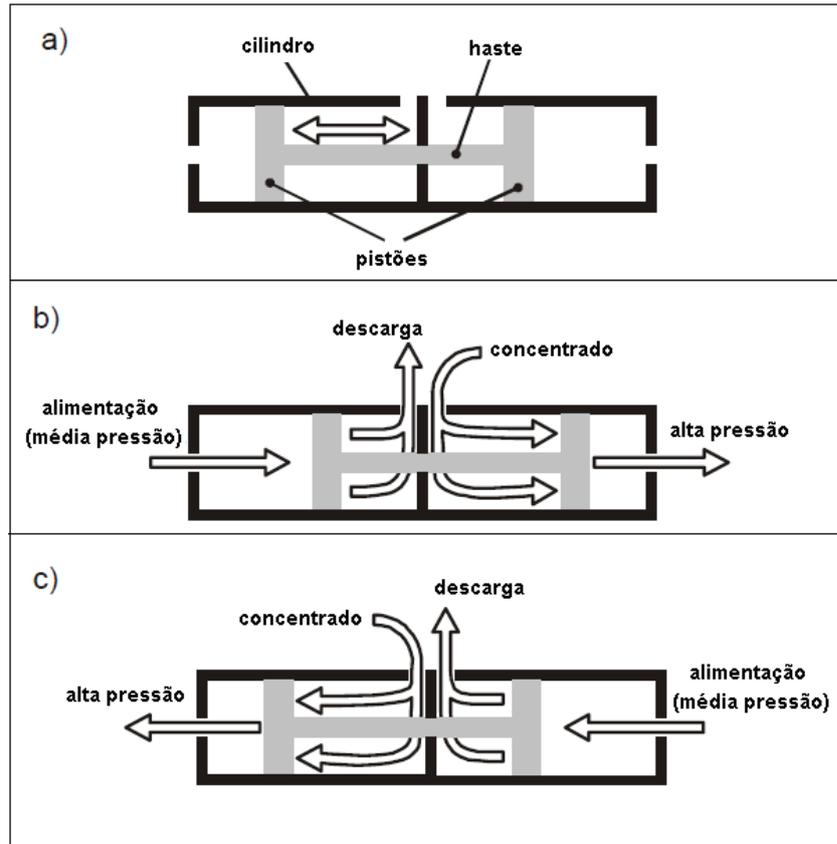


Figura 9 - Diagrama Esquemático do funcionamento de uma bomba Clark

#### 4.5 Consumo de energia para dessalinização por osmose reversa

A separação da água doce a partir de água salobra ou salina é um processo reversível, que deve obedecer à segunda lei da termodinâmica. Assim, para mesmas concentrações da água de entrada e do permeado, a energia mínima teórica necessária para que o processo ocorra é igual para qualquer método de separação que se use. Quanto mais concentrada estiver a água de entrada, maior será a energia mínima teórica necessária para a sua dessalinização. Para a água do mar, que apresenta um valor médio de salinidade da ordem de 35.000 mg/L, esse valor fica em torno de 0,7 Wh/m<sup>3</sup>. Como um sistema de dessalinização trabalha com um fluxo limitado de água a ser tratada, que aumenta de concentração à medida que o processo ocorre, é necessário que se leve em consideração a taxa de recuperação aplicada, ou seja, a proporção de água doce obtida a partir da água de entrada. Quanto maior a taxa de recuperação, maior será a energia teórica mínima, sendo que, para uma taxa de recuperação de 50%, essa energia fica em torno de 1 Wh/m<sup>3</sup>. Mas a energia realmente necessária para a dessalinização é maior do que a mínima teórica e depende da tecnologia utilizada. No caso da osmose Reversa, é preciso acrescentar parcelas relativas ao aumento da resistência da passagem da água através

da membrana, causada por fatores como a formação de camada de polarização de concentração, biofilme ou depósitos, além de se levar em consideração as perdas de pressão, perdas elétricas, etc. Para grandes sistemas de dessalinização da água do mar por osmose reversa que produzam, por exemplo, 100 m<sup>3</sup> diários de água, os valores típicos de consumo de energia ficam entre 4 e 7 kWh/m<sup>3</sup>, podendo ser considerado um valor de 2 kWh/m<sup>3</sup> como um limite ideal (THOMSON, 2003).

Para a água salobra, os valores de energia mínima teórica necessária para a dessalinização são menores do que para a água do mar. A dessalinização de água com SDT = 2.000 mg/L, com produção de 500 m<sup>3</sup>/dia e taxa de recuperação de 75% deve produzir um permeado com SDT em torno de 50 mg/L e um consumo específico de energia de 1,3 kWh/m<sup>3</sup>, enquanto para uma água de entrada com SDT = 4.000 mg/L, esse valor deve ficar em 1,5 kWh/m<sup>3</sup>, produzindo água com SDT por volta de 100 mg/L (IGLESIAS, 1999). Em um estudo que analisou diversos sistemas de dessalinização de água salobra por osmose reversa em unidades autônomas alimentadas por energia solar fotovoltaica em funcionamento na Jordânia, são citados consumos de energia de 1,1 kWh/m<sup>3</sup> e 1,6 kWh/m<sup>3</sup> para águas de entrada com SDT = 2.000 mg/L e 5.000 mg/L, respectivamente (HRAYSHAT, 2008). Já a análise da operação de um sistema localizado na Austrália e que produz em média 1,1 m<sup>3</sup> de água por dia a partir de uma água de entrada com SDT = 5.300 mg/L, com uma taxa de recuperação de 28% mostrou um consumo específico de energia de 2,3 kWh/m<sup>3</sup> (RICHARDS et al., 2007). Por sua vez, dois pequenos sistemas de dessalinização em funcionamento no Brasil apresentaram consumos específicos de energia da ordem de 1.6 kWh/m<sup>3</sup>. Esses valores foram obtidos com a produção horária de 25 a 30 litros de água com SDT em torno de 35 mg/L a partir de uma água de entrada com SDT = 800 mg/L e com uma taxa de recuperação de 15% (RIFTEL; CARVALHO, 2008).

Esses valores indicam que um aumento no consumo específico de energia, além de ser resultante de valores maiores de SDT na água de entrada, também está relacionado a menores valores de projeto para o de fluxo de permeado. Ou seja, de maneira geral, concentrações mais altas e sistemas de dessalinização menores acarretam maiores consumos de energia para cada litro de água dessalinizada obtida.

#### 4.6 Problemas com a membrana

Os problemas mais comuns relacionados à membrana são as precipitações, incrustações, depósitos, formação de biofilme e degradação química da membrana. Para o funcionamento de sistemas de osmose reversa, a água de alimentação não deve conter sólidos em suspensão, pois esses podem incrustar na superfície da membrana e causar danos irreversíveis à mesma. Diversos outros fatores podem prejudicar a integridade e o desempenho das membranas utilizadas na osmose reversa. Durante a operação de um sistema de dessalinização por osmose reversa, da mesma maneira que em qualquer processo de separação por membranas, com a passagem seletiva do solvente através da membrana, os sólidos dissolvidos vão aumentando sua concentração na região da interface entre a solução e a membrana. Esse fato, em conjunto com a formação da camada limite pelo fluxo laminar tangencial à superfície da membrana, causa um efeito conhecido como polarização de concentração que, por sua vez, pode evoluir para a formação de uma camada-gel. Esse efeito, além de causar a diminuição no fluxo de permeado e aumento da passagem de soluto através da membrana, pode também favorecer a ocorrência de incrustações por deposição na superfície da membrana e a precipitação de soluto se sua concentração exceder o limite de solubilidade. A polarização de concentração é um processo reversível e pode ser minimizado com a aplicação de pressões de trabalho mais baixas e, conseqüentemente, menores taxas de recuperação. Já os depósitos e incrustações, além de prejudicarem o desempenho do sistema de dessalinização, acabam também por reduzir significativamente a vida útil das membranas e sua ocorrência depende das concentrações, temperaturas, e espécies químicas presentes na água de entrada. Dessa maneira, é necessário que haja uma preocupação com esses fatores na determinação das características do sistema de dessalinização e dos parâmetros de processo.

Já na formação de biofilme, é formada uma camada viscosa sobre a superfície da membrana, decorrente do acúmulo de material orgânico contendo partículas de proteínas, lipídeos, carboidratos e vitaminas, entre outras substâncias, formando uma crosta onde os microrganismos de uma ou mais espécies, podem se desenvolver (COSTA, 2009). Esse processo é resultante dos mecanismos de adesão, responsável pela fixação dos microrganismos e crescimento, quando ocorre a multiplicação dos microrganismos. A adesão dos microrganismos, principalmente bactérias, se inicia com a atuação de interações de longo alcance, como as forças de Van der Waals e eletrostática, mas a seguir passa a contar com interações de curto alcance, como ligações químicas e interações hidrofóbicas. Enfim, os microrganismos acabam por produzir polímeros adesivos que levam à sua fixação na

superfície da membrana e formação do biofilme, propriamente dito, com sua estabilização mecânica sendo facilitada por meio de ligações cruzadas. O biofilme formado apresenta uma estrutura tridimensional complexa e concentra compostos orgânicos nessa estrutura, proporcionando os nutrientes necessários para o desenvolvimento e reprodução dos microrganismos. Os principais efeitos da formação do biofilme são a redução do fluxo de permeado e o aumento do consumo de energia. Mas seu contínuo desenvolvimento pode acarretar a degradação da membrana a ponto de permitir até a passagem de bactérias e contaminação do permeado.

A prevenção da formação de biofilme deve ser feita principalmente através do controle da água de entrada que, em caso de apresentar matéria orgânica, deve passar por um pré-tratamento que pode ser realizado com filtros cartucho, por exemplo. De acordo com parâmetros como a perda de fluxo ou a deterioração da qualidade do permeado, é necessária a realização de processos de sanitização e limpeza de todo sistema de dessalinização, com o objetivo de se fazer a limpeza física e química das membranas e demais superfícies do sistema de dessalinização que entram em contato com a água, além da eliminação de microrganismos. Quanto maior for o teor de matéria orgânica na água, maior também deverá ser a frequência das operações de limpeza e sanitização das membranas, de maneira a diminuir a formação de biofilme e reduzir o biofilme já formado. Outra opção para diminuir a formação de biofilme é a adição de cloro no pré-tratamento, mas essa alternativa deve ser adotada com cautela, pois o cloro pode causar a degradação química e danificar as membranas.

#### **.4.7 Descarte do rejeito**

Um dos principais problemas associados à utilização de dessalinizadores refere-se ao descarte do rejeito. Esse rejeito, também chamado de concentrado, apresenta alta salinidade e seu descarte inadequado pode acarretar sérios problemas como a salinização do solo. Em sistemas de dessalinização próximos ao oceano, é comum o transporte e descarte do rejeito no mar, o que não é viável para as instalações localizadas no interior do continente. Em projetos de grande porte, pode ser viável a injeção do rejeito em poços profundos, além de ser possível a integração dos dessalinizadores em um sistema produtivo, com aproveitamento do rejeito para a produção aquícola (por exemplo, tilápia rosa e camarão) e posterior irrigação de culturas de plantas halófitas, como o arbusto conhecido como erva-sal (*Atriplex nummularia*), utilizada para a produção de feno para o gado, com outras culturas. No caso de um sistema de pequeno

porte como o proposto no presente trabalho, pode-se utilizar o rejeito em conjunto com a água salobra extraída do poço para a irrigação de pequenas culturas de erva-sal ou de outras espécies que apresentem tolerância à salinidade. A Embrapa e outras instituições de pesquisa do país vêm se debruçando sobre esse tema e estudando alternativas para viabilizar o uso da água salobra obtida de poços e do rejeito do processo de dessalinização na criação de peixes, irrigação de plantas halófitas ou que toleram sais e na dessedentação animal. Nesse sentido, busca-se o aprimoramento de seu uso na aquicultura e irrigação através da ampliação do número de espécies que poderiam ser utilizadas. Calcula-se que existam aproximadamente 10.000 espécies de plantas tolerantes ao sal e mais de 250 espécies de halófitas com potencial de produção agrícola (VASCONCELLOS, 2011). Avanços vêm sendo obtidos no cultivo sob irrigação sazonal com espécies como palma, melancia forrageira, sorgo ponta negra, leucena, pornunça, gliricídia, cunhã, mamona, lã de seda e milho catingueiro. No caso da criação de peixes, são estudadas também espécies mais robustas e formas mais flexíveis para sua criação nos tanques com água salobra. Outras opções estudadas são o uso da água salobra na hidroponia e na cultura de microalgas.

#### **4.8 Sistemas de dessalinização em operação no Brasil**

Nos últimos anos, algumas empresas começaram engarrafar e vender água produzida por dessalinização da água do mar, ou água obtida da rede de abastecimento, tratada por osmose reversa e posteriormente adicionada de sais. Mas podemos considerar que a tecnologia de dessalinização por osmose reversa para produção de água potável tem sido usada principalmente em três situações, no Brasil:

- Em ilhas e localidades situadas no litoral, para dessalinização da água do mar;
- Em navios, submarinos e plataformas de petróleo, também para tratamento da água do mar;
- Em locais onde a água extraída de poços é salobra.

Como grandes exemplos da aplicação da tecnologia de dessalinização por osmose reversa no país, podemos citar os sistemas de dessalinização de grande porte instalados em ilhas, como na Ilha de Fernando de Noronha e os sistemas instalados na região do Semiárido, no âmbito do projeto Água Doce, do governo federal. Na Ilha de Fernando de Noronha, depois da ampliação realizada em 2011, um sistema de dessalinização (**Figura 10**) garante o abastecimento dos cerca de 3.500 habitantes e turistas, com capacidade de produzir 15 L/s de

água potável a partir da água do mar, com uma taxa de recuperação de cerca de 30%. O sistema instalado na ilha e operado pela Companhia Pernambucana de Saneamento – COMPESA realiza o descarte do rejeito no mar e conta com um sistema de reaproveitamento de energia para redução da energia consumida no processo de dessalinização. Outro exemplo de sistema de grande porte instalado no país é o sistema de dessalinização implantado em 1998 na Ilha do Guriri, localizada no município capixaba de São Mateus, mas que, atualmente, encontra-se fora de operação.



**Figura 10 – Sistema de dessalinização da água do mar instalado em Fernando de Noronha**  
Foto: Daniel Jordão de M. Rosa

Em termos da utilização da tecnologia de dessalinização por osmose reversa para, a partir da água do mar, prover o abastecimento de água à tripulação de instalações marítimas, o principal exemplo é o da Petrobrás que, em 1987, iniciou o seu programa de dessalinização de água do mar para atender às suas plataformas de petróleo. Com esse programa, a empresa busca diminuir ou mesmo eliminar a necessidade do dispendioso transporte de água do continente até as plataformas, muitas delas localizadas em alto-mar.

Por sua vez, o objetivo dos sistemas instalados pelo Programa Água Doce – PAD foi o atendimento prioritário das populações de baixa renda em comunidades dispersas do Semiárido com a particularidade de que, buscando resolver a questão relacionada com o descarte do rejeito, desenvolveu em parceria com a Embrapa/CPATSA um sistema de

produção integrado que utiliza os efluentes da dessalinização para a produção aquícola e produção de culturas forrageiras resistentes à salinidade para a alimentação do gado. A **Figura 11** apresenta um esquema desse arranjo.



**Figura 11 – Esquema da unidade demonstrativa do sistema de produção integrado do Projeto Água Doce**  
Fonte: (BRASIL, 2009b)

O Programa Água Doce prevê o acesso mínimo de 5 litros diários de água potável por pessoa, nas localidades beneficiadas. Diversos sistemas já foram instalados ou recuperados, fornecendo água potável a partir de água salobra ou salina extraída de poços para o abastecimento de comunidades do Semiárido, com o dessalinizador ligado à rede elétrica. A **Tabela 5** mostra os valores de SDT para a água de entrada e permeado de alguns sistemas instalados (BRASIL, 2012a). Como se pode ver, em todos os sistemas é produzida água com SDT atendendo ao padrão de potabilidade, a partir de águas com altos teores de sólidos dissolvidos.

**Tabela 5 – Valores de SDT obtidos em alguns dos sistemas instalados pelo Programa Água Doce**

<b>Cidade - Localidade</b>	<b>SDT da água bruta (mg/L)</b>	<b>SDT do permeado (mg/L)</b>
Alcantil (PB) - Barra de Aroeiras	5.745	61
Barra de Santana (PB) - Pedra D`Água	1.700	27
Boa Vista (PB) - Sítio Caluete	6.522	208
Cabaceiras (PB) - Sede	1.158	67
Campina Grande (PB) - Carretão	11.141	131
Pedra (PE) - Tenebre	1.722	114
Ibimirim (PE) - Jeritacó	5.677	498
Palmeira dos Índios (AL) - Olho D`Água do Bonifácio	2.332	48
Palmeira dos Índios (AL) - Bonifácio	2.789	61
Estrela de Alagoas (AL) - Casinhas	6.689	130
Igaci (AL) - Santo Antônio	10.039	224
Igaci (AL) - Sítio Calvário	7.566	148

A inserção de uma nova tecnologia de tratamento de água no meio rural, que demanda treinamento e capacitação de técnicos e usuários e um amplo arranjo institucional para sua operacionalização, fatalmente encontra dificuldades. Muitos sistemas de dessalinização instalados no âmbito do PAD passaram por problemas em seu funcionamento ou mesmo pararam de operar. Assim, uma das principais preocupações desse programa está relacionada com a execução de um programa de manutenção preventiva, para evitar que os dessalinizadores produzam água com qualidade inadequada ou fiquem fora de operação e de manutenção corretiva, de maneira a recolocar rapidamente em operação normal os sistemas que tenham parado de funcionar ou não estejam funcionando corretamente.

## **5 MATERIAIS, MÉTODOS E PROCEDIMENTOS TÉCNICOS**

O presente projeto de pesquisa teve como objetivo a verificação da viabilidade técnica, econômica e social da utilização de sistemas fotovoltaicos domiciliares de dessalinização, adaptados a partir de dessalinizadores por osmose reversa de pequeno porte disponível no mercado nacional, para o fornecimento de água à população rural de áreas com problemas de salinização dos mananciais, no Semiárido. Foram seguidos os seguintes passos, realizados após extensa pesquisa bibliográfica.

- Determinação de características básicas que um sistema fotovoltaico domiciliar de dessalinização por osmose reversa deve apresentar;
- Pesquisa de mercado e aquisição de um equipamento de dessalinização;
- Realização de testes com o equipamento conectado à rede elétrica, para obtenção de dados e parâmetros básicos de operação;
- Adaptação do dessalinizador para funcionamento com energia fornecida por geradores fotovoltaicos;
- Realização de testes do equipamento para diferentes concentrações de sais na água de entrada;
- Operação do Sistema Fotovoltaico de Dessalinização por Osmose Reversa por período prolongado, para verificação da confiabilidade do sistema, perda de fluxo e alterações nas características da água obtida ao longo do tempo;
- Análise dos dados obtidos e da viabilidade técnica, econômica e financeira do sistema proposto;

Esses itens serão abordados de forma detalhada no desenvolvimento desse capítulo.

### **5.1 Concepção do sistema fotovoltaico de dessalinização por osmose reversa**

O primeiro passo na concepção do sistema foi a determinação de se utilizar um equipamento de dessalinização de pequeno porte. Em parte, isso se deu por conta do menor custo de aquisição do equipamento, mas outros motivos levaram a essa opção. Se a escolha fosse por trabalhar com sistemas maiores para atender à demanda dos moradores de um conjunto de casas ou mesmo de toda uma comunidade, a água tratada precisaria ser conservada em um reservatório. Nesse caso, quanto maior for o número de consumidores dessa água e quanto

maior for o reservatório e o tempo de permanência da água no mesmo, maior será o risco de contaminação da água tratada e maior será a necessidade de organização da comunidade no gerenciamento conjunto do sistema de dessalinização e fornecimento de água tratada. Assim, um sistema de pequeno porte que atenda apenas a demanda diária de uma residência e sem necessidades de reservar a água por longos períodos pode ser uma boa opção para minimizar o problema de contaminação da água tratada. Além disso, muitas propriedades rurais possuem outros mananciais para fornecimento de água. Alguns exemplos são os riachos, açudes, barreiros, cacimbas, caxios ou ainda as cisternas, como as construídas para reservar a água de chuva coletada nos telhados das casas e criadas no âmbito do programa P1MC – Programa Um Milhão de Cisternas Rurais. Em todos esses casos, uma família que more em uma residência que conte com o equipamento de dessalinização pode utilizar o mesmo, em um sistema duplo de abastecimento, para realizar a potabilização da água para beber e cozinhar, no caso de contaminação ou suspeita de contaminação da mesma. Isso se dá pelo fato de que o processo de dessalinização apresenta a capacidade de separar contaminantes muito pequenos, como os íons de sais monovalentes. Assim, o processo de dessalinização também pode separar contaminantes de maior tamanho, como coliformes e demais microorganismos. Dessa maneira, a seleção do equipamento de dessalinização a ser acoplado ao gerador fotovoltaico foi realizada de acordo com os seguintes critérios:

- O equipamento deve ser de baixo custo, de maneira a aumentar a viabilidade financeira da utilização desse equipamento pela população do meio rural;
- O equipamento de dessalinização e seus diversos componentes individuais devem estar disponíveis no mercado nacional e, de preferência, serem fabricados no país;
- A potência máxima do equipamento de dessalinização deve ser menor que 350 W, para limitar a área total de painéis solares do gerador fotovoltaico, e consequentemente, o custo do sistema fotovoltaico de dessalinização.

No Brasil, diversas empresas comercializam sistemas de osmose reversa. Mas o mercado de sistemas de dessalinização no país está mais maduro para os dois casos a seguir:

- Sistemas de grande porte, alta potência e altas vazões;
- Sistemas de pequeno porte indicados para a produção de água ultrapura para laboratórios e hospitais.

Assim, a opção considerada mais adequada foi a de trabalhar com um equipamento de pequeno porte desenvolvido para a produção de água ultrapura e realizar algumas adaptações no mesmo. Esses equipamentos são projetados para produzir água ultrapura a partir da água

de abastecimento e, por conta disso, apresentam as seguintes dificuldades ou necessidade de adaptação para permitir sua utilização para os objetivos do presente trabalho:

- Contam com sistemas de pós-tratamento, como colunas de desmineralização, para buscar a produção de água com baixíssimos teores de sólidos dissolvidos;
- Não apresentam pré-filtro para particulados;
- Apresentam limitação em relação à concentração máxima de sais dissolvidos na água de entrada. Dentre os equipamentos analisados, foram encontrados os seguintes valores máximos permitidos de SDT: 500 mg/L, 1.000 mg/L e 2.000 mg/L. Os equipamentos capazes de dessalinizar água com maiores teores de sais dissolvidos já podiam ser considerados equipamentos de médio ou grande porte;
- Seu funcionamento necessita da pressão da água da rede de abastecimento.

Como se busca desenvolver um sistema de dessalinização fotovoltaico para a produção de água potável a partir de água salobra, não há necessidade de buscar uma remoção tão eficiente dos sais dissolvidos e, inclusive, é justamente recomendável que a água produzida apresente certo teor de sais dissolvidos, de maneira a ajudar na manutenção do equilíbrio eletrolítico corpóreo das pessoas que venham a ser consumidoras dessa água. Dessa maneira, não é necessário nem indicado o pós-tratamento para polimento e desmineralização da água produzida.

O equipamento de dessalinização apresenta uma limitação na concentração máxima de sais dissolvidos na água de entrada da ordem de 2.000 mg/L. Analisando-se os dados obtidos do SIAGAS em outubro de 2010 foi feita uma filtragem dos dados de sólidos dissolvidos totais - SDT de maneira a separá-los por faixas de valores de SDT:

1. SDT entre 0 e 500 mg/L (água doce);
2. SDT de 500 a 1.000 mg/L;
3. SDT de 1.000 a 2.000 mg/L;
4. SDT de 2.000 a 5.000 mg/L;
5. SDT de 5.000 a 30.000 mg/L;
6. SDT acima de 30.000 mg/L (água salina)

Foram encontrados 18.352 poços da Região Nordeste que tiveram o SDT determinado e a distribuição dos poços de acordo com os valores de SDT verificados e as faixas de valores citadas acima foi a seguinte:

1. 12.026 apresentaram água com SDT abaixo de 500 mg/L;
2. 2.965 apresentaram água com SDT entre 500 e 1.000 mg/L;

3. 1.737 apresentaram água com SDT entre 1.000 e 2.000 mg/L;
4. 1.173 apresentaram água com SDT entre 2.000 e 5.000 mg/L;
5. 449 apresentaram água com SDT entre 5.000 e 30.000 mg/L;
6. 2 apresentaram água com SDT acima de 30.000 mg/L.

Ou seja, desses 18.352 poços, 6.326 apresentaram água salobra ou salina. Um projeto de dessalinização deve ter como foco os poços com água que apresente teor de sais acima de 500 mg/L. Apesar de ser considerada água salobra, a água com SDT entre 500 e 1.000 mg/L é considerada potável, de acordo com o padrão de potabilidade. Mas o teor de sais acima do limite para ser considerada água doce pode levar a população a recusar seu consumo por conta da presença de sabor e odor e buscar outras fontes de abastecimento, muitas vezes, poluídas ou contaminadas. Assim, esses 2.965 poços com SDT entre 500 mg/L e 1.000 mg/L podem ser objeto da implantação de sistemas de dessalinização para fornecimento de água potável. Dessa maneira, somando-se aos 1.737 poços que apresentaram água com SDT entre 1.000 e 2.000 mg/L, tem-se 4.702 poços de água salobra com teores de sais dentro do limite de operação do equipamento de dessalinização selecionado, o que corresponde a 25,6% dos poços que tiveram o SDT da água determinado e 74,3% dos poços que apresentaram água salobra ou salina. Assim, a utilização de um equipamento de dessalinização com a limitação do SDT da água de entrada em 2.000 mg/L ainda permite trabalhar com pelo menos cerca de 75% dos poços que poderiam ser foco de um projeto de dessalinização. Além disso, é possível que o equipamento de dessalinização em questão possa tratar água com SDT acima de 2.000 mg/L, às custas de um menor fluxo de permeado e uma maior frequência nas operações de limpeza da membrana e troca dos filtros.

Em relação à pressão de entrada, para não criar a necessidade da inclusão de outra bomba que fornecesse uma pré-pressurização nem a necessidade de se elevar demasiadamente o reservatório de água salobra a ser tratada para aumentar a pressão de entrada, buscou-se um equipamento que pudesse operar com menores pressões de entrada.

Assim, após analisar as opções técnicas disponíveis no mercado e seus respectivos custos, optou-se por trabalhar com um sistema de dessalinização desenvolvido pela empresa Permution – Soluções em Água, de Curitiba/PR.

A seguir, estão apresentadas algumas características técnicas do sistema de osmose reversa Evolution RO-0220:

- SDT máximo da água de entrada: 2.000 mg/L;
- Dimensões do equipamento: 35 cm de comprimento, 15 cm de profundidade e 40 cm de altura;

- Capacidade para produzir 10 a 20 litros de água dessalinizada por hora;
- Pré-tratamento com cartucho de carvão ativado de 10” x 2,5”, para remoção de matéria orgânica;
- Membrana de osmose reversa 1,8” x 11, 75”;
- Pressão mínima de entrada = 0,2 bar;
- Potência de operação = 100 W;
- Bomba pressurizadora do tipo diafragma, com motor 24 Vc.c. e capaz de aplicar pressões de até 85 mca. (Bomba Booster TYP2600 1.6 LPM 24-29V 80-125 PSI);
- Transformador 220 Vc.a. / 24 Vc.c.

A **Figura 12** traz fotos da etiqueta de identificação do equipamento (em A), do equipamento de dessalinização (em B) e do equipamento com a caixa de proteção aberta (em C). Na parte inferior do equipamento, pode ser observado o filtro cartucho de carvão ativado.



**Figura 12 – Foto do sistema de osmose reversa Evolution RO-0220, da Permution – Soluções em Água**  
 Foto: Daniel Jordão de M. Rosa

O pré-tratamento com filtro de carvão ativado também é importante para preservar a membrana de dessalinização, diminuindo a formação de biofilme sobre a mesma e, conseqüentemente, a frequência da realização de operações de sanitização e limpeza.

A **Figura 13** traz uma fotografia em detalhe da parte superior do equipamento de dessalinização, acessada após abertura da caixa de proteção. Em A, temos o vaso de pressão contendo a membrana de osmose reversa. Em B, está a bomba pressurizadora, enquanto em C, temos o transformador 220 Vc.a./24 Vc.c.



**Figura 13 – Foto da parte superior do equipamento de dessalinização, com a tampa aberta**  
Foto: Daniel Jordão de M. Rosa

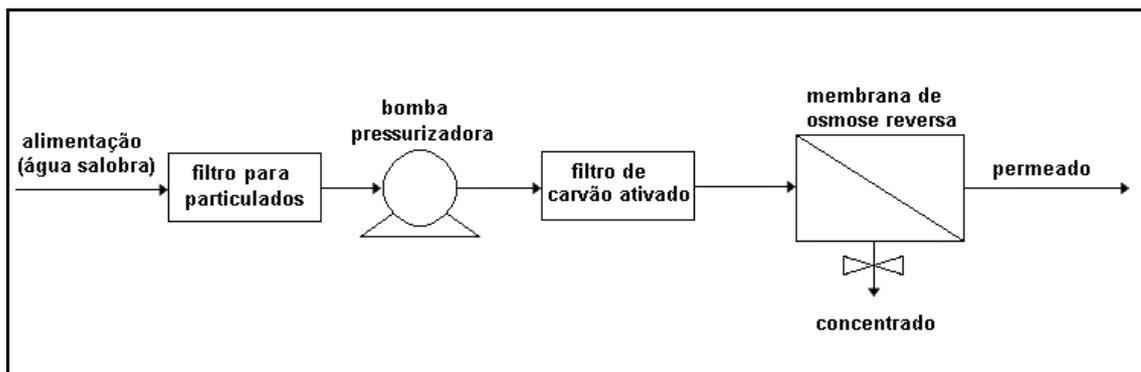
Como se pretende configurar um sistema de dessalinização para tratamento de água de poços com água salobra em campo, faz-se necessário acrescentar um filtro de particulados para pré-tratamento, de maneira a proteger e preservar a integridade da membrana e aumentar sua vida útil. Assim, foi incluído no sistema um Filtro Rápido Permuton FR 500 (**Figura 14**), com elemento filtrante em PP com 25/1  $\mu\text{m}$ , impedindo assim que partículas em suspensão maiores que 1  $\mu\text{m}$  possam alcançar a membrana de osmose reversa e causar danos à mesma.



**Figura 14 – Filtro para particulados, para pré-tratamento - Filtro Rápido Permution FR 500**

Foto: Daniel Jordão de M. Rosa

Assim, analisando o equipamento de dessalinização adquirido e com a inclusão do pré-filtro de particulados, pode-se construir um diagrama esquemático hidráulico simplificado do equipamento de dessalinização a ser utilizado inicialmente (**Figura 15**).



**Figura 15 - Diagrama esquemático hidráulico simplificado do equipamento de osmose reversa com a inclusão de pré-filtro de particulados**

O equipamento de dessalinização e o pré-filtro foram instalados em uma bancada de madeira, de forma a permitir fácil acesso às conexões elétricas e hidráulicas (**Figura 16**).



**Figura 16 – Equipamento montado em bancada**

Foto: Daniel Jordão de M. Rosa

A pressão hidráulica mínima exigida na entrada do equipamento é igual a 0,2 bar e pode ser obtida mantendo-se a caixa de água a ser tratada a uma altura de 2 metros em relação à entrada de água do equipamento de dessalinização (pressão de 2 metros de coluna de água). Optou-se por obter essa altura mínima com o levantamento da caixa d'água através da utilização de um andaime de 5 metros. Tal procedimento permitiu também testar o funcionamento do equipamento de dessalinização com pressões de entrada menores do que os 0,2 bar recomendados, através do controle da pressão de entrada pela atuação no registro instalado entre a caixa d'água e o equipamento de dessalinização e acompanhamento dos valores em um manômetro. Assim, foi possível simular pressões de entrada entre 0,05 bar e 0,45 bar.

A caixa d'água foi alimentada com água da rede de abastecimento que, após descanso, teve sua salinidade ajustada para os diversos teores de SDT a serem utilizados durante o trabalho experimental, de maneira a simular água salobra. A norma D1141-98e1 “Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water” da American Society for Testing and Materials (ASTM, 1998) apresenta os procedimentos para a preparação de água salobra e água do mar padrão artificiais. Para os objetivos desse trabalho, é suficiente trabalhar com soluções de NaCl. Os valores de SDT foram aferidos com a utilização de um Medidor multiparâmetro Hach HQ40d da

## 5.2 Funcionamento do equipamento e obtenção de dados

O equipamento foi montado no Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo – USP/IEE/LSF e colocado em funcionamento acoplado à rede elétrica convencional, com uma água de entrada com SDT ajustado para 2.000 mg/L, o valor máximo constante nas especificações técnicas do dessalinizador. Após 1 hora de funcionamento para estabilização das condições de trabalho, o equipamento foi mantido em funcionamento para testes e aquisição de dados preliminares, como tensão de trabalho e corrente de alimentação para o cálculo da potência de operação, além dos fluxos e valores de SDT do permeado e rejeito.

A seguir, considerando-se que o motor da bomba do dessalinizador deve funcionar com uma tensão de 24 Vc.c., foi feita a adaptação do equipamento para funcionamento em associação à geração fotovoltaica. Para compatibilizar a geração fotovoltaica, dependente do recurso solar, com o funcionamento do equipamento com uma potência constante de operação, existem duas alternativas:

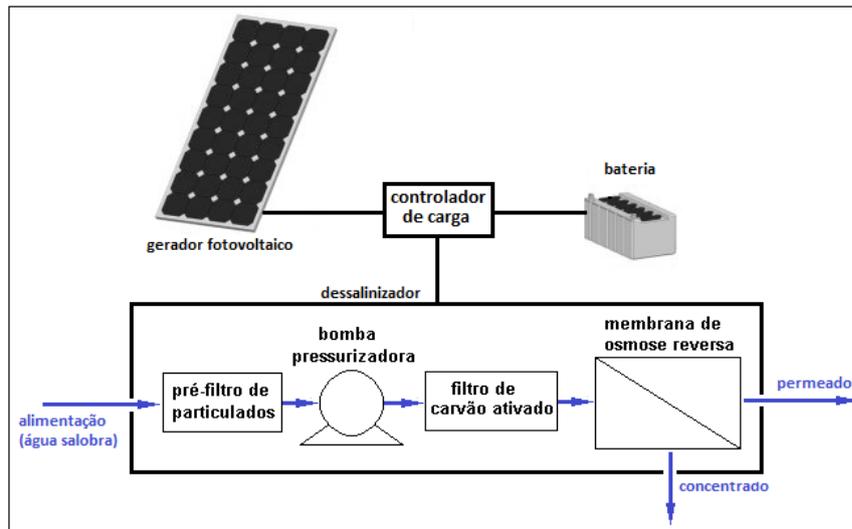
1. A utilização de acumuladores de carga elétrica entre o gerador e o equipamento de dessalinização. Nesse caso, acumuladores de carga, como baterias eletrolíticas e um dispositivo de condicionamento de potência devem ser acoplados entre os geradores fotovoltaicos e o equipamento de dessalinização. Os acumuladores de carga reservam a energia gerada durante as horas de sol para permitir a utilização do dessalinizador a qualquer momento, mesmo de noite ou em dias nublados;
2. O acoplamento do gerador ao motor da bomba utilizando-se conversores c.c.-c.c. e reservando a água produzida nas horas de sol para seu consumo posterior, eliminando a necessidade de utilização das baterias eletrolíticas.

Optou-se pela primeira alternativa, devido principalmente ao risco de contaminação da água dessalinizada nos reservatórios utilizados. Assim, o equipamento de dessalinização teve retirado seu transformador 220 Vc.a. – 24 Vc.c. e foi acoplado ao sistema fotovoltaico de geração, controlador de carga e baterias. Esse sistema foi dimensionado de maneira a permitir seu funcionamento por várias horas diárias, para simular um longo período de operação em um período relativamente menor e contou com a adição de 2 módulos fotovoltaicos de 32 células e 50 Wp, em série;

- 2 baterias automotivas de 95 Ah e 12 V, em série;
- 1 controlador de carga modelo Phocos CX-10;

- 1 disjuntor bipolar instalado entre o controlador de carga e o equipamento de dessalinização;
- 1 disjuntor bipolar instalado entre o gerador fotovoltaico e o controlador de carga.

A **Figura 17** apresenta um diagrama esquemático desse arranjo.



**Figura 17** – Diagrama esquemático do Sistema Fotovoltaico de Dessalinização

Na **Figura 18** estão apresentadas fotos do sistema fotovoltaico de dessalinização instalado conforme a descrição. Na **Figura 18-A**, pode-se ver o gerador fotovoltaico, a caixa d'água e o andaime utilizado para elevar a sua altura. Em **18-B**, estão o controlador de carga e os disjuntores. Em **18-C**, estão os acumuladores de carga enquanto em **18-D**, pode-se ver o equipamento de dessalinização.

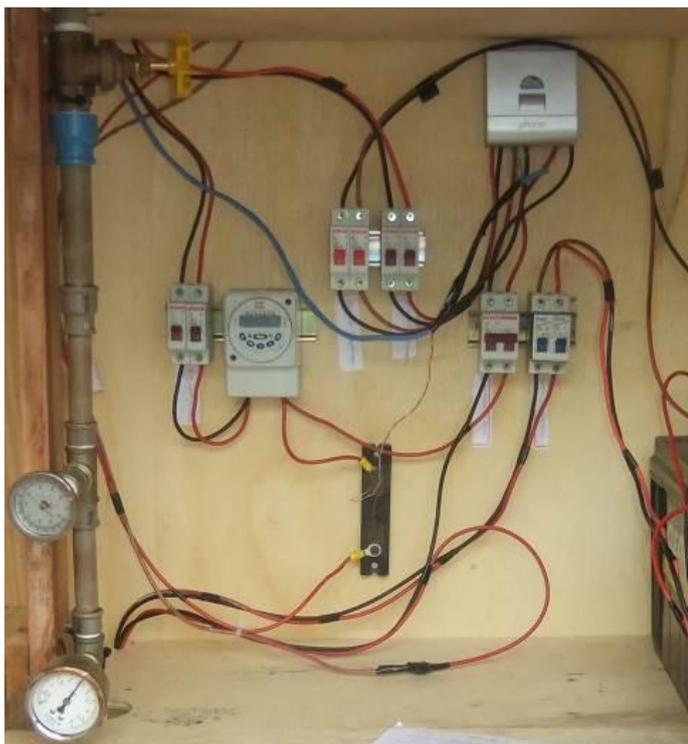


**Figura 18 – Componentes do Sistema Fotovoltaico de Dessalinização em sua primeira configuração**  
Foto: Daniel Jordão de M. Rosa

O equipamento assim configurado foi colocado em funcionamento para obtenção dos dados de tensão de trabalho, corrente e potência de operação, fluxo do permeado, fluxo do concentrado, SDT do permeado e SDT do concentrado. O início da aquisição de dados se deu sempre após pelo menos 1 hora de funcionamento do sistema e repetido para os seguintes valores de SDT na água de entrada: 50 mg/L (água da rede de abastecimento), 500 mg/L, 1.000 mg/L, 1.500 mg/L e 2.000 mg/L. Apesar das especificações do equipamento indicarem um SDT máximo de 2.000 mg/L na água de entrada, também foram realizados testes para as concentrações de 3.000 mg/L, 4.000 mg/L e 5.000 mg/L. Com os dados obtidos, foi possível calcular e comparar produção diária de água, taxa de recuperação do processo de dessalinização e consumo específico de energia ( $\text{kWh/m}^3$ ) para diferentes salinidades da água de entrada. Além disso, para uma água de entrada com  $\text{SDT} = 2.000 \text{ mg/L}$ , foram realizados testes para comparação dos dados para diferentes alturas manométricas.

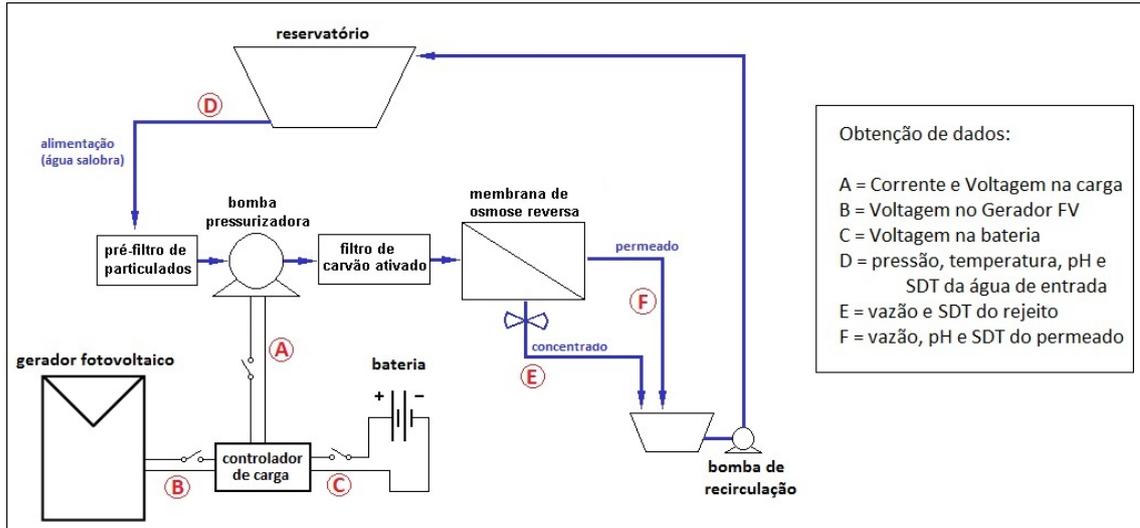
Após essa etapa e a verificação da pouca influência da variação da altura manométrica entre 0,2 e 0,45 bar, o sistema teve o andaime retirado e foi montado em uma estrutura menor, com a caixa d'água elevada a apenas 2 metros da entrada do dessalinizador, de acordo com as recomendações técnicas do fabricante. O equipamento foi montado nessa configuração para ser operado por período prolongado, de maneira a permitir a verificação da confiabilidade do

sistema e aferir alterações no fluxo de permeado e nas características da água obtida ao longo do tempo. Foram instalados disjuntores de proteção e um sistema de aquisição de dados foi conectado ao equipamento para obtenção e registro automático dos valores de tensão no gerador, bateria e dessalinizador, além da corrente no dessalinizador (**Figura 19**). A obtenção dos dados de tensão ocorreu no controlador de carga, enquanto que a aquisição dos dados de corrente foi realizada através da instalação de um resistor *shunt*.



**Figura 19 – Detalhe do equipamento, mostrando sistema de aquisição de dados, disjuntores, controlador de carga e interruptor horário**  
Foto: Daniel Jordão de M. Rosa

Um interruptor horário foi configurado e instalado no sistema, de maneira a ligar e desligar automaticamente o dessalinizador e simular um funcionamento intermitente, programando 9 horas diárias de funcionamento, divididas em 9 períodos de 1 hora cada. O permeado e o rejeito, após o ponto onde eram aferidos valores de SDT e vazões, eram misturados e bombeados para a caixa de entrada, de maneira a ser possível a operação contínua do equipamento, para verificação da queda da produção de permeado ao longo do tempo. A cada duas semanas, a água do sistema era trocada e se realizava a limpeza dos reservatórios de água. A **Figura 20** apresenta um diagrama esquemático desse arranjo, com duas fotos do mesmo sendo mostrada na **Figura 21**.



**Figura 20 – Diagrama esquemático do Sistema Fotovoltaico de Dessalinização configurado para teste de operação por período prolongado**



**Figura 21 – O Sistema Fotovoltaico de Dessalinização configurado para testes de funcionamento de longo período**

Foto: Daniel Jordão de M. Rosa

O sistema com essa configuração foi colocado em operação para tratar uma água de entrada com SDT = 2.000 mg/L. No período de 13 meses, o Sistema Fotovoltaico de Dessalinização totalizou cerca de 2.300 horas de operação. Os principais dados obtidos para análise foram: fluxo de água na alimentação e no permeado, concentração de sais na alimentação e no permeado e temperatura da água. Também foram obtidos dados relativos à potência de operação do equipamento, bem como potência gerada e energia produzida pelos geradores fotovoltaicos. A análise do funcionamento do sistema ao longo do tempo possibilitou também analisar a influência da operação do sistema de dessalinização de maneira descontínua e

adaptada à geração fotovoltaica, em termos de perda de fluxo, deterioração das propriedades das membranas, manutenção e substituição de componentes do sistema.

Com os dados coletados e de posse dos dados de irradiação do local de instalação do equipamento e demanda de água potável da família, é possível realizar o dimensionamento do gerador fotovoltaico e dos acumuladores de carga a serem utilizados em um sistema fotovoltaico domiciliar de dessalinização de água para consumo humano que garanta as necessidades básicas de água de uma família média rural do Semiárido, para beber e cozinhar. Com a realização de uma análise do custo e ciclo de vida do equipamento e de seus componentes, é possível a determinação do custo médio por volume de água produzida ao longo da vida útil do equipamento (R\$/L).

Após esse período, que correspondeu a 2.300 horas de operação, e o acompanhamento da perda de fluxo de permeado, ocorreu a troca da membrana e dos filtros. Após esse procedimento, os fluxos e valores de SDT do permeado foram novamente aferidos, para uma água de alimentação com SDT = 2.000 mg/L.

Por fim, foi realizada também uma análise relativa ao parâmetro bacteriológico, através de testes de remoção de coliformes. Nesses testes, a água de entrada foi contaminada com amostras de esgoto, para permitir a utilização de coliformes termotolerantes E. Coli como organismos indicadores de contaminação da água na análise baseada no método Colilert. Após esse procedimento, foram retiradas 10 amostras da água de entrada, 10 do permeado e 10 do rejeito, para análise. A coleta das amostras foi feita em vidros esterilizados em autoclave e a determinação da presença de E. coli foi realizada com a utilização uma lâmpada UV portátil, após 24 horas de incubação com o meio de cultura do método Colilert, a uma temperatura média de 35 °C.

## 6 RESULTADOS OBTIDOS

A potência de operação observada com o equipamento ligado à rede elétrica foi de 40 W. Após a retirada do transformador para conexão do sistema ao gerador fotovoltaico e instalação do sistema de aquisição de dados, foi obtida uma menor potência de operação. Não foi verificada relação entre as diferentes concentrações salinas da água de entrada e a variação da potência de operação, que variou entre 24 e 27 W, durante as 2.300 horas de operação do equipamento. A potência de operação e o fluxo de permeado não apresentaram variações significativas em relação à variação da pressão manométrica de entrada entre 0,2 e 0,45 bar. O fluxo de concentrado também apresentou pouca variação para os diferentes valores de SDT da água de entrada e foi de aproximadamente 20 L/h. A **Tabela 6** apresenta os valores médios de fluxos de permeado, SDT médio no permeado, potências de operação, taxas de recuperação e consumos específicos de energia para cada valor de SDT da água de entrada.

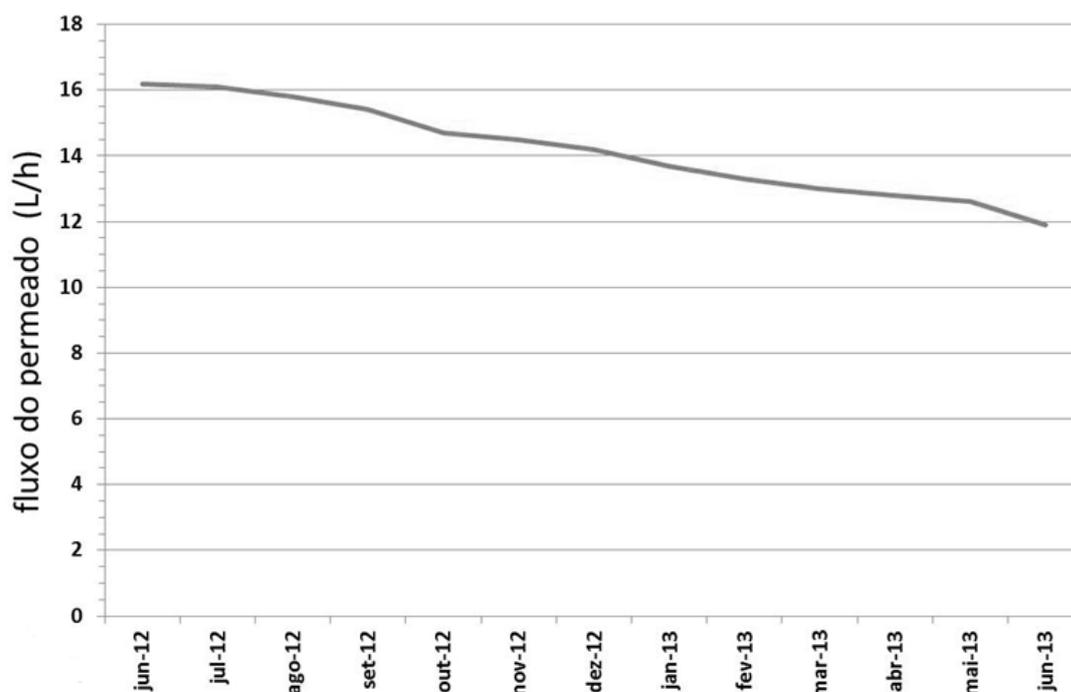
**Tabela 6 – Dados obtidos para diferentes concentrações na água de entrada**

	SDT na água de entrada							
	50 mg/L	500 mg/L	1000 mg/L	1500 mg/L	2000 mg/L	3000 mg/L	4000 mg/L	5000 mg/L
<b>Fluxo de Permeado (L/h)</b>	20,8	20,4	19,7	19,4	16,2	13,1	9	6,9
<b>SDT do permeado (mg/L)</b>	1	7	19	31	49	89	141	217
<b>Potência (W)</b>	25,4	24,9	26,2	26,1	25,7	25,9	26,5	26,9
<b>Taxa de recuperação (%)</b>	51,0	50,5	49,6	49,2	44,8	39,6	31,0	25,7
<b>Consumo Específico de Energia (kWh/m<sup>3</sup>)</b>	1,22	1,22	1,33	1,35	1,59	1,98	2,94	3,90

O consumo específico de energia para o caso da água de entrada com SDT = 2.000 mg/L foi de 1,59 kWh/m<sup>3</sup>, para uma taxa de recuperação de 44,8%. Esse valor é coerente com o encontrado na literatura. Esse valor foi 0,49 kWh/m<sup>3</sup> acima do consumo específico de energia constatado em estudo realizado na Jordânia (HRAYSHAT, 2008), para uma água de entrada com a mesma concentração de sais. Isso pode ser justificado pela escala do projeto, visto que no presente trabalho, a produção de permeado foi de 16,2 L/h, enquanto que os sistemas

pesquisados na Jordânia operaram com uma produção entre 250 e 312 L/h. Por outro lado, outro sistema de dessalinização de pequeno porte desenvolvido no Brasil (RIFTEL; CARVALHO, 2008) apresentou um consumo específico de energia de 1,6 kWh/m<sup>3</sup>, equivalente ao obtido no presente projeto de pesquisa, apesar de ter trabalhado com uma menor taxa de recuperação e menor concentração de sais na água de entrada.

Na análise da operação por período prolongado com uma água de entrada com SDT = 2.000 mg/L, verificou-se que o fluxo de permeado foi diminuindo gradativamente e após 2.300 horas de operação, atingiu 11,7 L/h. A **Figura 22** apresenta o gráfico da variação do fluxo de permeado ao longo do tempo. Já os valores de SDT do permeado apresentaram variação de no máximo 10%, não sendo possível observar uma tendência de aumento ou queda desses valores ao longo do tempo, durante o período prolongado de operação.

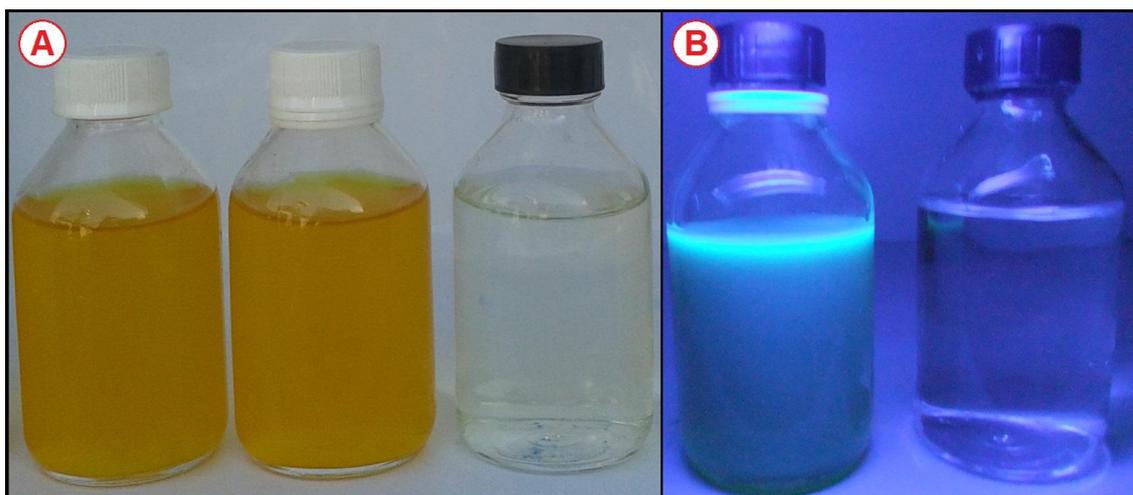


**Figura 22 – Variação do fluxo de permeado ao longo de 2.300 horas de operação**

Após a substituição da membrana e elementos filtrantes do sistema, realizada depois da operação do equipamento por 2.300 horas, o fluxo de permeado apresentou uma recuperação a valores próximos aos do início da operação do sistema, atingindo 15,9 L/h.

A análise relativa ao parâmetro bacteriológico, realizada através de testes de remoção de coliformes demonstrou que o equipamento foi capaz de retirar 100% dos coliformes E. Coli presentes na água de entrada contaminada. Todas as amostras retiradas da água de entrada e do rejeito acusaram a presença de coliformes totais e coliformes termotolerantes, enquanto que para todas as amostras retiradas do permeado, os resultados foram negativos. A **Figura**

23 traz as fotos dos frascos utilizados nos testes feitos segundo o método Colilert. Em A, a forte coloração amarela observada nas duas primeiras amostras, retiradas da água de entrada e do rejeito, indica a presença de coliformes totais. A presença de coliformes termotolerantes, nessas mesmas amostras, foi comprovada com a observação das mesmas sob luz ultravioleta, apresentando fluorescência azul. Em B, pode-se comparar a diferença entre uma amostra que acusou a presença de coliformes tolerantes e uma que acusou ausência dessa bactéria.



**Figura 23 – Resultados dos testes de remoção de coliformes**

Foto: Daniel Jordão de M. Rosa

### **6.1 Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico Domiciliar de Dessalinização de Água para consumo humano**

Com a análise dos dados obtidos durante o funcionamento do sistema fotovoltaico de dessalinização, foi possível a configuração e dimensionamento de um sistema fotovoltaico domiciliar de dessalinização de água para consumo humano capaz de atender uma família de tamanho médio da zona rural do Semiárido. Os cálculos foram realizados com base nas seguintes premissas:

- Tamanho médio da família = 5 pessoas;
- Litros diários necessários = 30 litros;
- Potência de operação considerada para o dessalinizador = 27 W;
- Concentração de sais na água de entrada = 2.000 mg/L;
- Eficiência do conjunto baterias/controlador = 0,85;
- Substituição da bomba por uma similar de 12 Vc.c.

A produção de água (fluxo de permeado) considerada foi de 14,6 L/h, que foi o fluxo de permeado aferido após 4 meses de funcionamento do sistema. Esse valor se justifica, pois o

número de horas de operação para esse período de 4 meses é equivalente a uma utilização do equipamento 2 horas por dia durante 1 ano, que é o tempo recomendado pelo fabricante do dessalinizador para a troca da membrana e, para a produção de 30 L diários de água, são necessárias 2,05 horas (cerca de 2 horas e 3 minutos) de funcionamento do dessalinizador por dia o que corresponde a uma demanda diária de energia elétrica de 55,4 Wh. Além disso, a queda no fluxo de permeado correspondente a esse período foi de 9,9%, caindo de 16,2 L/h para 14,6 L/h.

Considerando-se a eficiência do conjunto bateria/controlador e calculando-se para dois dias de autonomia e 50% de profundidade de descarga, é necessária a utilização de uma bateria de 12 V com capacidade de 22 Ah. E para a utilização do sistema proposto na região do Semiárido brasileiro, que possui níveis de irradiação solar  $\geq 5 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$ , um gerador fotovoltaico de 18 Wp garante a operação do sistema.

A instalação do dessalinizador é bastante simples, bastando sua fixação na parede ou em algum suporte dentro da casa, utilizando dois parafusos. A **Figura 24** traz um esquema simplificado da instalação em campo, mostrando os componentes do sistema fotovoltaico domiciliar de dessalinização de água para consumo humano. A fiação deve ser trazida desde o controlador de carga até o equipamento, utilizando fiação elétrica de 1,0 mm<sup>2</sup> ou de 1,5 mm<sup>2</sup>. Deve ser incorporado dispositivo de proteção, com a instalação de disjuntores e é recomendável que a fiação seja protegida por conduíte. A água deve ser trazida desde o reservatório elevado de água salobra com cano de PVC de 25 mm e um conector com rosca macho de ½ polegada. O reservatório de água salobra deve estar pelo menos 1,5 m acima da entrada do dessalinizador. Na figura, o equipamento foi acoplado a um sistema fotovoltaico dedicado exclusivamente à dessalinização, com poste para fixação dos geradores e da caixa de proteção contendo baterias e controlador de carga, mas no caso de haver um sistema fotovoltaico domiciliar para o fornecimento de energia elétrica para a residência, esses componentes podem ser incorporados aos mecanismos de fixação das unidades de geração e acumulação do mesmo.

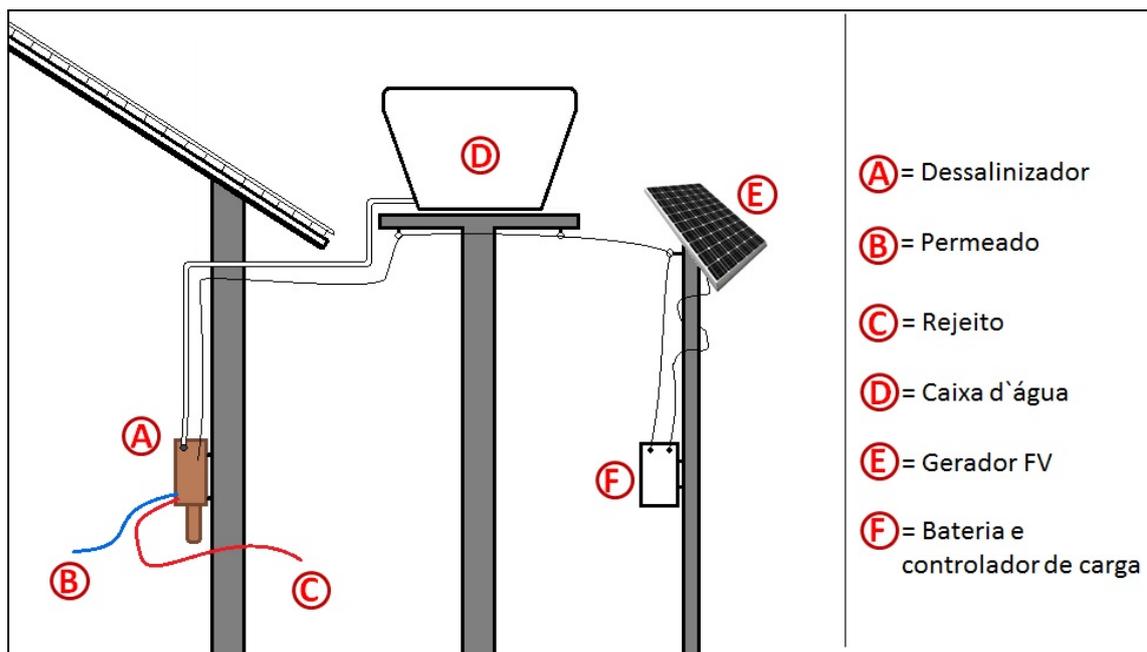


Figura 24 – Esquema simplificado para instalação do equipamento em campo

Em pesquisa de mercado realizada em junho/2013, foram obtidos os seguintes valores médios, para o cálculo preliminar do custo de investimento inicial de um Sistema Fotovoltaico de Dessalinização dimensionado dessa maneira:

- Dessalinizador = R\$ 2.000,00;
- Filtro Rápido para particulados = R\$ 250,00;
- Gerador Fotovoltaico (18 Wp) = R\$ 110,00;
- Controlador de Carga = R\$ 120,00;
- Bateria (12 V e 22 Ah) = R\$ 100,00.

Com a soma desses valores, chega-se a um total de R\$ 2.580,00. Ao serem considerados outros custos como o do disjuntor, fiação, instalação, etc., pode-se considerar um investimento inicial da ordem de R\$ 3.000,00 para a instalação dos equipamentos. Seguindo as recomendações dos fabricantes, considerou-se a substituição das baterias a cada 2 anos, dos elementos filtrantes e membrana de dessalinização a cada ano e da bomba pressurizadora após 5 anos de utilização e, assim, para um período de 20 anos, temos um custo médio com reposição dos componentes do sistema de cerca de R\$ 350,00 anuais, em valor presente. Portanto, considerando todos os custos com equipamentos durante os 20 anos de vida útil do sistema e uma produção de 30 litros diários de água, temos um custo entre 4 e 5 centavos por litro de água dessalinizada, com uma produção de cerca de 11.000 litros anuais de água potável. É importante ressaltar que esse custo é relativo apenas aos componentes do sistema fotovoltaico de dessalinização, considerando que a água a ser tratada já se encontra disponível

em reservatório instalado à altura adequada. Também não estão contabilizados os valores não relacionados diretamente com a aquisição do sistema e componentes para reposição, como a capacitação de instaladores, visitas de técnicos, gestão, etc. Mesmo assim, é interessante fazer uma comparação com os custos de instalação de uma cisterna rural, seguindo o padrão atualmente adotado pelo Programa Água Para Todos. As cisternas, com uma capacidade de armazenar 16.000 litros, apresentam um custo de instalação de aproximadamente R\$ 5.000,00. Essa comparação não deve ser entendida como uma disputa para se definir a melhor opção. As cisternas para reservação de água de chuva captada em telhados já demonstraram ser uma das principais alternativas para o abastecimento da população rural do Semiárido. Mas a utilização de dessalinizadores adaptados a sistemas fotovoltaicos domiciliares pode ampliar a utilização do bombeamento fotovoltaico para fornecimento de água a partir de poços com água salobra e contribuir para a segurança hídrica dessa população.

## 7 CONCLUSÕES

Foi avaliada a possibilidade de utilização de pequenos sistemas comerciais de dessalinização por osmose reversa para fornecimento de água potável. Para uma demanda de 30 L/dia de água potável são necessários o fornecimento de 55,4 Wh/dia. Esta demanda é relativamente pequena e poderia ser considerada no dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares. Esta inclusão representa um incremento de 18 Wp na unidade de geração e 22 Ah na unidade de acumulação. Também se pode optar pela montagem de um sistema fotovoltaico dedicado apenas à unidade de dessalinização. A forma de introdução do sistema, incluído na demanda de um sistema fotovoltaico domiciliar ou dedicado exclusivamente à dessalinização, dependerá do contexto do programa de universalização do atendimento elétrico e sua associação com as políticas públicas de suprimento de água potável.

O sistema dimensionado no presente trabalho também pode ser utilizado para tratamento de água salobra com valores de sólidos dissolvidos totais – SDT abaixo de 2.000 mg/L, podendo aumentar a produção diária de água ou diminuir as horas diárias de operação e, conseqüentemente, o tamanho da bateria e a potência do gerador fotovoltaico. A utilização do sistema para tratamento de água salobra com valores de SDT acima de 2.000 mg/L também pode ser considerada, por exemplo, para uma água de entrada com 3.000 mg/L. Nesse caso, seria necessário que o equipamento fosse operado por 3 horas diárias, o que acarretaria na necessidade do incremento de cerca de 50% da potência do gerador fotovoltaico e da capacidade da bateria. Já para as concentrações de 4.000 mg/L e 5.000 mg/L, é mais adequada a utilização de um sistema com uma membrana de maior capacidade de separação, além de uma bomba pressurizadora de maior potência, capaz de proporcionar maiores pressões de trabalho.

Do ponto de vista técnico, foi demonstrada a viabilidade de um Sistema Fotovoltaico de Dessalinização por Osmose Reversa para uso domiciliar. A operação do dessalinizador simulou sua operação por um período equivalente a três anos, com duas horas diárias de funcionamento e sem troca ou reposição de qualquer elemento do sistema. Os valores apresentados podem servir como referência, mas para cada caso de aplicação em campo, devem ser analisadas as características do local de instalação. Um correto dimensionamento do sistema só poderá ser feito de posse dos dados de irradiação solar e da caracterização da água de entrada, bem como da variação desses valores ao longo do ano. Em relação à água de

entrada, deve-se salientar que, mesmo para dois poços que apresentem valores de sólidos dissolvidos totais – SDT equivalentes, é importante a distinção das diferentes espécies químicas presentes, bem como de suas respectivas concentrações e demais parâmetros físico-químicos.

Do ponto de vista econômico, o crescente uso das membranas semipermeáveis em aplicações industriais nos últimos anos causou uma grande diminuição no preço dos sistemas que se utilizam dessa tecnologia. Portanto, um Sistema Fotovoltaico de Dessalinização por Osmose Reversa para uso domiciliar vem apresentando um custo cada vez mais compatível com as demais alternativas de abastecimento descentralizado dessa população, como as cisternas rurais. Esse custo pode diminuir por ganho de escala, no caso de adoção dos mesmos como alternativa para políticas públicas de abastecimento de água da população dispersa do Semiárido e aquisição dos equipamentos através de licitações governamentais.

Os equipamentos de dessalinização utilizados nos sistemas fotovoltaicos domiciliares de dessalinização podem continuar a ser utilizados, no caso de uma futura chegada da rede de distribuição de energia ao local, bastando para tanto o acoplamento de um transformador para a conversão da corrente alternada da rede de distribuição à corrente contínua na tensão adequada ao funcionamento da bomba.

O uso de dessalinizadores como alternativa para o fornecimento de água potável para a população, produzindo a partir de água salobra de poços profundos é uma realidade, no Semiárido. O Programa Água Doce – PAD já recuperou ou instalou diversos sistemas de dessalinização, prevendo atingir cerca de 3.500 sistemas e beneficiar 2,4 milhões de pessoas, até 2019. Com isso, a tecnologia de dessalinização por osmose reversa vai começando a fazer parte da realidade dessa população. A introdução de uma nova tecnologia no meio rural do Semiárido não é uma tarefa fácil, mas o PAD vem enfrentando os problemas, capacitando técnicos e moradores e desenvolvendo conhecimento no que tange à operação e manutenção dos equipamentos e gestão de um programa de dessalinização para o atendimento de comunidades rurais da região. Os problemas encontrados acabam por servir como exemplos para um contínuo aperfeiçoamento.

Uma próxima etapa seria voltar a atenção para a população que vive dispersa em residências isoladas ou comunidades de tamanho menor do que o necessário para a implantação de um sistema de dessalinização de maior porte. Nesse caso, uma alternativa para garantir o abastecimento de água potável para essa população é a utilização de sistemas fotovoltaicos domiciliares para dessalinização de água. Esses sistemas podem ser complementares a outras opções como a captação de água de chuva e reservação em cisternas, as barragens

subterrâneas, barraginhas ou barreiros-trincheira e contribuir para aumentar a segurança hídrica da população rural do Semiárido, ou seja, assegurar que cada pessoa da região tenha acesso à água potável suficiente para levar uma vida saudável e produtiva, contribuindo para a proteção da população contra os riscos relacionados à precariedade do acesso à água, que passa a não depender de apenas uma fonte de água potável. É importante haver um amplo leque de opções, de maneira a permitir que, com uma análise acurada de cada localidade, seja possível escolher as alternativas mais adequadas e suas possíveis combinações.

As maiores dificuldades para adoção dessa tecnologia como mais uma alternativa para as políticas públicas que visam a garantia de fornecimento de água potável para a população rural dispersa do Semiárido brasileiro estão relacionadas a questões políticas, como a necessidade de uma grande articulação institucional entre as diversas esferas do poder público, organizações não governamentais e demais instituições da sociedade civil. É importante que se determine fontes de financiamento e responsabilidades para a implantação desse tipo de sistema, prevendo manutenções periódicas e/ou emergenciais. Além disso, é necessário o estabelecimento de critérios e procedimentos para seleção e capacitação de usuários. A introdução de uma nova tecnologia é um processo demorado, que não pode ser imposto à população e não depende apenas de uma simples compra e instalação de equipamentos, principalmente no caso de um sistema fotovoltaico domiciliar de dessalinização, que demanda uma participação ativa do usuário em seu manejo e a compreensão da tecnologia para a sua correta operação e manutenção. Muitas vezes, o fracasso da introdução de uma tecnologia não está relacionado diretamente com as características da mesma, mas sim com a ausência de uma metodologia de implantação que considere as questões socioculturais e a participação dos usuários, considerando sua elaboração, implantação, operação e monitoramento. Tal metodologia deve ter forte caráter interdisciplinar, visto que envolve aspectos tecnológicos, econômicos, sociais, políticos e ambientais. Assim, um programa de instalação de sistemas fotovoltaicos domiciliares de dessalinização de água salobra como alternativa para o fornecimento de água potável, na região rural do Semiárido brasileiro, só poderá ser bem sucedido se houver grande atenção com a formação de pessoal especializado, criação de uma rede de assistência técnica e capacitação e treinamento dos usuários. Deve-se buscar o envolvimento dos usuários não só na utilização dos equipamentos, mas também nas demais etapas da de sua implantação, como o planejamento e gestão. Por outro lado, não se pode abdicar do envolvimento do poder público. Problemas técnicos de maior complexidade acabam por necessitar de recursos

humanos qualificados e recursos materiais e técnicos muitas vezes não disponíveis nos locais de implantação dos sistemas.

Para a adoção de sistemas fotovoltaicos domiciliares de dessalinização como mais uma alternativa para as políticas públicas de abastecimento de água para a população rural dispersa do Semiárido, quer seja enquadrada dentro de um programa já existente, ou proposto como um programa à parte, é de fundamental importância se basear em exemplos como o do Projeto Áridas e do Programa Um Milhão de Cisternas Rurais – P1MC. Um programa que proponha avaliar a viabilidade da utilização desses sistemas deve ser realizado através de um esforço colaborativo das diversas esferas do poder público, de órgãos não governamentais e com a participação direta dos usuários. Através de atividades participativas, a população deve apresentar seus problemas e dificuldades, além de discutir suas prioridades. Equipes técnicas devem ser organizadas para a realização de diagnósticos com a verificação de potencialidades e vulnerabilidades, além do debate com a população para se conhecer as práticas atualmente utilizadas e apresentação das alternativas viáveis. Caso haja a disponibilidade da utilização da água de poços, mas essa água apresente teores elevados de sais, o emprego de sistemas fotovoltaicos domiciliares de dessalinização pode ser uma alternativa viável. Nesse caso e havendo interesse por parte da população em tomar parte de um processo de capacitação, onde serão abordadas questões relacionadas ao uso, responsabilidade e conservação desse equipamento, pode-se proceder à elaboração de um programa para sua implantação, buscando o envolvimento das diversas instituições que possam colaborar com esse intento. Esse processo deve manter um caráter interdisciplinar desde a sua concepção e trabalhar com diferentes concepções de projeto, em função das características físicas culturais e econômicas de cada situação. Apesar de isso constituir um complicador e poder aumentar os custos iniciais, pode também contribuir para a aceitação e apropriação da tecnologia pelos usuários, melhorando o desempenho dos sistemas e diminuindo o custo a longo prazo.

É recomendável a elaboração de projetos piloto, de maneira a verificar a ocorrência de eventuais problemas e fazer correções, antes de alcançar uma maior escala. Para tanto, é necessária a determinação de fontes de financiamento como as previstas no Programa de Desenvolvimento do Setor Água – INTERÁGUAS. Após essa etapa e, a depender dos resultados apresentados, deve-se elaborar um projeto de maior porte, integrado ao Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Água - Água para Todos. A aquisição de equipamentos deve ocorrer mediante uma rigorosa comprovação de suas características, garantindo sua robustez e conformidade com os critérios estabelecidos para sua aceitação. É necessário que os resultados obtidos e dificuldades encontradas sejam objeto de contínuo

acompanhamento e discussão, com a participação dos usuários em todo processo, de maneira a se aprimorar a configuração dos sistemas e gestão do programa, além de estabelecer a periodicidade mais adequada para atividades de manutenção dos sistemas e avaliação da qualidade da água.

O presente trabalho demonstrou que a adaptação de sistemas de dessalinização de pequeno porte disponíveis comercialmente a sistemas fotovoltaicos domiciliares pode ampliar a utilização de sistemas fotovoltaicos de bombeamento em poços de água salobra. Apesar do mercado de dessalinizadores de pequeno porte ser voltado para produção de água desmineralizada a partir da água da rede de abastecimento de maneira a atender a demanda de hospitais e laboratórios, esses equipamentos podem ser utilizados para a produção de água potável a partir de água salobra. Também se comprovou que o equipamento pode ser operado de maneira intermitente por um longo período sem apresentar variações abruptas em seus parâmetros de funcionamento, como potência de operação, fluxo de permeado produzido e salinidade do permeado. Foi realizado o dimensionamento de um sistema fotovoltaico domiciliar de dessalinização de água para o fornecimento de água potável para uma família rural e foi determinado o seu custo.

Com um custo compatível com outras opções para o fornecimento de água potável em regiões isoladas do Semiárido, um sistema fotovoltaico domiciliar de dessalinização de água garante o fornecimento de água potável para uma família da zona rural da região que tenha acesso a algum poço com água salobra. Para que essa opção possa proporcionar uma nova alternativa de fornecimento de água potável para a população rural do Semiárido, o presente trabalho recomenda a sua utilização em um sistema de ponto de uso – SPU, configurando um sistema duplo de abastecimento, onde os moradores tenham acesso a dois tipos de água: água potável para beber e cozinhar e água com uma qualidade inferior, para uso geral.

Nesse sentido, há uma similaridade com a proposta do Programa Uma Terra e Duas Águas - P1+2, que leva em consideração a terra para produção e o abastecimento por dois tipos de água: – a água potável, para consumo humano e a água para produção de alimentos. No caso dos dessalinizadores domiciliares, deve-se considerar o uso direto da água salobra extraída de poços para certas atividades produtivas e em complementação aos demais mananciais disponíveis, enquanto a água para consumo humano seria garantida pela utilização dos dessalinizadores que, se utilizados em conjunto com as cisternas rurais de 16.000 litros, podem proporcionar enorme ganho na segurança hídrica para a população rural dispersa do Semiárido, principalmente nas ocasiões de ocorrência de secas plurianuais, quando apenas a

água reservada nas cisternas pode não ser suficiente para suprir a população com água potável para consumo humano.

O próximo passo a ser dado e que fica como proposta para trabalhos futuros é a instalação em campo e monitoramento da operação de sistemas fotovoltaicos domiciliares de dessalinização. O estudo do funcionamento desses sistemas em variadas condições de operação pode subsidiar diversos trabalhos que tratem questões técnicas como a proposição de modificações no equipamento, a utilização de membranas mais restritivas e bombas mais potentes para o tratamento de água com salinidades mais altas, a determinação da frequência ideal de troca dos elementos filtrantes e realização de sanitização do equipamento para o caso do tratamento de água salobra com diferentes concentrações e composições químicas. Outras questões também podem ser estudadas como os mecanismos de apropriação da nova tecnologia e o impacto na saúde e no modo de vida de famílias que passem a ser beneficiadas com esse serviço de fornecimento de água potável. Além disso, trabalhos em campo podem avaliar e ajudar na capacitação de equipes técnicas ou mesmo identificar problemas ainda não constatados durante a execução do presente trabalho.

Para os habitantes do meio rural do Semiárido, a garantia de abastecimento de água é uma conquista de cidadania, dentro de uma sociedade com grandes desigualdades socioeconômicas e regionais. O acesso à água constitui um direito essencial de todas as pessoas e o Estado deve realizar todos os esforços possíveis para assegurar a universalização e equidade no acesso desse serviço para toda a população.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB`SABER, A.N. **Os Domínios de Natureza no Brasil**. 7ª edição, Cotia, Ateliê Editorial, p. 81-98, 2012.

AMORIM, M.C.C.; PORTO, E.R. Avaliação da Qualidade Bacteriológica das Águas de Cisternas: Estudo de Caso no Município de Petrolina. In: 3º Simpósio Brasileiro de Captação de Água de Chuva no Semiárido, 2001, Pernambuco. – PE. **Anais 3º Simpósio Brasileiro de Captação de Água de Chuva no Semiárido**: ABCMAC, 2001

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Elaboração do Atlas de Obras Prioritárias para a Região Semiárida: Relatório Técnico nº 1**, Brasília: Agência Nacional de Águas, 2005a.

\_\_\_\_\_. **PROÁGUA Semiárido: Realizações e Resultados**, Brasília: Agência Nacional de Águas, 2005b.

\_\_\_\_\_. **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**, Brasília: Agência Nacional de Águas, 2006.

\_\_\_\_\_. **Cadernos de Recursos Hídricos 5 - Panorama do Enquadramento dos Corpos d'Água do Brasil/Panorama da Qualidade das Águas Subterrâneas no Brasil**, Brasília: Agência Nacional de Águas, 2007.

\_\_\_\_\_. **Programa Interáguas: Políticas Sociais do Programa Interáguas**, Brasília: Agência Nacional de Águas, 2010.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, 3ª edição, Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2008.

ASA – Articulação no Semiárido Brasileiro. **Caminhos para a Convivência com o Semiárido**, 3ª edição, Recife: ASA, 2008.

\_\_\_\_\_. **Programa Uma Terra e Duas Águas - P1+2: Resultados**. 2013 Disponível em:

<[http://www.asabrasil.org.br/Portal/Informacoes.asp?COD\\_MENU=5630&WORDKEY=Resultados](http://www.asabrasil.org.br/Portal/Informacoes.asp?COD_MENU=5630&WORDKEY=Resultados)>. Acesso em: 20 ago de 2013.

ASHBOLT, N.J. Microbial contamination of drinking water and disease outcomes in developing regions, **Toxicology**, v.198, p. 229–238, 2004.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water**, ASTM D1141-98e1, 1998.

BERNARDO, L.D.; DANTAS, A.D.B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. São Carlos: Rima, 2005.

BOBBIO, N. **Estado, Governo, Sociedade: Por uma Teoria Geral da Política**, 1ª edição, São Paulo: Paz e Terra, 1986.

BRASIL. MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **São Francisco**. Brasília, 2004. Disponível em: < <http://www.mi.gov.br/saofrancisco/integracao/index.asp>>. Acesso em: 11 ago de 2011.

\_\_\_\_\_. MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Plano Estratégico de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido - PDSA**. Brasília, 2005.

\_\_\_\_\_. MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **CONVIVER: Programa de Desenvolvimento Integrado e Sustentável do Semiárido**. Brasília, 2009a.

\_\_\_\_\_. MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2010 **Mapa do Projeto de Integração do São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional**. Disponível em: < <http://www.integracao.gov.br/projeto-sao-francisco1> > Acesso em: 15 set de 2010.

\_\_\_\_\_. MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2013, **Programa Água Doce – PAD: Perguntas Frequentes**. Disponível em: < <http://www.mi.gov.br/perguntas-frequentes#AGT12>>. Acesso em: 06 ago de 2013b.

\_\_\_\_\_. MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria nº 2.914**, de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, 2011b.

\_\_\_\_\_. MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Panorama do Saneamento Básico no Brasil - Cadernos Temáticos para o Panorama do Saneamento Básico no Brasil – vol. nº 7**. Brasília, 2011a.

\_\_\_\_\_. MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Programa PRODEEM e a Universalização do Acesso à Energia Elétrica no Brasil - Relatório 2002**, Brasília, 2002.

\_\_\_\_\_. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Catálogo de Indicadores de Monitoramento dos Programas do Ministério de Desenvolvimento Sustentável**, Brasília, 2007b.

\_\_\_\_\_. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Folder do Programa Água Doce**, MMA, Brasília, 2009b.

\_\_\_\_\_. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Programa Água Doce – Documento Base**. Brasília, 2012a.

\_\_\_\_\_. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Interáguas: Manual Operativo**. Brasília, 2012b.

\_\_\_\_\_. Presidência da República. Decreto nº 91.179, de 1 de Abril de 1985. Dispõe sobre a definição da estratégia de desenvolvimento rural para pequenos produtores, e a criação do Programa de Apoio ao Pequeno Produtor Rural, no âmbito do programa de Desenvolvimento da Região Nordeste - Projeto Nordeste. **Diário Oficial da União**, Brasília, 1985.

\_\_\_\_\_. Presidência da República. Decreto S/N, de 27 de Dezembro de 1994. Cria o Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios - PRODEEM e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 1994.

\_\_\_\_\_. Presidência da República. Lei nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da União**, Brasília, 1997.

\_\_\_\_\_. Presidência da República. Lei nº 11.445 de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nºs 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2007a.

\_\_\_\_\_. Presidência da República. Decreto nº 7.535 de 26 de julho de 2011. Institui o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Água - “ÁGUA PARA TODOS”. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2011c.

\_\_\_\_\_. Presidência da República. Instrução Operacional nº 1 de 9 de dezembro de 2013. Especifica o Modelo da Tecnologia Social de Acesso à Água - Cisterna de Placas Familiar de 16 mil Litros para Consumo Humano e seu Respectivo Valor de Referência. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2013a.

BRITO, A.U. **Otimização do Acoplamento de Geradores Fotovoltaicos a Motores de Corrente Alternada Através de Conversores de Frequência Comerciais para Acionar Bombas Centrífugas**. 2003.84 p. Tese (Doutorado em Energia) - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

BUARQUE, S.C.; TAVARES, R. **Desenvolvimento Regional Sustentável: Reflexões Sobre a Experiência do Banco do Brasil**, Brasília: Fundação Banco do Brasil/IICA, 2008.

CABRAL, R. Das Ideias à Ação, a Sudene de Celso Furtado - Oportunidade Histórica e Resistência Conservadora, **Cadernos do Desenvolvimento**, ano 5, n. 8, Centro Internacional Celso Furtado de Políticas para o Desenvolvimento, 2011.

CARVALHO, O. As Secas e Seus Impactos. In CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, **A Questão da Água no Nordeste**, CGEE, Brasília-DF, 2012.

CELPE – COMPANHIA ELÉTRICA DE PERNAMBUCO. Celpe instala placas solares para bombear água de poços em Serra Talhada, Disponível em: <http://www.celpe.com.br/Noticias/Pages/Celpe-instala-placas-solares-para-bombear-água-de-poços-em-Serra-Talhada.aspx>. Acesso em: 12 dez de 2013.

CHACON, S.S. **O Sertanejo e o Caminho das Águas: Políticas Públicas, Modernidade e Sustentabilidade no Semiárido**, Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2007.

CHALOULT, Y. Uma das Contradições da Nova República: O Projeto Nordeste, **Cadernos de Difusão de Tecnologia**, v. 2, n. 2, p. 271-304, 1985.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Dispõe sobre a aprovação da Política Nacional de Controle da Desertificação. Resolução nº 238, de 22 de dezembro de 1997. **Diário Oficial da União**. Brasília, 1997.

\_\_\_\_\_. 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. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. **Diário Oficial da União**. Brasília, 2005.

COSTA, A.C.M. Desenvolvimento de Membranas de Osmose Inversa resistentes À Deposição de Matéria Orgânica e Bioincrustações, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro-RJ, 2009.

COSTA, A.M.B.; MELO, J.G.; SILVA, F.M. Aspectos da Salinização das Águas do Aquífero Cristalino no Estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil, **Águas Subterrâneas**, v.20, n.1, p.67-82, 2006.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Programa de Água Subterrânea para a Região Nordeste - Programa Anual de Trabalho**, Brasília: CPRM, 2001.

\_\_\_\_\_. **Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea**, Recife: CPRM, 2005.

\_\_\_\_\_. PRODEEM - **Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios**. Água Subterrânea e Energia no Semiárido (apresentação da palestra), Rio de Janeiro, 2003.

FEDRIZZI, M.C., 2003. **Sistemas Fotovoltaicos de Abastecimento de Água para Uso Comunitário: Lições Apreendidas e Procedimentos para Potencializar sua Difusão**. 2003.174p. Tese (Doutorado em Energia)- Programa Interunidades de Pós- Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

FEITOSA, F.A.C. et al. **Hidrogeologia - Conceitos e Aplicações**, Rio de Janeiro: CPRM-LABHID, 2008.

FREITAS, M.A.S. **Que Venha a Seca: Modelos para Gestão de Recursos Hídricos em Regiões Semiáridas**, Rio de Janeiro: CBJE, 2010.

FREY, K. Políticas Públicas: Um Debate Conceitual e Reflexões Referentes à Prática da Análise de Políticas Públicas no Brasil. **Planejamento e Políticas Públicas**, v. 21, p. 211-259, 2000.

FUNASA - FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. **Manual de Saneamento**, 3ª ed. rev., Brasília: FUNASA, 2006.

\_\_\_\_\_. **Impactos na saúde e no sistema único de saúde decorrentes de agravos relacionados a um saneamento ambiental inadequado**, Brasília: FUNASA, 2010.

GELINSKI, C.R.O.G.; SEIBEL, E.J. Formulação de Políticas Públicas: Questões Metodológicas Relevantes, **Revista de Ciências Humanas**, v. 42, p. 227-240, 2008.

GOMES, G.M. **Velhas Secas em Novos Sertões**, Brasília: IPEA, 2001.

GRUPO FAE-DEN-UFPE. **Atlas Solarimétrico do Brasil**, Recife: UFPE, 1997.

GWSP - GLOBAL WATER SYSTEM PROJECT. **Segurança Hídrica para um Planeta sob Pressão - Transição para a Sustentabilidade: Desafios Interligados e Soluções**. São José dos Campos: IGBP, 2012.

HABERT, A.C.; BORGES, C.P.; NOBREGA, R. **Processos de Separação por Membranas**, Rio de Janeiro: E-papers, 2006.

HOWARD, G.; BARTRAM, J. **Domestic water quantity, service and health**. Geneva: World Health Organization, 2003.

HRAYSHAT, E.S. Brackish Water Desalination by a Stand Alone Reverse Osmosis Desalination Unit Powered by Photovoltaic Solar Energy, **Renewable Energy**, v. 33, p. 1784–1790, 2008.

IGLESIAS, M.F. **Ósmosis Inversa – Fundamentos, Tecnología y Aplicaciones**, Aravaca: McGraw-Hill, 1999.

IPEA - FUNDAÇÃO INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **PNAD-2007: Primeiras Análises, volume 5 – Saneamento Básico e Habitação**, Brasília: IPEA, 2008.

JALFIM, F.T. Considerações sobre a viabilidade técnica e social da captação e armazenamento da água da chuva em cisternas rurais na região semiárida brasileira. In: **Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Captação de água de Chuva no Semiárido**. Campina Grande. Petrolina: ABCMAC. CD-ROM, 2001.

LIMA, A.S.; BERNARDES, R.S. Levantamento Epidemiológico das Condições Sanitárias da Água para Abastecimento Público na Cidade de Redenção (PA). In: 21º Congresso brasileiro de engenharia sanitária e ambiental, 2001, João Pessoa. **Anais 21º Congresso brasileiro de engenharia sanitária e ambiental**: AIDIS, 2001.

LORENZO, E. **Electricidad Solar - Ingenieria de los Sistemas Fotovoltaicos**, Sevilla: Progensa, 1994.

LOWI, T.J. Four Systems of Policy, Politics, and Choice, **Public Administration Review**, v. 32, n. 4, p. 298-310, 1972.

MCKAUGHAN, S.E. **Projeto Áridas: Guia de Planejamento para o Desenvolvimento Sustentável**, MMA, Brasília: MMA, 2008.

MEJIA, A. et al. **Série Água Brasil: Água, Redução de pobreza e Desenvolvimento Sustentável**, Brasília, 2003.

MUGAMBI, J.N.K., KEBREAB, G. **Água Potável para Erradicar a Pobreza**, Norwegian Church Aid, 2006.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. The human right to water and sanitation. Resolution n° 64/292, de 28 de julho de 2010. **United Nations General Assembly**. New York, 2010a.

\_\_\_\_\_. Resolution adopted by the Human Rights Council. Human rights and access to safe drinking water and sanitation n° 15/19, de 6 de outubro de 2010. **United Nations General Assembly**. New York, 2010b.

ORRICO, S.R.M. **Sistema associativo de saneamento e seus efeitos sobre a população em comunidades do Semiárido baiano**. 2003. Tese (Doutorado em Saúde Ambiental). Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

PARREIRAS, L.E. **Negócios Solidários em Cadeias Produtivas: Protagonismo Coletivo e Desenvolvimento Sustentável**, Rio de Janeiro: IPEA/ANPEC/Fundação Banco do Brasil, 2007.

PEIXINHO, F.C.; OLIVEIRA, J.E.C. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - SIAGAS – As suas Funcionalidades e Importância no Contexto das Políticas Públicas. In: **XIII Congresso brasileiro de águas subterrâneas**, 2004, São Paulo. Disponível em: <[http://www.cprm.gov.br/publique/media/siagas\\_pub.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/siagas_pub.pdf)>. Acesso em: 2 set de 2010.  
PEREIRA JUNIOR, J.S. **Nova Delimitação do Semiárido**, Biblioteca Digital da Câmara dos Deputados, Brasília, 2007.

PETER-VERBANETS, M.; ZURBRÜGG, C.; SWARTZ, C.; Pronk, W. Decentralized systems for potable water and the potential of membrane technology. **Water Research**, v.43, p. 245-265, 2009.

PINA, A.V.V. **Dessalinização Solar no Abastecimento de Água para uma Família no Arquipélago de Cabo Verde**. Porto Alegre: UFRGS, 2004.

PNUD - PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO. **Declaração do Milênio**. 2000. Disponível em: <<http://www.pnud.org.br/odm/index.php?lay=odmi&id=odmi>>. Acesso em: 30 set de 2010.

\_\_\_\_\_. **RJ é o Estado que mais consome água**. 2004. Disponível em: <<http://www.pnud.org.br/saneamento/reportagens/index.php?id01=123&lay=san>>. Acesso em: 13 out de 2010.

\_\_\_\_\_. **Relatório do Desenvolvimento Humano 2006. A água para lá da escassez: poder, pobreza e a crise mundial da água**. New York, 2006.

REBOUÇAS, A. O Paradoxo brasileiro. **Cadernos Le Monde Diplomatique**, v. 3, p. 38-41, 2003.

RICHARDS, B.S.; CAPÃO, D.P.S.; SCHÄFER, A.I. Renewable Energy Powered Membrane Technology. 2. The Effect of Energy Fluctuations on Performance of a Photovoltaic Hybrid Membrane System, **Environmental Science & Technology**, v. 42, p. 4563–4569, 2007.

RIFFEL, D.B., CARVALHO, P.C.M. Small-scale Photovoltaic-powered Reverse Osmosis Plant Without Batteries: Design and Simulation, **Desalination**, v. 247, p. 378–389, 2008.

SBPC - SOCIEDADE BRASILEIRA PARA O PROGRESSO DA CIÊNCIA. Água Potável via Energia Solar, **Revista Ciência Hoje**, v.19, n.110, 1995.

SILVA, R.M.A. **Entre dois Paradigmas: Combate à Seca e Convivência com o Semiárido, Sociedade e Estado**. Brasília, 2003.

TEIXEIRA, E.C. **O Papel das Políticas Públicas no Desenvolvimento Local e na Transformação da Realidade**. Salvador: AATR, 2002.

THOMSON, A.M. 2003. **Reverse-Osmosis Desalination of Seawater Powered by Photovoltaics Without Batteries**. Leicestershire: Loughborough University, 2003.

UNICEF - FUNDO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A INFÂNCIA. **Alcançando o DM para água potável**, 2012. Disponível em:<  
[http://www.unicef.org/brazil/pt/media\\_22801.htm](http://www.unicef.org/brazil/pt/media_22801.htm)>. Acesso em: set de 2013.

VASCONCELLOS, E.B.C. **Dinâmica da Água e dos Nutrientes no Sistema de Produção Integrado Gerado pela Dessalinização da Água de Poço do Semiárido Brasileiro**. 2011. 99p. Dissertação (Mestrado em Ciências). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

WCED - COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. **Nosso Futuro Comum**. 2ª edição, Rio de Janeiro: Editora FGV, 1991.

WRIGHT, J.; GUNDRY, S.; CONROY, R. Household drinking water in developing countries: a systematic review of microbiological contamination between source and point-of-use, **Tropical Medicine and International Health**, v.9, p. 106–117, 2004.

ZAPAROLLI, D. Governo Planeja Atingir Todos os Lares em 2014, **Valor Econômico**, São Paulo, 02 set. 2013