



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS**



**FLÁVIO MELO DE LUNA**

**DESENVOLVIMENTO E TESTES DE UM  
DESSALINIZADOR SOLAR COM PRÉ-AQUECIMENTO  
DE ÁGUA**

**JOÃO PESSOA – PB**  
**2016**

**FLÁVIO MELO DE LUNA**

**DESENVOLVIMENTO E TESTES DE UM DESSALINIZADOR  
SOLAR COM PRÉ-AQUECIMENTO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em energias renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Orientadora: Dra. Flávia de Medeiros Aquino

Coorientador: Dr. Francisco Fechine Borges

**JOÃO PESSOA – PB  
2016**

L961d Luna, Flávio Melo de.  
Desenvolvimento e testes de um dessalinizador solar com  
pré-aquecimento de água / Flávio Melo de Luna.- João Pessoa,  
2016.  
101f. : il.  
Orientadora: Flávia de Medeiros Aquino  
Coorientador: Francisco Fchine Borges  
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR  
1. Energia solar. 2. Dessalinizador. 3. Coletor solar.  
4. Materiais alternativos.

UFPB/BC

CDU: 620.91(043)

**FLÁVIO MELO DE LUNA**

**DESENVOLVIMENTO E TESTES DE UM DESSALINIZADOR  
SOLAR COM PRÉ-AQUECIMENTO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em energias renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 14 de dezembro de 2016.

*Flávia de Medeiros Aquino*  
Prof. Dra. Flávia de Medeiros Aquino  
Orientadora  
UFPB

  
Prof. Dr. Francisco Fechine Borges  
Coorientador  
IFPB

*Márcio Gomes da Silva*  
Prof. Dr. Márcio Gomes da Silva  
Membro Externo  
IFPB

**JOÃO PESSOA - PB  
2016**

## DEDICATÓRIA

À minha companheira de todas as horas, Maria Luiza, a meus filhos Natália, Arthur e Hugo, a meu pai Aauto Luna (em memória), a minha mãe Maria de Lourdes, a meus irmãos e minha sogra Dulce Cantalice (em memória), por todo o apoio, contribuição, estímulo e compreensão.

## AGRADECIMENTOS

À Prof. Dra. Flávia Aquino, pela sua orientação, confiança e estímulo, para enfrentar e vencer esse construtivo desafio de produzir novos conhecimentos.

Ao Prof. Dr. Francisco Fechine, coorientador e amigo, pela longa caminhada criativa e inventiva no mundo da educação, por acreditar e estimular esse processo.

Aos professores e funcionários do CEAR, pelo seu compromisso com a pós-graduação e pela importante contribuição nessa caminhada de muito crescimento acadêmico.

Aos amigos e colegas de curso, que estiveram presentes neste momento de crescimento acadêmico com a partilha de conhecimentos, em especial, Thiago Melquiades, Alysson Domingos, Anderson Sá, Vicente Filho, Ivan Machado, Élson Silva, Ithyara Medeiros e Gustavo Assad.

Aos jovens David e Joebert, que contribuíram com o processo experimental de instalação e medições.

A minha irmã Glaucia e meu cunhado Genaro, por ceder o espaço para instalação do dessalinizador e apoiar irrestritamente todas as atividades realizadas na Granja Escola Janaina.

A minha irmã Vera Luna, por toda sua atenção, torcida e contribuição na revisão final da dissertação.

A toda a equipe do LETS – Laboratório Educacional de Tecnologias Sociais e Energias Renováveis, companheiros de luta por um mundo mais humano e inclusivo.

À equipe do Laboratório de Saneamento e à Profa. Dra. Carmem Gadelha, pela realização da análise da água bruta e dessalinizada.

À coordenação do Mestrado em Energias Renováveis sempre disponível e solícita nas rotinas burocráticas.

## RESUMO

Na região do semiárido brasileiro, há a necessidade de se ter água potável a partir da água salobra dos poços existentes, devido às secas sucessivas que castigam essa região. A finalidade deste trabalho foi estudar os materiais alternativos, dimensionar e desenvolver um protótipo de dessalinizador solar ativo com um coletor construído em alvenaria e ferrocimento, para a produção de água dessalinizada a partir de uma água salobra. O dessalinizador ativo dimensionado foi constituído de um coletor solar plano, utilizando 50 m de mangueira de polietileno em espiral, para o pré-aquecimento da água salobra a temperaturas de até 90 °C, e uma câmara de evaporação e condensação (trocador de calor) que recebe a água pré-aquecida do coletor solar, onde ocorrerá o processo de dessalinização a ebulição. Os testes foram realizados na cidade de João Pessoa (Latitude: 07° 06' 54" S Longitude: 34° 51' 47" W), na Paraíba, onde foram feitas as medições e comparações das temperaturas no interior e exterior do protótipo e medida a radiação solar diária do local e a quantidade de água dessalinizada produzida diariamente. No período de testes, o dessalinizador testado produziu em média de 3,3 l/m<sup>2</sup> de água sem sais. Assim, a energia solar, como fonte de energia alternativa e renovável, foi capaz de promover o aquecimento da água e a sua dessalinização, tendo em vista a alta disponibilidade dessa energia. A possibilidade da utilização do equipamento desenvolvido neste estudo, na região do semiárido nordestino, poderá trazer grandes benefícios à população, considerando as dificuldades de acesso à água potável. Além disso, os materiais alternativos propostos no dessalinizador e coletor solar mostraram-se eficazes para a dessalinização da água.

**Palavras-Chave:** energia solar, dessalinizador, coletor solar, materiais alternativos.

## ABSTRACT

In the Brazilian semi-arid region, there is a strong need to have drinking water taken from the brackish water of existing wells, due to the successive droughts in this region. The purpose of this work was to study alternative materials, to measure and test a prototype for an active solar desalination unit with a collector built with masonry and ferro-cement, and to produce desalinated water from brackish water. The dimensioned active desalinator consists of a flat solar collector using 50 m of a spiral polyethylene hose for the preheating of brackish water at temperatures up to 90 °C and an evaporation and condensation chamber (heat exchanger) that receives the preheated water from the solar collector where the boiling desalination process takes place. The tests were carried out in the city of João Pessoa (Latitude: 07°06'54"S Longitude: 34°51'47"W) in Paraíba, where measurements and comparisons of the temperatures inside and outside the prototype were made. The radiation of the place and the amount of desalinated water produced were also measured every day. During the testing period, an average of 3.3 liters per squared meter of desalinated water was produced daily. Thus, solar energy as an alternative energy source was able to promote water heating and desalination with great advantages for the families of the brazilian northeastern semi-arid region, given their difficulty of access to drinking water. In addition to this, the alternative materials proposed in the desalination unit and solar collector have been proven effective for water desalination.

**Keywords:** solar energy, desalinator, solar collector, alternative materials.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Delimitação do semiárido brasileiro.....	18
Figura 2 -	Espectro de radiação eletromagnética na natureza.....	21
Figura 3 -	Representação dos processos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre.....	22
Figura 4 -	Mapa da radiação solar global diária, média anual típica do Brasil (Wh/m <sup>2</sup> .dia).....	23
Figura 5 -	Esquema do processo de dessalinização.....	25
Figura 6 -	Sistema de dessalinização solar.....	26
Figura 7 -	Sistema de dessalinização solar ativo.....	27
Figura 8 -	Diagrama simplificado Destilação Flash de Múltiplos Estágios (MSF)..	32
Figura 9 -	Diagrama simplificado da Destilação por Múltiplo Efeito (MED).....	33
Figura 10 -	Diagrama de Destilação por Compressão de Vapor (CV).....	34
Figura 11 -	Ilustração de um Dessalinizador por Congelamento a Vácuo.....	35
Figura 12 -	Princípio da Eletrodiálise (ED).....	36
Figura 13 -	Osiose Reversa (OR).....	37
Figura 14 -	Balanco energético do destilador solar.....	39
Figura 15 -	Coletor solar plano.....	44
Figura 16 -	Dessalinizador projetado: visão em perspectiva.....	45
Figura 17 -	Dessalinizador projetado, vista em perspectiva, lado leste.....	46
Figura 18 -	Planta baixa do dessalinizador.....	47
Figura 19 -	Desenho do dessalinizador: (a) Corte A – A; (b) Vista lateral, leste.....	48
Figura 20 -	Desenho do dessalinizador: (a) Corte G – G; (b) Vista lateral, oeste; (c) Corte K – K.....	48
Figura 21 -	Desenho do dessalinizador: (a) Corte D – D; (b) Vista superior do dessalinizador.....	49
Figura 22 -	Dessalinizador projetado, vista explodida.....	55
Figura 23 -	Dessalinizador projetado, vista lado oeste.....	55
Figura 24 -	Dessalinizador projetado, vista ampliada, coletor e câmara.....	56
Figura 25 -	Dessalinizador projetado, tambor de armazenamento da água dessalinizada e <i>boiler</i> .....	56
Figura 26 -	Medidores de temperatura utilizados.....	58
Figura 27 -	Coletor de dados: (a) Gabinete com coletor de dados completo; (b) Cabo do sensor; (c) Gabinete e cabos dos sensores conectados.....	59
Figura 28 -	Montagem do coletor de dados: (a) Coletor de dados montado; (b) Colocação dos sensores.....	60
Figura 29 -	Vista em perspectiva, com localização dos sensores 1, 2 e 3.....	61
Figura 30 -	Detalhe da localização do sensor 4, no isolamento térmico.....	61
Figura 31 -	Base estrutural.....	64
Figura 32 -	Vista panorâmica, câmara e coletor.....	64
Figura 33 -	Lateral oeste da estrutura.....	64
Figura 34 -	Isolamento térmico com placas de EPS.....	64
Figura 35 -	Comparativo entre as temperaturas do ambiente, do isopor de isolamento térmico e do interior do coletor solar.....	65
Figura 36 -	Comparativo entre as temperaturas do ambiente, do isopor de isolamento térmico e da câmara (trocador de calor).....	66

Figura 37 -	Gráfico do comportamento das variáveis monitoradas, nos dias: (a) 01/10/2016; (b) 02/10/2016; (c) 03/10/2016 ; (d) 04/10/2016 e (e) 05/10/2016.....	68
Figura 38 -	Gráfico do comportamento das variáveis monitoradas, nos dias: (a) 06/10/2016; (b) 07/10/2016; (c) 08/10/2016 ; (d) 09/10/2016; (e) 10/10/2016 e (f) 11/10/2016.....	71
Figura 39 -	Gráfico do comportamento das variáveis monitoradas no período.....	74
Figura 40 -	Medições: (a) Medição local do pH (b) Medição local da condutividade elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).....	76
Figura 41 -	Acúmulo de sais no fundo da câmara de evaporação:(a) acúmulo de sais fundo negro; (b) visão geral do acúmulo de sais.....	77
Figura 42	Danos no coletor: (a) coletor danificado pelo calor; (b) detalhe da mangueira danificada.....	78
Figura 43 -	Comportamento médio diário dos indicadores monitorados para o intervalo em estudo, entre os dias 01 e 10/10/2016.....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Potencialidades, limitações e avanços da dessalinização solar.....	26
Tabela 2 -	Comparação entre inclinação, tipo de cobertura, produção e local dos estudos.....	42
Tabela 3 -	Relação de materiais utilizados na construção do dessalinizador.....	50
Tabela 4 -	Condutividade térmica dos materiais utilizados.....	53
Tabela 5 -	Tipos de vidros para cobertura de coletores e dessalinizadores solares...	53
Tabela 6 -	Propriedades térmicas da laje com EPS.....	53
Tabela 7 -	Propriedades térmicas da parede com bloco cerâmicos e argamassa.....	54
Tabela 8 -	Custo estimado do dessalinizador solar.....	54
Tabela 9 -	Comparação entre a média temperatura ambiente, média da radiação solar, condições climáticas e produção diária de água.....	66
Tabela 10 -	Medição diária, temperaturas, velocidade do vento e radiação do dia 01/10/2016.....	67
Tabela 11 -	Parâmetros físico-químicos da água, antes e pós-dessalinização solar.....	75
Tabela 12 -	Diferenças entre as temperaturas médias diárias do ambiente e do coletor.....	78

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.  
CEa – Condutividade Elétrica da Água.  
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente.  
CPC - Coletores Concentradores Parabólicos.  
DS – Dessalinização Solar Térmica.  
EPS – Poliestireno Expandido.  
ED - Eletrodíálise  
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia  
ITA - Instituto Tecnológico da Aeronáutica  
LM35 - Sensor de medição de temperatura  
MSF - Destilação Flash de Múltiplos Estágios (Multi-Stage Flash)  
MED - Destilação de Múltiplo Efeito (Multi-Effect Distillation).  
OI – Osmose Inversa.  
ONG – Organização Não-Governamental.  
OR – Osmose Reversa.  
PET - Polietileno Tereftalato.  
PVC - Policloreto de Vinila.  
RTC - Real Time Clock.  
VDC- Voltagem de Corrente Direta (Voltage Direct Current).  
VC - Destilação por Compressão de Vapor (Vapor Compression).  
 $\tau$  - Transmitância da cobertura.  
 $\alpha_g$  - Absorbância da cobertura.  
 $\alpha_w$  - Absorbância da bandeja (quantidade de água).  
Cwg - Capacidade térmica do sistema.  
 $\alpha_g H_s$  - Energia absorvida pelo vidro.  
 $\tau H_s$  - Energia transmitida pelo vidro.  
 $\tau H_s \times \alpha_w$  - Energia absorvida pela bandeja.  
Cwg x (dT<sub>w</sub>/dt) - Energia estocada no sistema.  
q<sub>ga</sub> - Perda através da cobertura.  
q<sub>b</sub> - Perdas através das parede laterais e do fundo.  
H<sub>s</sub> - Radiação solar (W/m<sup>2</sup>).  
 $\Lambda$  - Calor latente de evaporação da água.  
q<sub>r</sub> - Calor transferido pela radiação.  
q<sub>c</sub> - Valor transferido por convecção.  
q<sub>e</sub> - Calor transferido por evaporação-condensação.  
k<sub>b</sub> - Condutividade térmica.  
T<sub>w</sub> - Temperatura da água (interna).  
T<sub>a</sub> - Temperatura ambiente (externa).

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.2 Objetivos.....	16
1.2.1 Objetivo geral.....	16
1.2.2 Objetivo Específico.....	17
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>18</b>
2.1 O semiárido brasileiro.....	18
2.2 Energia e radiação.....	20
2.3 História da dessalinização solar.....	24
2.3.1 Dessalinização solar.....	24
2.4 Processos de dessalinização.....	31
2.4.1 Processos térmicos.....	31
2.4.1.1 Destilação Flash de Múltiplos Estágios MSF).....	31
2.4.1.2 Destilação de Múltiplo Efeito MED).....	33
2.4.1.3 Destilação por Compressão de Vapor CV).....	33
2.4.1.4 Congelamento.....	34
2.4.2 Processos por Membranas.....	35
2.4.2.1 Eletrodialise (ED).....	35
2.4.2.2 Osmose Reversa (OR).....	36
2.4.3 Balanço energético, produção e eficiência da dessalinização solar.....	37
2.5 Coletor Solar.....	43
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>45</b>
3.1 Protótipo do dessalinizador solar com uso de coletor solar.....	46
3.2 Materiais utilizados.....	49
3.3 Custo do protótipo do dessalinizador solar.....	54
3.4 Testes realizados.....	56
3.5 Medições experimentais do protótipo do dessalinizador solar.....	60
3.6 Limpeza do protótipo do dessalinizador solar.....	62
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>63</b>
4.1 Desempenho dos materiais utilizados na confecção do protótipo do dessalinizador solar.....	63
4.2 Análise térmica do protótipo do dessalinizador solar.....	65
4.3 Avaliação do desempenho do equipamento e das condições de operação.....	66
4.4 Custos de produção do dessalinizador solar e da água.....	74
4.5 Análises físico-químicas da água dessalinizada.....	75
4.6 Avaliação do coletor solar.....	77
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>80</b>
<b>6. SUGESTÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....</b>	<b>82</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>83</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>90</b>
A1 Medição diária da temperatura, da velocidade do vento e da radiação, dia 02/10/2016.....	90
A2 Medição diária da temperatura, da velocidade do vento e da radiação, dia 03/10/2016.....	91
A3 Medição diária da temperatura, da velocidade do vento e da radiação, dia 04/10/2016.....	92
A4 Medição diária da temperatura, da velocidade do vento e da radiação, dia 05/10/2016.....	93

A5	Medição diária da temperatura, da velocidade do vento e da radiação, dia 06/10/2016.....	94
A6	Medição diária da temperatura, da velocidade do vento e da radiação, dia 07/10/2016.....	95
A7	Medição diária da temperatura, da velocidade do vento e da radiação, dia 08/10/2016.....	96
A8	Medição diária da temperatura, da velocidade do vento e da radiação, dia 09/10/2016.....	97
A9	Medição diária da temperatura, da velocidade do vento e da radiação, dia 10/10/2016.....	98
A10	Médias de temperatura, velocidade do vento, radiação solar e produção de água dessalinizada, no período de 01 a 10/10/2016.....	99
A 11	Comparativo entre as temperaturas, ambiente (INMET), da câmara de evaporação e condensação, do vidro da câmara e do interior do coletor em 01/10/16.....	99
<b>ANEXOS.....</b>		<b>100</b>
1	Laudo dos resultados da análise da água bruta.....	100
2	Laudo dos resultados da análise da água dessalinizada.....	101

## INTRODUÇÃO

A disponibilidade e fornecimento de água é um dos principais problemas em muitas regiões do mundo, principalmente nas semiáridas, onde, além de escassa, grande parte é salobra e imprópria para o consumo humano. Esta condição leva à necessidade da utilização de equipamentos e técnicas para dessalinização e posterior utilização.

Um dessalinizador unifamiliar pode ser construído e utilizado em locais remotos e de difícil acesso ou isolados, ao contrário do que é comum em plantas de osmose reversa, onde geralmente os equipamentos são centralizados na sede de um município e as famílias beneficiadas têm que se deslocar para buscar a água.

A tendência mundial é que, para os próximos anos, haja um aumento ainda maior no consumo da água, devido à demanda e ao crescimento populacional acentuado e desordenado, principalmente nos grandes centros urbanos (MEIO AMBIENTE, 2016).

A importância da água na manutenção da vida é inquestionável, sendo essencial em todos os processos. A água cobre 75% da superfície do nosso planeta, dos quais 97,0% estão nos oceanos (água salgada), imprópria para o consumo humano. Os 3,0% restantes são de água doce, mas apenas 0,3% está ao alcance do homem, estando o restante distribuído pelas águas subterrâneas, calotas polares e outros (MORRISON, MORIKAWA, MURPHY & SCHULTE, 2009).

Em nosso país, apesar do grande potencial hídrico existente, todas as regiões têm sofrido com o problema da escassez provocado pelas mudanças climáticas. Segundo Formoso (2010), um dos maiores problemas do semiárido brasileiro é a escassez de água durante os períodos de estiagem, fato agravado pela presença de grande quantidade de sais dissolvidos nos mananciais disponíveis, provindos naturalmente de rochas que compõem o solo da região e das características de aridez do clima. Essa salinidade torna, muitas vezes, a água disponível imprópria para o consumo humano, para agricultura e até mesmo para consumo animal.

Cerca de 50% dos solos da Região Nordeste são representados por rochas do embasamento cristalino (granitos, gnaisses, xistos, etc.), de reduzida potencialidade hídrica, correspondendo essa área à localização das zonas de maior aridez dos Estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, norte da Bahia e leste do Piauí (MME, 2009). Essas rochas cristalinas apresentam baixos valores de porosidade e de permeabilidade primárias, o

que acarreta uma circulação lenta dos fluidos e, conseqüentemente, maior tempo de permanência das águas percoladas nos aquíferos, com uma maior salinização das mesmas.

Para solucionar ou amenizar problemas de acesso à água de qualidade na região semiárida brasileira, uma das técnicas utilizadas é a destilação solar, que serve tanto para dessalinização quanto para desinfecção, a partir de uma fonte de energia renovável e que pode ser realizada a nível familiar e de forma descentralizada.

Muitos trabalhos têm sido publicados por diversos pesquisadores sobre métodos de dessalinização, com a finalidade de reduzir os custos dos dessalinizadores e aumentar o acesso à água potável, nas regiões onde a água possui um teor médio de sais acima do permitido para consumo.

Esse processo térmico de dessalinização é muito antigo, imita o ciclo natural da água no planeta. O mais simples deles, como descrito por Soares (2004) e utilizado em lugares quentes, caracteriza-se pela construção de grandes tanques cobertos com vidro ou outro material transparente. A luz solar que atravessa o vidro provoca aquecimento da água, gerando vapores que, ao se condensarem na parte interna do vidro, retornam ao estado líquido, escorrendo para um sistema de coleta e armazenamento.

Nesse processo de dessalinização solar, o aquecimento da água aparece como uma das aplicações mais simples e práticas do uso da energia solar, especialmente no Brasil, que possui alta incidência de radiação solar, principalmente na região Nordeste.

O Censo Demográfico (2010), realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), revelou que a região Semiárida contabiliza 1.135 municípios distribuídos no espaço geográfico de nove unidades da Federação, totalizando uma extensão onde reside uma população de 22.598.318 habitantes, aproximadamente 12% da população brasileira.

Esta pesquisa visou o desenvolvimento e confecção de um dessalinizador solar para uso unifamiliar e descentralizado no semiárido nordestino brasileiro, utilizando materiais alternativos e de fácil aquisição, com um sistema de pré-aquecimento da água incorporado.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Desenvolvimento de um dessalinizador solar de alvenaria e ferrocimento, analisando sua eficiência na dessalinização da água salobra, para uso no semiárido brasileiro.



### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Identificar e estudar os materiais necessários e adequados à confecção de um dessalinizador solar;
- Projetar um protótipo do dessalinizador solar construído em alvenaria e ferrocimento;
- Avaliar o desempenho do protótipo, em condições de operação;
- Levantar os custos de produção do dessalinizador desenvolvido;
- Realizar análises físico-químicas da água dessalinizada.

Esta dissertação está organizada em 6 capítulos, assim distribuídos: Introdução; Objetivo Geral e Objetivos Específicos; Referencial Teórico; Materiais e Métodos; Resultados e Discussão; Conclusões e Referências Bibliográficas.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. O semiárido brasileiro

Na região Nordeste do Brasil, que ocupa uma área total de 1.561.177 km<sup>2</sup>, localiza-se o Semiárido Brasileiro, com área de 969.589 km<sup>2</sup>, em torno de 62% da região. Inclui os Estados do Ceará, Rio Grande do Norte, a maior parte da Paraíba e Pernambuco, Sudeste do Piauí, Oeste de Alagoas e Sergipe, região central da Bahia e uma faixa que se estende a Minas Gerais, seguindo o Rio São Francisco, juntamente com um enclave no vale seco da região média do Rio Jequitinhonha (BRASIL, 2005), como mostrado na Figura 1.

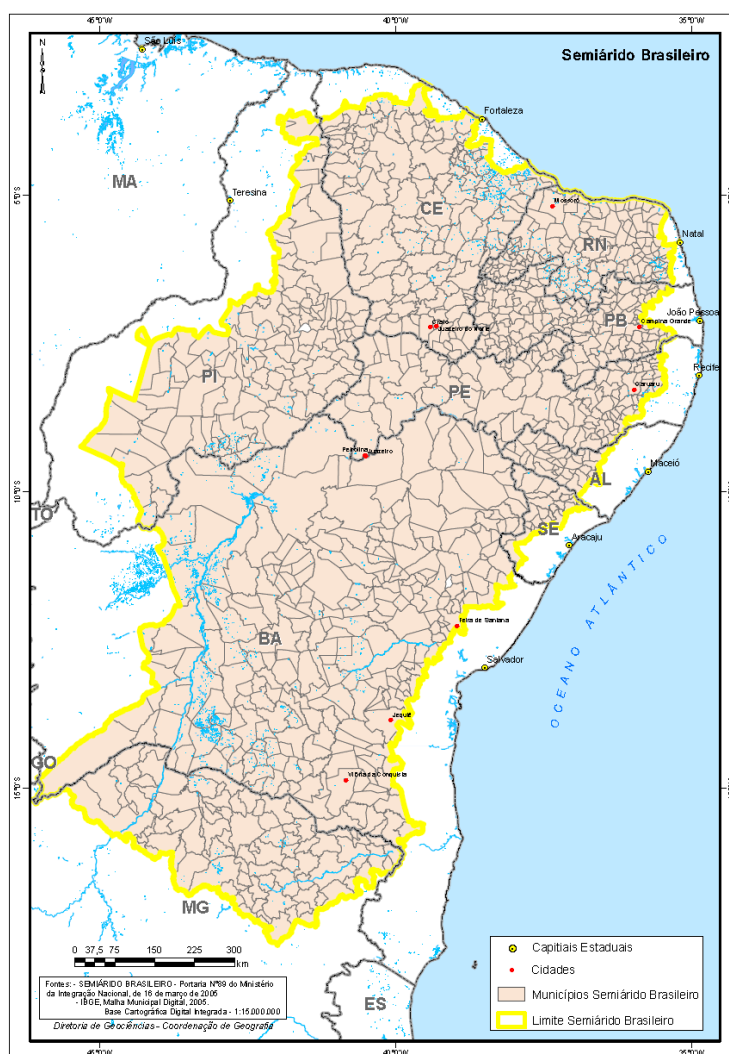


Figura 1: Delimitação do semiárido brasileiro.  
Fonte: IBGE, (2010).

Caracteriza-se por ser, atualmente, a zona semiárida mais povoada do mundo. Teve seu processo de ocupação e uso da terra iniciada na época do Brasil colonial, em decorrência da necessidade de expansão da criação de bovinos para atender à demanda dos engenhos.

A população da Região Nordeste ultrapassa os 55 milhões de habitantes (28,7% da população do País), onde se concentra a parcela mais pobre da população brasileira, com ocorrência de graves problemas sociais (IBGE, 2013).

De acordo com Marengo (2006), no semiárido brasileiro sempre ocorreram grandes eventos extremos de secas. A média anual da temperatura varia de 20 a 28 °C. Ressalta-se que, nas áreas situadas acima de 200 m de altitude e no litoral oriental, as temperaturas variam de 24 a 26 °C. As médias anuais inferiores a 20 °C encontram-se nas áreas mais elevadas da Chapada Diamantina, na Bahia, e da Borborema, na Paraíba (TUCCI, et al. 2001).

A região semiárida é uma área muito devastada devido à luta secular que o homem enfrenta com a natureza, na tentativa de sobrevivência. O regime pluviométrico é, em média, de 500 mm/ano, em estações bem distintas: chuvas de 3 a 5 meses no primeiro semestre do ano, chamada outono-inverno, e seca de 7 a 9 meses, chamada primavera-verão, podendo alongar-se (MENDES, 2006).

A disponibilidade de água para consumo humano depende das condições climáticas e do tipo dos reservatórios. Nos períodos de estiagem e nos anos de seca, a disponibilidade de água diminui drasticamente, comprometendo sua qualidade e fazendo com que o fornecimento ocorra por meio de carros-pipas e da utilização de água de poços, muitas vezes salobra, e que necessita ser dessalinizada.

Segundo Veríssimo & Feitosa (2002), no cristalino do semiárido brasileiro, os poços perfurados muito comumente apresentam baixas vazões, entre 1 e 3 m<sup>3</sup>/h e elevado conteúdo salino, acima dos padrões de potabilidade. Apesar disso, em muitas pequenas comunidades do interior nordestino, esses poços constituem a única fonte de abastecimento disponível.

Nas águas na região do semiárido do Ceará, com características semelhantes às da Paraíba, o valor médio da dureza dos poços no cristalino é de 1.094 mg/L de CaCO<sub>3</sub>, o que caracteriza águas muito duras. Para sólidos totais dissolvidos, a média é de 3.012 mg/L e o pH médio é de 7,7. Os valores elevados de sólidos totais dissolvidos e de dureza impõem restrições ao uso dessas águas para irrigação, indústria e consumo humano. Foi observada a predominância das águas cloretadas sódicas (VERÍSSIMO & FEITOSA, 2002).

Segundo Silva Junior *et al.* (1999), a partir de estudos realizados com as águas do cristalino do Nordeste brasileiro, pode-se afirmar que:

1. As águas possuem baixos níveis de sulfato, carbonato e potássio, independente da condutividade elétrica (CEa);
2. Há predominância de águas cloretadas sódicas, independentemente do nível de salinidade dos locais e das fontes de origem;
3. Os teores de cloretos podem atingir valores superiores a 80% do total de ânions presentes na água com níveis de salinidade elevados ( $CEa > 3.000 \mu S.cm^{-1}$ ).
4. As águas com baixos níveis de salinidade ( $CEa < 750 \mu S.cm^{-1}$ ) podem ter as concentrações percentuais de bicarbonato próximas ou superiores às de cloreto.

## 2.2. Energia e radiação solar

O Sol é uma esfera de matéria gasosa e intensamente quente, com um diâmetro de  $1,39 \times 10^6$  km. Está, em média, a  $1,5 \times 10^8$  km de distância da Terra. Sua superfície atinge uma temperatura de cerca de  $6.000^\circ C$  (DUFFIE e BECKMAN, 1991).

No centro do Sol, ocorre a fusão entre dois núcleos de hidrogênio e um de hélio. Dessa fusão, liberta-se uma grande quantidade de energia, que é irradiada para o espaço na forma de ondas eletromagnéticas. Devido à grande distância existente entre o Sol e a Terra, apenas uma ínfima parte da radiação solar emitida (cerca de duas partes por milhão) atinge a atmosfera terrestre, denominada de radiação extraterrestre.

Uma vez que o movimento de translação da Terra em redor do Sol é descrito por uma elipse, a radiação extraterrestre não é constante, variando cerca de 3% durante o ano. O valor desse fluxo radiativo no ponto de distância média entre o Sol e a Terra denomina-se por constante solar, com valor aproximado de  $1.367 W/m^2$  (GREENPRO, 2010).

A radiação solar é a principal fonte energética da vida na Terra, sendo responsável pelo dinamismo da atmosfera e pelas características climáticas terrestres (HILLS et al., 2013).

Segundo Pereira *et al.* (2002), a radiação solar é a fonte primária de todos os fenômenos atmosféricos e de processos físicos, químicos e biológicos observados em ecossistemas agrícolas, podendo ser aproveitada sob várias formas, tais como a captura pela biomassa, o aquecimento de ar e água para fins domésticos e industriais, foto eletricidade para pequenos potenciais e fontes para ciclos termodinâmicos variados.

Segundo Bezerra (1982), a energia solar é uma fonte não poluente, podendo ser utilizada de forma concentrada. A constante solar fora da atmosfera terrestre é de cerca de  $1,4 \text{ kW/m}^2$ . Ao entrar na atmosfera, parte desta energia é absorvida pelas impurezas, poeiras, vapor d'água e outros.

O espectro eletromagnético pode ser dividido em faixas, conforme os comprimentos de onda ( $\lambda$ ) das radiações: radiação ultravioleta ( $\lambda < 0,38 \text{ }\mu\text{m}$ ); radiação visível ( $0,38 \text{ }\mu\text{m} < \lambda < 0,78 \text{ }\mu\text{m}$ ) e radiação infravermelha ( $\lambda > 0,78 \text{ }\mu\text{m}$ ), conforme pode ser observado na Figura 2 (DUFFIE & BECKMAN, 1991).

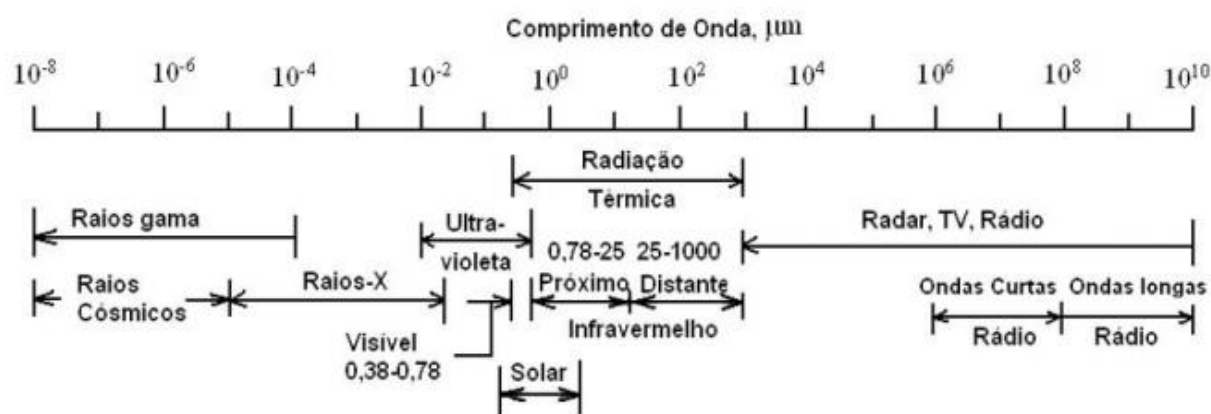


Figura 2 – Espectro de radiação eletromagnética na natureza.  
Fonte: Duffie & Beckman (1991).

Conforme Pereira (2010), a radiação global que atinge um plano localizado na superfície terrestre pode ser decomposta em três componentes:

- **Radiação direta:** constituída pelos raios solares recebidos do Sol, ou seja, é a radiação que chega à superfície vinda diretamente do disco solar (cerca de 70% do total da radiação);
- **Radiação difusa:** proveniente de todo o céu visível, excluindo o disco solar, e originada pelos raios não diretos e dispersos pela atmosfera. É muito variável no tempo, ou seja, é a radiação que é dissipada pelas nuvens e poeiras em suspensão (cerca de 28% do total da radiação);
- **Radiação refletida:** constituída pela parcela de radiação que é refletida ao atingir o solo, denominada de radiação de albedo, ou seja, é a radiação que chega a uma superfície ao ser refletida por outra superfície (cerca de 2% do total da radiação).

Quando a radiação solar entra na atmosfera da Terra, uma parte da energia incidente sofre dispersão por partículas da atmosfera e outra parte é absorvida. Da parte dispersa, também chamada de radiação difusa, uma parcela volta para o espaço e a parte restante atinge a Terra, que a absorve. A radiação solar que chega diretamente na Terra sem qualquer perturbação é chamada de radiação direta.

A radiação difusa é inicialmente interceptada por constituintes do ar, como vapor de água, dióxido de carbono, nuvens, poeiras, para depois ser liberada em várias direções. Com isso, as proporções relativas às radiações difusa e direta vão depender do local, estação do ano, elevação do nível médio do mar e período do dia (SEN, 2004). A Figura 3 mostra os diversos percentuais de absorção e reflexão da radiação incidente.

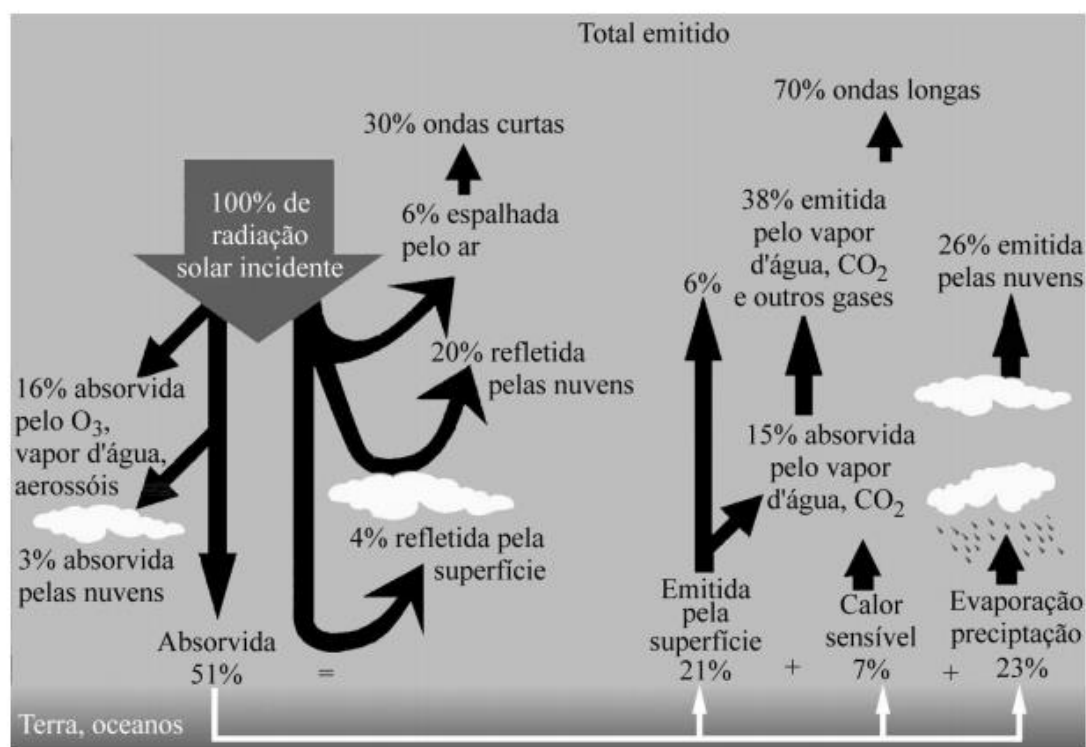


Figura 3 – Representação dos processos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre.  
Fonte: Martins et al (2016).

A depender da forma como essa energia é captada, as temperaturas obtidas podem variar da temperatura ambiente até milhares de graus centígrados, o que demonstra o potencial de uso enquanto energia renovável.

Segundo Soares (2004), para evaporar 1 kg de água, inicialmente a uma temperatura de 30°C, é necessário cerca de  $2,4 \times 10^6$  J. Assumindo-se uma insolação média de  $250 \text{ W/m}^2$ , esta energia poderia evaporar um máximo de  $9 \text{ l/m}^2$  dia. Na prática, perdas de calor ocorrerão, reduzindo a produção para valores típicos de  $4$  a  $5 \text{ l/m}^2$  dia, o que corresponde a

uma eficiência de 45 a 55 %. A razão porque o destilador solar é ineficiente é que uma energia considerável deve ser fornecida para a evaporação da água.

Cálculos realizados por especialistas mostraram que a energia solar incidente sobre um milésimo da superfície da Terra, com uma eficiência de apenas 1%, representa oito vezes todo o consumo mundial de energia dos dias atuais, cerca de 12.000 TWh, mostrando que essa é uma fonte de energia renovável que pode ser muito mais explorada e utilizada, de forma sustentável, no mundo (BEZERRA, 2001).

O Brasil é privilegiado em termos de incidência de radiação solar global, como apresentado na Figura 4. No semiárido, há diversas regiões com incidência acima de 5.000 Wh/m<sup>2</sup> dia, energia ainda muito pouco explorada.

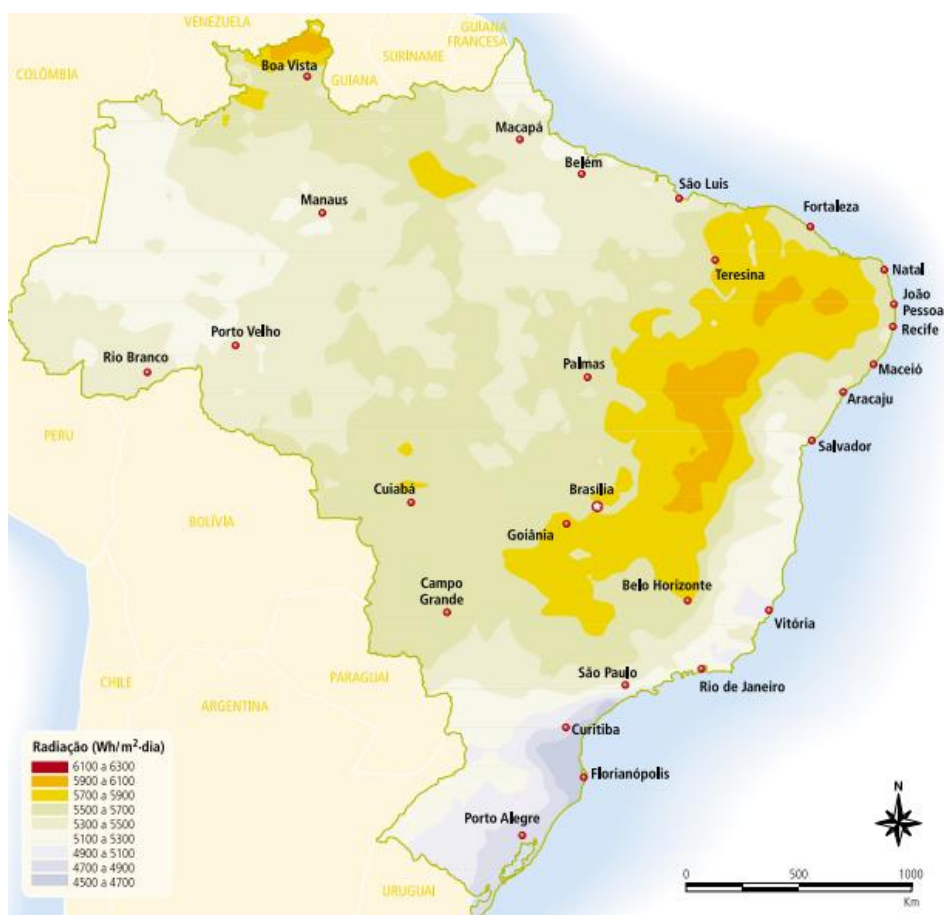


Figura 4 – Mapa da radiação solar global diária, média anual típica do Brasil (Wh/m<sup>2</sup>.dia)  
Fonte: Atlas de Irradiação Solar no Brasil (1998).

## **2.3 História da dessalinização solar**

A dessalinização da água salina com uso de energia solar, para transformá-la em água potável, é uma técnica antiga, relatada por Aristóteles em 2300 a.C. Ele dizia que “água salgada, quando passa a vapor, torna-se doce e o vapor não produz água salgada quando condensa”. Vários outros povos relatam experiências de uso desta técnica: os alquimistas árabes, ingleses (nas navegações), africanos e, mais recentemente, a experiência realizada em Las Salinas, no Chile, por Charles Wilson, em 1872, tida como a primeira instalação de dessalinização solar, numa área de 4.459 m<sup>2</sup> e produção de cerca de 20 mil litros de água dessalinizada por dia (MALUF, 2005).

Em 1961, foram publicados dois importantes trabalhos na área de destilação solar: o trabalho de Dunkle sobre destiladores solares simples e múltiplo efeito e o trabalho de Lof, Eibling e Bloemer, sobre balanço de energia em destiladores solares (SOUZA, 2004). Quanto ao Brasil, há registros de experiências com destilação solar realizadas sob os auspícios do ITA - Instituto Tecnológico da Aeronáutica, em São José dos Campos na década de 70. Mais recentemente, em 1987, a Petrobrás iniciou o seu programa de dessalinização de água do mar, para atender às suas plataformas marítimas, usando o processo da osmose reversa (SOUZA, 2004).

Além destas, existem diversas outras pesquisas realizadas e em andamento sobre a dessalinização solar e suas aplicações, das mais simples às mais sofisticadas, tanto para atender a demandas residenciais quanto de centros urbanos, em maior escala. Incluem-se neste grupo as experiências e pesquisas realizadas recentemente no semiárido nordestino, por suas características climáticas, o que demonstra a importância desta técnica como alternativa para o tratamento da água (MALUF, 2005).

### **2.3.1 Dessalinização Solar**

A dessalinização solar da água é realizada por meio de um destilador solar. Dentre os vários tipos existentes, o mais simples é o tanque raso, que reproduz o processo natural que ocorre quando a radiação solar aquece um recipiente raso de concreto ou outros materiais, com superfície escura. A água é aquecida e muda de estado, passando a vapor que, ao encontrar o vidro da cobertura, que está em temperatura mais baixa, condensa-se. A água



destilada, então, escorre para as canaletas localizadas nas laterais, sendo coletada em recipientes.

Neste processo, a câmara funciona como uma armadilha térmica, onde a energia solar é aprisionada, replicando o efeito estufa em um ambiente controlado. O vidro comum tem elevada transparência para a radiação solar, no entanto, é opaco para a radiação térmica emitida pela água no interior do dessalinizador. A água, ao evaporar, deixa sais e impurezas no fundo do recipiente.

A dessalinização solar da água salina ou salobra consiste na remoção de sais dissolvidos na água a níveis ou concentrações que possibilitam a sua utilização tanto para o consumo humano como para outras atividades em que é necessária água doce. (CLAYTON, R. 2006).

O processo térmico de dessalinização solar corresponde ao processo natural do ciclo da água, ou seja, a água salgada aquece, evapora, condensa e precipita sob a forma de água potável. Para que ocorra a evaporação da água, é necessário atingir-se temperatura adequada em relação à temperatura ambiental e, ao mesmo tempo, assegurar uma grande quantidade de energia para manter o processo (Figura 5).



Figura 5 - Esquema do processo de dessalinização.  
Fonte: Silvero (2013), adaptado pelo autor.

Segundo Clayton (2006), o processo de destilação solar ocorre quando a água do mar é depositada dentro de um tanque. Este tanque é dotado internamente de uma superfície negra que absorve calor e coberto com placas de vidro transparente que permitem a entrada de radiação solar. O calor proveniente da radiação solar aquece e evapora a água do mar. O vapor, sem os sais dissolvidos, é condensado na superfície de vidro e recolhido como água destilada. Este método de destilação pode ser considerado como destilação de único efeito.

Como citado por Maluf (2005), o destilador solar clássico é conhecido do homem há muito tempo e o seu princípio de funcionamento é a repetição do ciclo hidrológico natural, que ocorre em uma câmara de fundo negro com água e coberta com vidro transparente, levemente inclinado, que, ao receber a radiação solar através do vidro, é absorvida pelo

fundo negro. A água aquecida evapora e condensa na parte interna do vidro, escoando para uma calha, onde é recolhida, como esquematizado na Figura 6.

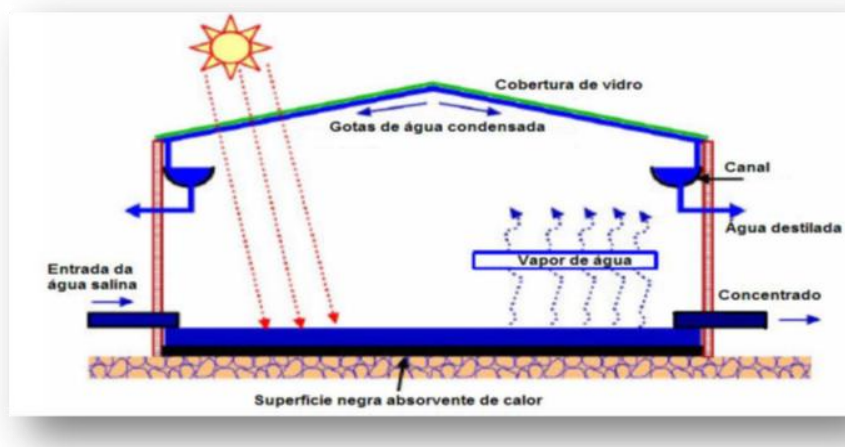


Figura 6 - Sistema de dessalinização solar.  
Fonte: Clayton, (2006).

Assim, como os demais processos, apresenta vantagens e desvantagens, conforme quadro apresentado por Formoso (2010), que considera vários aspectos relevantes quanto às potencialidades, limitações e avanços da dessalinização solar.

**Tabela 1** - Potencialidades, limitações e avanços da dessalinização solar.

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

Fonte: Formoso (2010).

É consenso entre alguns autores que a destilação solar se destaca entre as tecnologias existentes, por ser a que mais se adequa, técnica e economicamente, a regiões como a do

semiárido brasileiro, caracterizada pelo baixo desenvolvimento, dificuldade de acesso a água potável, mesmo com a existência de reservas subterrâneas salobras, devido ao tipo de solo e clima.

Como desvantagens, há a baixa produção  $m^2$  e a extensa área que ocupa para atingir produção mais significativa. No entanto, considerando-se unidades que atendam às necessidades de uma família, utilizando-se materiais e equipamentos de baixo custo, com manutenção simples e mais eficiente, as desvantagens ficam minimizadas.

É importante referir que este método, ao utilizar a energia solar, é pouco dispendioso em termos energéticos, embora necessite de grandes áreas de implantação, com a construção de tanques de grandes dimensões (LEVY 2008), o que pode tornar a utilização difícil ou restrita a certas zonas com climas não favoráveis. Segundo Semiat (2000), são necessários  $250 m^2$  para obter  $1m^3$ /dia de água potável.

Jorge (2011) cita que os sistemas de destilação solar são classificados de acordo com o tipo de energia aplicada à bacia de água, dividindo-se em sistemas passivos e sistemas ativos. Nos sistemas ativos (Figura 7), uma parcela extra de energia é introduzida no sistema, mais concretamente na bacia de água, promovendo uma evaporação mais rápida. Essa energia extra pode ser introduzida por um coletor/concentrador solar. Se nenhum modo extra de energia for usado, o sistema é conhecido por destilador solar passivo.

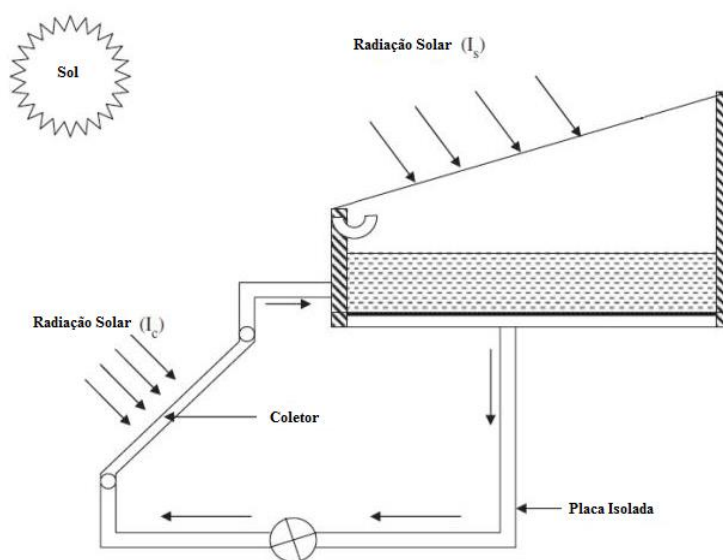


Figura 7 - Sistema de dessalinização solar ativo.  
Fonte: Tiwar, Dimri e Chel G.N. ( 2009 *apud* Jorge 2011)

De acordo com Tiwari & Tiwari (2007), a destilação solar passiva é a solução economicamente mais recomendada para fornecimento de água potável, enquanto o sistema ativo é a solução mais atrativa do ponto de vista comercial.

Tiwari, Dimri e Chel (2009) compararam os destiladores solares passivos com os ativos e concluíram que, com o sistema ativo, consegue-se uma melhoria na produção em cerca de 3 a 4 vezes, embora no que diz respeito à eficiência térmica, haja uma redução de eficiência dos sistemas ativos quando comparados com os sistemas passivos.

Como descrito por Formoso (2010), o desenvolvimento de um método sustentável de dessalinização exige a minimização do consumo de energia e, igualmente, o uso de fontes de energias renováveis que possam permitir que países menos desenvolvidos tenham acesso a águas tratadas. Diferentes opções utilizando energias alternativas podem ser sugeridas, no entanto, os sistemas baseados na energia solar estão entre os mais realistas.

O mercado da dessalinização continua a crescer exponencialmente, esperando-se que, de 2006 até 2015, seja duplicada a capacidade de produção instalada, de acordo com Araújo (2013). Estima-se que, até janeiro de 2005, 10.000 unidades de dessalinização foram construídas ou contratadas no mundo, representando uma capacidade instalada de produção de cerca de 36 milhões de m<sup>3</sup>/dia de água proveniente das mais variadas origens. Estima-se que, em 2015, a produção seja em torno de 100 milhões de m<sup>3</sup>/dia (COOLEY *et al*, 2013).

Em relação à eficiência dos dessalinizadores solares, uma opção interessante é a do uso de um coletor plano acoplado ao destilador. Dessa maneira, além da água quente para o banho, a eficiência da destilação será aumentada, devido à maior temperatura da água (MALUF, 2005).

A produção de água destilada a partir de corpos d'água contaminados é outra alternativa para o reuso da água, pois testes de laboratório mostraram que o destilador solar pode eliminar, além de sólidos não voláteis, bactérias (HANSOM *et al*, 2004).

As perdas típicas em um destilador solar do tipo tanque raso são causadas pela reflexão da radiação incidente no vidro (cerca de 10% da energia total), absorção no vidro (10%), perdas por radiação da cobertura de vidro para o espaço (3,7%), perdas por convecção do vidro para o ambiente (12,2%), perdas por condução da base do reservatório para o solo (16%, mas com o uso de um bom isolante térmico pode cair para 5%) e outras perdas menores devido aos vazamentos de calor (9,7%). Esses valores foram extraídos de experimentos feitos na Índia (MALUF, 2005).

A velocidade do vento (efeito Bernoulli) e as diferenças de temperatura contribuem para as perdas de calor. Assim, considerando-se esses números como referência, 38 a 43% da energia solar recebida pelo destilador é utilizada no processo de transferência de massa da evaporação. Existem registros de eficiência máxima atingida da ordem de 60%, indicando que o uso de vedadores ou selantes são fundamentais para uma eficiente operação dos destiladores (MALUF, 2005).

Uma regra empírica geral é que 1 m<sup>2</sup> de destilador produzirá cerca de 4 litros de água doce por dia, valor esse considerado baixo (BUROS, 2000).

Cappelletti (2002) descreve que um destilador solar convencional produz aproximadamente 5 l/m<sup>2</sup> dia, em um dia quente de verão; e 2 l/m<sup>2</sup> dia, em um dia de inverno, com radiação difusa. Já Tiwari (2008) afirma que, em climas quentes, os destiladores solares produzem geralmente entre 2 e 3 l/dia, para cada m<sup>2</sup> de área.

Segundo Jorge (2011), os resultados obtidos revelaram que os parâmetros que mais influenciam no desempenho das unidades de destilação solar são: a profundidade da bacia, a espessura do isolamento do revestimento da bacia, o ângulo de inclinação da cobertura, o número de coletores solares e o ângulo de inclinação dos coletores. Além destes parâmetros relativos à instalação, também se verificou que há forte dependência do clima, que corresponde à intensidade de radiação solar e da temperatura ambiente.

Foi também possível observar um aumento de produção da destilação solar ativa relativamente ao caso passivo, assim como o aumento de produção e de eficiência térmica produzida pela aplicação do sistema regenerativo ao caso passivo (JORGE, 2011).

O processo de dessalinização, essencialmente, efetua a separação da água salobra em dois fluxos: um com baixa concentração de sais dissolvidos (água doce ou potável), e o outro contendo um concentrado de sais dissolvidos (fluxo de salmoura). O dispositivo requer energia para operar e pode usar variadas tecnologias para efetuar a separação (SOUZA, 2006).

Segundo Mattoso (2009), uma construção com desenho ou projeto adequado do recipiente (reservatório) permite que esse vapor, produzido a 55 °C por efeito da radiação solar, seja condensado pela mesma água extraída do poço tubular, fazendo-a circular por fora da “serpentina do alambique” que, quando acoplado a uma parte integrante do reservatório, passa a constituir o dessalinizador.

Carvalho *et al.* (2004) desenvolveram estudos sobre o dessalinizador de baixo custo para uso familiar, para atender a comunidades na região do semiárido brasileiro, com a construção

de dois dessalinizadores, utilizando materiais de fácil aquisição e baixo custo: madeira, forro de PVC, lona plástica, vidro, tinta preta. O volume diário de água produzido neste dessalinizador foi de até de 2,6 litros por dia, obtendo-se uma concentração de sal na faixa de 200 mg/l, abaixo do limite de 500 mg/l para água doce, classe 1 (CONAMA 357, 2005). Esse dessalinizador apresenta baixo investimento inicial e tecnologia simples, necessitando de pouca manutenção e grande confiabilidade (CARVALHO et al., 2004).

Sousa (2010) afirma que o uso de energias renováveis para dessalinização é muito limitado, correspondendo a apenas 2 % das fontes.

Jorge (2011), em seus estudos, observa que a radiação solar direta e difusa, ao chegar à cobertura, sofre efeitos da reflexão, absorção e transmissão. Depois de refletida e absorvida na cobertura, é transmitida através do meio transparente, sofre reflexão na superfície da água, absorção na camada de água e reflexão e absorção no fundo da bacia, com o conseqüente aquecimento da água contida na bacia, que é evaporada em condições de saturação no interior da unidade.

As variações destes processos de transferência de calor dependem de vários parâmetros atmosféricos, como variação da intensidade de radiação e a variação da temperatura ao longo de um dia; da latitude e da longitude do local onde a unidade se encontra montada; da velocidade do vento e dos parâmetros da própria unidade, como espessura da cobertura, orientação e inclinação, profundidade da bacia e das propriedades dos materiais usados na unidade (JORGE, 2011).

Ainda segundo Jorge (2011), para uma aceitação da destilação solar em larga escala é imperativo conscientizar as pessoas de que esta é uma alternativa real para o tratamento de água, ação que poderá ser realizada nas escolas, universidades, comunicação social e comunidade científica, tendo como objetivo quebrar a barreira cultural estabelecida pelas tradições locais.

Atualmente, tem aumentado o interesse por alternativas de baixo custo e eficientes para dessalinização da água que atendam às demandas da região semiárida, sendo identificados vários estudos desenvolvidos por universidades e organizações da sociedade civil. Outro aspecto é o grande potencial solar do Brasil e, em especial, da Região Nordeste, que permite a utilização de sistemas solares térmicos para produção de água potável, fator que aumenta a eficiência deste tipo de equipamento. Consideram-se, também, estudos que apontam que mais de 60% da água dessalinizada no mundo é produzida com calor (SOARES, 2004).

## 2.4 Processos de dessalinização

Um dispositivo de dessalinização essencialmente efetua a separação da água salina em dois fluxos: um com baixa concentração de sais dissolvidos (o fluxo de água destilada) e o outro contendo os sais dissolvidos remanescentes (o concentrado ou fluxo de salmoura). O dispositivo requer energia para operar e pode usar tecnologias variadas para efetuar a separação (SAGIE, 2001).

São conhecidas e estudadas diversas formas de dessalinização de água. Normalmente, esses processos são classificados de acordo com o tipo de fonte de energia utilizada e pela utilização ou não de membranas especiais. Como citado por Souza (2006), divide-se em:

- **Processos térmicos:**
  - Destilação Flash de Múltiplos Estágios (Multi-Stage Flash – MSF);
  - Destilação de Múltiplo Efeito (Multi-effect distillation – MED);
  - Destilação por Compressão de Vapor (Vapor Compression – VC);
  - Destilação Solar Térmica (DS); e
  - Congelamento.
- **Processos por membranas:**
  - Eletrodialise (ED);
  - Osmose Reversa (OR).

Em âmbito mundial, a destilação, utilizando fontes de energia como combustíveis fósseis ou eletricidade, corresponde a 65% da capacidade instalada mundial; a osmose reversa corresponde a 30% da capacidade instalada e a eletrodialise aos restantes 5% da capacidade instalada. A destilação solar térmica tem uma participação quase insignificante em relação aos outros processos (MALUF, 2005).

### 2.4.1 Processos Térmicos

#### 2.4.1.1 Destilação Flash de Múltiplos Estágios (MSF)

Como descrito por Formoso (2010), consiste numa série de câmaras onde a evaporação da água salina resulta da pressão aplicada. Atualmente, corresponde a mais de 40% da

capacidade de dessalinização instalada, em nível mundial. A água salina é aquecida e vaporizada em várias câmaras, terminando com o recolhimento da água destilada pela condensação do vapor (CRUZ, 2012).

A água salina é aquecida e entra numa primeira câmara, considerada o primeiro estágio, onde vaporiza pela alta temperatura. O vapor é recolhido sob a forma de destilado, através do condensador da câmara. A salmoura restante passa para a fase seguinte, em que o processo passa a ocorrer em temperatura da operação inferior à anterior. Esta diminuição da temperatura deve-se à diminuição de pressão entre fases consecutivas (CLAYTON, 2006; GUERREIRO, 2009), como mostrado na Figura 8.

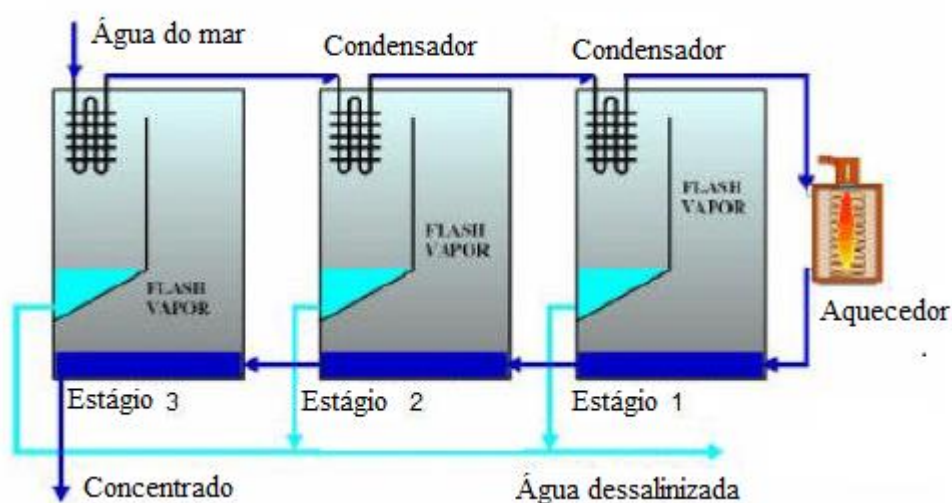


Figura 8 - Diagrama simplificado Destilação Flash de Múltiplos Estágios (MSF).  
Fonte: Clayton (2006 *apud* Cruz 2012).

O processo é repetido, sucessivamente, por diversas câmaras, considerados estágios do processo, até que se atinge a pressão atmosférica e até que a salmoura atinja valores de concentração de sais muito elevados, sendo esta enviada para o meio receptor. O condensador é arrefecido pela própria água do mar que alimenta o sistema (CLAYTON, 2006; GUERREIRO, 2009; CRUZ, 2012).

Este método de destilação pode conter quatro a quarenta câmaras onde se realizam o aquecimento, a evaporação e a condensação dos vapores e cada extração do destilado numa câmara representa um estágio do processo, por isso este método é designado por destilação multiestágio (ALVES, 2007).



### 2.4.1.2 Destilação de Múltiplo Efeito (MED)

O processo MED é semelhante ao de MSF, diferenciando-se pelo fato do vapor obtido no primeiro compartimento, através do aquecimento dos jatos de água salina, ser utilizado para aquecer e evaporar a água salina no compartimento seguinte. A parte da água que não foi evaporada num compartimento é dirigida para o compartimento seguinte, onde desempenhará uma dupla função: esfria o vapor no circuito e, ao mesmo tempo, é aquecida e vaporizada (CRUZ, 2012), como mostrado na Figura 9.

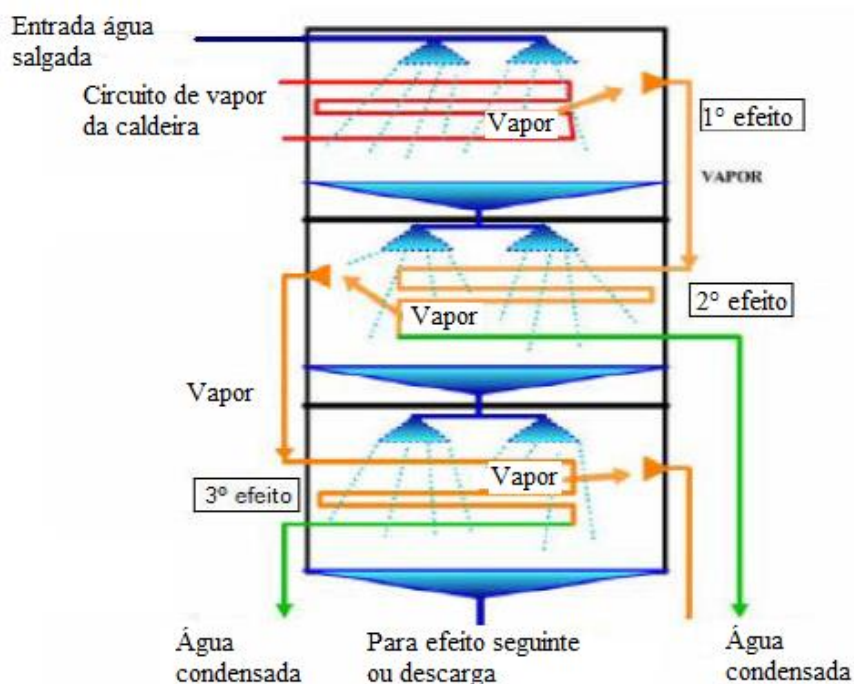


Figura 9 - Diagrama simplificada da Destilação por Múltiplo Efeito (MED).  
Fonte: Clayton (2006 *apud* Cruz 2012).

Neste sistema, a temperatura diminui gradualmente nos sucessivos compartimentos e o processo termina quando o vapor não tem temperatura suficiente para evaporar a água salina no compartimento (CLAYTON, 2006).

Segundo Alves (2007), a temperatura máxima de operação neste tipo de destilador é da ordem de 64 -70 °C e a capacidade média varia de 2.000 a 20.000 m<sup>3</sup>/dia.

### 2.4.1.3 Destilação por Compressão de Vapor (CV)

O princípio de funcionamento da destilação por compressão de vapor, ou VCD (*Vapour Compression Distillation*) é semelhante ao do MED, com a diferença de que a VCD tem por

base a compressão do vapor de água gerado na evaporação da água a altas pressões (CRUZ, 2012), como mostrado na Figura 10.

Este método de dessalinização é empregado na produção de água potável em estações de pequena e média escala, como em hotéis, barcos e pequenas comunidades. A capacidade destas unidades é, em geral, inferior a 100 m<sup>3</sup>/dia, embora existam algumas que atingem os 3000 m<sup>3</sup>/dia. O consumo energético varia de 7 a 12 kWh/m<sup>3</sup>.

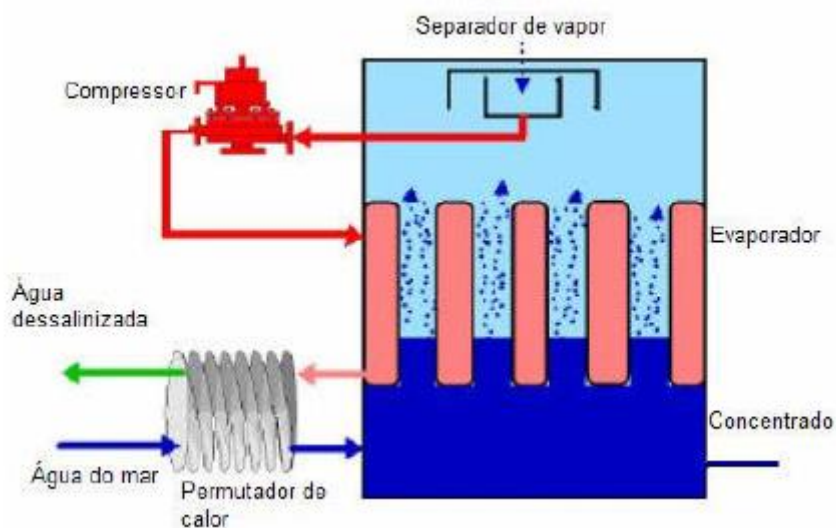


Figura 10 - Diagrama de Destilação por Compressão de Vapor (CV).  
Fonte: Clayton (2006 *apud* CRUZ 2012).

#### 2.4.1.4 Congelamento

Como descrito por Clayton (2006, *apud* CRUZ, 2012), na dessalinização por congelamento em vácuo, a água do mar é injetada para o interior de uma câmara de vácuo a uma pressão aproximadamente 0,004 atm. A esta baixa pressão, ocorre subitamente uma evaporação parcial da água injetada, bem como a perda de calor da água, o que provoca o seu arrefecimento e a formação de cristais de gelo. Os cristais de gelo que flutuam na água salina são lavados com água doce, para remoção dos sais adsorvidos e, depois, fundidos em água dessalinizada. Esta água, por ser menos densa que a água do mar, é removida facilmente da câmara de lavagem e fusão, como representado na Figura 11.

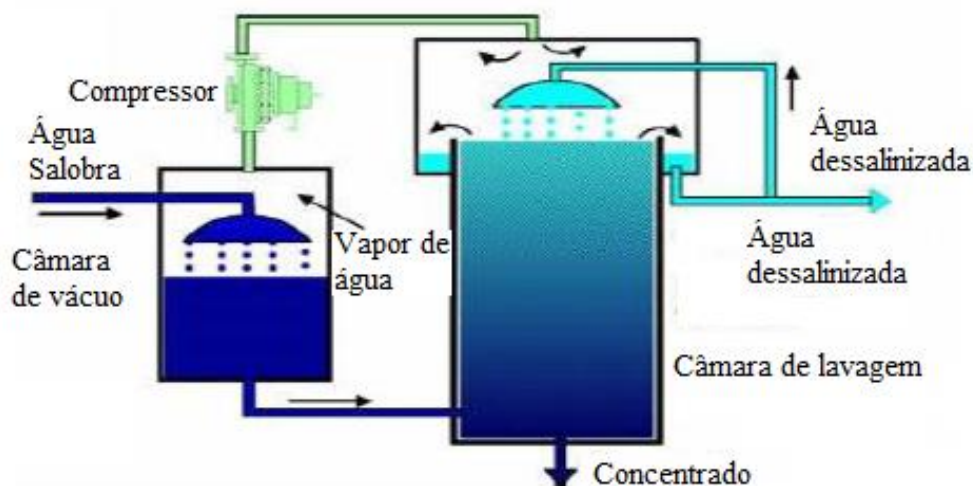


Figura 11 - Ilustração de um Dessorizador por Congelamento a Vácuo  
 Fonte: Clayton (2006, *apud* CRUZ, 2012).

Buros (1990, *apud* Dantas, 1998) observou que, teoricamente, o congelamento tem algumas vantagens sobre a destilação, que incluem uma menor exigência (teórica) de energia, baixa corrosão e pouco encrostamento e precipitação. A desvantagem é que envolve a manipulação de misturas de gelo e água, o que é mecanicamente complexo, tanto no transporte como no processamento.

## 2.4.2 Processos por Membrana

### 2.4.2.1 Eletrodialise (ED)

Segundo Soares (2004), eletrodialise é uma evolução de eletrólise que, além da energia elétrica, requer o uso de membranas especiais, semipermeáveis, de pergaminho ou de matéria plástica, as quais podem ser catiônicas ou aniônicas. A maior parte de energia utilizada é de corrente contínua, usada para separar as substâncias iônicas no perfilado de membranas.

Alves (2007) assim descreve o processo:

*“as moléculas de cloreto de sódio dissociam-se em íons, indo os de sódio para o polo negativo e os de cloro para o polo positivo. Outros sais também são afetados por este fenômeno. Para além da energia eléctrica, a ED requer o uso de membranas especiais, semipermeáveis, as quais podem ser catiônicas ou aniônicas. As membranas são colocadas paralela e alternadamente formando vários compartimentos. As catiônicas permitem a passagem apenas de íons positivos, enquanto as aniônicas permitem a passagem de íons negativos. Devido ao campo eléctrico*

*formado entre os dois polos, situados um no primeiro compartimento e o outro no último, os íons migram para os respectivos polos, atravessando as membranas ou sendo por elas detidos. Obtêm-se assim compartimentos com água potável com uma determinada quantidade de sais, bem como compartimentos com águas mais salgadas que a original (salmoura).*

As unidades de eletrodialise possuem centenas de membranas com uma espessura de 0,5 mm e um espaçamento entre elas de 1 mm, por onde a água circula. A eletrodialise está mostrada, esquematicamente, na Figura 12.

O consumo de energia é proporcional à quantidade de sais removidos, sendo da ordem de 1,5 a 2 kWh/m<sup>3</sup> de água dessalinizada.

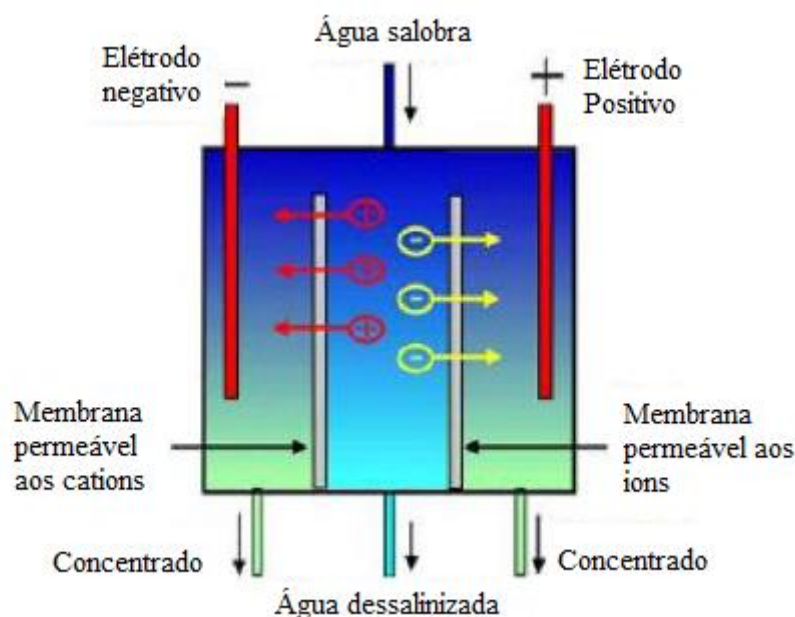


Figura 12 - Princípio da Eletrodialise (ED).  
Fonte - Clayton (2006, *apud* CRUZ, 2012).

#### 2.4.2.2 Osmose Reversa (OR)

Processo desenvolvido na década de 1960, foi aplicado em alguns países a partir da década de 1970 e no Brasil em meados da década de 1980, como citado por (SOARES, 2004), a osmose é um fenômeno natural de caráter físico-químico, identificado há mais de duzentos anos. Nela, quando duas soluções com diferentes concentrações são separadas em um mesmo recipiente por uma membrana semipermeável, ocorre espontaneamente a passagem da solução de menor concentração no sentido da solução menos diluída, até que se estabeleça um equilíbrio.

A osmose reversa (OR), ou osmose inversa (OI), consiste na passagem forçada da água, com elevada concentração de sais, a uma elevada pressão externa, por meio de uma bomba especial, contra uma membrana semipermeável devidamente projetada para aquela solução, como mostrado na Figura 13 (CRUZ, 2012). Na OR há a aplicação mecânica de uma pressão superior à pressão osmótica, do lado da solução mais concentrada, fazendo com que ocorra um fluxo no sentido da solução de menor concentração salina (KOBAYAMA et al, 2004).

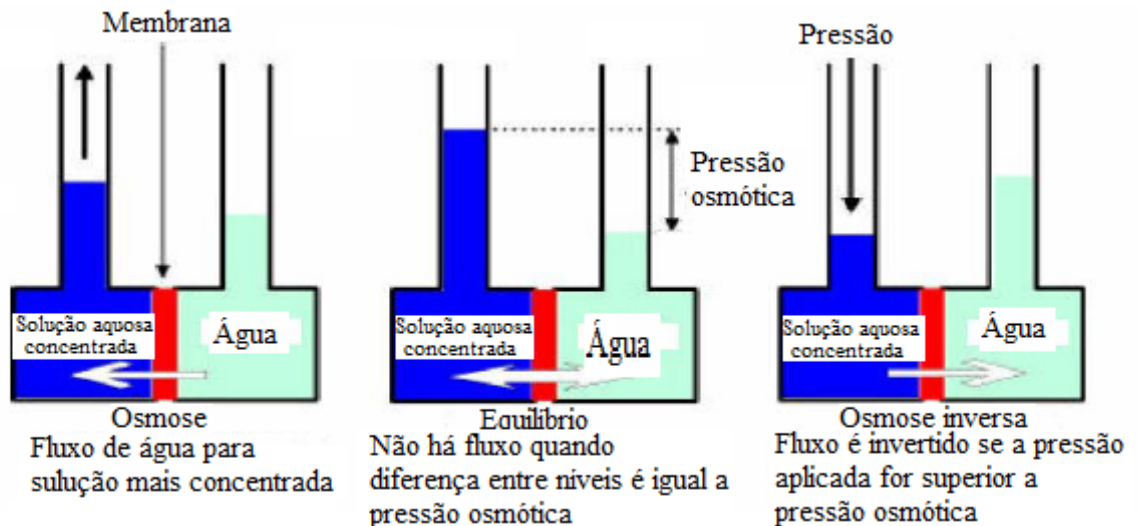


Figura 13 – Osmose Reversa.  
 Fonte - Clayton (2006, *apud* CRUZ, 2012).

### 2.4.3 Balanço energético, produção e eficiência da dessalinização solar

Segundo Incropera (2003), transferência de calor (ou calor) é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço. A condutividade térmica é uma propriedade física dos materiais que descreve a sua capacidade de conduzir calor. Equivale à quantidade de calor  $Q$  transmitida através de uma espessura  $L$ , numa direção normal à superfície de área  $A$ , devido ao gradiente de temperatura  $\Delta T$ , sob condições de estado fixo e quando a transferência de calor é dependente apenas do gradiente de temperatura.

A quantidade de calor que atravessa, por exemplo, uma parede por segundo depende dos seguintes fatores:

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

$$(Q / \Delta T) = K \times A \times (\Delta T / L)$$

$(Q / \Delta T)$  = energia transferida, como calor, por segundo (J/s)

K= condutividade térmica (W/m.K)

A= área (m<sup>2</sup>)

$\Delta T$ = diferença de temperaturas (K)

L= espessura (m)

O coeficiente de condutividade térmica é uma característica do material. Corresponde à quantidade de energia, sob a forma de calor, que passa, num segundo, através de 1 m<sup>2</sup> de superfície, quando a diferença de temperatura entre o interior e o exterior é de 1°C.

$$(Q / \Delta T) = U \times A \times \Delta T$$

$(Q / \Delta T)$  = energia transferida, como calor, por segundo (J/s)

U= coeficiente de condutividade térmica

A= área (m<sup>2</sup>)

$\Delta T$ = diferença de temperaturas (K)

Segundo Silva (2014), os mecanismos internos e externos da destilação solar originam-se da transferência de calor, que consistem em radiação, convecção e condução. Apontam-se, também, outros fenômenos importantes neste processo, como a evaporação e a condensação.

No processo da dessalinização solar, o agente de separação é o calor proveniente da radiação solar, captada por coletores e/ou concentradores, sendo a obtenção da água purificada baseada na evaporação da água salobra (ou salgada) por meio de aquecimento, sem necessariamente provocar sua ebulição.

O comportamento do destilador solar é caracterizado pelas diferentes transferências de massa e calor que ocorrem no seu interior. Os principais fenômenos que ocorrem são a transferência de calor e de massa entre a água e o vidro do destilador solar. A transferência de massa deve-se aos processos físicos de evaporação da água existentes nas coberturas do destilador. O vapor de água vai incorporando o ar do interior do destilador, aumentando sua concentração. A condensação se produz quando o ar próximo à cobertura de vidro alcança a saturação e a temperatura do vidro. (GAMEIRO, 2010)

A eficiência com que a energia solar é utilizada pode ser estimada pelo cálculo da razão entre o calor necessário para a formação de vapor e o calor equivalente da radiação solar incidente. A temperatura da água na bacia aumenta com a intensidade da radiação e produz um aumento exponencial na pressão de vapor no interior do invólucro. Esta pressão mais elevada é acompanhada por mais evaporação por unidade de entrada de calor, aumentando assim a eficiência (HOWE, 1986).

Soares (2004, apud DELYANNIS e BELESSIOTIS, 1996), assim como Duffie e Beckaman (1991), têm estudado os princípios da destilação solar. Considerando-se uma unidade de área de um destilador solar para uma radiação solar de intensidade  $H_s$ , são considerados os parâmetros a seguir:

- Transmitância da cobertura ( $\tau$ );
- Absorbância da cobertura ( $\alpha_g$ );
- Absorbância da bandeja (quantidade de água) ( $\alpha_w$ );
- Capacidade térmica do sistema ( $C_{wg}$ ).

Com isso, tem-se:

- Energia absorvida pelo vidro ( $\alpha_g H_s$ );
- Energia transmitida pelo vidro ( $\tau H_s$ );
- Energia absorvida pela bandeja ( $\tau H_s \times \alpha_w$ );
- Energia estocada no sistema ( $C_{wg} \times (dT_w/dt)$ ).

Com relação às perdas, é necessário considerar as que ocorrem através da cobertura ( $q_{ga}$ ) e através das paredes laterais e fundo ( $q_b$ ). Estes parâmetros estão ilustrados na Figura 14.

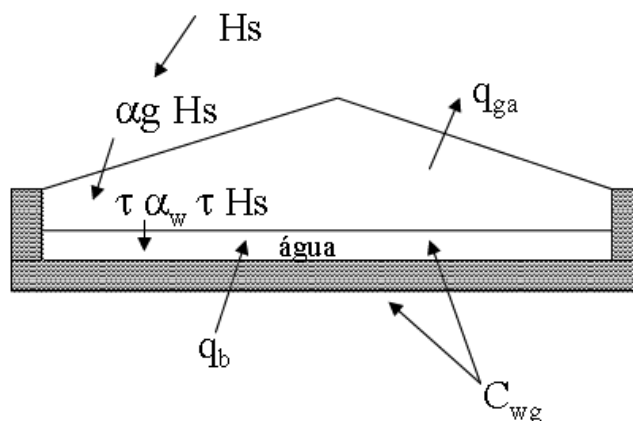


Figura 14 – Balanço energético do destilador solar.  
Fonte: Soares (2004).

Assim, a energia estocada pelo destilador pode ser expressa pela equação (1):

$$\alpha_g H_s + \alpha_w + H_s - q_{ga} - q_a = C_{wg} \times (dT_w/dt) \quad (1)$$

O calor que é transferido da salmoura para o vidro pode ser expresso pela soma (2):

$$q_r + q_c + q_e \quad (2)$$

onde,  $q_r$  = calor transferido pela radiação,  $q_c$  = calor transferido por convecção e  $q_e$  = calor transferido por evaporação-condensação.

O calor transferido para o exterior, pelo vidro, é dado pela soma anterior, acrescida da energia absorvida pelo vidro, conforme equação (3):

$$q_{ga} = q_r + q_c + q_e + \alpha_g + H_a \quad (3)$$

As perdas através das paredes e base do destilador são expressas pela equação (4):

$$q_b = k_b (T_w - T_a) \quad (4)$$

onde  $k_b$  é a condutividade térmica do material;  $T_w$  é a temperatura da água (interna) e  $T_a$  é a temperatura ambiente (externa).

Dunkle obteve valores para  $q_r$ ,  $q_c$  e  $q_e$ . Pode-se também calcular  $q_{ga}$  em função do coeficiente de transferência de calor por convecção,  $h_{ga}$ .

O rendimento  $\eta$  de um destilador pode ser calculado pela equação (6):

$$P = \frac{\eta \times H_s}{\lambda} \quad (6),$$

sendo:

P: produção de água destilada (l/m<sup>2</sup>.dia);

Hs: valor da radiação solar (kcal/m<sup>2</sup>);



$\lambda$ : calor latente de evaporação da água (kcal/kg).

Sempre que é projetado um destilador, visa-se maximizar o  $q_e$ , calor que está relacionado ao transporte do vapor de água do tanque até a superfície inferior da cobertura, onde é condensado. A energia de evaporação ( $q_e$ ) é diretamente proporcional à produtividade do destilador.

Segundo Tleimat (1979, apud SOARES, 2004), o rendimento dos destiladores solares se expressa normalmente pela quantidade de água produzida por unidade de área, por dia. Essa quantidade varia segundo a configuração do destilador, a insolação e as condições climáticas. Uma vez que um destilador está construído e instalado, ele tem uma configuração geométrica permanente pelo qual seu rendimento será função exclusivamente da insolação e das condições ambientais.

A produção de água potável por meio da destilação solar depende drasticamente da intensidade da radiação solar (AL-HAYEK e BADRAN, 2004). Por esta razão, muitos países localizados em regiões áridas e semiáridas vem adotando a destilação solar para superar o problema da escassez de água potável.

De acordo com Malik et al.(1982), a quantidade de água destilada que pode ser produzida varia muito com a posição geográfica, posição do sol, condições meteorológicas, modelo do destilador solar e técnicas operacionais.

Soares (2004) construiu vários sistemas piloto para determinar a melhor inclinação da cobertura piramidal de um destilador solar, avaliando o escoamento da água condensada e a produção de água destilada. No experimento, quatro pirâmides de vidro foram construídas com inclinações de 15°, 25°, 30° e 45°, conservando-se a mesma área da base de 35 x 35 cm. Entre os resultados obtidos, verificou-se que a água escoou 100% a partir da inclinação de 15° e a pirâmide com 25° de inclinação mostrou-se mais eficiente na produção de água destilada. Os experimentos foram realizados em Florianópolis (SC), localização entre os paralelos 27°10' e 27°50' de latitude sul e entre os meridianos de 48°25' e 48°35' de longitude a oeste de Greenwich.

Al Hayek e Badran (2004) avaliaram a produtividade de um destilador solar assimétrico e de outro simétrico, utilizando diferentes lâminas de água bruta (1,5, 3,0 e 4,0 cm). A produção de água destilada aumentou com a diminuição da lâmina de água, devido ao aumento de radiação solar absorvida pela base dos destiladores. A adição de uma tinta preta na base também contribuiu para uma maior produção.

A espessura da lâmina de água também interfere significativamente na eficiência de inativação de microrganismos. O aumento da profundidade da água implica em menor eficiência do processo, considerando um tempo fixo de exposição (SOMMER et al, 1997).

A intensidade da radiação solar tem importância fundamental nos resultados, durante a operação de um dessalinizador solar. Diferentemente de outros tipos de dessalinizadores, nos quais os problemas de funcionamento podem estar relacionados com o desligamento do equipamento ou com a saída da água salgada em vez de dessalinizada, o mau funcionamento de dessalinizadores solares está diretamente relacionada com a redução da produção abaixo do seu valor ideal para a quantidade de energia solar disponível no sistema. Este mau funcionamento, de forma geral, está relacionado a perdas ou vazamento de vapor da câmara transparente ou de entupimentos nos canais ou tubulações coletoras da água dessalinizada, não interrompendo o processo mas comprometendo significativamente a produção.

Soares (2004), apresenta uma tabela comparativa das relações entre inclinação, tipo da cobertura, produção e local de realização dos estudos, reproduzida na Tabela 2.

Tabela 2 - Comparação entre inclinação, tipo da cobertura, produção e local dos estudos.

<b>Autor</b>	<b>Inclinação da cobertura (graus)</b>	<b>Tipo de cobertura</b>	<b>Produção (l/m<sup>2</sup>.dia)</b>	<b>Local</b>	<b>Observação</b>
Ribeiro e Nunes (1983)	-	uma água (tipo telhado)	3,4 a 5,2	Fortaleza	Inclinação não registrada
Torres (1984)	10	uma água (tipo telhado)	4,1	Paraíba	
STEC (1984)	10	uma água (tipo telhado)	5,0	Recife	
Garcias (1985)	20	uma água (tipo telhado)	-	Paraná	Produção não registrada
Hamed et al.(1993)	-	uma água (tipo telhado)	2,8	-	Inclinação e local estudado não registrados
Elkader (1998)	35	meia água	5,6	Egito	
Akash et al. (1998)	35	uma água (tipo telhado)	2,1	Jordânia	
Senem (2000)	45	pirâmide	3,5	Florianópolis	
Soares (2001)	45	pirâmide	1,3	Florianópolis	Ocorrência de reevaporação na calha coletora de água destilada e fuga de vapor na mesma
Boukar et al.(2001)	10	uma água (tipo telhado)	4,0	Deserto de Sahara	
Cappelletti (2002)	45	uma água (tipo telhado)	1,8	Itália	
Cerda et al. (2002)	45	uma água (tipo telhado)	-	México	Produção em Kg/hora e em gráficos

Fonte: Soares 2004

## 2.5 - Coletor solar

O coletor solar é um tipo de trocador de calor que transforma energia solar em calor. O coletor diferencia-se em diversos aspectos dos trocadores de calor convencionais, uma vez que estes últimos realizam uma troca entre dois fluidos com alta taxa de transferência de calor, desprezando-se o fator radiação. O coletor solar converte a energia da fonte radiante, o Sol, em calor para o fluido (ABOGERAH, 1991).

O princípio básico de operação dos coletores é o da exposição de uma superfície negra à radiação solar, para que esta radiação absorvida seja transferida para um fluido, água ou ar.

A eficiência de um coletor envolve um grande número de variáveis, entre elas: materiais utilizados na fabricação; tipo de superfície absorvedora; intensidade da radiação solar; número de coberturas transparentes; tipo e espessura do isolamento térmico; temperaturas de trabalho, entre outras (SOUZA, 2002).

Segundo Lopez (2004), uma forma de aumentar o rendimento dos destiladores solares tipo bacia é potencializá-los, termicamente, incorporando um sistema de coletor solar na entrada.

Os coletores solares são classificados em três tipos: planos, concentradores e coletores concentradores parabólicos (CPC). Os planos são os mais comumente utilizados no aquecimento solar da água. Seus elementos constituintes são: placa metálica absorvedora, tubos (serpentina), aletas, cobertura de vidro, caixa e isolamento térmico. O coletor funciona da seguinte maneira: os raios de sol atravessam o vidro da tampa, esquentam a placa absorvedora e as aletas (de cobre ou alumínio, pintadas com tinta escura que ajuda na absorção da radiação solar), e o calor passa para os tubos ou serpentina (geralmente de cobre), esquentando a água que está dentro da serpentina.

Cristofari *et al.* (2002) cita que vários trabalhos foram desenvolvidos, demonstrando que os coletores solares plásticos de baixo custo têm sido estudados desde os anos 70.

Lopo (2010), em seu estudo sobre o desempenho térmico de um sistema de aquecimento solar de baixo custo, cita que o principal objetivo do estudo de coletores solares alternativos é a redução do custo de fabricação, buscando a socialização do seu uso em sistemas de aquecimento de água domésticos e industriais. Referencia, ainda, que são largamente utilizados para produção de energia solar térmica de baixas temperaturas, tendo sido objeto de numerosos estudos e pesquisas desde 1950.

São citados estudos de coletores construídos com utilização de diversos materiais. Rivera (1994) cita em seu trabalho um coletor em PVC. Saglitti *et al.* (1997) fizeram estudo em um coletor feito com polietileno extrudado de 12,7 mm, dispostos em espiral. Souza (2004) realizou estudo comparativo entre um coletor com tubos de cobre e outro feito de PVC. Leal (2008) construiu um coletor com Tetrapak e garrafas PET. Neto *et al.* (2008) realizou estudo comparativo entre coletores não convencionais e convencionais, demonstrando que um dos coletores não convencionais de baixo custo apresentou índices econômicos compatíveis com os convencionais.

Os coletores solares, como os desenvolvidos e utilizados nesse trabalho, construídos com tubo de polietileno ou de PVC, apresentam resultados térmicos que demonstram a sua viabilidade, atingindo temperaturas de até 87 °C. São necessários estudos complementares relativos à sua vida útil, durabilidade e resistência da mangueira e possível contaminação da água dessalinizada, Figura 15.

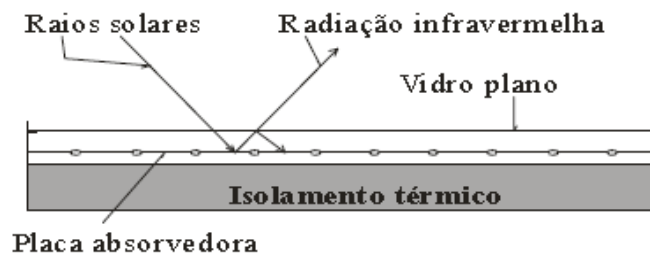


Figura 15 – Coletor solar plano.  
Fonte: Lopo (2010).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada para a realização da pesquisa consistiu no levantamento bibliográfico sobre as diversas formas da dessalinização e tipos de coletores solares, com identificação e comparação dos principais processos de dessalinização, além da identificação e estudo dos materiais a serem utilizados no projeto, considerando que estes deveriam ser de baixo custo, de fácil aquisição local e que atendessem às características desejadas para a tecnologia proposta, quanto à durabilidade, facilidade de uso, resistência à corrosão e ao calor.

A partir desse estudo e da identificação dos materiais, a etapa seguinte consistiu em projetar o protótipo, considerando o uso do ferrocimento e da alvenaria na sua confecção. Foram realizados os primeiros testes de funcionamento e avaliações preliminares, visando uma adequação e definição dos melhores materiais e arquitetura, visando a sua funcionalidade, eficiência e custos.

Optou-se por um modelo com sistema ativo, como apresentado nas Figuras 16 e 17, incorporando um coletor solar para o pré-aquecimento da água, integrado à câmara de evaporação/condensação, seguindo os mesmos critérios definidos quanto às características dos materiais.

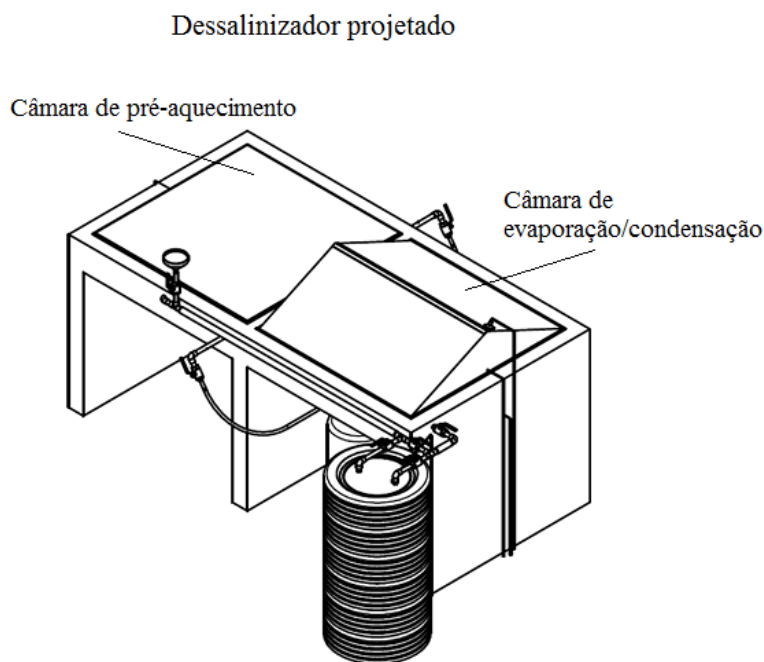


Figura 16 - Dessalinizador projetado: visão em perspectiva.

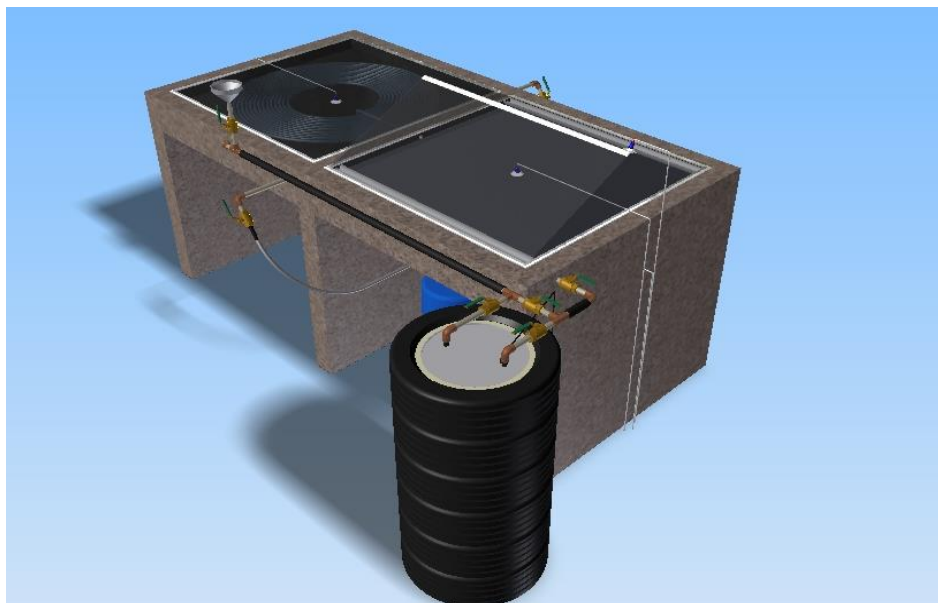


Figura 17 - Dessalinizador projetado, vista em perspectiva, lado leste.

Considerando-se a importância da elevação da temperatura para a dessalinização solar ativa e a necessidade de desenvolver tecnologias acessíveis e de baixo custo, foi projetado um coletor solar responsável pelo pré-aquecimento da água que entra no destilador solar, buscando-se uma maior eficiência do sistema, revertida em maior produção de água destilada. Assim, o coletor solar configura-se como segundo elemento mais importante do sistema. O seu funcionamento e operação devem ser observados com atenção.

### 3.1 Protótipo do dessalinizador solar com uso de coletor solar

Realizaram-se o projeto e a construção do protótipo do dessalinizador, na cidade de João Pessoa, na Granja Janaina (Latitude: 07° 06' 54" S Longitude: 34° 51' 47" W), na Paraíba, confeccionado com alvenaria e ferrocimento, estruturado de forma suspensa a 1 metro do solo, com paredes de alvenaria e laje, medindo 1,20 m x 2,30 m x 0,17 m (comprimento x largura x espessura).

A estrutura da base foi composta de trilhos de concreto, blocos de EPS (isolamento térmico da parte inferior), revestidos com camada de ferrocimento de 7 cm de espessura, formando uma placa impermeável e com isolamento térmico.

A laje foi dividida em dois compartimentos distintos, cada um deles com medida interna de 1 metro de comprimento por 1 metro de largura (medida da parede interna), com área total de 1 m<sup>2</sup> em cada compartimento, apresentando paredes divisória de 10 cm de largura

por 5 cm da altura, com superfície interna toda pintada em preto, servindo como superfície absorvedora, conforme mostrado na Figura 18.

O primeiro compartimento foi destinado à instalação da câmara de evaporação e condensação (trocador de calor), com tampa de cobertura em vidro, montada em estrutura de alumínio, em forma de telhado de duas águas com 25° de inclinação (Figura 18).

Nas laterais opostas foram instaladas duas calhas confeccionadas em cano PVC de 50 mm, para o recolhimento da água condensada no vidro. A tampa de vidro foi hermeticamente fechada por meio de cola de silicone, com o objetivo de se evitar e diminuir ao máximo as perdas de vapor produzidas no seu interior. As calhas recolheram e direcionaram a água condensada, por meio de mangueiras plásticas de polietileno, para os tambores de armazenamento.

O segundo compartimento, com medidas iguais, foi destinado à instalação do coletor solar plano para o pré-aquecimento da água salobra. Foi instalado um rolo espiral com 48 metros de mangueira de polietileno de ½ polegada de diâmetro, presa às conexões de entrada e saída de água para a câmara, estruturada e fixada no fundo do coletor.

Essa mangueira manteve-se ligada à câmara de evaporação e condensação. Este segundo compartimento foi hermeticamente fechado com cobertura de vidro plano, também estruturado em uma moldura de alumínio e colado com silicone à parede do coletor, evitando-se perda de calor e otimizando do processo de aquecimento.

As Figuras 18 a 20, que representam a planta baixa, cortes e fachada, detalham o dessalinizador, seu formato e dimensões.

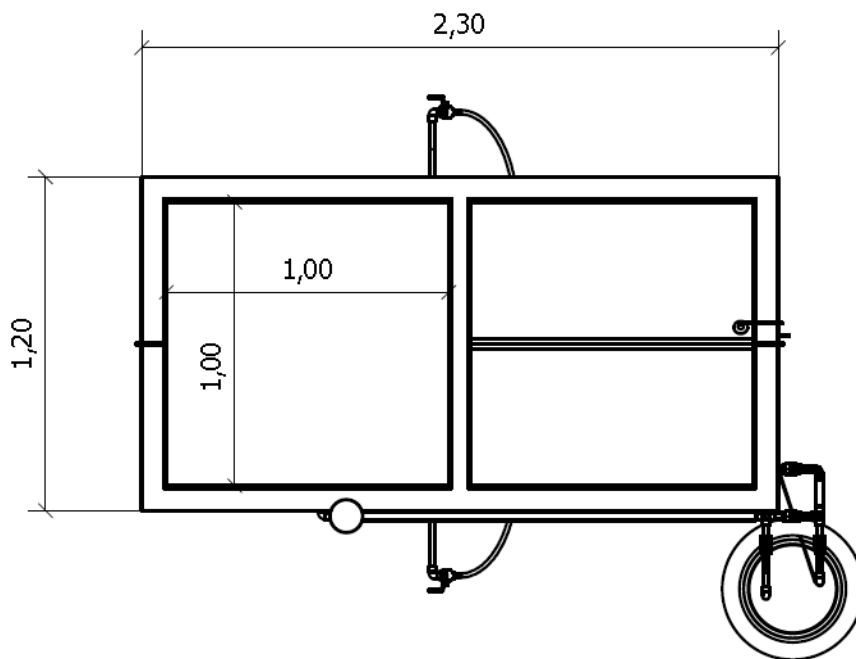


Figura 18 – Planta baixa do dessalinizador.

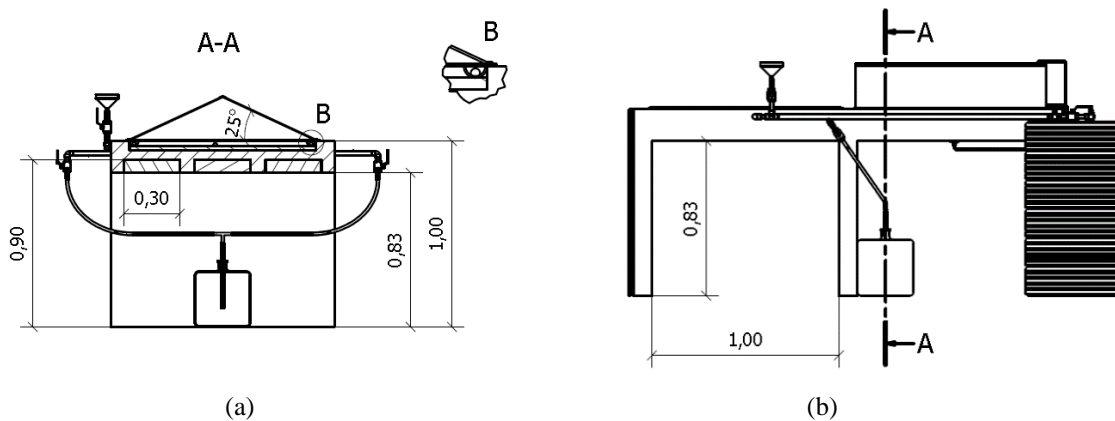


Figura 19 - (a) Corte A – A do dessalinizador ; (b) Vista leste do dessalinizador

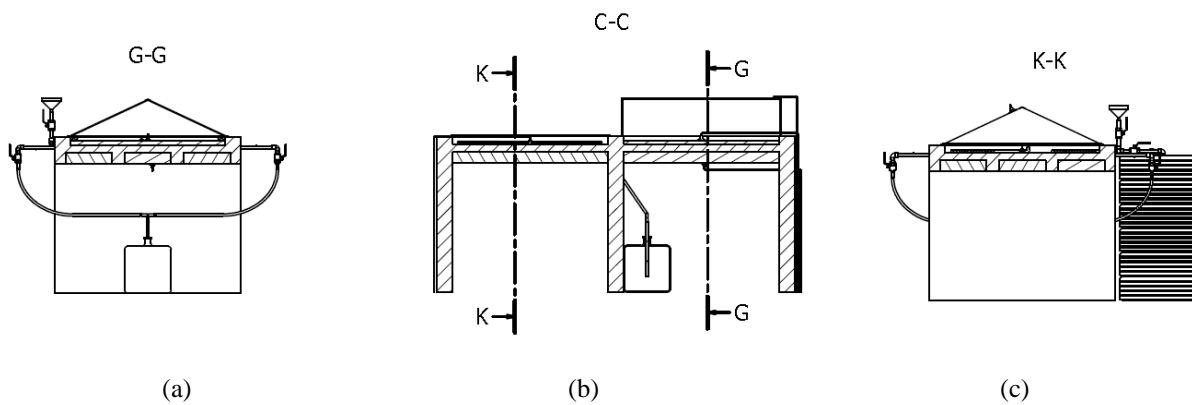


Figura 20 - (a) Corte G – G (b) Vista lateral (oeste) (c) Corte K – K



Após a construção de alvenaria e realizada a pintura, com tinta preta para piso, marca Coral, deu-se início à montagem dos demais componentes do protótipo do dessalinizador, com a colocação da mangueira em espiral na sua câmara, seguida da colocação da tampa de vidro, compondo o coletor solar.

Concluída essa etapa, foram feitas as instalações da tampa de vidro na câmara de evaporação e condensação (trocaador de calor), necessária para provocar o efeito estufa e possibilitar o processo de evaporação-condensação. Em seguida, foi realizada a ligação da tubulação e conexões para circulação da água do coletor para o tanque de evaporação. O processo foi finalizado com a instalação de uma pequena bomba de aquário, de 12 VDC, para forçar a circulação da água entre o coletor e câmara, de forma contínua.

Para a realização dos testes de rendimento térmico com o pré-aquecimento da água, foi construída ao lado do protótipo uma estrutura utilizando-se pneus velhos, serragem de madeira e um balde plástico com capacidade para 20 litros de água, conforme Figura 21, (a) e (b).

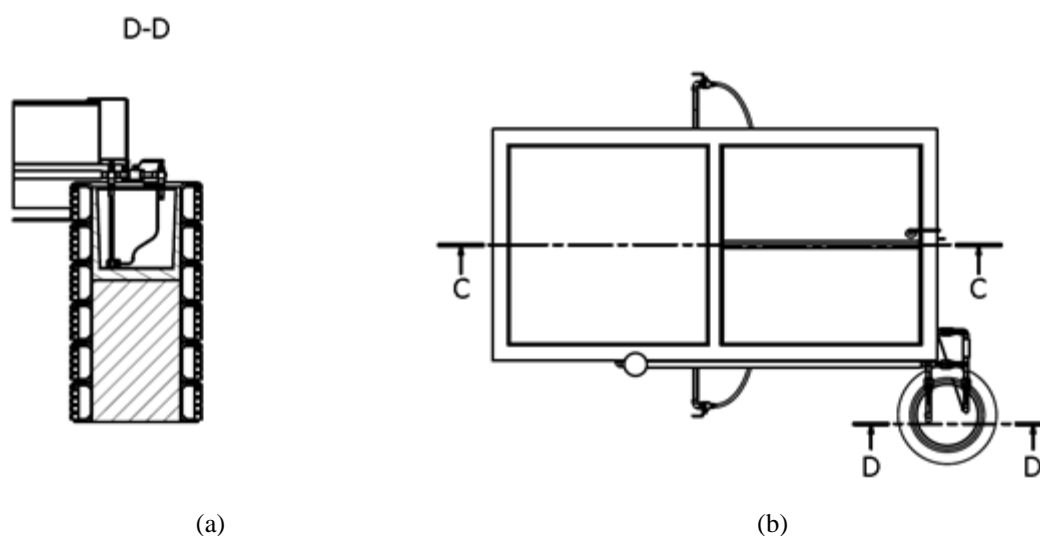


Figura 21 - (a) Corte D – D Sistema circulação (b) Vista superior do dessalinizador

Este componente extra foi utilizado como reservatório térmico (*boiler*), com duas finalidades: a primeira, permitir o armazenamento de um maior volume de água salobra no sistema, com a manutenção de sua temperatura; e a segunda, possibilitar a instalação de uma micro bomba de 12 VDC acionada por um painel fotovoltaico para a circulação forçada e contínua da água entre o coletor e a câmara de evaporação, mantendo o seu nível, como desejado, entre 1 e 3 cm sobre a superfície absorvedora de calor, no caso, a placa de ferrocimento do fundo do dessalinizador. Este nível está de acordo com os estudos de Soares (2004), que adotou lâmina de água de 1 cm, e Suneja e Tiwar (1999), que verificaram que

quanto maior a profundidade da lâmina d'água no interior da base do dessalinizador, menor a transferência de calor na água condensada, ou seja, menor produção de água destilada.


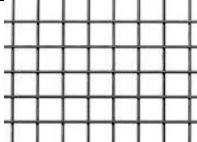


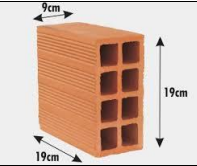
### 3.2 Materiais utilizados


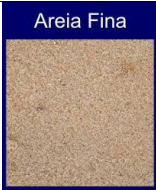









Na confecção do protótipo do dessalinizador solar, foi priorizada a utilização de materiais de baixo custo, de fácil aquisição no mercado local, de boa resistência e durabilidade, que fossem adequados à sua construção e à proposta do estudo.

Segundo Silva (2014), em diversos estudos já realizados, não há descrições detalhadas sobre deslocamento, transporte, forma de montagem, construção dos equipamentos, funcionamento e manutenção. No presente estudo, foi dada importância à descrição detalhada dos métodos construtivos e dos materiais utilizados, uma vez que a proposta é que o equipamento possa ser facilmente replicado e utilizado no meio rural do semiárido.

A seguir, foram listados todos os materiais utilizados na construção do protótipo em estudo. Vale ressaltar, ainda, que estes materiais poderão ser substituídos à medida que estudos posteriores apontem a necessidade de otimização do sistema.

Tabela 3 – Relação de materiais utilizados na construção do dessalinizador.

Item	Material	Unidade	Quant	Imagem
1	Trilhos de laje em concreto, ferro 6,3 mm.	m	2,30	
2	Malha de ferro, tipo <i>pop</i> , diâmetro do ferro de 1/8", malha quadrada de 15 cm.	m <sup>2</sup>	6	
3	Bloco de EPS, para laje, espessura de 8 cm.	m <sup>2</sup>	0,80	
4	Cimento tipo <i>Portland</i> , CPII.	kg	50	
5	Tijolo de cerâmica, 8 furos.	un	100	

6	Aditivo concentrado para argamassas de assentamento e reboco convencional, marca <i>Vedacit</i> , tipo <i>Vedalit</i> .	litro	1	
7	Areia fina.	m <sup>3</sup>	1	
8	Vidro laminado plano, espessura de 3 mm (para o coletor).	m <sup>2</sup>	1,1	
9	Tampa de vidro da câmara de evaporação e condensação, 1 m x 1 m, <i>dual slope</i> (duas superfícies de condensação).	m <sup>2</sup>	1,7	
10	Cola de silicone alta temperatura.	g	1000	
11	Tambor plástico, volume de 50 litros, com tampa.	un	1	
12	Garrafão plástico de polietileno, para água, volume de 10 litros.	un	2	
13	Mangueira plásticas de polietileno, diâmetro diâmetro de 1/2", material polietileno de alta densidade (PEAD).	m	50	
14	Cano de PVC branco, para esgoto, diâmetro de 50 mm.	m	1	
15	Cano de PVC soldável, marrom, diâmetro de 1/2".	m	3	
16	Joelho diâmetro de 1/2", cola-rosca.	un	2	

17	Joelho diâmetro de ½”, cola-rosca.	un	2	
18	Luvas simples, diâmetro de ½”, cola-rosca.	un	2	
19	Adaptador de polietileno rosca e mangueira, diâmetro de ½”.	un	4	
20	Cola para canos PVC.	ml	50	
21	Abraçadeiras, diâmetro de ½”.	un	4	
22	Torneira de polietileno, diâmetro de ½”.	un	2	
23	Registro PVC de esfera, diâmetro de ½”.	un	4	
24	Cantoneira de alumínio, diâmetro de ½”.	m	4	
25	Tinta preta para piso.	galão	1	

Os materiais utilizados foram escolhidos com base nos critérios pré-definidos para a construção do dessalinizador, de forma a melhorar o rendimento do equipamento, observando a resistência, facilidade em seu manuseio e uso. Foram também consideradas as condutividades térmicas e capacidades de absorção de calor.

Foram observados, ainda, detalhes técnicos como os da base inferior do tanque de evaporação e do coletor, onde é desejável atingir certas temperaturas e manter o calor concentrado no interior dos dois compartimentos, evitando-se ao máximo as perdas para o ambiente externo, de forma a tornar mais eficientes os processos que neles ocorrem.

A Tabela 4 apresenta a condutividade térmica dos principais materiais utilizados na construção do dessalinizador, que atendem aos pré-requisitos desejados.

Tabela 4 – Condutividade térmica dos materiais utilizados.

Material	Condutividade térmica ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
Vidro	0,72 - 0,86
Tijolo	0,4 - 0,8
Isopor	0,025
Concreto leve	0,7-0,9
Cimento	0,35 – 1,40

Em relação ao tipo de vidro a ser utilizado na confecção da tampa do coletor e da câmara de evaporação e condensação, identificou-se a existência de três tipos no mercado, com características diferentes. Considerando-se o preço e a disponibilidade no mercado, optou-se pelo uso do vidro comum, cujos dados técnicos estão na Tabela 5.

Tabela 5 – Tipos de vidros para cobertura de coletores e dessalinizadores solar.

Propriedade	Tipos de vidro		
	Comum	Lima	Cristal/Branco
Óxido de ferro	0,1 – 0,13	0,05	0,01
Índice de refração	1,52	1,51	1,51
Transmitância normal (%)	81-85	85-87	90,50
Espessura (pol)	0,175 - 0,1875	0,125 – 0,1875	0,1875
Perdas por reflexão (%)	8,0 – 8,2	8,0 – 8,1	8,00
Perdas por absorção (%)	6,8 – 11,0	4,9 – 7,0	1,50

Fonte: Ismail (2002).

As propriedades térmicas calculadas para as paredes, para a laje com EPS e para parede de bloco cerâmico com argamassa são apresentadas nas tabelas 6 e 7 a seguir.

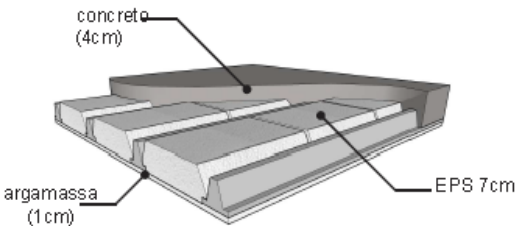
Tabela 6 – Propriedades térmicas da laje com EPS.

Propriedade	Tipos de vidro		
	Comum	Lima	Cristal/Branco
Óxido de ferro	0,1 – 0,13	0,05	0,01
Índice de refração	1,52	1,51	1,51
Transmitância normal (%)	81-85	85-87	90,50
Espessura (pol)	0,175 - 0,1875	0,125 – 0,1875	0,1875
Perdas por reflexão (%)	8,0 – 8,2	8,0 – 8,1	8,00
Perdas por absorção (%)	6,8 – 11,0	4,9 – 7,0	1,50

Propriedade	Tipos de vidro		
	Comum	Lima	Cristal/Branco
Óxido de ferro	0,1 – 0,13	0,05	0,01
Índice de refração	1,52	1,51	1,51
Transmitância normal (%)	81-85	85-87	90,50
Espessura (pol)	0,175 - 0,1875	0,125 – 0,1875	0,1875
Perdas por reflexão (%)	8,0 – 8,2	8,0 – 8,1	8,00
Perdas por absorção (%)	6,8 – 11,0	4,9 – 7,0	1,50



concreto (4cm)

argamassa (1cm)

EPS 7cm

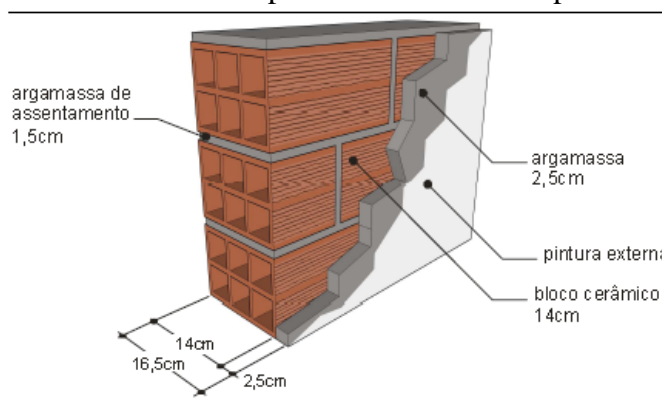
Descrição:

Laje pré-moldada 12cm (concreto 4cm + EPS 7cm + argamassa 1cm)  
Sem telhamento

U	C <sub>T</sub>	α	FCS
[W/(m <sup>2</sup> K)]	[kJ/m <sup>2</sup> K]	[-]	[-]
2,29	132	0,2	1,8
		0,4	3,7
		0,8	7,3

Fonte: Morishita (2011).

Tabela 7 – Propriedades térmicas da parede com bloco cerâmicos e argamassa.



Descrição:

Sem revestimento interno  
 Bloco cerâmico (14,0 x 14,0 x 29,0cm)  
 Argamassa externa (2,5cm)  
 Pintura externa ( $\alpha$ )

U	$C_T$	$\alpha$	FCS
[W/(m <sup>2</sup> K)]	[kJ/m <sup>2</sup> K]	[-]	[-]
1,96	106	0,2	1,6
		0,4	3,1
		0,8	6,3

Fonte: Morishita (2011).

### 3.3 - Custo do protótipo do dessalinizador solar

Foram realizados os cálculos, conforme mostrado na Tabela 8, obtendo-se um valor total de R\$ 932,50 (novecentos e trinta e dois reais e cinquenta centavos), com variações de acordo com os preços locais dos materiais empregados.

Em relação a outros modelos pesquisados, observou-se que os custos não são apresentados, quando apresentados são de protótipos com aplicação de outros materiais.

Tabela 8 – Custo estimado do dessalinizador solar.

Descrição	Unid.	Quant.	Valor unitário (R\$)	Valor Total (R\$)
Trilhos de laje em concreto (4 x 2,3 m = 9,2).	m	10	9,00	90,00
Malha de ferro, tipo <i>pop</i> , diâmetro do ferro de 1/8", 15x15 cm.	m <sup>2</sup>	1	42,00	42,00
Bloco de EPS, para laje, espessura de 8 cm.	placa	10	4,00	40,00
Cimento tipo <i>Portland</i> , CPII.	saca	4	23,46	92,00
Tijolo cerâmico, 8 furos.	un	100	0,50	50,00
Aditivo concentrado para argamassas (Vedalit/Vedacit).	l	1	12,00	12,00
Areia fina.	m <sup>3</sup>	1	60,00	60,00
Vidro laminado plano, espessura de 3 mm (para coletor).	m <sup>2</sup>	1	60,00	60,00
Tampa de vidro da câmara de evaporação e condensação, 1 x 1 m, <i>dual slope</i> (duas superfícies de condensação).	un	1	250,00	250,00
Cola de silicone alta temperatura.	tubo	3	13,00	39,00
Tambor plástico com tampa, volume 50 litros com tampa.	un	1	10,00	10,00
Garrafão plástico de polietileno, para água, volume de 10 litros.	un	2	18,00	18,00
Mangueira polietileno preta, diâmetro 1/2" PEAD.	m	50	0,73	36,50
Cano de PVC branco, para esgoto, diâmetro de 50mm	kg	1	5,00	5,00
Cano de PVC soldável, marrom, diâmetro de 1/2"	un	1	3,00	3,00
Joelho de PVC, diâmetro de 1/2", cola-rosca	un	2	1,50	3,00
Joelho de PVC, diâmetro de 1/2", cola	un	2	1,50	3,00
Luvas simples diâmetro de 1/2", cola-rosca	un	2	1,50	3,00
Adaptador de polietileno rosca e mangueira diâmetro de 1/2"	und	4	1,00	6,00
Cola para cano	und	1	6,00	6,00
Abraçadeiras diâmetro de 1/2"	und	4	1,00	4,00
Torneira de polietileno, diâmetro de 1/2"	und	2	6,00	12,00
Registro PVC de esfera, diâmetro de 1/2"	und	4	2,75	11,00
Cantoneira de alumínio, diâmetro de 1/2"	m	4	5,00	20,00
Tinta preta para piso	galão	1	57,00	57,00
<b>Total geral</b>				<b>932,50</b>

\*Considerando-se tartar de Tecnologia Social, sendo a construção e manutenção realizada pelas próprias famílias, não foram considerados na composição do custo mão de obra e tributos.

Nas Figuras 22 a 25 são apresentadas imagens em perspectiva, sob diversos ângulos, em detalhes, do protótipo do dessalinizador solar.

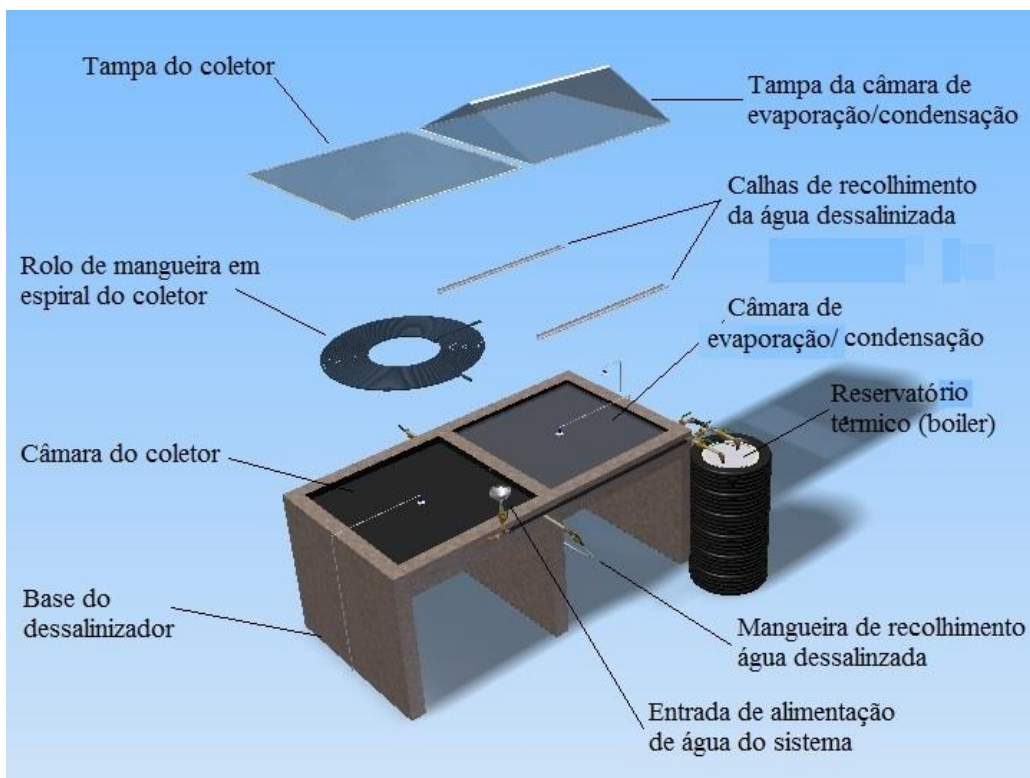


Figura 22 - Dessalinizador projetado: vista explodida.

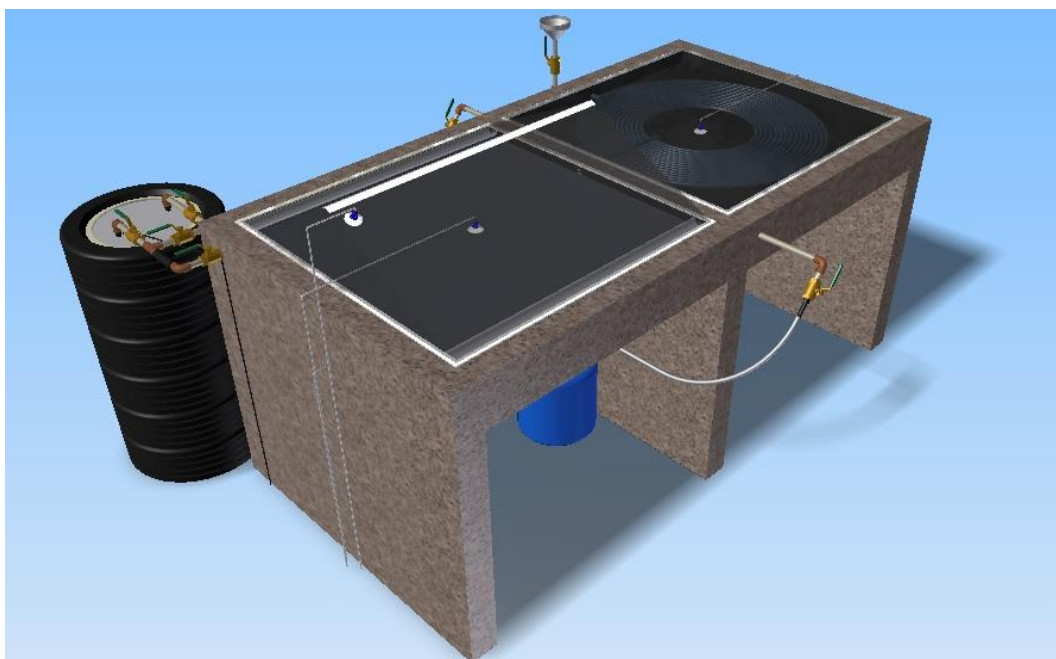


Figura 23 - Dessalinizador projetado: vista lado oeste.



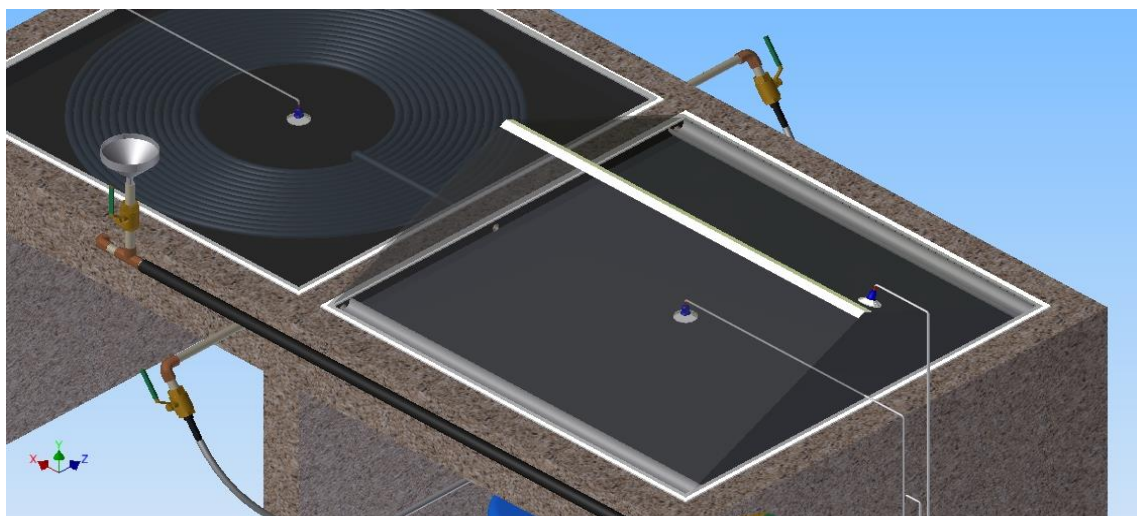


Figura 24 - Dessalinizador projetado: vista ampliada do coletor e câmara.



Figura 25 - Dessalinizador projetado: tambor de armazenamento da água dessalinizada e *boiler*.

### 3.4 Testes realizados

Foram realizadas medidas de temperatura no interior do coletor, na mangueira, nas paredes laterais externas e na superfície inferior da placa de ferrocimento que, no início dos testes, não estava adequadamente isolada, termicamente. Após identificação de perdas significativas de calor para o meio ambiente, foi incorporado um isolamento térmico constituído de placas de isopor de 8 cm de espessura, em toda a superfície inferior da câmara.

Concluída a etapa de montagem e instalação do protótipo, foram iniciadas as avaliações preliminares do funcionamento, com levantamentos diários dos seguintes indicadores: aquisição de dados de temperatura, de forma periódica e em intervalos de tempo pré-



definidos, nos seguintes locais: água do interior da câmara de evaporação, da superfície externa do vidro da tampa, do fundo do tanque, do interior do coletor solar, além da temperatura do ambiente, da radiação solar e da velocidade do vento, estes três últimos disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET.

Foi feita uma avaliação comparativa dos resultados que serviram de referência para a realização de ajustes e modificações necessárias no protótipo proposto, visando melhorar a eficiência do mesmo.

Considerando-se que o aquecimento da água salobra deve ser o mais eficiente possível, assim como a vedação do equipamento, evitando-se perdas de vapor para o meio e melhorando-se a taxa de evaporação, optou-se por experimentar um processo com circulação forçada de água salobra pré-aquecida para o interior da câmara de evaporação e desta de volta para o coletor, por meio de bombeamento, de forma contínua.

Nos primeiros testes, foi feita a instalação de sensores de temperatura para acompanhamento e coleta de dados térmicos na câmara de evaporação e condensação, também denominado de tanque ou bacia (trocaador de calor). Foram realizadas medidas de temperatura da água e do ar no interior da câmara.

As leituras de temperatura foram realizadas a intervalos de 30 minutos, durante 24 horas, ao longo do período de avaliação, entre novembro de 2015 a outubro de 2016, somados 35 dias não consecutivos, para análise e determinação da eficiência térmica.

Esses períodos de avaliação tiveram duração de 10 dias cada, com 3 repetições. Outros cinco dias de testes foram realizados no início do processo, para ajustes do equipamento, e foram realizadas também as medições do volume de água salobra utilizada na alimentação do dessalinizador e do volume resultante do processo de destilação, medido diariamente em horário pré-estabelecido, para avaliação da eficiência do equipamento.

Os instrumentos utilizados foram o Arduino, que é uma plataforma de prototipagem eletrônica de hardware e software livres e de placa única; um termômetro digital de vareta SURIHA, modelo SRA LX36569, e um instrumento de medidas múltiplas, THAL 300, que mede temperatura, umidade, velocidade do vento e luminosidade, como mostrado na Figura 26.



Figura 26- Medidores de temperatura utilizados.  
Fonte: Registros do autor.

Em paralelo aos procedimentos citados, foram realizadas as análises dos parâmetros de salinidade, condutividade elétrica e dureza na água salobra a ser dessalinizada (água bruta) e da água resultante do processo (água dessalinizada) para comparação do resultado.

Para elaboração dos desenhos das Figuras 16 e 17, 18 a 21, 22 a 25, 29 e 30, utilizou-se o software AUTODESK Inventor 2012.

A água utilizada para os testes foi proveniente de um poço tubular localizado no município de Caldas Brandão, Estado da Paraíba, latitude 07°06'09"S, longitude 35°19'35"W e altitude de 75 m. Foi recolhida na saída da bomba e armazenada em tambor plástico com capacidade de 200 litros.

Foram realizadas análises físico-químicas no Laboratório de Saneamento da UFPB, antes e depois do processo de dessalinização, conforme Certificado Técnico nº 26/2016 (anexo).

O dessalinizador foi alimentado inicialmente com esta água salobra, num volume total de sua capacidade (7 litros), incluindo a capacidade do coletor e a lâmina de água do tanque, sendo recomposta diariamente, de acordo com o volume produzido no dia anterior, de forma a manter a lâmina de água com cerca de 2 a 3 cm de profundidade, no fundo da câmara de evaporação.

Abaixo do compartimento de evaporação e condensação, foi instalado um recipiente para armazenamento da água dessalinizada: um garrafão de água mineral com capacidade para 10 litros, que recebeu a mangueira proveniente da tubulação ligada às canaletas de recolhimento da água condensada, instaladas nas laterais e interligadas através de uma

conexão de adaptação em T, direcionada ao citado garrafão, como mostrado nas Figuras 25 e 28.

As medições experimentais foram realizadas por meio de um circuito coletor de dados, para aquisição das medidas de temperaturas nas principais partes térmicas do dessalinizador e do coletor, com armazenamento dos dados em um cartão de memória, tipo SD.

Neste circuito coletor foi utilizado uma placa micro controlada tipo Arduino Mega 2560, que possui 16 entradas analógicas, número suficiente para realização das medições necessárias, com sensores de medição de temperatura tipo LM35, que enviaram sinais analógicos através dos conectores fixados na lateral da caixa do equipamento. Foi utilizado também um módulo RTC (*Real Time Clock*) e um módulo SD, para que fosse possível salvar, no cartão de memória, os horários das leituras de temperatura.

O esquema eletrônico foi elaborado no software de código aberto *Fritzing*, que permite projetar placas de circuito impresso a partir de um esquema e montagem em um *protoboard* virtual.

A placa de interface possui conectores para interligação às placas Shield RTC e Shield Cartão SD. Além disso, a placa possui o encaixe padrão para conexão do Arduino MEGA, e circuito adicional divisor de tensão de 5 V para 3,3 V, que é necessário em alguns módulos. A Figura 27 (a) e (b) ilustra a caixa do coletor, com o Arduino, placa de interface, módulos RTC, SD, cabos e conectores. Na Figura 27 (c), são mostrados os cabos para interligação dos sensores à placa de interface, através dos conectores fixados no gabinete do coletor e interligados através de soldas ao cabo flat que se conecta à placa de interface.



(a)Gabinete com coletor



(b)Sensor, com cabo



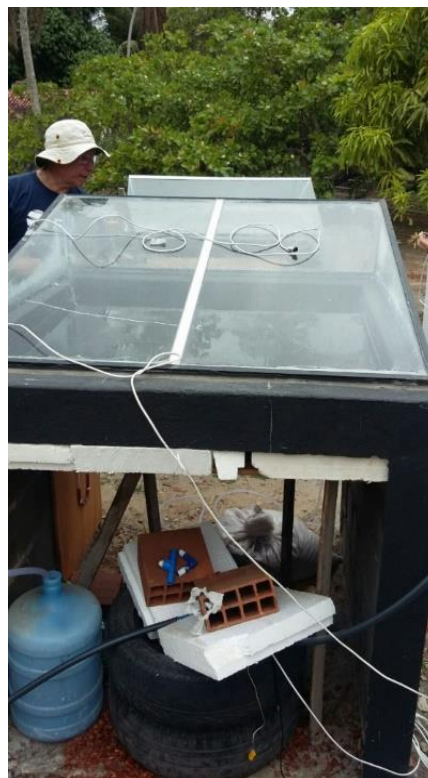
(c)Gabinete sensores conectados

Figura 27 – Coletor de dados.

O coletor de dados foi instalado no sistema, conforme mostrado na Figura 28.



(a) Coletor de dado montado.



(b) Colocação dos sensores.

Figura 28 –Montagem do coletor dados.

### 3.5 Medições experimentais do protótipo do dessalinizador solar

Nas Figuras 29 e 30 são identificados os pontos de medição instalados na estrutura do dessalinizador, onde pode-se observar:

- a) Sensor 1 – interior da câmara de evaporação e condensação;
- b) Sensor 2 – vidro da tampa da câmara;
- c) Sensor 3 – interior do coletor solar;
- d) Sensor 4 – na superfície inferior no isopor.

Além destes sensores, foram utilizados os dados diários da Estação de Dados automática do INMET, número 82798, localizada em João Pessoa (PB), Latitude: 07° 06' 54" S Longitude: 34° 51' 47" W, altitude: 7,43 m.

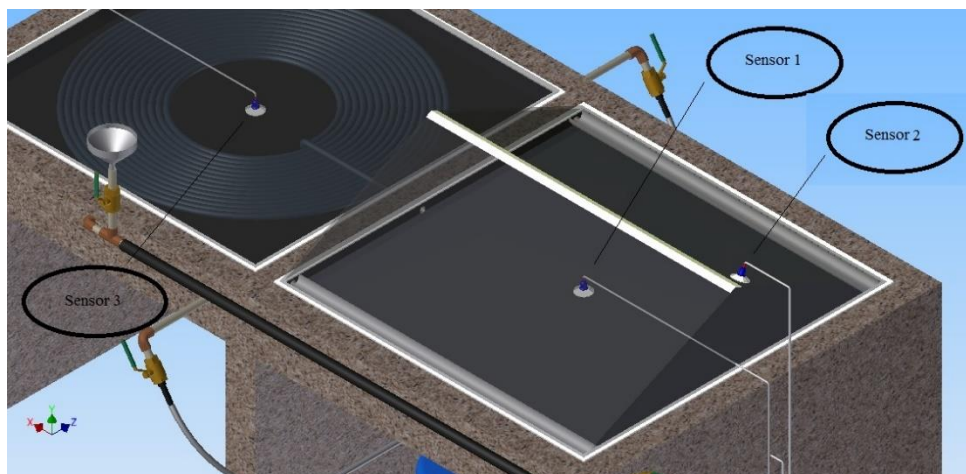


Figura 29 - Vista em perspectiva, com localização sensores 1, 2 e 3.



Figura 30 – Detalhe localização do sensor 4, no isolamento térmico.

As medições iniciais no protótipo do dessalinizador foram realizadas em novembro de 2015, e os resultados possibilitaram a avaliação primária, a correção e ajustes técnicos do projeto quanto às suas dimensões, vedação e perdas de calor.

Em janeiro de 2016, foram realizadas novas medições, porém, foram prejudicadas por problema no coletor de dados. Após isso, foram realizados novos testes entre os meses de setembro e outubro de 2016, e realizadas as medições finais, a sistematização e análises, chegando-se aos resultados da pesquisa.

As medições finais foram retomadas no período de 22 de setembro a 11 de outubro de 2016. Foi considerado o período de 01 a 10 de outubro de 2016 para a composição dos resultados finais, devido ao fato de, neste período, não ter havido nenhuma intercorrência que comprometesse a coleta de dados.

### **3.6 Limpeza do protótipo do dessalinizador solar**

Considerando-se que a camada de sais acumulada interfere na absorção do calor, foi realizada uma limpeza periódica, a cada 30 dias, na câmara de evaporação-condensação. Após a remoção da tampa de vidro, utilizou-se a própria água salobra para a retirada das incrustações de sais. Concluída esta etapa, foi realizada a repintura do fundo da câmara com tinta preta. Ao final, a tampa foi recolocada e vedada com silicone, restabelecendo o sistema para um novo ciclo de operação.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Desempenho dos materiais utilizados na confecção do protótipo do dessalinizador solar**

Os estudos realizados demonstraram que os materiais utilizados para a construção do protótipo do dessalinizador solar apresentavam características térmicas dentro dos parâmetros aceitáveis de condutividade térmica, absorção de calor, resistência ao calor e durabilidade, resultando no desenvolvimento de um equipamento que utiliza técnicas construtivas simples.

O ferrocimento, assim como o isolamento térmico utilizando placas de isopor de lajes pré-moldadas, mostraram-se eficientes, tanto para a câmara de evaporação como para o coletor, como indicado nos estudos das propriedades térmicas e demonstrado pelas leituras das temperaturas nestes dois ambientes.

Estima-se que a construção do equipamento completo possa ser realizada em cerca de cinco dias, desde o preparo do terreno, fundações, alvenaria, instalação hidráulica e colocação das tampas do coletor, do tanque de evaporação e instalação dos reservatórios de armazenamento da água.

O dessalinizador construído apresenta algumas inovações, quando comparado com outros dessalinizadores descritos na literatura e apresentados na Tabela 2, produzidos com outros materiais. Entre as inovações, destaca-se a altura, a cerca de 1 metro do solo, diferentemente dos demais, que normalmente são construídos ao nível do solo. Esta altura facilita o manuseio do equipamento por parte dos usuários.

Outro aspecto importante é o isolamento térmico, com a utilização de placas de EPC (nome comercial: isopor) na superfície inferior da placa de ferrocimento, correspondente ao fundo do equipamento.

As Figuras 31 a 34 mostram, em detalhes, a base do dessalinizador, a cobertura do coletor e da câmara de evaporação, o isolamento térmico utilizado e sua vista do lado oeste.





Figura 31 - Base estrutural.



Figura 32 – Vista panorâmica, câmara e coletor.



Figura 33 - Lateral oeste da estrutura.



Figura 34 -Isolamento térmico com placas EPS (Isopor)

Com relação à tinta utilizada na pintura da bacia, que tem a finalidade de provocar a maior absorção possível da radiação solar, traduzido em maior temperatura, apresentou rendimento térmico dentro de parâmetros para esse tipo de coletor. Utilizamos tinta para pisos, marca Coral, tipo Pinta Piso Concreto. De acordo com a Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico (FISPQ N° 0001/2013), os ingredientes da sua composição têm Classificação de Risco 1, ou seja, pouco perigoso à saúde humana.

No entanto, análises mais completas da água processada devem ser realizadas, para uma avaliação mais ampla de possíveis resíduos e seus efeitos para o ser humano.



Por outro lado, identificamos no mercado a existência de uma tinta atóxica com resistência à temperatura de até 250 °C, marca Aquaverti, tipo 3800WB, Alta Temperatura Colorida Ecológica, à base d'água, que pode vir a ser avaliada e utilizada.

#### 4.2 Análise térmica do protótipo do dessalinizador solar

Nos gráfico abaixo, Figuras 35, é apresentada a comparação entre a temperatura do ambiente ao lado do dessalinizador, temperatura no isolante (EPS ou isopor) e temperatura no interior do coletor solar. Resultados semelhantes são mostrados na Figura 36, alternando apenas para a temperatura da câmara.

Os resultados indicam que o isolamento térmico entre o ambiente e a placa de ferrocimento na parte inferior do dessalinizador funcionou, de forma eficiente, diminuindo as perdas do calor para o meio ambiente, mantendo o aquecimento do sistema, tanto no coletor quanto na câmara de evaporação-condensação.

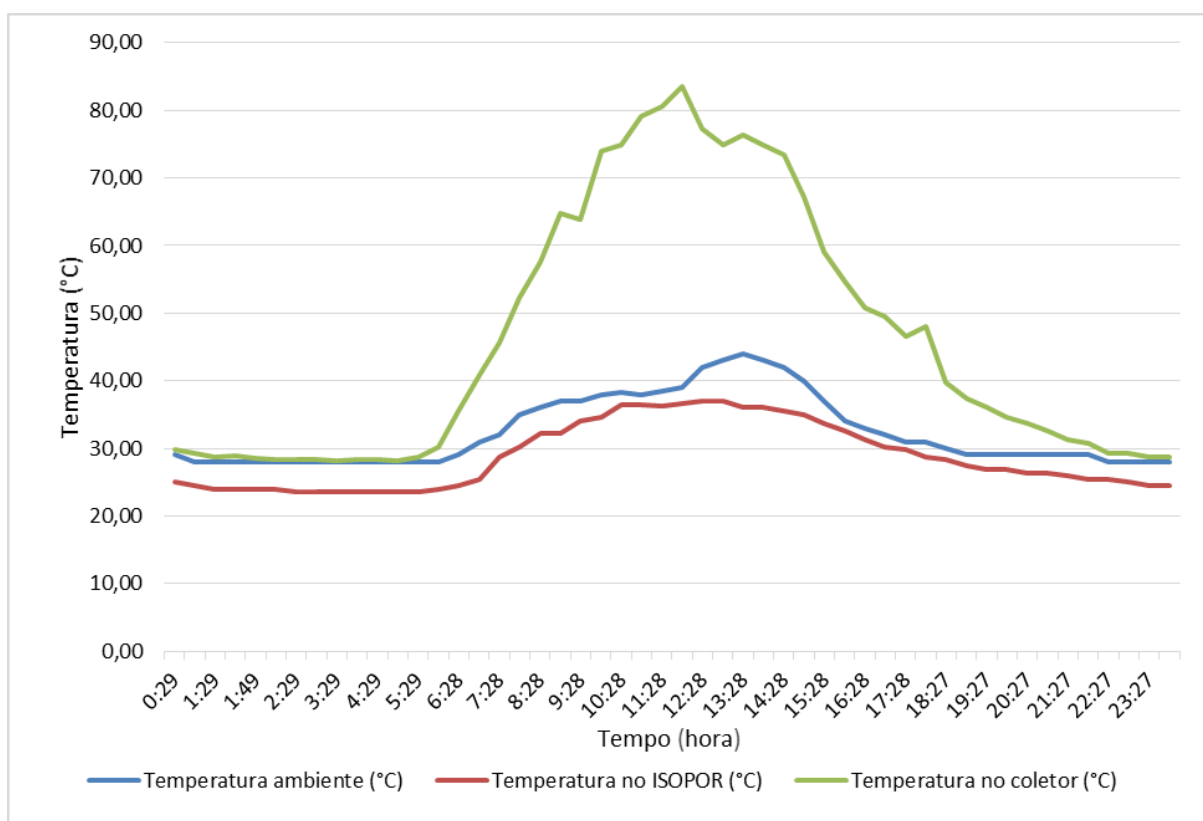


Figura 35 – Comparativo entre as temperaturas, do ambiente, do isopor de isolamento térmico e interior do coletor solar.

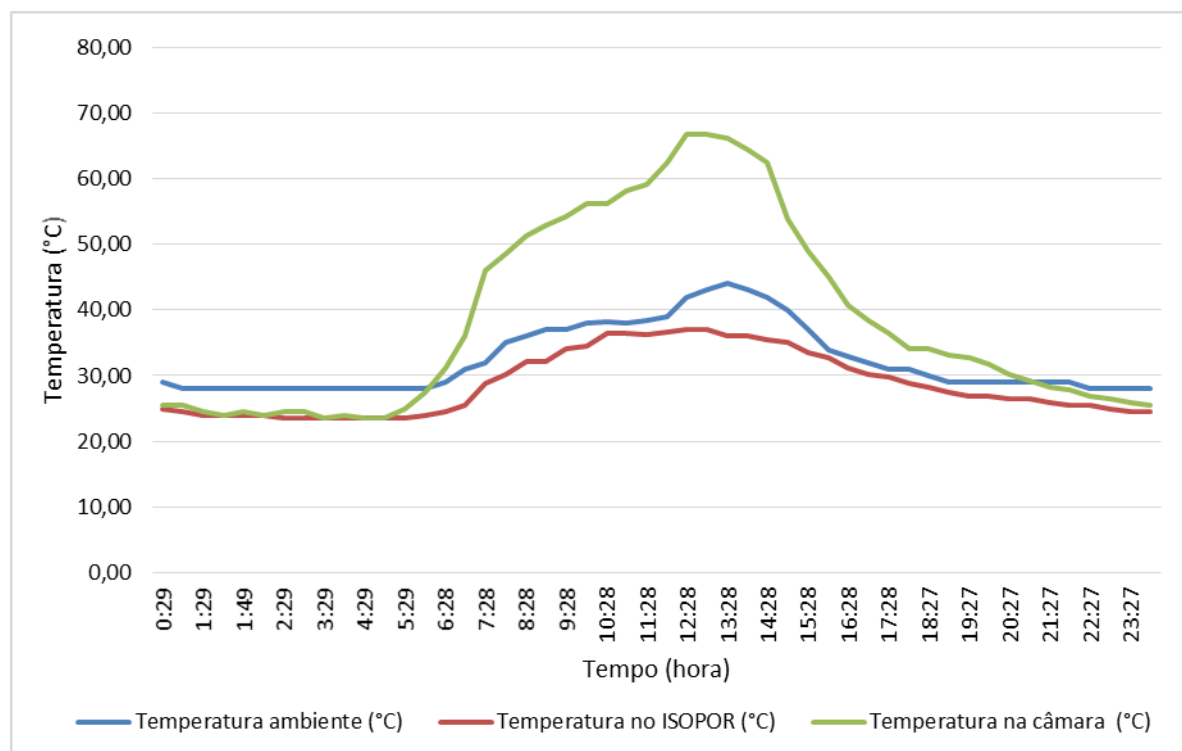


Figura 36 – Comparativo entre as temperaturas, ambiente, do isopor de isolamento térmico e câmara (trocaador de calor).

#### 4.3 – Avaliação do desempenho do equipamento e das condições de operação

Para avaliar o desempenho térmico e do volume de água dessalinizada, foram realizadas diversas medições térmicas nas principais partes do dessalinizador. Simultaneamente, foi feito o acompanhamento das condições climáticas e dos níveis diários de radiação solar, observando-se parâmetros térmicos dentro das margens esperadas para este tipo de equipamento, como observado na Tabela 9.

Tabela 9 – Comparação entre média da temperatura ambiente, média da radiação solar, condições climáticas e produção diária da água

Dia	Temperatura ambiente INMET (°C)	Radiação Solar média do dia (Wh/m <sup>2</sup> )	Velocidade do vento (m/s)	Precipitação do dia	Produção de água dessalinizada l/dia
1/10/16	27,03	256,82	2,64	0	3,60
2/10/16	25,60	248,14	3,34	0,2	3,55
3/10/16	27,75	283,83	3,44	0	3,40
4/10/16	26,64	230,78	2,85	0	3,15
5/10/16	26,69	273,80	2,39	0,2	2,75
6/10/16	26,57	257,33	2,04	0	3,40
7/10/16	26,99	275,99	1,98	0	2,90
8/10/16	26,64	267,17	1,70	0	3,80
9/10/16	26,93	269,34	2,50	0	2,75
10/10/16	26,93	268,80	3,10	0,8	3,50
<b>Médias</b>	<b>26,78</b>	<b>263,20</b>	<b>2,60</b>	<b>0,12</b>	<b>3,28</b>

No que se refere à produção diária de água dessalinizada, os volumes medidos nos testes preliminares e nos testes finais demonstram que as quantidades se encontram dentro de parâmetros para dessalinizadores passivos, entre de 3 a 4 litros/m<sup>2</sup>.dia (SOARES 2004).

A partir desses primeiros dados, foram feitas melhorias na vedação da tampa de vidro e na utilização de um sistema fotovoltaico de circulação forçada da água no coletor solar, utilizado a fim de tornar este processo mais eficiente.

As temperaturas medidas tanto na câmara de evaporação, quanto no coletor solar variaram de acordo com a radiação solar e com as condições meteorológicas ao longo do dia, como observado na Tabela 10 e Figura 37. Apresentam comportamentos similares ao de outros experimentos dessa natureza, como o realizado por Lopo (2010). Foram identificadas oscilações provocadas por nebulosidades, típicas das variações climáticas para esse tipo de sistema. As temperaturas no interior da câmara no período entre 09:00h da manhã e 15:00h variaram entre 49 e 70 °C, e no interior do coletor, neste mesmo horário, de 48 e 82 °C, com picos em alguns dias, chegando a ultrapassar os 90 °C, acompanhado do aumento da radiação, declinando de forma acentuada após as 16:00h.

Tabela 10 - Medição diária, temperaturas, velocidade do vento e radiação do dia 01/10/2016.

Hora*	Temperatura do vidro da câmara (°C)	Temperatura do interior câmara (°C)	Temperatura do interior coletor (°C)	Temperatura ambiente INMET (°C)	Velocidade do vento (m/s)	Radiação (Wh/m <sup>2</sup> )
0:00	23,52	25,44	33,60	25,80	1,5	-0,83
1:00	21,60	24,48	31,68	25,90	2,1	-0,98
2:00	22,56	24,48	30,72	26,00	2,4	-0,98
3:00	22,56	24,48	29,76	25,60	1,8	-0,94
4:00	22,08	23,52	28,80	25,30	1,9	-0,93
5:00	21,60	23,52	27,36	25,60	2,4	-0,88
6:00	23,04	24,96	27,84	25,70	2,4	39,11
7:00	26,88	31,20	31,68	25,40	2,3	135,58
8:00	36,00	48,00	43,68	25,30	2,4	493,89
9:00	39,36	51,36	51,84	26,20	2,1	736,39
10:00	44,16	54,24	58,08	27,50	2,9	893,61
11:00	46,56	56,16	64,32	28,20	3,1	898,06
12:00	47,52	59,04	66,24	29,80	3,1	747,22
13:00	53,28	66,72	76,32	30,10	2,6	868,06
14:00	51,84	66,24	75,84	29,40	3,3	741,67
15:00	47,52	62,40	72,00	30,20	3,4	575,56
16:00	36,96	48,96	61,44	29,10	3,7	246,81
17:00	31,20	40,80	53,28	29,10	3,7	54,94
18:00	28,80	36,48	48,48	28,90	2,6	0,95
19:00	26,40	32,64	44,64	27,20	3,2	-0,98
20:00	24,96	30,24	41,76	26,30	2,8	-0,98
21:00	24,00	28,32	38,88	25,90	2,8	-0,98
22:00	23,52	26,88	36,48	25,80	2,7	-0,98
23:00	22,56	25,92	34,56	25,80	2,6	-0,98
0:00	21,60	24,48	32,64	25,60	2,2	-0,98
<b>Média</b>	<b>31,60</b>	<b>38,44</b>	<b>45,68</b>	<b>27,03</b>	<b>2,64</b>	<b>256,82</b>

Seguem as Figuras 37 e 38, contendo os gráficos do comportamento das variáveis estudadas, temperaturas do vidro, do interior da câmara de evaporação e condensação, do interior do coletor, ambiente, velocidade do vento e radiação. A leitura destes permite identificar um padrão diário com alterações devido à ocorrência nebulosidade ou chuva ou alteração na velocidade do vento, que afetam e alteram os níveis de radiação, temperatura e, consequentemente, o rendimento do equipamento.

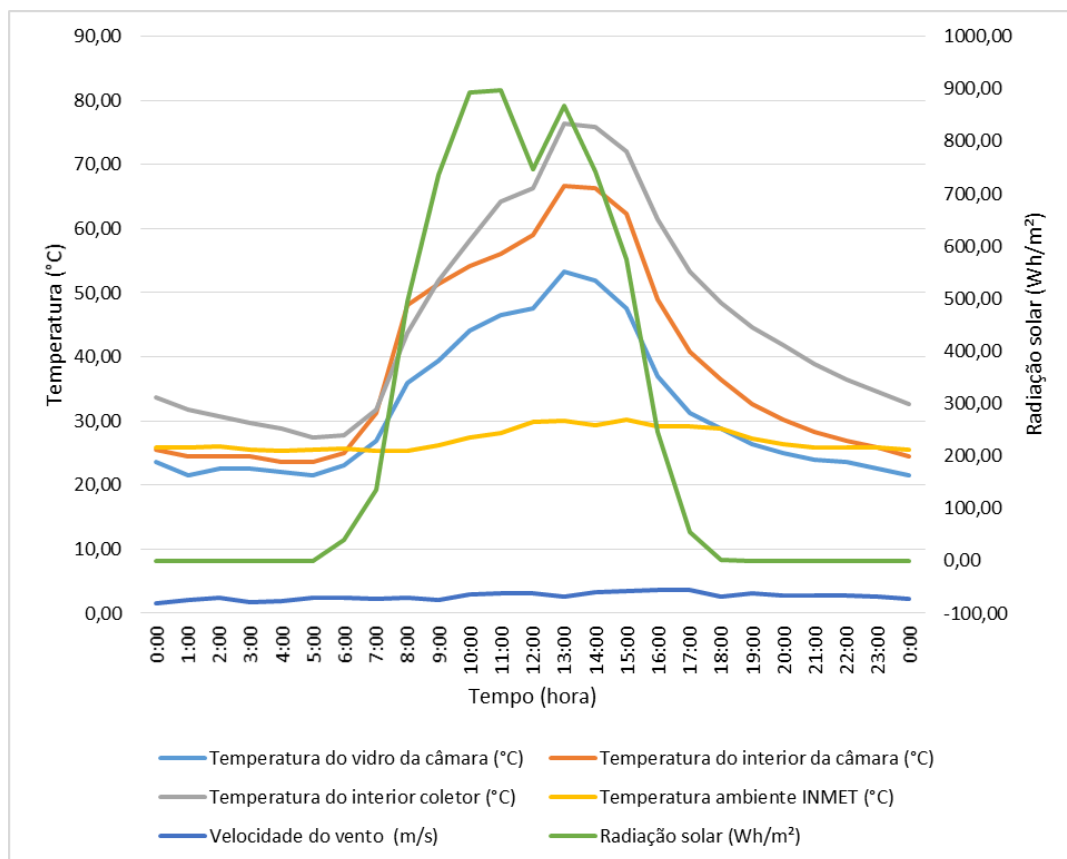


Figura 37(a) – Gráfico mostrando o comportamento das variáveis monitoradas do dia 01/10/2016

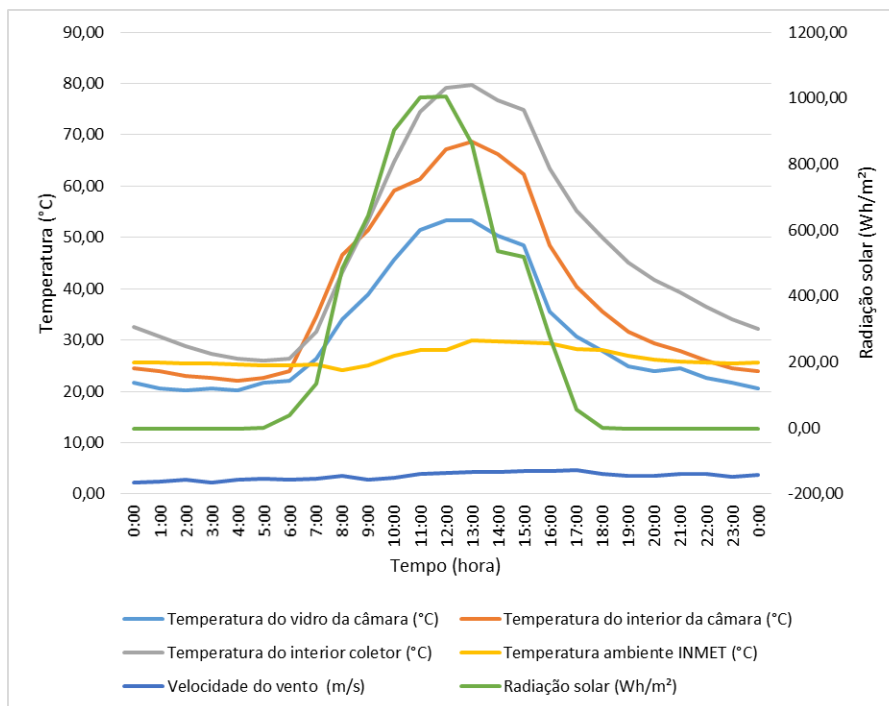


Figura 37(b) – Gráfico mostrando o comportamento das variáveis monitoradas do dia 02/10/2016.

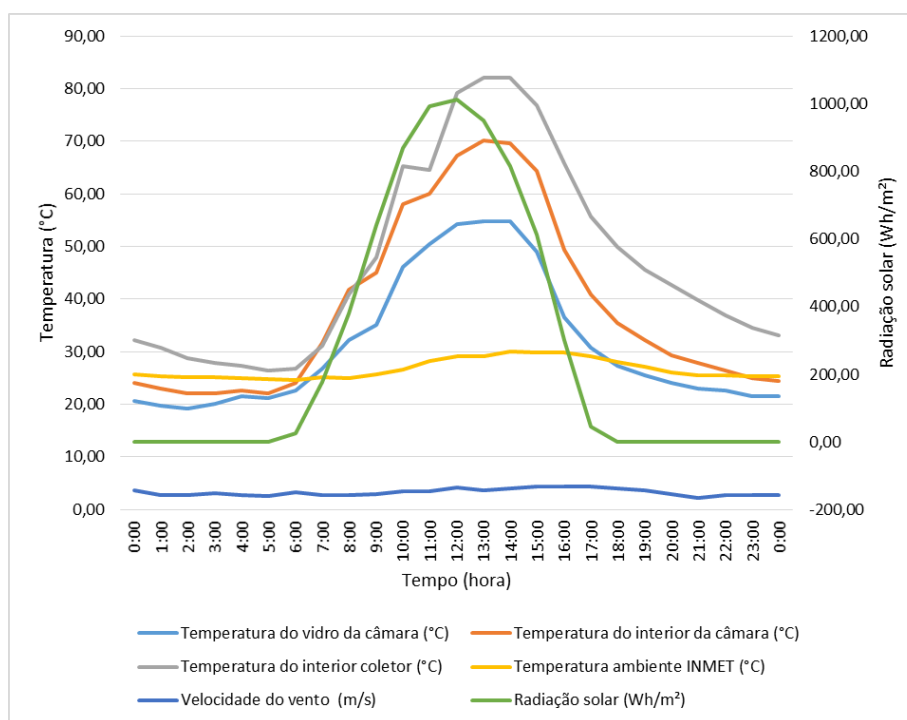


Figura 37(c) – Gráfico mostrando o comportamento das variáveis monitoradas do dia 03/10/2016.

As Figuras 37(a) a 37(c) mostram os resultados referentes ao comportamento das variáveis acompanhadas, apresentando variações consideradas típicas para esse tipo de sistema.

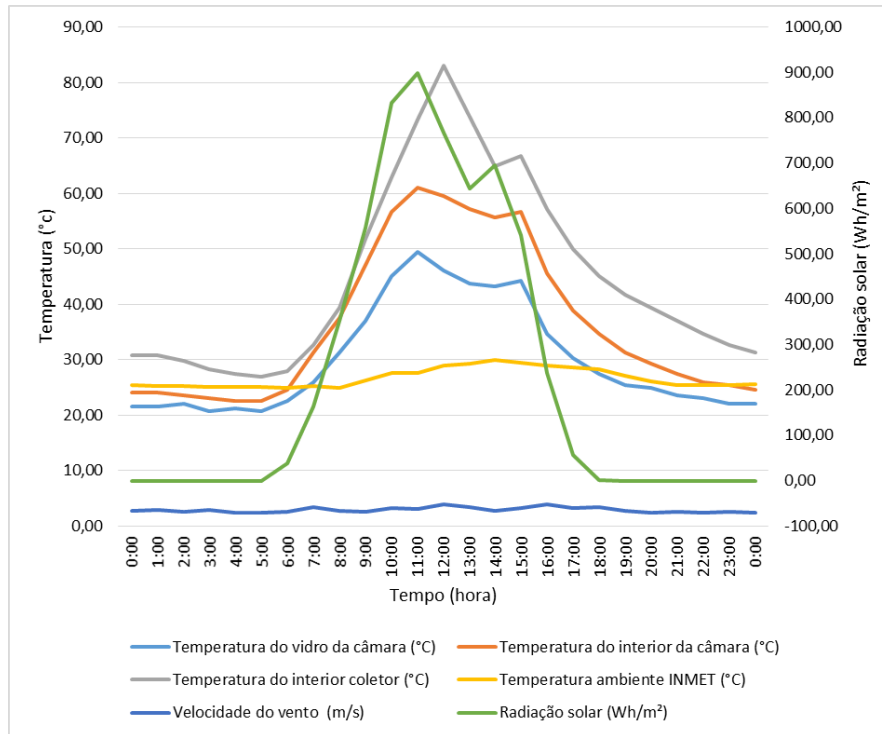


Figura 37(d) – Gráfico mostrando o comportamento das variáveis monitoradas do dia 04/10/2016.

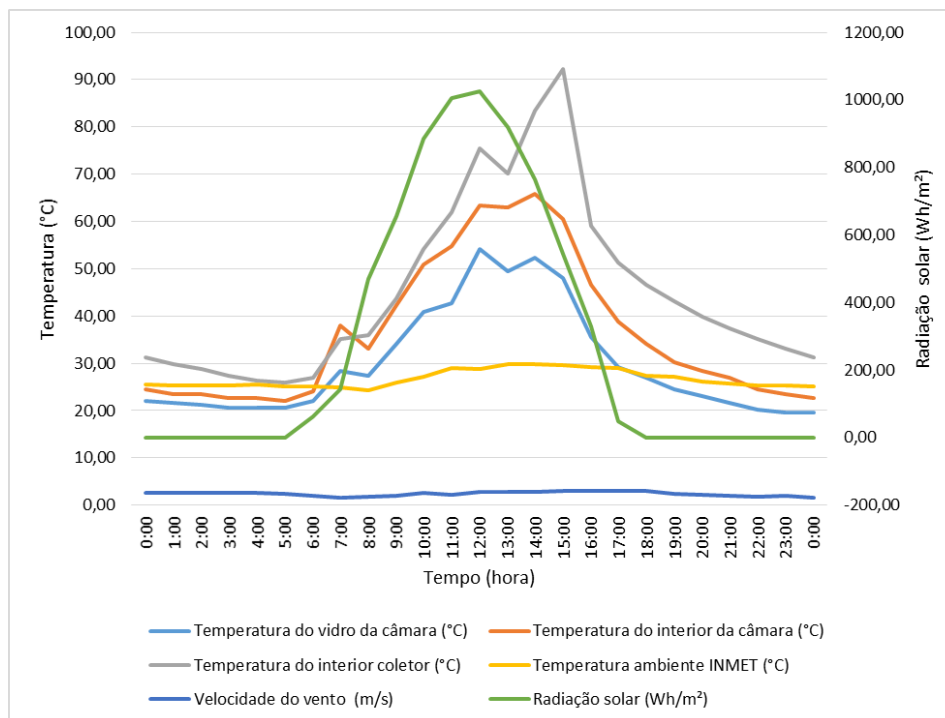


Figura 37(e) – Gráfico mostrando o comportamento das variáveis monitoradas do dia 05/10/2016.

As Figuras 37(d) e 37(e) mostram os resultados dos parâmetros de comportamento das variáveis acompanhadas, onde observam-se variações atribuídas a oscilações climáticas, no local dos experimentos, típicas para esse tipo de sistema.

Assim como nas figuras anteriores, as Figuras 38(a) a 38(e), que seguem, permitem visualizar o comportamento das variáveis acompanhadas no período de teste, com resultados considerados típicos para esse tipo de sistema.

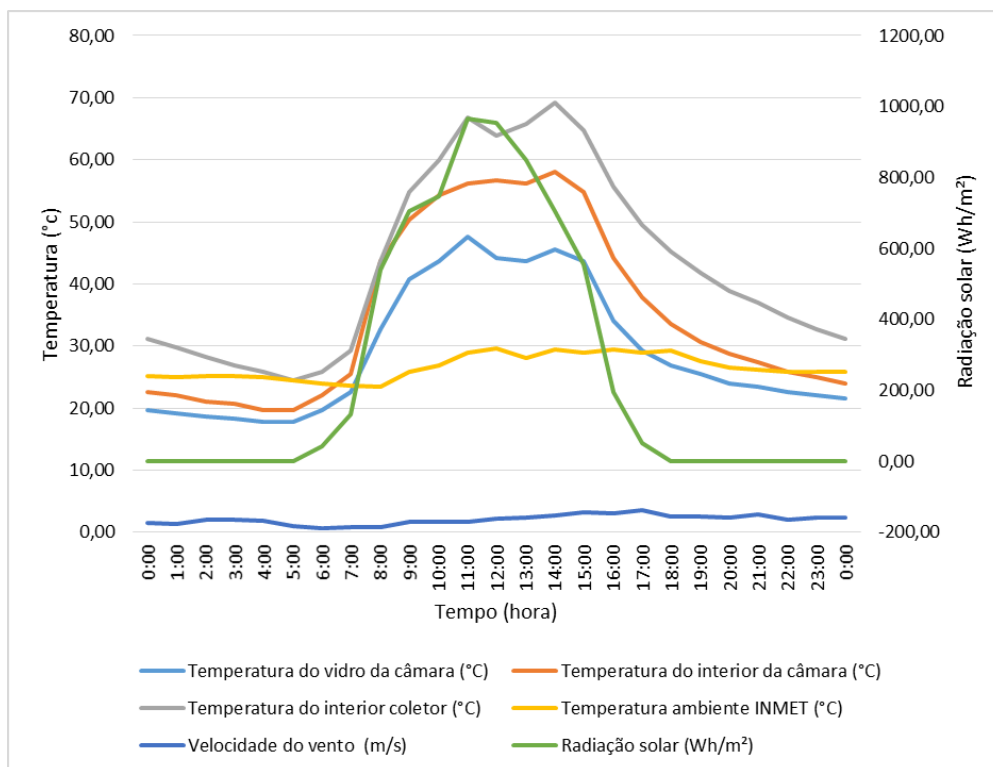


Figura 38 (a) – Gráfico mostrando o comportamento das variáveis monitoradas do dia 06/10/2016;

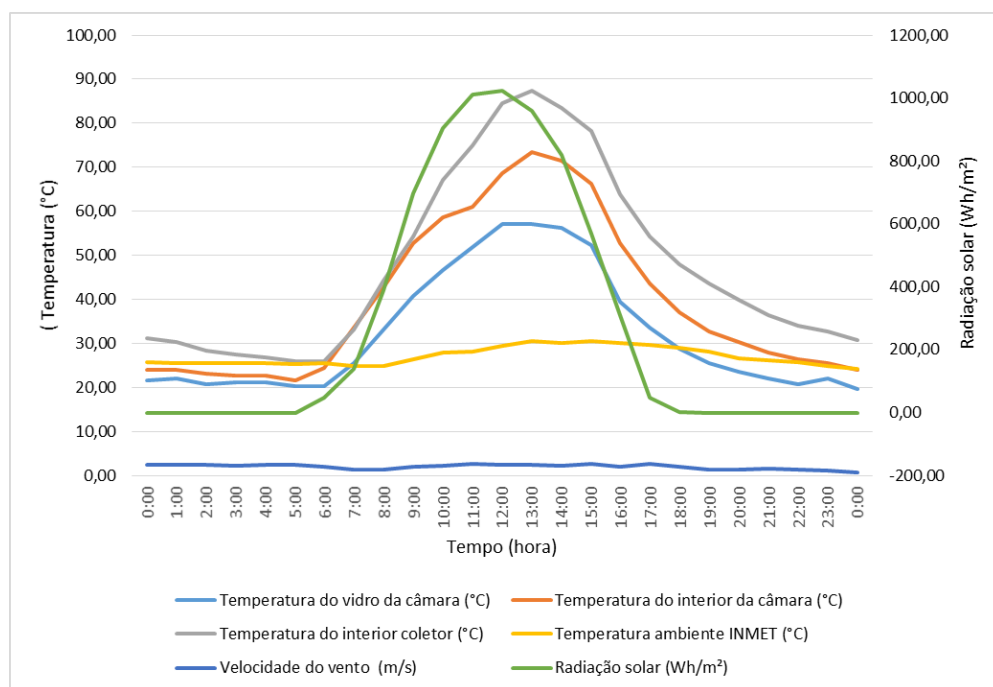


Figura 38 (b) – Gráfico mostrando o comportamento das variáveis monitoradas do dia 07/10/2016.

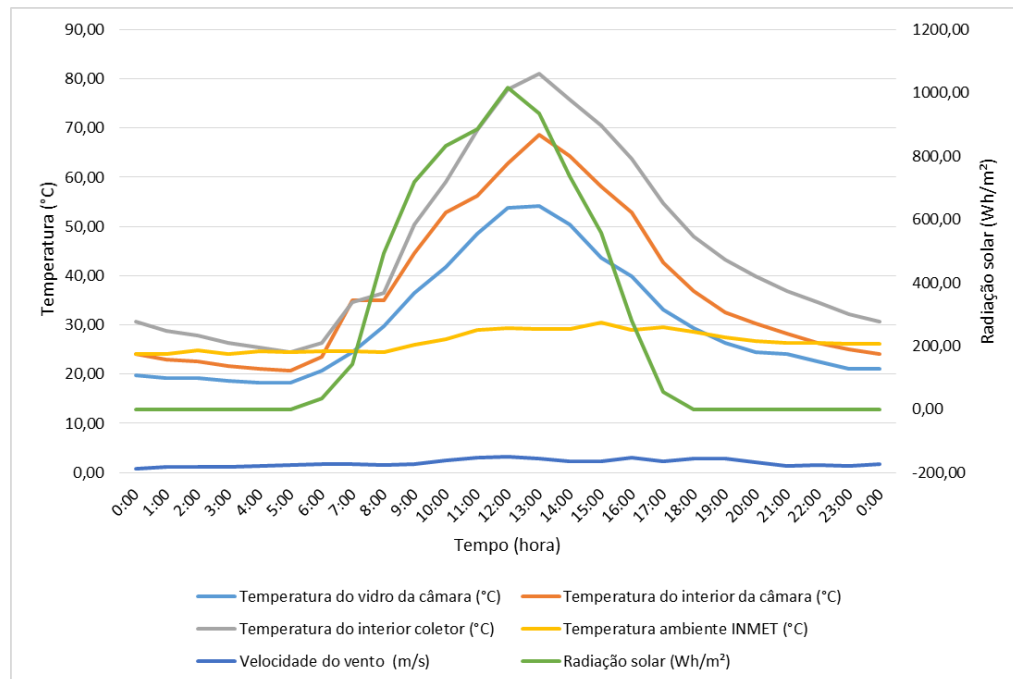


Figura 38 (c) – Gráfico mostrando o comportamento das variáveis monitoradas do dia (08/10/2016)

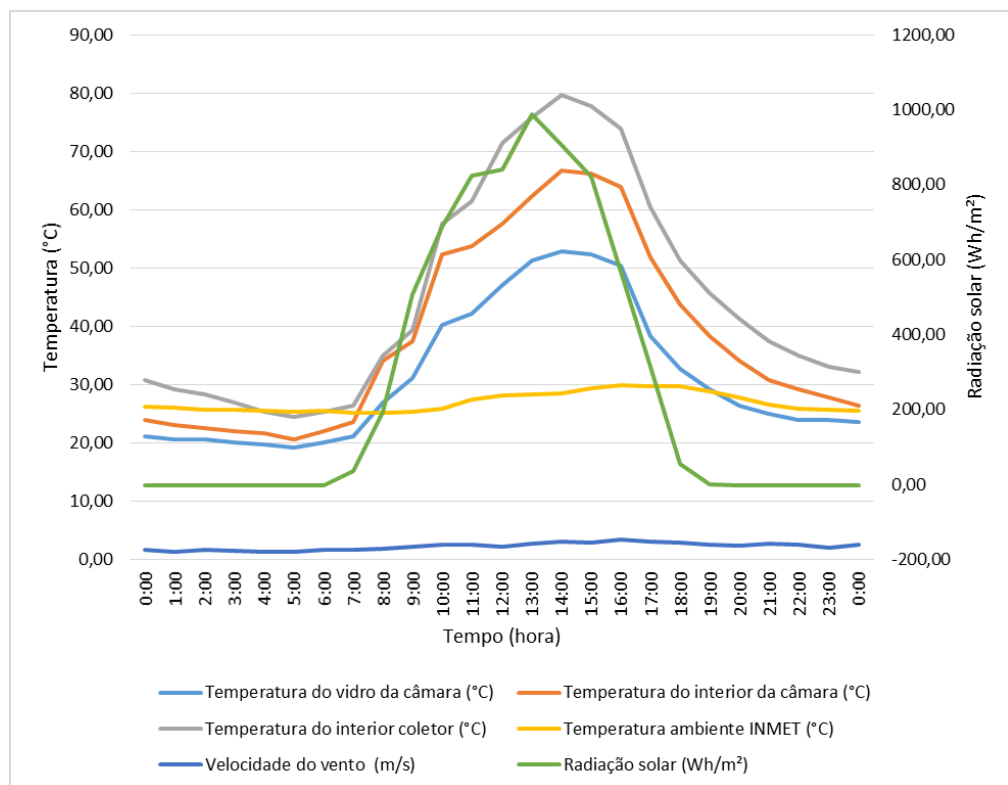


Figura 38 (d) – Gráfico mostrando o comportamento das variáveis monitoradas do dia 09/10/2016



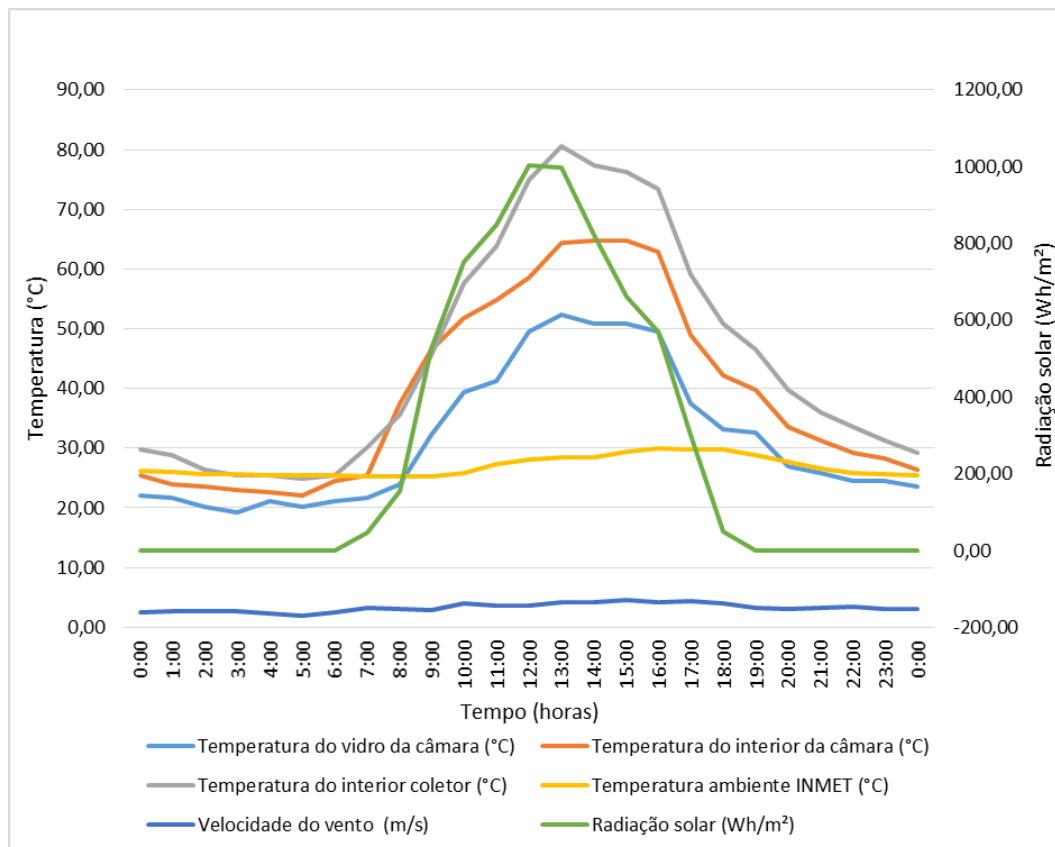


Figura 38 (e) – Gráfico mostrando o comportamento das variáveis monitoradas do dia (d) 10/10/2016.

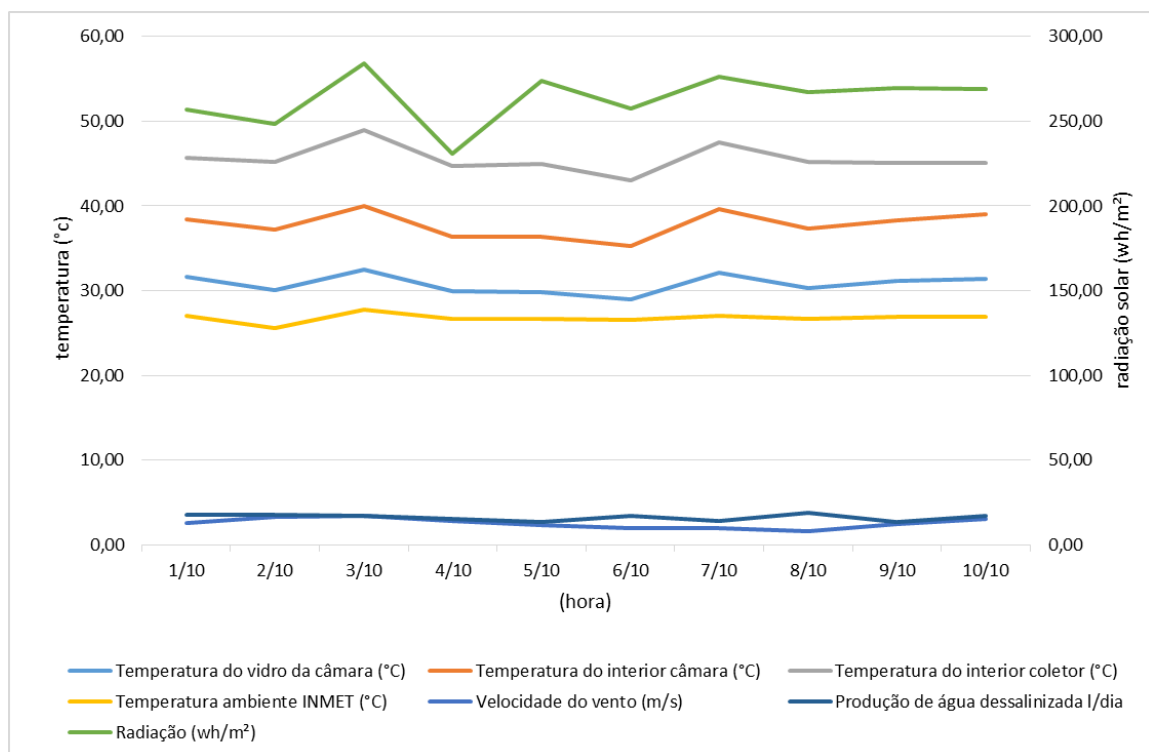


Figura 39 – Gráfico mostrando o comportamento das variáveis monitoradas no período.

A Figura 39 mostra o comportamento das variáveis monitoradas durante o período experimental, considerando as médias diárias para: temperatura do vidro que compõe a tampa da câmara ou trocador de calor; a temperatura ambiente no interior da câmara e no interior do coletor, além da radiação solar ( $\text{wh.m}^2$ ); velocidade do vento e produção do dia de água dessalinizada em litros/dia.

#### **4.4 - Custos de produção do dessalinizador solar e da água**

O custo de um dessalinizador solar está diretamente relacionado à escolha do material, dependendo disso o custo pode ser relativamente alto, quando observada a sua capacidade limitada de produção diária por metro quadrado, porém deve-se levar em consideração que a energia utilizada não tem custo, sendo o investimento recuperado com o passar dos anos, e mais, quando se tem a informação de que as famílias residentes em regiões remotas do semiárido são sujeitas à escassez da água e necessitam pagar para ter a água necessária para seu consumo, sem a devida garantia da sua potabilidade.

Como apresentado na Tabela 8, o custo total para a confecção do protótipo do dessalinizador foi calculado em R\$ 932,50 (novecentos e trinta e dois reais e cinquenta centavos).

Com as condições climáticas favoráveis ao melhor aproveitamento da energia térmica na região, dividindo-se o investimento inicial (R\$ 932,50) pela quantidade de água dessalinizada produzida por ano (984 l), para 300 dias de sol, obtém-se o valor estimado produzido de R\$ 0,95 centavos por litro, valor inferior ao de uma garrafa de água mineral de 500 ml.

Estimando ainda que, nos anos subsequentes, as despesas presumíveis serão apenas de pequenos reparos, repintura e troca de algum componente danificado. Desse modo, a tendência é diminuição progressiva desse custo por litro, considerando que este tipo de equipamento tem vida útil em torno de 15 a 20 anos.

Do ponto de vista econômico, despesas médicas relacionadas a doenças transmitidas pela água podem ser reduzidas, uma vez que a água dessalinizada tem melhor qualidade do que a água original. Em países subdesenvolvidos, metade das doenças ocorridas são transmitidas por águas contaminadas (KHAMA, 2008).

Busca-se, também, a aplicação de materiais alternativos, de baixo custo e de fácil utilização, como o ferrocimento, que é um material constituído de ferro bem distribuído,

mergulhado em uma argamassa rica de cimento e areia. Desse modo, obtém-se um material resistente, impermeável e de fácil moldagem (SOUZA, 2002), tendo múltiplas aplicações na construção de cisternas, no revestimento de lagoas para armazenamento de água, em casas, silos para armazenagem de grãos, barcos e, inclusive, para construção de dessalinizadores.

Outro aspecto a considerar é o aumento da área da câmara de evaporação, fator que amplia também a produção diária de água dessalinizada sem um aumento substancial no custo do equipamento, uma vez que os custos aumentam, de forma proporcional, somente em relação à área da câmara de evaporação-condensação.

#### 4.5. Análises físico-químicas da água dessalinizada

Em relação às características físico-químicas da água, como expresso no Tabela 11, as amostras analisadas antes e após o processo de dessalinização solar apresentaram diferenças significativas na sua salinidade, condutividade e dureza, o que demonstra a eficiência do sistema.

Quanto à salinidade, a amostra diminuiu drasticamente sua quantidade de sais, podendo ser esses X, Y e Z da região em estudo. Assim, está em conformidade com o CONAMA, que tem um intervalo de águas salobras de 0,5 ‰ e inferior a 30 ‰.

Tabela 11 – Parâmetros físico-químicos da água, antes e pós dessalinização solar

Parâmetro	Amostra 1 (água bruta)	Amostra 2 (água dessalinizada)
Salinidade (‰)	1,7	0,02
Condutividade elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	1596,5	18,0
Dureza total ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{CaCO}_3$ )	292,0	10,0
pH	7,7	7,6

Em relação à condutividade elétrica, a norma CONAMA n° 357/05 não estabelece limites para este parâmetro, no aspecto dureza total ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{CaCO}_3$ ). A Portaria n° 2.914/2011 do Ministério da Saúde estabelece para dureza o teor de 500 mg/L em termos de ( $\text{CaCO}_3$ ) como o valor máximo permitido para água potável, sendo considerados os níveis de 0 – 75  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{CaCO}_3$  como *água branda* ou *mole*; de 75 – 150 como *moderadamente dura*; e de 150 – 300 como *dura*. Como se observa na Tabela 20, a dureza da água bruta era de 292,0  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{CaCO}_3$ , classificada como *dura*. Após o processo de dessalinização, a dureza foi reduzida para 10  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{CaCO}_3$ , classificada como *branda* ou *mole*.



(a) Medição do pH.

(b) Medição da condutividade elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

Figura 40 – Medição do pH e da condutividade elétrica.

Segundo Kovda (1973, apud SILVA JUNIOR, 1999), os principais sais presentes nos solos e águas são o cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ), o sulfato de magnésio ( $\text{MgSO}_4$ ), o sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), o cloreto de magnésio ( $\text{MgCl}_2$ ) e o carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Tais sais podem ter sua solubilidade afetada em função de alguns fatores, como pH e temperatura na fonte, razão porque esses fatores devem ser levados em consideração no estudo da qualidade das águas, principalmente quando se tem carbonatos e/ou bicarbonatos.

Ocorreu acúmulo de sais no fundo da câmara de evaporação, como mostra a Figura 41. Porém, não foram realizadas medições da quantidade desse resíduo, apenas foi feita uma limpeza do fundo do tanque após 30 dias de seu uso, uma vez que a quantidade acumulada após este período já estava interferindo, provavelmente, na absorção do calor pela superfície negra do fundo.

Desta forma, faz-se necessário, em pesquisas futuras, quantificar esse acúmulo, considerando que quanto mais salinas forem as águas utilizadas, maiores as concentrações de sais residuais.



(a) Acúmulo de sais no fundo.



(b) Visão geral do acúmulo de sais.

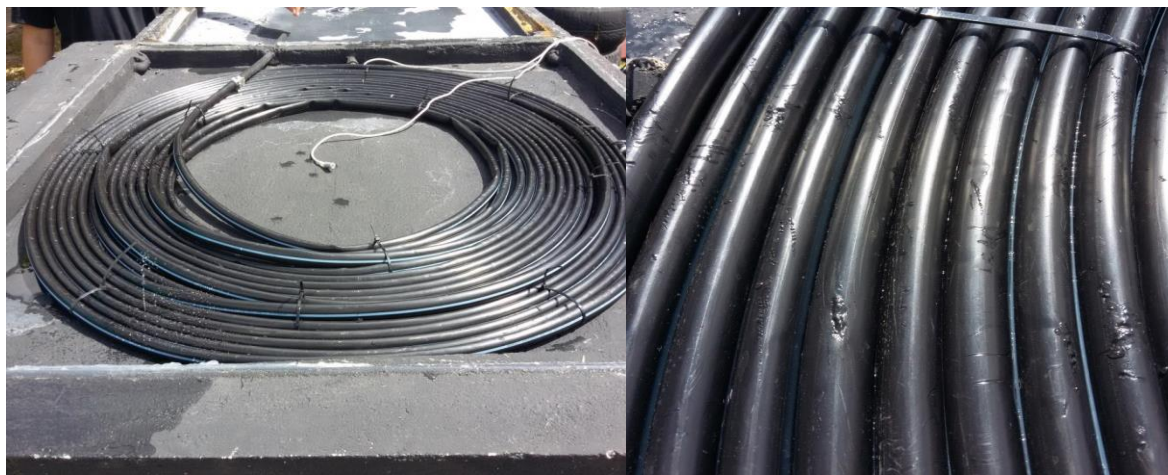
Figuras 41 - Acúmulo de sais no fundo da câmara de evaporação.

#### 4.6 Avaliação do coletor solar

O coletor projetado, assim como toda a estrutura do dessalinizador, teve como objetivo aliar o baixo custo à eficiência, utilizando materiais alternativos, optando-se, assim, por um coletor equipado com uma serpentina de mangueira de polietileno de alta Densidade – PEAD, utilizada para irrigação.

Foram estudadas as suas principais características, considerando o tipo de utilização, sua flexibilidade e resistência ao calor, dentro das margens de exigência de um coletor solar. No entanto, embora as normas técnicas para esse tipo de mangueira indiquem que a temperatura de fusão se situa entre 125 e 130 °C, com indicação de temperatura mínima e máxima de uso contínuo variando de -40 a + 90 °C, ocorreu degradação e rompimento de suas paredes em temperaturas da ordem de 82 °C (Figura 42), como registrado e sistematizado na Tabela 21, que identifica as médias diárias de temperatura medidas no período de testes.

A ocorrência deste problema prejudicou a avaliação do rendimento do dessalinizador no seu modo ativo, com o uso do coletor. As medições com o sistema de bombeamento forçado foram interrompidas sem a obtenção de resultados conclusivos quanto à eficiência deste modo no aumento do volume diário de água dessalinizada.



(a) Coletor danificado pelo calor.

(b) Detalhe da mangueira danificada.

Figuras 42 – Danos no coletor.

Na comparação dos resultados registrados, observa-se que a diferença entre a temperatura da água na câmara de evaporação e a temperatura da água no coletor teve um valor médio diário, identificado no período final de testes, da ordem de 9,15 °C. Isso pode ser um indicativo de que a circulação forçada entre a câmara e o coletor pode promover um aumento na eficiência de equipamento, ocorrendo assim uma maior e mais rápida evaporação.

Nesse contexto, deve ser realizada uma avaliação do custo adicional com o sistema de bombeamento que foi utilizado no coletor. Foi necessário fazer uso de um painel solar de 10 W e uma bomba de 12 VDC (utilizada em aquários), com impacto total de custo de aproximadamente R\$ 120,00 (cento e vinte reais). Percebeu-se um aumento inicial da eficiência produtiva em termos de litros de água dessalinizada produzida diariamente com a adoção desse bombeamento, no entanto, não foi realizado um estudo de custo/benefício ao ser adicionado esse sistema.

Tabela 12 – Diferenças entre as temperaturas médias diárias do ambiente e do coletor.

DATA	Temperatura ambiente (°C) (média do dia) INMET	Temperatura média no interior do coletor (°C)	Diferença média $T_{\text{coletor}} - T_{\text{ambiente}}$ (°C)
1/10/2016	25,30	64,07	38,77
2/10/2016	28,01	68,95	40,94
3/10/2016	28,14	67,73	39,60
4/10/2016	28,27	62,69	34,42
5/10/2016	28,26	62,51	34,25
6/10/2016	27,94	61,13	33,19
7/10/2016	28,41	72,17	43,76
8/10/2016	28,33	63,67	35,34
9/10/2016	28,29	67,93	39,64
10/10/2016	28,26	69,37	41,12
<b>Média</b>	27,92	66,02	38,10



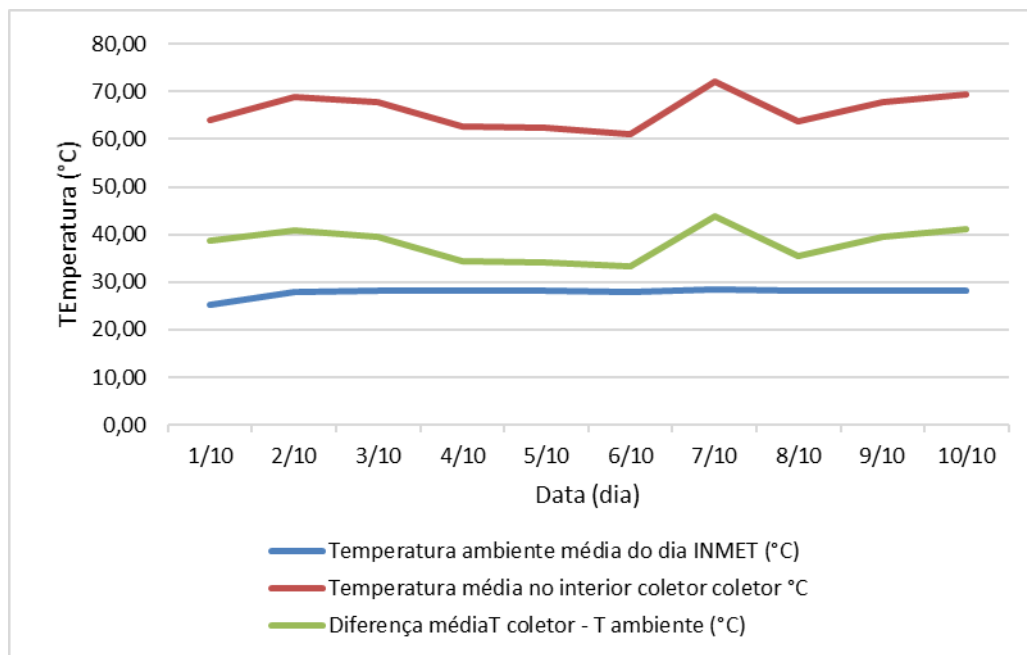


Figura 43 – Comportamento médio diário dos indicadores monitorados para o Intervalo em estudo entre os dias 01 a 10/10/2016.

Considerando, pois, que o equipamento desenvolvido, inicialmente planejado para funcionar de forma ativa, com a inclusão do coletor solar para aumentar a temperatura da água na tentativa de melhorar a sua eficiência; considerando, também, que este coletor apresentou resultados térmicos positivos, com a ressalva da degradação da mangueira utilizada, fato que resultou na impossibilidade de concluir os testes com o seu sistema ativo inteiramente funcional, limitando-se à análise dos resultados de seu funcionamento enquanto equipamento passivo; faz-se necessária a continuação dos testes após identificação e substituição da mangueira utilizada no coletor para avaliar o seu desempenho nas condições desejadas.

## 5. CONCLUSÕES

O dessalinizador solar projetado, construído e testado no presente estudo, com materiais e técnicas construtivas alternativas, de menor custo, apresentou resultados similares no seu desempenho a de outros equipamentos passivos, e, portanto, não foram evidenciados ganhos pelo uso do coletor solar, quando realizada a comparação com outros modelos descritos na literatura.

O *design* estrutural, considerando sua construção elevada a 1 metro em relação ao nível do solo, mostrou-se ergonômico e funcional quanto ao seu adequado manuseio.

A placa de ferro cimento, suportada em trilhos de laje com preenchimento por blocos de EPS, proporcionou o isolamento térmico necessário à retenção da energia solar na câmara, promovendo o efeito térmico desejado.

Os dados iniciais e finais coletados e analisados demonstraram que o equipamento desenvolvido apresenta viabilidade para utilização na dessalinização da água salobra do semiárido nordestino, tanto do ponto de vista da qualidade, como demonstrado nas análises realizadas, quanto da eficiência média do sistema.

As dimensões do equipamento podem ser facilmente adequadas às necessidades mínimas de água dessalinizada por dia, para uma família, disponibilizando uma água de melhor qualidade, evitando-se doenças normalmente transmitidas pela água na região.

O fato de serem utilizados materiais comuns, de fácil aquisição e grande durabilidade, com exceção da mangueira do coletor, torna a tecnologia acessível e socialmente viável para as populações de baixa renda do semiárido nordestino, onde as condições climáticas e de solo dificultam o acesso e disponibilidade de água doce de boa qualidade.

O coletor solar acoplado à câmara de evaporação e condensação, em um único bloco, torna o equipamento mais compacto, sendo de fácil construção e montagem. As temperaturas da água obtidas no interior do coletor chegaram a ultrapassar os 87 °C. A mangueira estudada e utilizada no coletor mostrou-se inadequada, devido às deformações e rupturas, quando submetida aos níveis de temperatura mais elevados, de aproximadamente 90 °C.

Este tipo de dessalinizador pode ser utilizado em locais remotos, de difícil acesso ou mesmo sem energia elétrica, ao contrário do que é comum em plantas de osmose reversa, onde geralmente os equipamentos são centralizados na sede de um município e as famílias beneficiadas têm que se deslocar para buscar a água, gerando custos de transporte e de indisponibilidade da água.



Concluindo, relaciona-se vantagens e desvantagens identificadas na construção e teste.

Como vantagens, identificaram-se:

- A energia solar é livre de custos;
- A construção, manutenção e a operação são simples e não exigem mão de obra especializada;
- Tem vida útil longa;
- Atende de forma descentralizada à demanda por água;
- Pode ser implantada em locais de difícil acesso;
- A produção de efluente líquido com alta concentração salina é baixa;
- Os materiais utilizados são facilmente encontrados no mercado;
- Obtém-se através desse processo, como comprovado pelas análises de laboratório, água doce de boa qualidade e desinfetada, reduzindo a transmissão de doenças para quem a consome;
- O custo por litro produzido é compatível com o de outros processos.

Como desvantagens, identificaram-se:

- Eficiência típica baixa, menor que 50%;
- Para dessalinização de grandes volumes, os custos da instalação tendem a ser elevados, se comparados a outros processos;
- Necessita de grandes áreas para maiores volumes diários de água dessalinizada.

Por fim, com a realização deste trabalho, ficou comprovado o grande potencial do uso da dessalinização solar na obtenção de água potável, principalmente para utilização na região do semiárido brasileiro. Ficou igualmente demonstrado que a tecnologia atualmente em estudo ainda não permite grandes volumes de produção, mas é também evidente que esta poderá ser uma tecnologia de apoio descentralizado à produção de água potável em regiões onde os outros tipos de destiladores (não solares), sejam economicamente e fisicamente inviáveis.

## 6. SUGESTÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Foram identificados alguns ajustes que deverão otimizar o sistema, em trabalhos futuros:

- Identificação de um material alternativo à mangueira de polietileno utilizada para compor o coletor solar;
- Construção de uma tampa piramidal para a câmara de evaporação, visando um aumento da eficiência da condensação;
- Desenvolvimento de uma vedação da tampa por meio de selo d'água, visando melhorar a vedação e facilitar o processo de montagem e desmontagem para acesso ao interior da câmara;
- Implementação de novos testes com o sistema de bombeamento forçado, visando ampliar a produção diária;
- Melhoramento do isolamento térmico nas técnicas de construção, como forma de otimizar os processos de aproveitamento da radiação solar;
- Realização de outras avaliações e testes em períodos mais longos;
- Melhorias no que tange à superfície de absorção da câmara, com o teste de materiais mais absorventes de calor, visando à obtenção de maiores temperaturas, mantendo por mais tempo o aquecimento e promovendo uma melhor eficiência na utilização da energia solar térmica.

## REFERÊNCIAS

AL-HAYEK, I.; BADRAN, O. **The effect of using different designs of solar stills on water distillation**. Desalination, v.169, p. 121-127, Jordan, 2004.

ABOGDERAH, Almabrouk Mansor. **Análise teórica, numérica e experimental de um coletor solar com tubos de calor**. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia térmica e de fluidos. Unicamp, Campinas, SP. 111f, 1991.

ALVES, C. **Tratamento de águas de abastecimento**, 2ª Edição, Publindústria, 301-320. 2007

AMORIM, F.A.V. **Uma Inserção de Recursos Institucionais na Disciplina de Construções Rurais: O Uso de Materiais Alternativos Disponíveis na Microrregião de Satuba nas Construções de Instalações Rurais**. 80f. Dissertação (Mestrado em Educação Agrícola). Instituto de Agronomia. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica-RJ, 2010.

ANA. Agência Nacional das Águas (Brasil). **Panorama da qualidade das águas superficiais no Brasil: 2012/ Agência Nacional de águas**. Brasília, 2012.

ARAÚJO, A. C. S. P. A. **Contribuição para o Estudo da viabilidade/Sustentabilidade da Dessalinização enquanto Técnica de Tratamento de Água**. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Perfil Engenharia Sanitária, Faculdade de Ciências Tecnológicas, Universidade Nova De Lisboa, março de 2013.

**ATLAS Brasileiro da Energia Solar no Brasil**, (1998). Disponível em: [http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil\\_solar\\_atlas\\_R1.pdf](http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf), acesso em 26 set. 2015

BEZERRA, A.M. **Aplicações térmicas de energia solar**, Editora Universitária – UFPB, João Pessoa, 2001.

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

BRASIL, Instituto Nacional de Meteorologia - INMET – Disponível em: (<http://www.inmet.gov.br/portal/>); em 27 de outubro de 2016.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente – MMN. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>. Acesso em: 27 de abril 2015.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Nova delimitação do Semiárido brasileiro. Brasília, DF, 2005. 32 p. il. Disponível em: [http://www.mi.gov.br/c/document\\_library/get\\_file?uuid=0aa2b9b5-aa4d-4b55-a6e1-82faf0762763&groupId=24915](http://www.mi.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=0aa2b9b5-aa4d-4b55-a6e1-82faf0762763&groupId=24915). Acesso em: 30 de maio de 2016.

CAPPELLETTI, G.M. **An experiment with a plastic solar still.** *Desalination*, v.142, Foggia, Italy, 2002.

CARVALHO, P. C. M.; PONTES, R. T.; OLIVEIRA JR, D. S. **Estudo estatístico de radiação solar visando o projeto de unidades de dessalinização acionadas por painéis fotovoltaicos sem baterias.** In Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural, Campinas/SP. 2004.

CAVALCANTI, Clóvis. **A seca do Nordeste brasileiro: uma visão de estudos e pesquisas elaborados em um século de produção de conhecimento.** Revista Econômica do Nordeste, Fortaleza, v.19, n.,1, p. 97-126, jan./mar. 1988.

CLAYTON, R. (2006). ***Desalination for Water Supply*** FR/R0013 (35p), Review of Current Knowledge, Foundation for Water Research, U.K, Feb. 2006.

CONAMA RESOLUÇÃO. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Nº 357, de 17 de março de 2005, disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>: Acesso em junho de 2015.

COOLEY, H., Gleick, P. H., e Wolff, G. ***Desalination, With a Grain of Salt – A California Perspective.*** Novembro de 2012.

COLLE, Sérgio; PEREIRA, Ênio Bueno. **Atlas de radiação solar do Brasil:** In fontes não convencionais de energia: as tecnologias solar, eólica e de biomassa/ organização e edição: Organização Alexandre Albuquerque Montenegro.-3.ed.rev.modificada e ampliada-Florianópolis: 2000. 208p.

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

CRISTOFARI, C. Et al., **Modeling and performance of a copolymer solar water heating collector,** *Solar Energy*, v. 72: (2), p. 99-112, 2002.

CRUZ, Carolina Eneida Monteiro da. **Dessalinização da água do mar através da energia solar: caso de estudo: Salamansa - Cabo Verde:** Universidade do Algarve, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Faro, 2012.

DELYANNIS, E.; BELESSIOTIS, V. **Solar application in desalination:** the Greek Islands experiment. *Desalination*, v.100, p. 27-34, 1996

DUFFIE J.A.; BECKMAN W. A. **Solar energy thermal processes.** Wiley Interscience Publication, New York., 1991. 386p.

EVERETT D. HOWE. ***Desalination* (1986) 307—320 Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam - Printed in The Netherlands** Chapter 2.4 Measurements And Control In Solar Distillation Plants, **1971.**

FORMOSO, Silvia Curpetino. **Sistema de tratamento de água salobra: alternativa de combate a escassez hídrica no semiárido Sergipano**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão – SE, 2010.

GAMEIRO, Bruno Miguel Leitão. **Análise do rendimento de um destilador solar integrado numa estufa**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro. Departamento de Ambiente, 2010.

GUERREIRO, M. B. **Dessalinização para Produção de Água Potável - Perspectivas para Portugal**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009.

GONZAGA, F. A. S. **Uma metodologia para determinação da vazão de exploração do sistema aquífero cristalino no Cariri Paraibano**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, maio de 2011.

GREENPRO PROJECTO, **Energia Solar Térmica. Manual sobre tecnologias, projecto e instalação**. 2004. Disponível em: <http://www.marioloureiro.net/tecnica/energSolar/guia-tecnico-manual-solartermico.pdf>. Acesso em 04 de maio de 2015.

HANSON, A. et al. **Distillate water quality of a single-basin solar still: laboratory and field studies**. Solar Energy v.76, p.635-645, 2004.

HILLS, D. M.; SADAVA, D. E.; BERENBAUM, M. **Life: The Science of Biology**. SundeHemus, MA: Sinauer Associates, 2013.

HOWE, E.D., Tleimat, B.W. **Fundamentals of water desalination**. Sayigh, A.A.M. (Ed), Solar Energy Engineering. Academic Press, p.431-464, 1977.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. Estimativas Populacionais Para os Municípios Brasileiros. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2013/>>. Acesso em 15 de junho de 2016.

Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em 2015 e 2016.

INCROPERA, F; DEWITT, D. **Transferência de Calor e Massa**. Quinta Edição. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, 2003. 698 p.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S., **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**, Rio de Janeiro, 6ª edição, LTC, 2008.

ISMAIL, K. A. R. **Técnicas experimentais em fenômenos de transferência**. Campinas – São Paulo: Ed. do Autor, 2000. 488p.

JORGE, B. M. J. **Simulação de processos de destilação solar de água salgada**. Dissertação, Engenharia Mecânica, INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO, Universidade Técnica de Lisboa, outubro de 2011.

LEVY, J. Q. (2008). *Novas Fontes de Abastecimento - Reutilização e Dessalinização* (1ª ed.). Disponível em: Ecoserviços  
<http://www.ecoservicos.pt/artgcientif.htm#.VVtxEEYYMi0>

LOPES, J. T. **Dimensionamento e Análise Térmica de um Dessalinizador Solar Híbrido**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Departamento de Mecânica, Campinas, SP, 2004.

LOPO, A. B. **Desempenho de um sistema de aquecimento por coletor solar construído com material alternativo**. Dissertação, Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Brasil, 2010.

KOBIYAMA, M., CHECCHIA, T., SILVA, R. **Tecnologias Alternativas para Aproveitamento de Águas** (115 páginas). Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Brasil, 2004.

KRUSCHE, R. S. A. **Estudo sobre a dessalinização de águas salobras utilizando a energia solar**// Monografia de Graduação. Universidade Federal de Uberlândia – MG 2008.

KUMAR, K. V. e BAI, R. K. **Performance study on solar still with enhanced condensation**. *Desalination* 230. 2008.

MALIK, M., TIWARI, M.S.G.N., KUMAR, A., SODHA, M.S. **Solar Distillation: a practical study of a wide range of stills and their optimum design, construction and performance**. Pergamon Press, Oxford, 1982.

MALUF, A. P. **Destiladores solares no Brasil**. Monografia do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras do curso de Pós-Graduação *Lato Sensu* em Fontes Alternativas de Energia. UFLA, Minas Gerais, 2005.

MARENCO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI**. Brasília, DF: MMA, 2006. 202 p. il. (Biodiversidade, 26).

MARTINS, F. R. PERREIRA, Ê. B, MARIZA, P. S. **Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com emprego de satélite geoestacionário – O Projeto Swera**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 26, n. 2 p. 145 – 159, 2004.

MATTOSO, S. Q. **Aplicações da energia solar para dessalinização**. Revista Intertox de Toxicologia, Risco Ambiental e Sociedade, vol.2, nº2, jun., 2009.

MEIO AMBIENTE ÁGUA. **Qual a porcentagem de água existente no planeta?** Disponível em <<http://meioambienteagua.pbworks.com/w/page/20725600/Porcentagem>>. Acesso em 10/10/2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME, SECRETARIA DE GEOLOGIA, Relatório Técnico 015 “**Análise das Informações Sobre Recursos Hídricos Subterrâneos**

no País” Mineração e Transformação Mineral-SGM. Consultor ALBERT MENTE, junho de 2009.

O CICLO DA ÁGUA. **Uma estimativa da distribuição global da água.** Disponível em: <http://water.usgs.gov/edu/watercycleportuguese.html#global>. Acesso em 01 novembro2016.

MONTORO, F. **A água é a riqueza mais importante.** Qualidade e Gestão da água. ILAN - Julho/1993.

MORISHITA, C.; SORGATO, M. J.; VERSAGE, R.; TRIANA, M. A.; MARINOSKI, D. L.; LAMBERTS, R. **Catálogo de propriedades térmicas de paredes e coberturas. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações.** Florianópolis, 2011. Disponível em < <http://labeee.ufsc.br/> > acesso em 10/03/2016.

MORRISON, J., MORIKAWA, M., MURPHY, M., & SCHULTE, P. **Water Scarcity & Climate Change: Growing Risks for Businesses & Investors.** Ceres, Pacific Institute, 2009.

PEREIRA, ANDRÉ BELMONT et al. **Estimativa da radiação solar global diária em função do potencial de energia solar na superfície do solo.** Scientia agrícola, v.59, n.2, p.211-216, abr/jun. 2002.

PEREIRA, P.T.S. **Energia Solar Térmica: Perspectivas do Presente e do Futuro.** Dissertação realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores (115 páginas). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Janeiro de 2010.

PEREIRA, R.G. et al. **Desenvolvimento de um coletor solar alternativo utilizando materiais reaproveitáveis.** Mundo & Vida, v.2, n.1, 57-60. 2000.

RIVERA, D.A.L. **Projeto de Construção e Análise de Desempenho de um Coletor Solar Alternativo a Baixo Custo,** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 1994. 127f.

RODRIGUES, A. P. **Estudo experimental de um dessalinizador térmico com aquecimento controlado.** Centro de Tecnologia, UFCE, Ceará, 2011.

SAGIE D., FEINERMAN E. AND AHARONI E. **Potential Of Solar Desalination In Israel And In Its Close Vicinity.** Desalination, 139, (1-3), 2001, 21-33p.

SEMIAT, R. **Desalination: Present and Future.** *Water International*, vol. 25, nº 1, 2000.

SEN, Z. **Solar energy in progress and future research trends.** In: Progress in energy and combustion science 30. p.367-415, 2004.

SILVA JUNIOR, L. G. A. GHEYI, H. R. MEDEIROS, J. F. de. **Composição Química de Águas do Cristalino do Nordeste Brasileiro**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Online), v. 03, p. 11-17, 1999.

SILVA, M. C. C.. **Estudos Sobre Sistemas de Destilação Solar Direta Para Potabilização de Água**. Tese (doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Florianópolis, SC. 2014, 343 p.

SEMIAT, R. “**Desalination: present and future**”. International water resources association – Water international, 25: 54-65. (2000).

SOARES, C. **Tratamento de Água Unifamiliar Através da Destilação Solar Natural Utilizando Água Salgada, Salobra e Doce Contaminada**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

SOMMER, B.; MARIÑO, A.; SOLARTE, Y.; SALAS, M.L.; DIEROLF, C.; VALIENTE, C.; MORA, D.; RECHSTEINER, R.; SETTERS, P.; WIROJANAGUD, W.; AJARMEH, H.; AL-HASSAN, A.; WEGELIN, M. **SODIS - an emerging water treatment process**. *Aqua*, v.46, n.3, p.127-137. 1997.

SOUZA, L. F. **Análise Térmica de um dessalinizador de múltiplo efeito para obtenção de água potável**// Dissertação de Mestrado, Centro de Tecnologia, UFPB, João Pessoa, 2002.

SOUZA, L.G.M., Gomes, U.U. **Viabilidades térmica, econômica e de materiais da utilização de tubos de PVC como elementos absorvedores em coletores de um sistema de aquecimento de água por energia solar**, Tese de Doutorado do Programa de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais, UFRN, 2002.

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

SOUSA, M. A. S. B. **Estudo da viabilidade da destilação solar para polimento de águas produzidas de petróleo**. – Natal, 2010.

SUNEJA, S.; TIWAR, G. N. **Effect of water low on internal heat transfer solar distillation**. *Energy Conversion e Management*, v. 40. India , 1999.

TIWARI, A. K., & TIWARI, G. N. **Thermal Modeling Based on Solar Fraction and Experimental Study of the Annual and Seasonal Performance of a Single Slope Passive Solar Still: The Effect of Water Depths**. *Desalination*, 207, 184-204. (2007).

TIWARI, G. N., DIMRI, V, & CHEL, A. **Parametric Study of an Active and Passive Solar Distillation System: Energy and Exergy Analysis**. *Desalination*, 242, 1-18. 2009.

TUCCI, C.E.M. **Variabilidade e mudanças de clima no semiárido**. *Clima e Recursos Hídricos*. Editores. C. Tucci e B. Braga. Coleção ABRH Vol. 9, Porto Alegre, RS, 2003.



VERÍSSIMO, L.S. & FEITOSA, F.A.C. **Aspectos qualitativos das águas subterrâneas da região de Irauçuba, norte do Estado do Ceará.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 12. Florianópolis, 2002. Florianópolis: ABAS, 2002. CD-ROM.

APÊNDICE A1 - Medição diária, temperatura, velocidade do vento e radiação  
(02/10/2016)

Hora	Temperatura do vidro da câmara (°C)	Temperatura do interior da câmara (°C)	Temperatura do interior coletor (°C)	Temperatura ambiente INMET (°C)	Velocidade do vento (m/s)	Radiação (Wh/m <sup>2</sup> )
0:00	21,60	24,48	32,64	25,60	2,2	-0,98
1:00	20,64	24,00	30,72	25,60	2,4	-0,95
2:00	20,16	23,04	28,80	25,40	2,7	-0,98
3:00	20,64	22,56	27,36	25,50	2,2	-0,98
4:00	20,16	22,08	26,40	25,20	2,8	-0,94
5:00	21,60	22,56	25,92	25,00	2,9	-0,75
6:00	22,08	24,00	26,40	25,00	2,8	37,61
7:00	26,40	34,56	31,68	25,30	2,9	134,56
8:00	34,08	46,56	43,20	24,10	3,5	484,44
9:00	38,88	51,36	53,28	25,10	2,8	644,72
10:00	45,60	59,04	64,80	26,90	3,2	902,78
11:00	51,36	61,44	74,40	28,00	4	1001,11
12:00	53,28	67,20	79,20	28,10	4,1	1005,83
13:00	53,28	68,64	79,68	29,90	4,3	863,06
14:00	50,40	66,24	76,80	29,70	4,3	536,67
15:00	48,48	62,40	74,88	29,60	4,5	517,78
16:00	35,52	48,48	63,36	29,40	4,5	276,17
17:00	30,72	40,32	55,20	28,30	4,6	57,11
18:00	27,84	35,52	49,92	28,10	4	1,36
19:00	24,96	31,68	45,12	27,00	3,6	-0,98
20:00	24,00	29,28	41,76	26,10	3,6	-0,98
21:00	24,48	27,84	39,36	25,90	3,9	-0,98
22:00	22,56	25,92	36,48	25,70	4	-0,98
23:00	21,60	24,48	34,08	25,50	3,3	-0,98
0:00	20,64	24,00	32,16	25,70	3,7	-0,98
<b>Média</b>	<b>30,04</b>	<b>37,22</b>	<b>45,14</b>	<b>25,60</b>	<b>3,34</b>	<b>248,14</b>

APÊNDICE A2 - Medição diária, temperatura, velocidade do vento e radiação  
(03/10/2016)

Hora	Temperatura do vidro da câmara (°C)	Temperatura do interior da câmara (°C)	Temperatura do interior coletor (°C)	Temperatura ambiente INMET (°C)	Velocidade do vento m/s	Radiação (Wh/m <sup>2</sup> )
0:00	20,64	24,00	32,16	25,70	3,7	-0,98
1:00	19,68	23,04	30,72	25,30	2,8	-0,98
2:00	19,20	22,08	28,80	25,20	2,7	-0,98
3:00	20,16	22,08	27,84	25,10	3,2	-0,98
4:00	21,60	22,56	27,36	24,90	2,8	-0,89
5:00	21,12	22,08	26,40	24,80	2,5	-0,96
6:00	22,56	24,00	26,88	24,60	3,3	24,25
7:00	26,88	31,68	31,20	25,10	2,7	178,64
8:00	32,16	41,76	40,80	24,90	2,7	380,28
9:00	35,04	45,12	48,00	25,70	3	641,39
10:00	46,08	58,08	65,28	26,60	3,5	867,78
11:00	50,40	60,00	64,48	28,30	3,4	991,39
12:00	54,24	67,20	79,20	29,10	4,2	1013,33
13:00	54,72	70,08	82,08	29,10	3,6	951,67
14:00	54,72	69,60	82,08	30,00	4	814,17
15:00	48,96	64,32	76,80	29,80	4,4	613,06
16:00	36,48	49,44	65,76	29,80	4,3	301,94
17:00	30,72	40,80	55,68	29,10	4,4	45,11
18:00	27,36	35,52	49,92	28,00	4	0,51
19:00	25,44	32,16	45,60	27,10	3,7	-0,98
20:00	24,00	29,28	42,72	26,00	3	-0,98
21:00	23,04	27,84	39,84	25,60	2,3	-0,98
22:00	22,56	26,40	36,96	25,50	2,8	-0,98
23:00	21,60	24,96	34,56	25,40	2,8	-0,98
0:00	21,60	24,48	33,12	25,40	2,7	-0,98
<b>Média</b>	<b>32,54</b>	<b>39,94</b>	<b>48,93</b>	<b>27,75</b>	<b>3,44</b>	<b>283,83</b>

APÊNDICE A3 - Medição diária, temperatura, velocidade do vento e radiação  
(04/10/2016).

Hora	Temperatura do vidro da câmara (°C)	Temperatura do interior da câmara (°C)	Temperatura do interior coletor (°C)	Temperatura ambiente INMET (°C)	Velocidade do vento (m/s)	Radiação (Wh/m <sup>2</sup> )
0:00	21,60	24,00	30,72	25,40	2,7	-0,96
1:00	21,60	24,00	30,72	25,30	2,8	-0,98
2:00	22,08	23,52	29,76	25,30	2,6	-0,98
3:00	20,64	23,04	28,32	25,10	2,9	-0,98
4:00	21,12	22,56	27,36	25,00	2,3	-0,93
5:00	20,64	22,56	26,88	25,00	2,3	-0,77
6:00	22,56	24,48	27,84	24,90	2,5	36,97
7:00	25,92	31,20	32,64	25,20	3,4	163,11
8:00	31,20	37,44	39,36	24,90	2,7	351,39
9:00	36,96	47,04	51,84	26,20	2,5	556,67
10:00	45,12	56,64	62,88	27,50	3,2	831,67
11:00	49,44	60,96	73,28	27,60	3	898,33
12:00	46,08	59,52	83,04	29,00	3,8	767,50
13:00	43,68	57,12	73,84	29,30	3,3	643,61
14:00	43,20	55,68	64,80	29,90	2,7	695,28
15:00	44,16	56,64	66,72	29,50	3,2	541,67
16:00	34,56	45,60	57,12	28,90	3,8	237,86
17:00	30,24	38,88	49,92	28,60	3,2	55,56
18:00	27,36	34,56	45,12	28,30	3,4	1,45
19:00	25,44	31,20	41,76	27,10	2,7	-0,98
20:00	24,96	29,28	39,36	26,10	2,4	-0,98
21:00	23,52	27,36	36,96	25,40	2,6	-0,98
22:00	23,04	25,92	34,56	25,40	2,4	-0,98
23:00	22,08	25,44	32,64	25,40	2,5	-0,98
0:00	22,08	24,48	31,20	25,60	2,3	-0,98
<b>Média</b>	<b>29,97</b>	<b>36,36</b>	<b>44,75</b>	<b>26,64</b>	<b>2,85</b>	<b>230,78</b>

APÊNDICE A4 - Medição diária, temperatura, velocidade do vento e radiação  
(05/10/2016).

Hora	Temperatura do vidro da câmara (°C)	Temperatura do interior da câmara (°C)	Temperatura do interior coletor (°C)	Temperatura ambiente INMET (°C)	Velocidade do vento (m/s)	Radiação (Wh/m <sup>2</sup> )
0:00	22,08	24,48	31,20	25,60	2,5	-0,98
1:00	21,60	23,52	29,76	25,30	2,6	-0,94
2:00	21,12	23,52	28,80	25,40	2,6	-0,95
3:00	20,64	22,56	27,36	25,40	2,6	-0,98
4:00	20,64	22,56	26,40	25,50	2,6	-0,98
5:00	20,64	22,08	25,92	25,10	2,4	-0,69
6:00	22,08	24,00	26,88	25,10	2	63,06
7:00	28,32	37,92	35,04	24,90	1,6	142,11
8:00	27,36	33,12	36,00	24,30	1,7	469,44
9:00	34,08	42,24	43,68	25,90	1,9	656,94
10:00	40,80	50,88	54,24	27,10	2,7	885,56
11:00	42,72	54,72	61,92	29,00	2,2	1006,39
12:00	54,24	63,36	75,36	28,70	2,9	1024,44
13:00	49,44	62,88	70,08	29,80	2,8	920,28
14:00	52,32	65,76	83,50	29,80	2,8	763,89
15:00	48,00	60,48	92,16	29,70	3	545,28
16:00	35,52	46,56	59,04	29,20	3	330,00
17:00	29,28	38,88	51,36	29,10	3	48,61
18:00	26,88	34,08	46,56	27,40	3,1	0,46
19:00	24,48	30,24	43,20	27,20	2,4	-0,98
20:00	23,04	28,32	39,84	26,10	2,2	-0,98
21:00	21,60	26,88	37,44	25,70	1,9	-0,98
22:00	20,16	24,48	35,04	25,40	1,8	-0,98
23:00	19,68	23,52	33,12	25,40	1,9	-0,98
0:00	19,68	22,56	31,20	25,20	1,5	-0,98
<b>Média</b>	<b>29,86</b>	<b>36,38</b>	<b>45,00</b>	<b>26,69</b>	<b>2,39</b>	<b>273,80</b>

APÊNDICE A5 - Medição diária, temperatura, velocidade do vento e radiação  
(06/10/2016).

Hora	Temperatura do vidro da câmara (°C)	Temperatura do interior da câmara (°C)	Temperatura do interior coletor (°C)	Temperatura ambiente INMET (°C)	Velocidade do vento (m/s)	Radiação (Wh/m <sup>2</sup> )
0:00	19,68	22,56	31,20	25,20	1,5	-0,98
1:00	19,20	22,08	29,76	24,90	1,4	-0,98
2:00	18,72	21,12	28,32	25,20	2	-0,98
3:00	18,24	20,64	26,88	25,20	2,1	-0,98
4:00	17,76	19,68	25,92	25,00	1,9	-0,98
5:00	17,76	19,68	24,48	24,50	1	-0,73
6:00	19,68	22,08	25,92	24,00	0,6	42,03
7:00	22,56	25,44	29,28	23,60	0,8	131,36
8:00	32,64	43,68	43,68	23,50	0,9	541,11
9:00	40,80	50,40	54,72	25,90	1,6	703,89
10:00	43,68	54,24	60,00	26,80	1,6	748,06
11:00	47,52	56,16	66,72	29,00	1,6	966,94
12:00	44,16	56,64	63,84	29,60	2,2	954,44
13:00	43,68	56,16	65,76	28,10	2,3	848,33
14:00	45,60	58,08	69,12	29,50	2,7	706,11
15:00	43,68	54,72	64,80	29,00	3,2	556,39
16:00	34,08	44,16	55,68	29,50	3,1	195,58
17:00	29,28	37,92	49,44	29,00	3,6	50,28
18:00	26,88	33,60	45,12	29,30	2,5	0,27
19:00	25,44	30,72	41,76	27,50	2,6	-0,98
20:00	24,00	28,80	38,88	26,50	2,3	-0,98
21:00	23,52	27,36	36,96	26,10	2,8	-0,98
22:00	22,56	25,92	34,56	25,80	2,1	-0,98
23:00	22,08	24,96	32,64	25,80	2,3	-0,98
0:00	21,60	24,00	31,20	25,80	2,4	-0,98
<b>Média</b>	<b>28,99</b>	<b>35,23</b>	<b>43,07</b>	<b>26,57</b>	<b>2,04</b>	<b>257,33</b>

APÊNDICE A6 - Medição diária, temperatura, velocidade do vento e radiação  
(07/10/2016).

Hora	Temperatura do vidro da câmara (°C)	Temperatura do interior da câmara (°C)	Temperatura do interior coletor (°C)	Temperatura ambiente INMET (°C)	Velocidade do vento (m/s)	Radiação (Wh/m <sup>2</sup> )
0:00	21,60	24,00	31,20	25,80	2,4	-0,98
1:00	22,08	24,00	30,24	25,60	2,5	-0,98
2:00	20,64	23,04	28,32	25,50	2,3	-0,98
3:00	21,12	22,56	27,36	25,40	2,2	-0,94
4:00	21,12	22,56	26,88	25,40	2,5	-0,84
5:00	20,16	21,60	25,92	25,20	2,3	-0,82
6:00	20,16	24,48	25,92	25,50	2	47,33
7:00	25,44	33,60	33,12	24,90	1,4	138,53
8:00	33,12	42,72	44,16	24,80	1,4	388,33
9:00	40,80	52,80	54,24	26,30	2	697,50
10:00	46,56	58,56	67,20	27,90	2,2	903,33
11:00	51,84	60,96	74,88	28,20	2,6	1010,00
12:00	57,12	68,64	84,48	29,40	2,5	1021,94
13:00	57,12	73,44	87,36	30,40	2,4	960,28
14:00	56,16	71,52	83,52	30,00	2,2	819,72
15:00	52,32	66,24	78,24	30,40	2,6	567,22
16:00	39,36	52,80	63,84	30,00	2	310,56
17:00	33,60	43,68	54,24	29,70	2,7	45,81
18:00	28,80	36,96	48,00	29,00	1,9	0,58
19:00	25,44	32,64	43,68	28,10	1,4	-0,98
20:00	23,52	30,24	39,84	26,50	1,3	-0,98
21:00	22,08	27,84	36,48	26,20	1,6	-0,98
22:00	20,64	26,40	34,08	25,70	1,3	-0,98
23:00	22,08	25,44	32,64	24,80	1,2	-0,98
0:00	19,68	24,00	30,72	24,10	0,7	-0,98
<b>Média</b>	<b>32,10</b>	<b>39,63</b>	<b>47,46</b>	<b>26,99</b>	<b>1,98</b>	<b>275,99</b>

APÊNDICE A7 - Medição diária, temperatura, velocidade do vento e radiação  
(08/10/2016).

Hora	Temperatura do vidro da câmara (°C)	Temperatura do interior da câmara (°C)	Temperatura do interior coletor (°C)	Temperatura ambiente INMET (°C)	Velocidade do vento (m/s)	Radiação (Wh/m <sup>2</sup> )
0:00	19,68	24,00	30,72	24,10	0,7	-0,98
1:00	19,20	23,04	28,80	24,00	1,1	-0,81
2:00	19,20	22,56	27,84	24,80	1,2	-0,56
3:00	18,72	21,60	26,40	24,00	1,1	-0,98
4:00	18,24	21,12	25,44	24,60	1,3	-0,96
5:00	18,24	20,64	24,48	24,50	1,5	-0,84
6:00	20,64	23,52	26,40	24,70	1,7	33,69
7:00	24,48	35,04	34,56	24,60	1,8	141,44
8:00	29,76	35,04	36,48	24,40	1,5	493,33
9:00	36,48	44,64	50,40	26,00	1,7	719,17
10:00	41,76	52,80	59,04	27,10	2,5	832,78
11:00	48,48	56,16	69,60	29,00	3,1	886,67
12:00	53,76	62,88	77,76	29,30	3,2	1017,22
13:00	54,24	68,64	81,12	29,10	2,8	934,44
14:00	50,40	64,32	75,84	29,20	2,2	737,50
15:00	43,68	58,08	70,56	30,40	2,2	557,22
16:00	39,84	52,80	63,84	29,00	3,1	280,56
17:00	33,12	42,72	54,72	29,50	2,2	55,69
18:00	29,28	36,96	48,00	28,60	2,8	0,42
19:00	26,40	32,64	43,20	27,40	2,9	-0,98
20:00	24,48	30,24	39,84	26,70	2,1	-0,98
21:00	24,00	28,32	36,96	26,30	1,4	-0,85
22:00	22,56	26,40	34,56	26,30	1,6	-0,98
23:00	21,12	24,96	32,16	26,20	1,4	-0,98
0:00	21,12	24,00	30,72	26,10	1,7	-0,85
<b>Média</b>	<b>30,36</b>	<b>37,32</b>	<b>45,18</b>	<b>26,64</b>	<b>1,95</b>	<b>267,17</b>



APÊNDICE A8 - Medição diária, temperatura, velocidade do vento e radiação  
(09/10/2016).

Hora	Temperatura do vidro da câmara (°C)	Temperatura do interior da câmara (°C)	Temperatura do interior coletor (°C)	Temperatura ambiente INMET (°C)	Velocidade do vento (m/s)	Radiação (Wh/m <sup>2</sup> )
0:00	21,12	24,00	30,72	26,20	1,7	-0,98
1:00	20,64	23,04	29,28	26,10	1,4	-0,98
2:00	20,64	22,56	28,32	25,70	1,7	-0,98
3:00	20,16	22,08	26,88	25,70	1,6	-0,97
4:00	19,68	21,60	25,44	25,50	1,4	-0,96
5:00	19,20	20,64	24,48	25,40	1,3	-0,98
6:00	20,16	22,08	25,44	25,50	1,7	-0,92
7:00	21,12	23,52	26,40	25,20	1,7	36,81
8:00	26,88	34,08	35,04	25,20	1,9	193,11
9:00	31,20	37,44	39,36	25,30	2,2	508,61
10:00	40,32	52,32	57,60	25,90	2,5	687,50
11:00	42,24	53,76	61,44	27,40	2,6	823,06
12:00	47,04	57,60	71,52	28,10	2,2	840,00
13:00	51,36	62,40	75,84	28,40	2,8	988,06
14:00	52,80	66,72	79,68	28,50	3,1	906,11
15:00	52,32	66,24	77,76	29,40	2,9	820,56
16:00	50,40	63,84	73,92	29,90	3,4	568,89
17:00	38,40	51,84	60,48	29,70	3,1	315,28
18:00	32,64	43,68	51,36	29,80	3	56,31
19:00	29,28	38,40	45,60	28,90	2,5	1,01
20:00	26,40	34,08	41,28	27,80	2,4	-0,98
21:00	24,96	30,72	37,44	26,60	2,8	-0,98
22:00	24,00	29,28	35,04	25,90	2,5	-0,98
23:00	24,00	27,84	33,12	25,70	2,1	-0,98
0:00	23,52	26,40	32,16	25,50	2,5	-0,98
<b>Média</b>	<b>31,22</b>	<b>38,25</b>	<b>45,02</b>	<b>26,93</b>	<b>2,28</b>	<b>269,34</b>

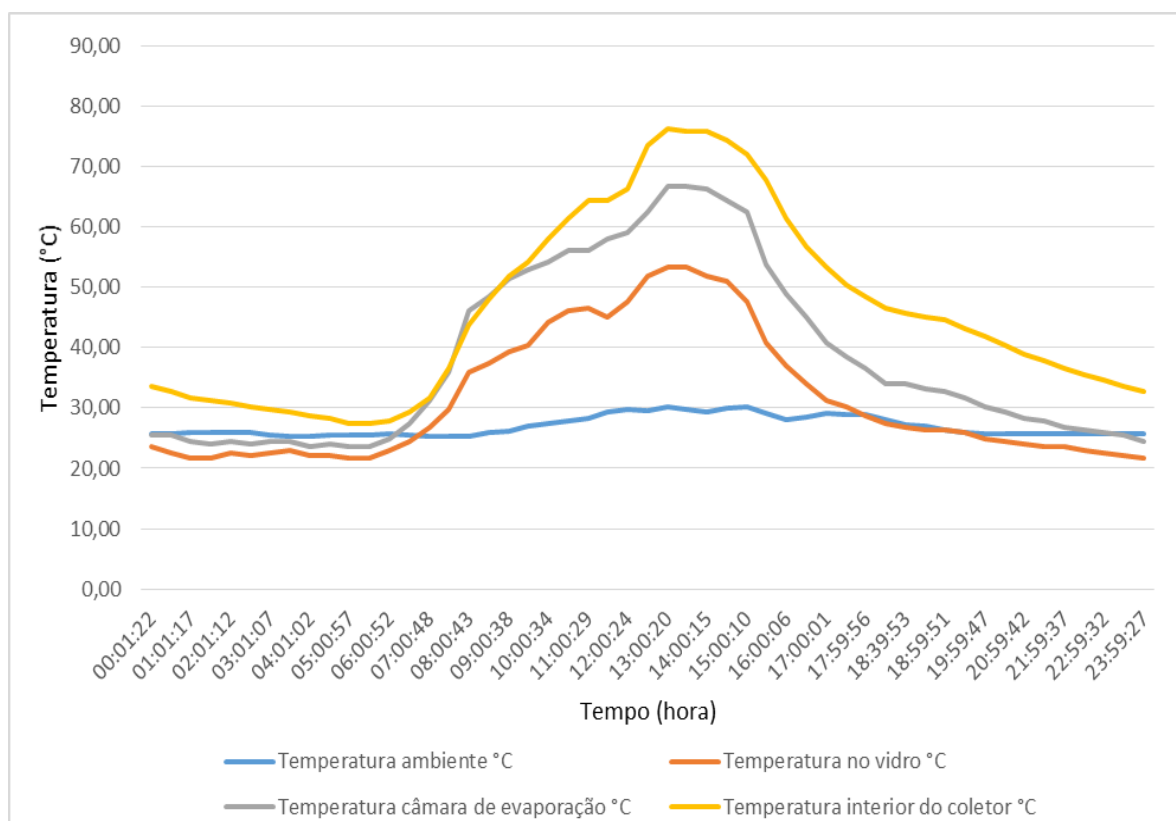
APÊNDICE A9 - Medição diária, temperatura, velocidade do vento e radiação  
(10/10/2016).

Hora	Temperatura do vidro da câmara (°C)	Temperatura do interior da câmara (°C)	Temperatura do interior coletor (°C)	Temperatura ambiente INMET (°C)	Velocidade do vento (m/s)	Radiação (Wh/m <sup>2</sup> )
0:00	22,08	25,44	29,76	26,20	2,5	-0,98
1:00	21,60	24,00	28,80	26,10	2,7	-0,98
2:00	20,16	23,52	26,40	25,70	2,6	-0,98
3:00	19,20	23,04	25,44	25,70	2,6	-0,98
4:00	21,12	22,56	25,44	25,50	2,3	-0,98
5:00	20,16	22,08	24,96	25,40	1,9	-0,96
6:00	21,12	24,48	25,44	25,50	2,5	-0,63
7:00	21,60	25,44	30,24	25,20	3,2	47,64
8:00	24,00	37,44	35,52	25,20	3,1	153,78
9:00	32,16	46,56	45,60	25,30	2,9	525,83
10:00	39,36	51,84	57,60	25,90	4	751,67
11:00	41,28	54,72	63,84	27,40	3,6	848,06
12:00	49,44	58,56	74,88	28,10	3,6	1002,78
13:00	52,32	64,32	80,64	28,40	4,2	998,61
14:00	50,88	64,80	77,28	28,50	4,2	821,67
15:00	50,88	64,80	76,32	29,40	4,5	660,28
16:00	49,44	62,88	73,44	29,90	4,2	569,72
17:00	37,44	48,96	59,04	29,70	4,3	300,28
18:00	33,12	42,24	50,88	29,80	4,1	50,67
19:00	32,64	39,84	46,56	28,90	3,3	0,49
20:00	26,88	33,60	39,84	27,80	3,1	-0,98
21:00	25,92	31,20	36,00	26,60	3,3	-0,98
22:00	24,48	29,28	33,60	25,90	3,5	-0,98
23:00	24,48	28,32	31,20	25,70	3,1	-0,98
0:00	23,52	26,40	29,28	25,50	3	-0,98
<b>Média</b>	<b>31,41</b>	<b>39,05</b>	<b>45,12</b>	<b>26,93</b>	<b>3,29</b>	<b>268,80</b>

APÊNDICE A10 - Médias de temperaturas, velocidade do vento, radiação solar e produção de água dessalinizada do período de 01 a 10/10/16

Dia	Temperatura do vidro da câmara (°C)	Temperatura do interior da câmara (°C)	Temperatura do interior coletor (°C)	Temperatura ambiente INMET (°C)	Velocidade do vento (m/s)	Radiação (Wh/m <sup>2</sup> )	Produção de água dessalinizada l/dia	Precipitação do dia (mm)
1/10	31,60	38,44	45,68	27,03	122,28	256,82	3,60	0
2/10	30,04	37,22	45,14	25,60	131,50	248,14	3,55	0,2
3/10	32,54	39,94	48,93	27,75	150,38	283,83	3,40	0
4/10	29,97	36,36	44,75	26,64	136,16	230,78	3,15	0
5/10	29,86	36,38	45,00	26,69	118,32	273,80	2,75	0,2
6/10	28,99	35,23	43,07	26,57	74,96	257,33	3,40	0
7/10	32,10	39,63	47,46	26,99	42,92	275,99	2,90	0
8/10	30,36	37,32	45,18	26,64	70,80	267,17	3,80	0
9/10	31,22	38,25	45,02	26,93	115,08	269,34	2,75	0
10/10	31,41	39,05	45,12	26,93	138,24	268,80	3,50	0,8
<b>Média</b>	<b>30,81</b>	<b>37,78</b>	<b>45,53</b>	<b>26,78</b>	<b>110,06</b>	<b>263,20</b>	<b>3,28</b>	<b>0,12</b>

APÊNDICE A11 - Comparativo entre as temperaturas, ambiente (INMET), da câmara de evaporação e condensação, do vidro da câmara e do interior do coletor em 01/10/16.



## ANEXOS

### Anexo 1 - Laudo dos resultados da análise da água bruta



**SCIENTEC - Associação para o Desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia**

Fone/Fax: (83)2167063 – CNPJ- 08.331.902/0001-12

Cidade Universitária – CEP 58.059-900 – João Pessoa - Paraíba

E-MAIL : [scientec.@ct.ufpb.br](mailto:scientec.@ct.ufpb.br) Caixa Postal 5125 Agência UFPB CEP 58051970

João Pessoa, 09 Setembro de 2016.

**Laudo Técnico nº 26/2016**

**Solicitante:** Flávio Luna

**Endereço:** Caldas Brandão – Fazenda Olho d'água

**Produto (s):** Água subterrânea

**Marca/Procedência:** Água subterrânea

**Data de Entrada:** 09/09/2016

**Nº de Amostra:** 01

**OBS:** Amostra coletada e trazida ao Laboratório de Saneamento pelo solicitante.

#### RESULTADOS

Parâmetros	Amostra	VMP - Valor Máximo Permitido
Salinidade (‰)	1,7	*
Condutividade Elétrica (µS/cm)	1595,0	*
Dureza Total (mg.L <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub> )	292,0	*/**

**VMP:** Valor Máximo Permitido segundo a Resolução N.º 396/2008 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA (Uso **Preponderante – Consumo Humano**).

(\*) Não é citado na Resolução N.º 396/2008 do CONAMA.

(\*\*) Segundo bibliografia específica: água mole (dureza inferior a 50,0 mg.L<sup>-1</sup> CaCO<sub>3</sub>)

**CONCLUSÃO:** De acordo com os parâmetros analisados e citados na Resolução N.º 396/2008 do CONAMA, a água apresenta-se fora dos limites estabelecidos para o uso preponderante - **Consumo Humano**.

  
 Prof. Dr. Carmen Lúcia A. Uacchi  
 Laboratório de Saneamento  
 Coordenadora

## Anexo 2 - Laudo dos resultados da análise da água dessalinizada



**SCIENTEC - Associação para o Desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia**

Fone/Fax: (83)2167063 – CNPJ- 08.331.902/0001-12

Cidade Universitária – CEP 58.059-900 – João Pessoa - Paraíba

E-MAIL : [scientec.ct.ufpb.br](mailto:scientec.ct.ufpb.br) Caixa Postal 5125 Agência UFPB CEP 58051970

João Pessoa, 03 outubro de 2016.

**Laudo Técnico nº 35/2016**

**Solicitante:** Flávio Luna

**Endereço:** Caldas Brandão – Fazenda Olho d'água

**Produto (s):** Água subterrânea

**Marca/Procedência:** Água subterrânea

**Data de Entrada:** 30/09/2016

**Nº de Amostra:** 01

**OBS:** Amostra coletada e trazida ao Laboratório de Saneamento pelo solicitante.

#### RESULTADOS

Parâmetros	Amostra	VMP - Valor Máximo Permitido
Salinidade (‰)	0,02	*
Condutividade Elétrica (µS/cm)	18,0	*
Dureza Total (mg.L <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub> )	10,0	*/**

**VMP:** Valor Máximo Permitido segundo a Resolução N.º 396/2008 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA (Uso Preponderante – Consumo Humano).

(\*) Não é citado na Resolução N.º 396/2008 do CONAMA.

(\*\*) Segundo bibliografia específica: água mole (dureza inferior a 50,0 mg.L<sup>-1</sup> CaCO<sub>3</sub>)

**CONCLUSÃO:** De acordo com os parâmetros analisados e citados na Resolução N.º 396/2008 do CONAMA, a água apresenta-se dentro dos limites estabelecidos para o uso preponderante - **Consumo Humano**.

  
 Prof. Dr. Carmem Lúcia M. Góes  
 Laboratório de Saneamento