



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DIEGO CAITANO DE PINHO**

**AVALIAÇÃO DE UM DESSALINIZADOR SOLAR COM RECUPERAÇÃO DE  
CALOR COM NOVO ARRANJO DO CIRCUITO DE AQUECIMENTO PARA  
OPERAÇÃO COM ÓLEO TÉRMICO**

**FORTALEZA**

**2017**

DIEGO CAITANO DE PINHO

AVALIAÇÃO DE UM DESSALINIZADOR SOLAR COM RECUPERAÇÃO DE CALOR  
COM NOVO ARRANJO DO CIRCUITO DE AQUECIMENTO PARA OPERAÇÃO COM  
ÓLEO TÉRMICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Orientadora: Profa. Maria Eugênia Vieira da Silva, *Ph.D.*

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- P723a Pinho, Diego Caitano de.  
Avaliação de um dessalinizador solar com recuperação de calor com novo arranjo do circuito de aquecimento para operação com óleo térmico / Diego Caitano de Pinho. – 2017.  
81 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2017.  
Orientação: Profa. Dra. Maria Eugênia Vieira da Silva.  
Coorientação: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha.
1. Dessalinização. 2. Dessalinização Solar Térmica. 3. Torre de Recuperação de Calor. I. Título.  
CDD 620.1
-

DIEGO CAITANO DE PINHO

AVALIAÇÃO DE UM DESSALINIZADOR SOLAR COM RECUPERAÇÃO DE CALOR COM NOVO ARRANJO DO CIRCUITO DE AQUECIMENTO PARA OPERAÇÃO COM ÓLEO TÉRMICO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Aprovada em 17/02/2017

BANCA EXAMINADORA

---

Prof.<sup>a</sup> Maria Eugênia Vieira da Silva, Ph. D. (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha (Coorientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Heloisa Beatriz Cordeiro Moreira  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

A Deus.

Aos meus pais, por tudo.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Francisco Clever Pinho e Josenice Pinheiro Caitano de Pinho, que sempre estiveram ao meu lado independente das minhas decisões, por sempre estarem me incentivando e pelo amor incondicional.

A minha irmã, Debora Caitano de Pinho, por todo carinho.

Ao meu sobrinho, Cauã Davi Pinho Lima, por todos os dias poder ver um sorriso sincero e inocente.

A minha namorada, Fernanda de Almeida Monteiro pela ajuda, paciência, compreensão, amor e por sempre estar ao meu lado, independente de tudo.

Aos familiares, pelo apoio.

Aos Professores Maria Eugênia Vieira da Silva e Paulo Alexandre Costa Rocha pela excelente orientação acadêmica, confiança e pelos ensinamentos que levarei por toda a minha vida.

Aos amigos de laboratório, principalmente ao Kaio Hemerson Dutra e Eliezer Batista da Costa Neto pela valiosa ajuda.

Aos colegas da turma de mestrado, por todas reflexões e pelos momentos de descontração.

Ao amigo Valdi Matos de Almeida Júnior, além do seu excelente profissionalismo, uma grande amizade que o mestrado me proporcionou.

À CAPES pelo apoio financeiro.

E a todas as pessoas, que de alguma forma fizeram parte desse trabalho.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.” (Charles Chaplin)

## RESUMO

Devido à crescente demanda por água potável, assim como o aumento dos níveis de poluição nos reservatórios naturais de água, os aperfeiçoamentos em sistema de dessalinização solar térmico com torre de recuperação de calor não é somente um desafio, mas também uma necessidade. O Sistema de dessalinização solar possui duas partes principais: uma unidade de aquecimento e uma unidade de dessalinização. O unidade de aquecimento tem três coletores solares planos, dois destes fabricados na Europa como parte de outro projeto, e o terceiro foi fabricado no laboratório. A unidade de dessalinização consiste de um tanque de armazenamento e sete estágios de dessalinização, cada um com sua respectiva bandeja. Entre outras modificações, a diferença principal entre o sistema e seus antecessores foi a utilização de um trocador de calor dentro do tanque de armazenamento. Portanto, a radiação solar absorvida pelos coletores foi transferida pelo trocador de calor (composto por uma tubulação de cobre) para a água armazenada no tanque, por condução e convecção forçada. Uma bomba de óleo era responsável pelo escoamento do óleo térmico no circuito fechado da unidade de aquecimento. Parte da água armazenada aquecida se evaporava, subindo, e condensando na superfície inferior da bandeja menos aquecida do primeiro estágio, aquecendo a água salobra desta bandeja. O objetivo da presente dissertação é avaliar o sistema de dessalinização solar com recuperação de calor, operando com as modificações apresentadas e um fluxo de óleo térmico sintético (*Dowtherm A*) como fluido de trabalho. Para caracterizar o desempenho do sistema térmico, a produção de água e a sua respectiva qualidade foi medida para duas diferentes condições de alimentação de água nas bandejas: alimentação contínua, alimentação intercalada. O sistema também foi testado com refletores planos fixados no coletor solar. Dois parâmetros importantes, a Razão de Ganho de Saída (GOR) e o Coeficiente de Desempenho (COP) foram também determinados. A melhor produção foi de 34 L por dia (198,1 mL/MJ) com uma condutividade elétrica média de 14,9  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (equivalente a 9,5513 ppm). Neste mesmo dia, o GOR e o COP foram de 0,44 e 4,41, respectivamente. O sistema está em condição de ser utilizado em comunidades onde existe um bom nível de radiação solar e recursos de água salgada.

**Palavras-chave:** Dessalinização. Dessalinização Solar Térmica. Torre de Recuperação de Calor.



## ABSTRACT

Due to the increasing demand for potable water, as well as the rising levels of pollution in natural water reservoirs, performance improvements in a solar thermal desalination system with heat recovery tower is not only a challenge, but also a necessity. The solar desalination system studied has two main units: a heating unit and a desalination unit. The heating unit has three flat solar collectors, two of these made in Europe as part of another project, and the third one was manufactured in the solar laboratory. The desalination unit consists of a one storage tank and seven desalination stages, each with its own tray. Among other modifications, the main difference between the present system and its predecessors was the use of a heat exchanger inside the storage tank. Thus, the solar radiation absorbed by the collectors was transferred in the heat exchanger (made of a copper pipes) to the water stored in the tank, mainly by conduction and forced convection. An oil pump was responsible for the flow of the thermal oil through the closed circuit of the heating unit. Part of the heated water stored in the tank evaporated, rose, and condensed on the lower surface of the less heated tray of the first stage above, heating the brackish water in this tray. The present dissertation evaluated the solar desalination system with heat recovery, operating with the modifications presented and a synthetic thermal oil flow (Dowtherm A) as the working fluid. To characterize the performance of the thermal desalination system, the water production and its quality were measured for two different water supply conditions to the tower: continuous feed and intermittent feed. The system was also tested with flat plate reflectors fixed on the solar collector. Two important parameters, the Output Gain Ratio (GOR) and the Performance Coefficient (COP) were determined. The best desalinate water (almost pure) production was 34 L per day (198.1 mL / MJ) with an average electrical conductivity of 14.9  $\mu\text{S} / \text{cm}$  (equivalent to 9.5513 ppm). On this day, the GOR and COP were 0.44 and 4.41, respectively. The system is in conditions to be tested in communities where there is a good level of solar radiation and saltwater resources.

**Keywords:** Desalination. Solar Thermal Desalinations. Heat Recovery tower.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Distribuição dos recursos hídricos mundiais.....	16
Figura 2	Capacidades instaladas de dessalinização.....	17
Figura 3	Princípio de funcionamento MSF.....	30
Figura 4	Princípio de funcionamento MED.....	31
Figura 5	Princípio de funcionamento de dessalinização por congelamento.....	32
Figura 6	Princípio de funcionamento DS.....	33
Figura 7	Esquema de um dessalinizador solar térmico com recuperação de calor.	34
Figura 8	Dessalinizador solar térmico com recuperação de calor.....	35
Figura 9	Tanque de armazenamento.....	38
Figura 10	Perfil de polietileno.....	39
Figura 11	Bandeja em W.....	40
Figura 12	Trocador de calor.....	41
Figura 13	Bomba de deslocamento positivo acoplada ao sistema.....	42
Figura 14	Tanque de expansão.....	43
Figura 15	Circuito de óleo térmico.....	43
Figura 16	Coletores do mesmo fabricante.....	44
Figura 17	Coletor fabricado no LESGN.....	46
Figura 18	Torre de dessalinização.....	46
Figura 19	Trocador de calor instalado no tanque de armazenamento.....	47
Figura 20	O protótipo.....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Características dos testes de produção.....	50
Tabela 2	Temperatura máxima e suas diferenças nos estágios e tanque no teste 3...	55
Tabela 3	Temperatura máxima e suas diferenças nos estágios e tanque no teste 4...	57
Tabela 4	Temperatura máxima e suas diferenças nos estágios e tanque no teste 5...	58
Tabela 5	Temperatura máxima e suas diferenças nos estágios e tanque no teste 6...	59
Tabela 6	Temperatura máxima e suas diferenças nos estágios e tanque no teste 7...	61
Tabela 7	Temperatura máxima e suas diferenças nos estágios e tanque no teste 8...	63
Tabela 8	Parâmetros de desempenho dos testes 7 e 8.....	64
Tabela 9	Temperatura máxima e suas diferenças nos estágios e tanque no teste 9...	65
Tabela 10	Parâmetros de desempenho dos testes 7 e 9.....	66

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Temperatura e radiação para o primeiro dia de teste 1.....	52
Gráfico 2	Temperatura e radiação para o primeiro dia de teste 2.....	53
Gráfico 3	Temperatura e radiação para o primeiro dia de teste 3.....	54
Gráfico 4	Temperatura e radiação para o primeiro dia de teste 4.....	55
Gráfico 5	Temperatura e radiação para o quarto dia de teste 5.....	57
Gráfico 6	Temperatura e radiação para o quinto dia de teste 6.....	59
Gráfico 7	Temperatura e radiação para o terceiro dia de teste 7.....	60
Gráfico 8	Taxa de produção (mL/MJ).....	61
Gráfico 9	COP e GOR para os testes 1 ao 7.....	62
Gráfico 10	Temperatura e radiação para o segundo dia de teste 8.....	63
Gráfico 11	Temperatura e radiação para o segundo dia de teste 9.....	65
Gráfico 12	Condutividade elétrica da água dessalinizada dos testes 1 ao 7.....	67

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI:	<i>American Iron and Steel Institute</i> (Instituto Americano de Ferro e Aço)
COP:	<i>Coefficient of Performance</i> (Coeficiente de Desempenho)
GOR:	<i>Gain Output Ratio</i> (Relação de Ganho de Saída)
LESGN:	Laboratório de Energia Solar e Gás Natural
MED:	<i>Multieffect Distillation</i> (Destilação de Multi – Efeitos)
MSF:	<i>Multistage Distillation Flash</i> (Destilação <i>Flash</i> de Multi – Estágios)
RO:	<i>Reverse Osmosis</i> (Osmose reversa)
SED:	Simple Effect Distillation (Destilação de Simples Efeito)
ONU:	Organização das Nações Unidas

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Área [m <sup>2</sup> ]
$E$	Energia [W]
$h$	Calor latente [W/kg °C]
$m$	Massa [kg]
$t$	Tempo [s]

## SUBSCRITOS

$col$	Coletor
$fg$	Líquido – vapor
$T$	Temperatura
$n$	Número de estágios

## GREGOS

$\Delta$	Diferença
----------	-----------

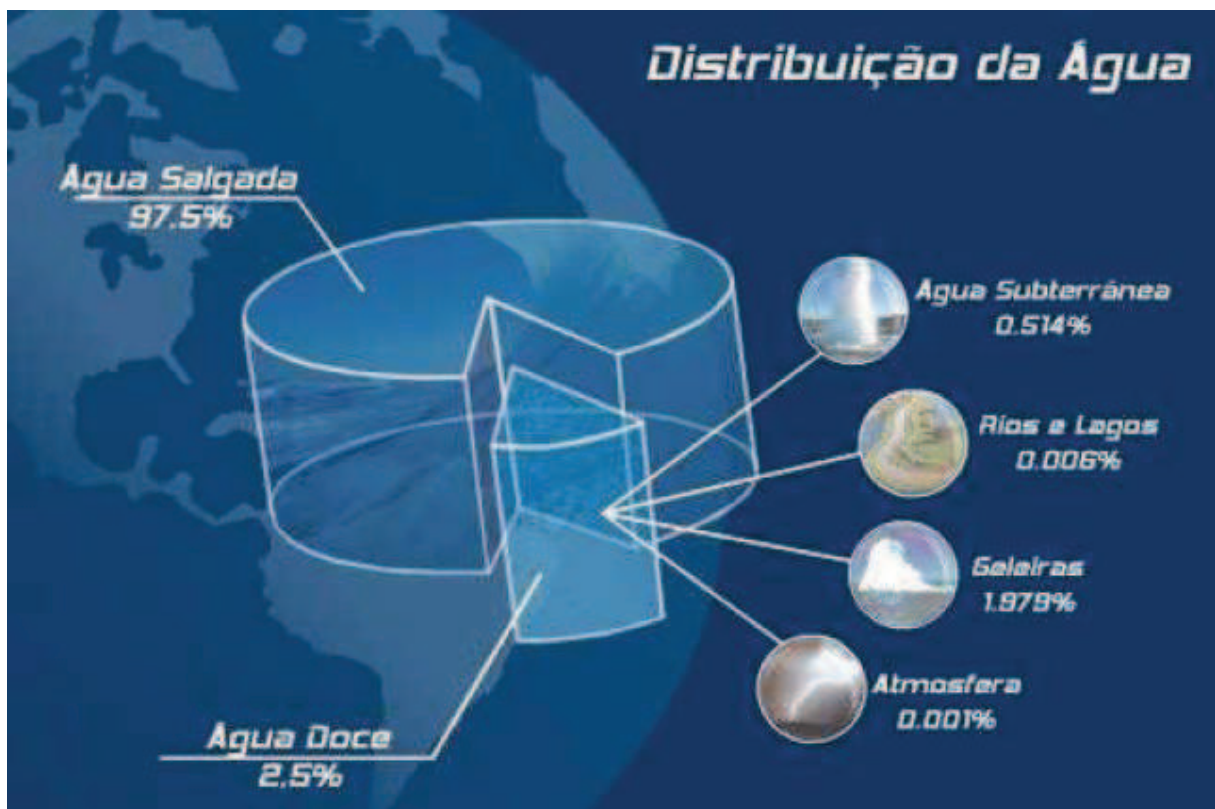
## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
2	<b>OBJETIVOS</b> .....	19
2.1	<b>Geral</b> .....	19
2.2	<b>Específicos</b> .....	19
3	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	20
4	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	28
4.1	<b>Principais tipos de tecnologias de dessalinização</b> .....	28
4.1.1	<i>Processo por membrana</i> .....	28
4.1.2	<i>Processos térmicos</i> .....	28
4.1.2.1	<i>Destilação rápida de múltiplo estágios (MSF)</i> .....	29
4.1.2.2	<i>Destilação de múltiplo efeito (MED)</i> .....	30
4.1.2.3	<i>Congelamento (Freezing)</i> .....	31
4.1.2.4	<i>Destilação solar térmica</i> .....	32
4.2	<b>Dessalinizador solar térmico com recuperação de calor</b> .....	33
4.3	<b>Parâmetros de desempenho de um dessalinizador</b> .....	35
5	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	37
5.1	<b>Componentes principais da torre de dessalinização</b> .....	37
5.2	<b>Modificações realizadas para operação com óleo térmico</b> .....	40
5.2.1	<i>Torre de dessalinização</i> .....	40
5.2.2	<i>Unidade de captação de energia solar</i> .....	41
5.3	<b>O protótipo final</b> .....	44
5.3.1	<i>Unidade de aquecimento</i> .....	44
5.3.2	<i>Unidade de dessalinização</i> .....	46
5.4	<b>Medições Experimentais</b> .....	48
5.5	<b>Procedimentos de testes</b> .....	49
6	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	51
6.1	<b>Resultados – Testes de produção</b> .....	51
6.1.1	<i>Teste 1 – Um Estágio de Produção</i> .....	51
6.1.2	<i>Teste 2 – Dois Estágios de Produção</i> .....	53
6.1.3	<i>Teste 3 – Três Estágios de Produção</i> .....	54
6.1.4	<i>Teste 4 – Quatro Estágios de Produção</i> .....	55
6.1.5	<i>Teste 5 – Cinco Estágios de Produção</i> .....	57
6.1.6	<i>Teste 6 – Seis Estágios de Produção</i> .....	58
6.1.7	<i>Teste 7 – Sete Estágios de Produção</i> .....	60
6.1.8	<i>Avaliação de Desempenho da Torre</i> .....	61
6.1.9	<i>Teste 8 – Abastecimento Contínuo</i> .....	62
6.1.0	<i>Teste 9 – Uso de um Refletor Plano</i> .....	64
6.2	<b>Análise da condutividade elétrica</b> .....	66
7	<b>CONCLUSÃO</b> .....	68
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	69
	<b>ANEXO A - CARACTERÍSTICAS DO ÓLEO TÉRMICO</b> ....	74
	<b>ANEXO B – COLETORES SOLARES PLANOS</b> .....	75
	<b>ANEXO C – RADIAÇÃO SOLAR</b> .....	77
	<b>ANEXO D – APARELHOS DE MEDIÇÃO</b> .....	80

## 1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural de valor econômico e de fundamental importância para a existência dos seres vivos; contudo, sua disponibilidade é limitada. Como mostra a Figura 1, 97,5% do volume total de água da Terra formam os oceanos, sendo impróprias para o consumo humano, enquanto que apenas 2,5% são de água doce. Dos 2,5% de água doce, cerca de 68,9% constituem as calotas polares e as geleiras, 29,9% formam as águas subterrâneas, 0,9% compõem a umidade dos solos e pântano e somente 0,3% formam os rios e lagos (GRASSI, 2001).

Figura 1: Distribuição dos recursos hídricos mundiais.



Fonte: COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DE NOVA FRIBURGO - CAENF, 2009.

O aumento pela demanda de água potável em virtude do crescimento demográfico, a poluição das reservas hídricas, a degradação dos recursos naturais, bem como as mudanças climáticas destacam-se como as principais causas da crise hídrica. Esta crise, que vem acontecendo nos últimos anos, tem causado uma série de consequências ambientais, econômicas e sociais. De acordo com a ONU (Organização das Nações Unidas), estima-se que em 2025, aproximadamente 1,8 bilhões de pessoas estarão vivendo em áreas muito secas e que

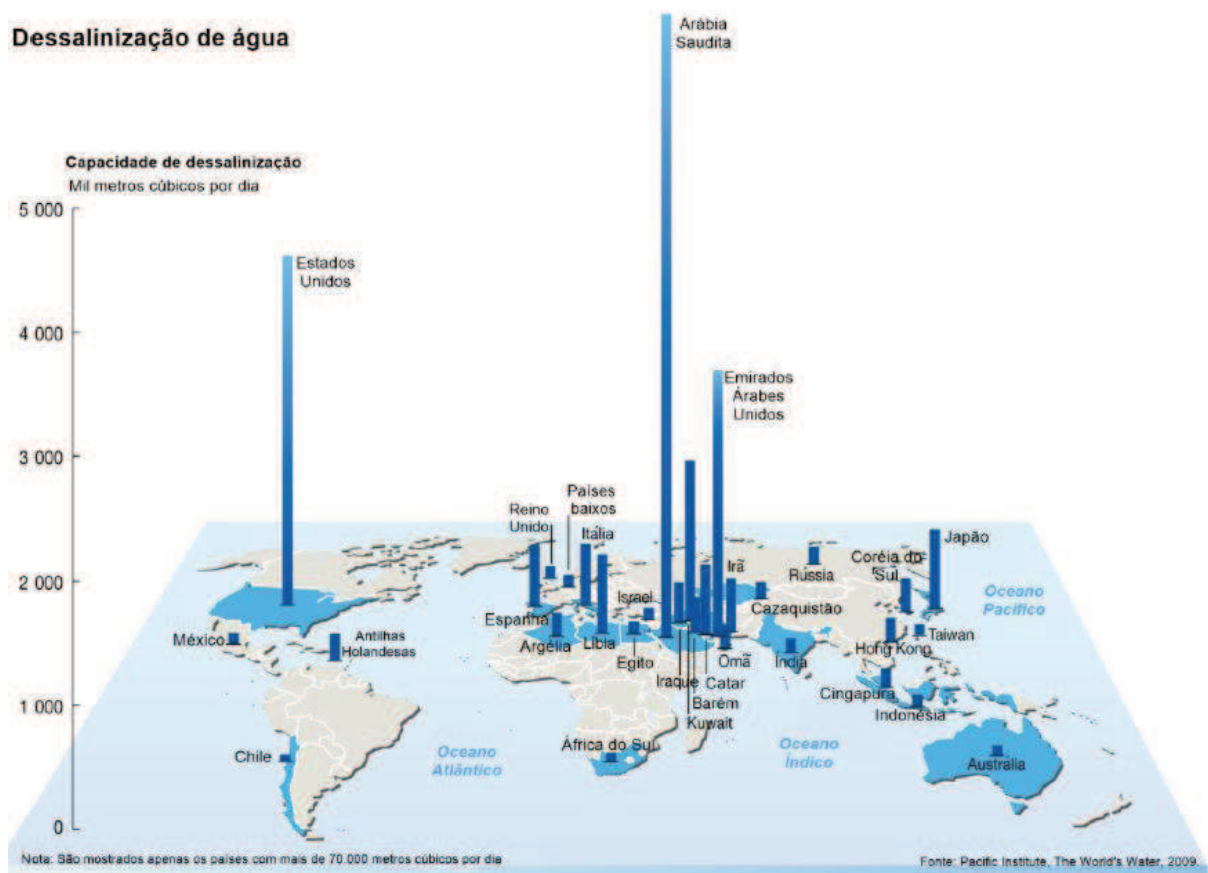


dois terços da humanidade estarão sujeitos à alguma restrição no acesso à água, caso as políticas praticadas não se modifiquem.

Desta forma, torna-se fundamental pesquisar e explorar métodos sustentáveis e viáveis de produção de água potável utilizando-se a energia solar. A dessalinização solar térmica apresenta-se como uma opção ambientalmente e economicamente favoráveis para obter água potável a partir da água salgada ou salobra. Além de retirar o sal da água, a dessalinização permite a eliminação de muitos microrganismos causadores de doenças.

O Brasil possui uma das maiores disponibilidades hídricas do mundo – cerca de 12% de toda a água potável do planeta – entretanto, este volume não está distribuído de forma uniforme pelo seu território. Aproximadamente 68% das reservas encontram-se nos rios da região Norte, que reúnem menos de 8% da população nacional, enquanto a região Nordeste possui 3% das reservas, onde habitam 28% da população nacional. Diante disso, como pode ser verificado na Figura 2, o Brasil praticamente não possui instalações para a dessalinização de água.

Figura 2: Capacidades instaladas de dessalinização.



Fonte: Adaptado de UNEP/GRID – Arendal (2009).

A Arábia Saudita é o maior produtor mundial de água dessalinizada, com aproximadamente 27% da produção mundial. A maior parte da sua produção é proveniente do processo de dessalinização térmica, que possui como fonte de energia petróleo e gás natural. A água utilizada é a do mar. Os Estados Unidos da América são o segundo maior produtor, com 12% do total, utilizando usinas de Osmose Reversa (RO) e a água salobra como matéria prima.

Neste contexto, o objetivo desse trabalho é a avaliação de um sistema de dessalinização solar com recuperação de calor, utilizando um novo arranjo do conjunto de coletores planos para o aquecimento de um fluxo de óleo térmico, que transfere calor para a torre de dessalinização.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

Avaliação de um sistema de dessalinização solar com recuperação de calor, utilizando um novo arranjo do conjunto de coletores planos para o aquecimento de um fluxo de óleo térmico, que transfere calor dos coletores para a torre de dessalinização. A circulação do óleo é feita por meio de uma bomba volumétrica. A utilização do *DOWTHERM A* possibilita que o dessalinizador alcance temperaturas mais elevadas quando comparada com as de um desalinizador operando com água.

### **2.2 Específicos**

1. Apresentar alternativas para a produção de água potável;
2. Demonstrar a viabilidade do processo desenvolvido;
3. Estabelecer e identificar as condições de temperaturas e irradiação ideais;
4. Avaliar os resultados, comparando com outros testes;
5. Realizar variações no sistema, avaliando seus resultados e definindo qual é o mais eficiente.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os primeiros registros históricos da utilização da energia solar térmica com a finalidade de dessalinização estão ligados aos antigos egípcios. O primeiro dessalinizador solar tipo tanque, projetado, construído e que garantiu informações experimentais significativas, foi desenvolvido em Las Salinas (Chile), em 1872 por Charles Wilson. Desde então, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos nessa área.

Löf *et al.* (1961) determinaram as relações de transferência de massa e energia para indicar o comportamento de um dessalinizador solar tipo tanque operando em regime permanente. Foram relacionadas a produtividade do dessalinizador em função da temperatura ambiente, da inclinação da cobertura transparente de vidro, da velocidade do vento e da quantidade de radiação solar incidente. Concluiu-se a partir dos resultados que a taxa de produção de água destilada era tão maior quanto maior fosse a diferença entre as temperaturas do vidro e da água salobra no tanque.

Cooper (1973) construiu alguns dessalinizadores solares para analisar quais fatores determinavam a eficiência do dessalinizador solar de simples efeito. A inclinação da cobertura de vidro, espessura da lâmina de água e o tipo de isolamento nas paredes do tanque eram fatores que influenciavam a eficiência do sistema. Concluiu-se que a eficiência de um dessalinizador ideal tipo tanque não ultrapassava 60% e que em raras exceções, a eficiência excedia 50%.

Proctor (1973) construiu um sistema de dessalinizadores solares do tipo tanque em Victória (Austrália). O sistema possuía uma área de 1,85 m<sup>2</sup> e era formado por um tanque de concreto isolado com placa de isopor. A água era reciclada no sistema por uma bomba centrífuga com capacidade de 20 gal/min. O experimento obteve uma produção de 821 litros de água dessalinizada, representando uma produção de 3 a 18 vezes maior que a dos dessalinizadores convencionais.

Deronzier *et al.* (1981) construíram um protótipo de destilador solar de múltiplos efeitos acoplado a coletores solares. O sistema possuía uma torre de evaporação com 12 estágios e os coletores possuíam uma área de superfície seletiva total de 270 m<sup>2</sup>. O calor absorvido pelo coletor solar era transmitido para a água a ser dessalinizada através de um trocador de calor. A água evaporada era condensada em outro trocador de calor para em seguida ser coletada. O destilador chegou a uma produção de 35L/m<sup>2</sup>.dia.

Fernández e Chargoy (1990) desenvolveram um destilador solar com reaproveitamento de calor baseado no princípio de empilhamento de bandejas. A água evaporada no primeiro estágio aquecia os outros estágios e condensava no topo do destilador.

O experimento foi capaz de produzir um destilado maior do que o padrão usual de 4 litros/m<sup>2</sup> para um destilador do tipo tanque.

Chendo e Egariewe (1991) realizaram um estudo com o objetivo de comparar o dessalinizador do tipo tanque com vários tipos de enchimento como: pedra, carvão mineral e tecido. Foi observado que a taxa de destilação no tanque aumentava na seguinte ordem: carvão mineral, tecido e pedras. Este último apresentou produtividade máxima, além de continuar produzindo água destilada 4 horas após o pôr do sol. A capacidade calorífica de armazenamento de energia das pedras e a baixa temperatura ambiente, favoreceu o processo de evaporação – condensação e a produção de água dessalinizada.

Schwarzer *et al.* (1991) desenvolveram um sistema solar para a dessalinização e destilação de água salobra. O destilador era basicamente uma versão modificada de um coletor placa plana com isolamento transparente do vidro e com uma torre de dessalinização com recuperação de calor. Com base nos dados de radiação, temperatura ambiente e velocidade do vento do verão alemão e nos dias de céu claro, a temperatura do fluido atingiu 120 °C. Os valores obtidos experimentalmente mostraram que na saída do destilador sem sistema de recuperação de calor o destilado aumentava de um valor inicial de 0,20 L/MJ, para 0,36 L/MJ no destilador com sistema de recuperação de calor.

Baumgartner *et al.* (1991) construíram um destilador solar de múltiplo efeito com dois estágios para operação em baixas temperaturas, de 70 °C a 85 °C. O sistema foi desenvolvido com o intuito de reduzir os seus custos específicos. O calor de evaporação era recuperado num processo de convecção natural em contra fluxo, na pressão ambiente. Foi encontrado uma razão de ganho (GOR), que representa a eficiência do dessalinizador, de até 6. Isto significa que 115 kWh de calor do processo térmico era necessário para produzir 1 m<sup>3</sup> de água doce a partir da água salgada, comparado com 690 kWh/m<sup>3</sup> do calor de evaporação da água.

Adhikari *et al.* (1995) apresentaram um estudo teórico por meio de um modelo de simulação computacional e construíram um sistema experimental com diferentes números de estágios, com o objetivo de verificar o aumento da produção de água dessalinizada com o número de estágios. Os resultados obtidos nos estudos teórico e prático apresentaram boa concordância. Concluiu-se que um dessalinizador com o número de estágios superior a oito não possui um ganho significativo na produção de água, devido a capacidade térmica do sistema e no valor da razão de ganho de saída da torre de recuperação de calor.

Porta *et al.* (1997) construíram um dessalinizador solar de tanque raso com o objetivo de mostrar que a inércia térmica do sistema depende do tipo de cobertura de vidro, da composição dos materiais utilizados no isolamento e das qualidade e quantidade de sais na água salobra. A combinação destes fatores com as variáveis ambientais e a radiação solar mantiveram a eficiência global do sistema. Foi constatado também que as condições climáticas influenciavam na variação da taxa de produção em função das diferenças de temperatura, do coeficiente de transferência de calor, e da quantidade inicial de água salgada contida no tanque.

Schwarzer *et al.* (2001) apresentam um estudo teórico e experimental de uma torre de dessalinização térmica com recuperação de calor que operava com aquecimento de um óleo térmico. Foram apresentados os resultados da simulação numérica, além das equações de balanço de energia e massa para o processo de dessalinização térmica. O dessalinizador era formado por um coletor solar conectado a um trocador de calor e uma torre de dessalinização com bandejas inclinadas de 15° e com seis estágios com recuperação de calor. Os resultados numéricos obtidos mostraram uma taxa de produção podendo alcançar 25 litros/m<sup>2</sup>/dia. Foram feitos também testes físico-químicos e bacteriológicos e os resultados mostraram que o processo de dessalinização eliminou as bactérias do grupo coliforme e reduziu a quantidade de sais para níveis muito baixos.

Badran (2007) construiu um dessalinizador solar no deserto árido da Jordânia com o objetivo de estudar os parâmetros operacionais do dessalinizador. O sistema era formado por uma cobertura de vidro com 4 mm de espessura e 1,46 m<sup>2</sup> de área, uma inclinação de 32° e um tanque com 5 cm de altura, 1 m<sup>2</sup> de área e volume de 5 litros. O tanque foi construído de modo que pudesse ter uma elevada absorção da radiação solar. Foi observada a influência de alguns fatores na produtividade do dessalinizador, como a temperatura ambiente, o isolante térmico, a velocidade do vento sobre a cobertura de vidro e a altura da coluna de água no tanque de armazenamento. Os resultados mostraram que a diminuição da altura da coluna de água de 3,5 para 2 cm contribuiu em um aumento de 26% na produtividade, enquanto o revestimento de asfalto ocasionou um aumento de 29%. O aumento da velocidade do vento de 2,7 para 5 m/s resultou em um aumento da produção de 26%, e com um aumento da temperatura ambiente de 28°C para 32°C houve um aumento de 53% na produção.

Schwarzer *et al.* (2009) desenvolveram o dessalinizador térmico com recuperação de calor para produção descentralizada de água em áreas rurais, onde a falta de água é um grave problema. O sistema é formado por uma torre de dessalinização com múltiplos estágios, bandejas inclinadas para as laterais e um ou mais coletores. Quatro sistemas com diferentes geometrias de torre e bandejas foram testados em cada um dos países: Alemanha, Espanha,

Índia e Brasil (LESGN). Os experimentos mostraram que os sistemas produziam em média de 15 a 18  $L/m^2/dia$ , o que representa 5 a 6 vezes mais que a produção de um destilador de aquecimento direto. O estudo mostrou também que o número ideal de estágios de recuperação de calor varia de 5 a 7 estágios. Os sistemas têm a característica de serem modulares e cada unidade produz aproximadamente 35  $L/dia$ , permitindo a instalação de sistema maiores de até 1000  $L/dia$ .

Liu *et al.* (2014) desenvolveram e testaram um novo sistema de dessalinização solar com multiestágios de evaporação e recuperação de calor. O sistema era formado por quatro unidades de coleta interconectadas. Em cada uma delas, ocorria um processo de dessalinização independente, incluindo coleta da energia solar, recuperação de calor e evaporação da água do mar. Uma série de experimentos foram feitos sob diferentes condições de operação, com o propósito de investigar o efeito de vários parâmetros, entre eles: métodos para ajuste de pressão de operação; condições climáticas; temperatura de coleta da água. Como resultados, a produção diária de água dessalinizada chegou a até 8,24  $Kg/m^2$ , e a máxima produção instantânea, durante o verão, foi de 2,138  $kg/(h.m^2)$ . O GOR (Razão de Ganho de Saída) máximo obtido foi de 2,5, e a eficiência térmica do sistema foi de 0,4. A produção de água variou de acordo com a radiação solar. Para intensidades similares de radiação solar, a produção de água para o método de ajuste estável da pressão foi um pouco superior ao método de ajuste livre de pressão, e também houve acréscimo na produção devido ao aumento da temperatura da água coletada, devido à melhora da eficiência do processo de recuperação de calor.

Marinho *et al.* (2015) aperfeiçoaram um modelo de dessalinizador solar, com o intuito de melhorar as condições de segurança hídrica de camponeses da região semiárida brasileira. Foram realizadas adaptações técnicas para redução dos custos de construção, maior durabilidade dos equipamentos e aproveitamento do sistema de coleta de água das chuvas. Com objetivo de reduzir custos, o sistema de dessalinização solar, associado ao coletor de águas pluviais, com 36  $m^2$  de área, foi construído em alvenaria. Foram monitorados os índices de precipitação, os volumes de água dessalinizada produzida, os volumes captados de água de chuva, a temperatura da água no interior do dessalinizador e o número de coliformes fecais e totais encontrados na água produzida. O modelo produziu cerca de 150 l/dia de água doce para os agricultores, com índices de coliformes sendo reduzidos a quase zero. Chegou-se a um baixo custo de implantação e manutenção, sendo necessária uma limpeza do tanque com frequência, retirando-se os sais acumulados, a fim de manter a qualidade da água produzida.



No laboratório de Energia Solar e Gás Natural (LESGN), foram desenvolvidos alguns protótipos de dessalinizadores solares, sendo a maioria em parceria com o Instituto Solar de Jülich (Alemanha). A seguir, serão apresentados alguns dos trabalhos realizados:

Lima (2000) instalou, no LESGN, o primeiro protótipo de um dessalinizador solar térmico com recuperação de calor. O sistema experimental foi construído no Solar-Institut Jülich (FH-Aachen), na Alemanha. O sistema era composto por dois coletores solares de placa plana, de área total de 4 m<sup>2</sup>, e uma torre de dessalinização com seis estágios. Cada um destes era composto por uma bandeja metálica, com área de 2,5 m<sup>2</sup>. Foram testados três tipos de água: do mar, da CAGECE e de um dos poços da UFC. Os resultados da análise mostraram que o processo de dessalinização reduziu dureza, alcalinidade, pH, cor, turbidez, teor de cloretos e condutividade elétrica, além de eliminar todas as bactérias do grupo Coliformes Totais e do grupo Coliformes de origem fecal, necessitando apenas da adição de sais para ser consumida. O dessalinizador também apresentou bom desempenho térmico, embora os dias de testes tenham sido nublados. Observou-se que a temperatura da água no primeiro estágio alcançou valores próximos a 80 °C e a eficiência experimental, definida como a energia de evaporação de toda a água condensada dividida pela energia incidente no coletores foi de 25%.

Coutinho (2003) fabricou e testou o segundo protótipo experimental do dessalinizador solar térmico no LESGN. O sistema foi projetado em parceria com o Instituto Solar de Jülich, na Alemanha. O sistema era composto por apenas um coletor solar de placa plana, com área de 2 m<sup>2</sup>, e uma torre de dessalinização com seis estágios, cada um deles compostos por uma bandeja metálica de 1,5 m<sup>2</sup>. Dois tipos de água foram testados: poço e do mar. Tal como na análise feita por LIMA (2000), o processo de dessalinização reduziu a cor, o pH, a turbidez, a condutividade elétrica, a dureza total e o teor de cloreto, não sendo encontradas bactérias do grupo Coliformes Totais e do grupo Coliformes de origem Fecal. A temperatura da água, no primeiro estágio, alcançou valores próximos a 90 °C, e a eficiência experimental global encontrada foi de 22%, menor que a calculada por LIMA (2000).

Alves (2009) desenvolveu um sistema de distribuição de calor na torre térmica de dessalinização, utilizando um tubo de aço inoxidável, no qual foram feitos furos passantes igualmente espaçados ao longo do seu comprimento, de forma a permitir uma melhor distribuição de água quente no tanque de armazenamento. A torre era constituída por sete estágios, utilizando em cada estágios bandejas com dimensões menores. A unidade de aquecimento era formada por dois coletores solares de placa plana com 2,3 m<sup>2</sup> de área cada, com o refletor plano móvel. O dessalinizador apresentou desempenho térmico satisfatório. A temperatura no tanque alcançou valores próximos a 85 °C e as temperaturas da água na saída



dos coletores ficaram próximas a 100 °C. A produção diária foi de 31 litros e o valor do GOR (razão de ganho na saída) foi de 1,54.

Praciano *et al.* (2009) projetaram e fabricaram novas bandejas de aço inox, para substituir as bandejas testadas anteriormente, compostas por um grade de aço inoxidável, acima da qual ficavam duas películas plásticas, uma película hidrofílica e outra hidrofóbica. Essas películas, por serem muito finas, eram facilmente furadas ou rasgadas, ocasionando vazamentos. Portanto, foram feitas medições experimentais de radiação, temperaturas e produção para o sistema com as novas bandejas e com a grade com as películas, ambas utilizando perfil de poliuretano. Observou-se um aumento de produção superior a 50%.

Rodrigues (2010) estudou o desempenho de uma torre de recuperação de calor de cinco estágios, cada um deles composto por perfis de poliuretano e bandejas de aço inoxidável AISI 304, em formato de W, para a condensação da água evaporada no estágio inferior. Para isso, foram calculados os valores do COP (Coeficiente de desempenho) e do GOR (Razão de Ganho de Saída), e foi medido o volume de água produzido. A fim de que o desempenho do dessalinizador solar térmico, em campo, pudesse ser comparado com um desempenho máximo experimental, foi construído um dessalinizador de um único estágio, com temperaturas de evaporação e condensação controladas. O objetivo foi o desenvolvimento de uma correlação para o número de Sherwood,  $Sh$ , em função dos números de Grashof,  $Gr$ , e Schmidt,  $Sc$ . Os parâmetros de desempenho foram calculados, encontrando-se 1,26 para o GOR e 4,78 para o COP. Na correlação desenvolvida para o número de Sherwood, aproximadamente 83% dos pontos utilizados apresentaram erro abaixo de 15%, e 97% dos pontos obtiveram erro abaixo de 50%.

Rodrigues (2011) apresentou a primeira tentativa de um estudo experimental de um protótipo dessalinizador térmico, com recuperação de calor e fonte de energia controlada, projetado para operar nos regimes transiente e permanente. O dessalinizador estudado era composto por um queimador, um tanque de armazenamento e uma torre de dessalinização com seis estágios. O objetivo era verificar os parâmetros operacionais que influenciavam a produção de água: altura da coluna d'água no tanque de armazenamento, o tipo de queimador, a vazão de gás natural, o número de estágios e o uso de uma nanopelícula sob a superfície de condensação. Os resultados mostraram que o uso do queimador linear, além da quantidade de 6 litros de água no tanque de armazenamento, apresentou a melhor produção da torre. Foi mostrado também que a vazão de 0,533 g/min, para o gás natural, e o uso de 6 a 7 estágios de dessalinização eram mais adequados para o sistema. Os valores do COP e do GOR foram 4,09 e 5,91, respectivamente. Um aumento de 65,59%, na produção de água dessalinizada, foi observado

com o uso da *nanopelícula Nano Chrom & Edelstahl-Versiegelung*, de fabricação alemã, embora não tenham sido realizados testes químicos.

Costa (2013) fabricou e testou dois protótipos de um dessalinizador circular de menores dimensões quando comparadas às dos protótipos anteriores para operação em uma das painéis do fogão solar de aquecimento indireto. O primeiro protótipo, denominado Tipo A, produzia água dessalinizada a partir da água salobra contida na própria panela do fogão solar. No segundo protótipo, o Tipo B, a água salobra da panela era usada apenas como meio de transferência de calor para a primeira bandeja da torre de dessalinização. A estrutura da torre era formada por chapas de aço inoxidável com bandejas circulares e inclinadas para baixo, com o intuito de facilitar o escoamento do condensado para o centro, no qual tinha um funil de coleta do condensado com tubulação de escoamento para fora da torre. Foram testados arranjos com um, dois e três estágios. Os resultados experimentais mostraram que a máxima produção diária foi, para o Tipo A, de 4,72 L, com três estágios, enquanto que, para o Tipo B, foi de 3,50 L, também com três estágios. Verificou-se que a eficiência do dessalinizador Tipo A era superior ao do Tipo B, já que o Tipo B possuía uma resistência à transferência de calor a mais. Por outro lado, o protótipo Tipo B permitia uma operação continuada da torre de dessalinização, não sendo necessário a sua desmontagem após cada esvaziamento da água da panela.

Pinheiro (2013) desenvolveu um protótipo de dessalinizador térmico, com parâmetros operacionais controláveis, para funcionamento em regimes transiente e permanente. O aquecimento da água a ser dessalinizada era feito por resistência elétrica, com fonte de tensão ajustável, permitindo a variação da potência de aquecimento. O principal objetivo do trabalho era utilizar materiais diferentes para as bandejas, onde a água condensava-se, e determinar qual deles fornecia melhores resultados. Os materiais testados foram de alumínio, aço polido, aço inoxidável e aço cromado. Foram instalados sensores do tipo PT-100, em diferentes posições no tanque, para medições de temperatura da água. A massa de água produzida era medida por balança de precisão. A bandeja de alumínio apresentou melhores resultados, com uma produção de 4510 mL e 5900 mL de água dessalinizada para as diferenças de potencial de 165 e de 200V, respectivamente.

Mendonça *et al.* (2014) montaram uma torre de dessalinização com novos estágios fabricados com tubos de plásticos retangulares, utilizados como suporte para as bandejas. Essa configuração da torre de dessalinização foi testada com coletores de tubo evacuado. Com cinco estágios de produção de água dessalinizada foi alcançada uma produção máxima de 23 L.

Pinheiro (2014) analisou o desempenho de um dessalinizador com recuperação de calor formado por uma torre de dessalinização e por três coletores solares acionado por bomba de engrenagem, utilizando óleo térmico no circuito de aquecimento. O óleo térmico utilizado foi Lubrax Utile OT-100. Foram alcançadas temperaturas próximas a 77 °C no tanque de armazenamento. O dessalinizador alcançou uma produção de 25 litros de água dessalinizada por dia, com uma baixa salinidade, que foi determinada pela medição da condutividade elétrica ( $10 \mu S/cm^2$ ). O melhor resultado, no cálculo de desempenho, foi obtido quando o sistema de bombeamento foi combinado com o uso de refletor solar, obtendo o valor do GOR de 2,85.

Herculano (2015) otimizou o trabalho de Costa (2013), e desenvolveu uma nova panela para diminuir o vazamento de vapor no encaixe entre os estágios. Assim, a panela podia ser utilizada tanto pra cozinhar ou como tanque de armazenamento da torre de dessalinização. A nova panela foi instalada no fogão solar com aquecimento indireto e todo o sistema foi testado em condições de campo. O sistema produziu mais de 5,7 L de água dessalinizada, com condutividade elétrica média abaixo de  $10 \mu S/cm$ , COP de 1,77 e GOR 0,35.

Dutra (2016) testou a mesma torre de dessalinização com duas configurações diferentes na unidade de aquecimento, com dois e três coletores placas planas. Cada coletor possuía 2 m<sup>2</sup> de área útil e operava com água como fluido de trabalho. O tanque de armazenamento possuía capacidade de 40 Litros. Essa torre já havia sido ajustada e testada por Mendonça *et al.* (2014), tendo como característica principal a utilização de tubos de plástico retangulares na estrutura dos estágios. No interior do tanque foi instalado um tubo de distribuição de calor, o mesmo utilizado por Alves (2009). Foram realizados testes de operação, de aquecimento e de produção. O teste de aquecimento foi realizado com dois e três coletores, e nas duas configurações os resultados mostraram temperaturas acima de 90 °C. Nos testes de produção, foi obtida uma produção máxima de 42 Litros por dia, utilizando 3 coletores e sete estágios.

## **4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Este capítulo apresenta uma revisão dos temas necessários à compreensão da operação de dessalinizadores comerciais. O capítulo é dividido em três tópicos. Estão apresentadas as principais tecnologias de dessalinização utilizadas, o princípio de operação de um dessalinizador solar com recuperação de calor e os parâmetros de análise do desempenho do dessalinizador. Os Anexos B e C apresentam as características dos coletores placa plana e os fundamentos de radiação solar.

### **4.1 Principais tipos de Tecnologias de Dessalinização**

A dessalinização é um processo de tratamento da água que separa o sal das moléculas de água com o objetivo de torná-la potável. Existem várias tecnologias que realizam esse processo, classificadas conforme o tipo de energia e a presença ou não de membranas especiais. Podem-se citar as tecnologias disponíveis: Processos por Membrana: Eletrodialise (ED); Osmose Reversa (RO). Processos Térmicos: Destilação Flash de Múltiplos Estágios (MSF); Destilação de Múltiplos Efeitos (MED); Destilação Solar Térmica (DS) e Congelamento.

#### **4.1.1 Processo por Membrana**

Nos processos por membrana, utiliza-se a capacidade das membranas de diferenciar e separar sais e água; porém, as membranas são utilizadas diferentemente em cada um dos processos. A eletrodialise utiliza um potencial elétrico para deslocar seletivamente os sais por meio de uma membrana, deixando água dessalinizada como produto. No processo de osmose reversa, principal processo de dessalinização por membrana, a pressão é utilizada para separação, permitindo que a água doce atravesse uma membrana, deixando do outro lado os sais (SOUZA, 2002).

#### **4.1.2 Processos Térmicos**

A dessalinização térmica usa energia na forma de calor como força motriz. O calor pode ser proveniente de várias fontes, tais como: queima de combustíveis fósseis, aquecimento

por resistência elétrica, energia solar e reações químicas exotérmicas. Os principais processos térmicos estão descritos a seguir:

#### **4.1.2.1 Destilação Rápida de Múltiplos Estágios (Multistage Flash – MSF)**

Em um sistema MSF, Figura 3, a dessalinização da água salgada ou salobra ocorre em baixas temperaturas em pressões abaixo da atmosférica. O vapor condensa para formar o condensado, ou água dessalinizada. Em pressões menores (inferiores à atmosférica), o ponto de ebulição da água é mais baixo (inferior a 100 °C) e a energia requerida para o processo é menor.

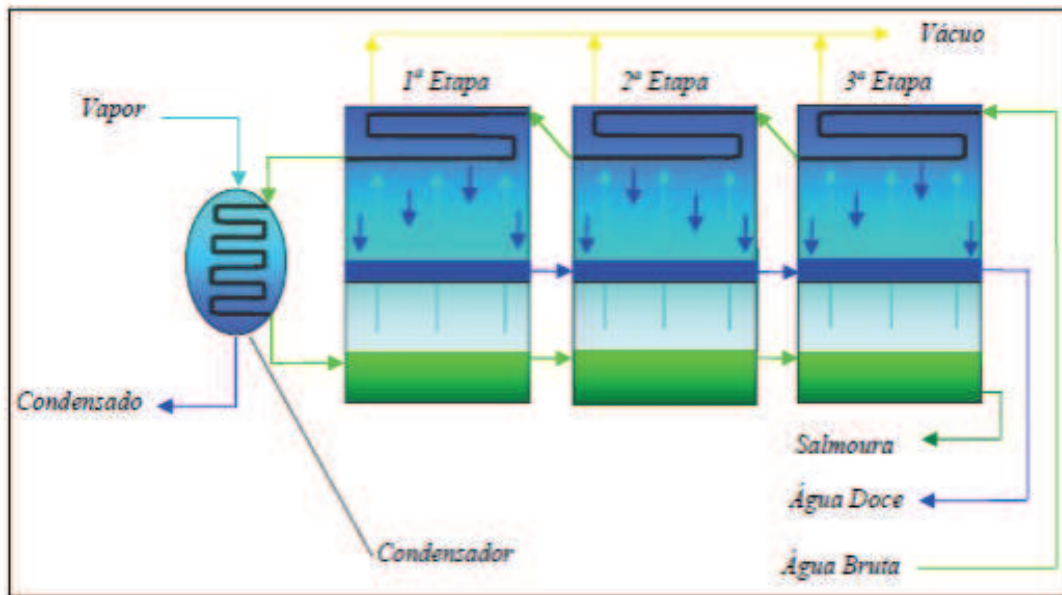
Na Figura 3, um aquecedor de salmoura eleva a temperatura da água salgada ou salobra até aproximadamente 90 a 100 °C. Antes de chegar ao aquecedor de salmoura, a água salobra passa através de serpentinas de condensação instaladas em câmaras. Isto tem duas funções:

- Pré-aquecimento da água salgada (fria) antes de entrar no aquecedor de salmoura.
- Condensação do vapor evaporado (flash) nas câmaras.

Após o aquecedor, a salmoura quente entra nas câmaras de evaporação, que estão a baixa pressão. Visto que a temperatura da água é mais alta do que a correspondente temperatura de ebulição na baixa pressão (vácuo), parte da água evapora instantaneamente. O vapor sobe até a parte superior da câmara e, em contato com a serpentina de condensação para se liquefazer (água dessalinizada). O sal e outras impurezas permanecem na salmoura da parte inferior da câmara. Ejetores de vapor produzem o “vácuo” necessário nas câmaras de evaporação.

O fluxo de salmoura vai para a próxima câmara, onde o processo se repete. Múltiplas câmaras aumentam a quantidade de água produzida.

Figura 3: Princípio de Funcionamento MSF.



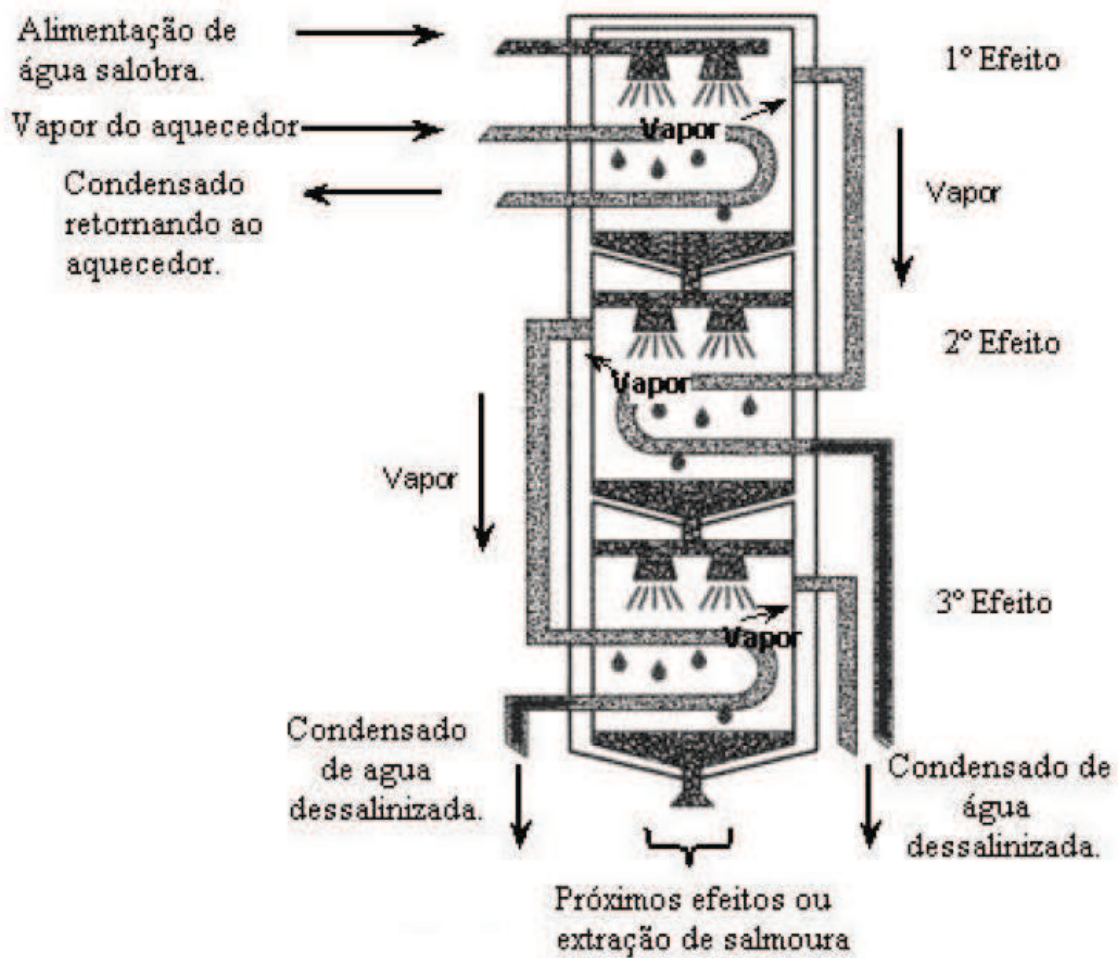
Fonte: DEPINÉ (2012).

#### 4.1.2.2 Destilação de Múltiplos Efeitos (MED)

O MED é o processo de destilação mais antigo. A destilação de múltiplo efeito, Figura 4, consiste na evaporação da água, salina ou salobra, pela transferência de calor produzida na condensação de vapor. O vapor produzido é utilizado em um passo (“efeito”) subsequente, que operam a uma pressão e a uma temperatura ligeiramente menores, de tal forma que a energia do vapor condensado é usada para evaporação adicional da água no efeito posterior (KALOGIROU, 1997).

Esse processo ocorre em uma série de recipientes e utiliza o princípio de redução de pressão interna nos vários estágios. Isso permite à água submeter-se à ebulição múltipla, com ausência de suprimento de calor adicional após o primeiro efeito. Somente no primeiro efeito um vapor primário, gerado independentemente do processo de destilação, é utilizado, podendo ser obtido, por exemplo, com a utilização de coletores planos ou parabólicos.

Figura 4: Princípio de Funcionamento MED.



Fonte: MILLER (2003)

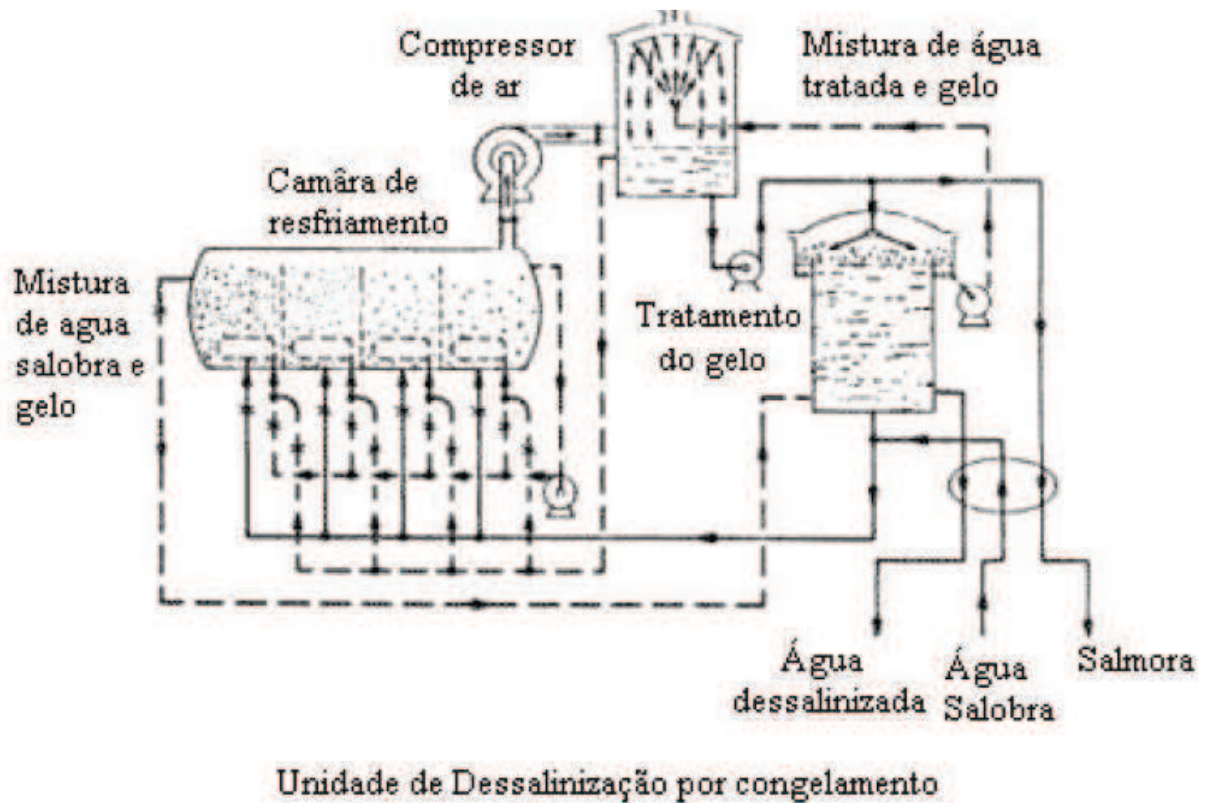
#### 4.1.2.3 Congelamento (*Freezing*)

No processo de dessalinização por congelamento, ilustrado na Figura 5, a solução de água salobra é parcialmente congelada e as partículas dissolvidas são extraídas. O processo está baseado no conceito de que quando a água congela, as partículas de sais contidas não congelam. Assim, água livre de sais é obtida quando o gelo derrete. Os cristais congelados são lavados para remover as partículas, e derretidos novamente para produzir água pura.

As vantagens desse tipo de dessalinização são requisição de energia teoricamente baixa, pequeno potencial de corrosão e poucas incrustações. Em contrapartida, a desvantagem deste processo está na complicação de processamento e transporte do gelo (SOUZA, 2002).



Figura 5: Princípio de Funcionamento de Dessalinização por Congelamento.



Fonte: Adaptado United Nations Environment Programme -UNEP (2009).

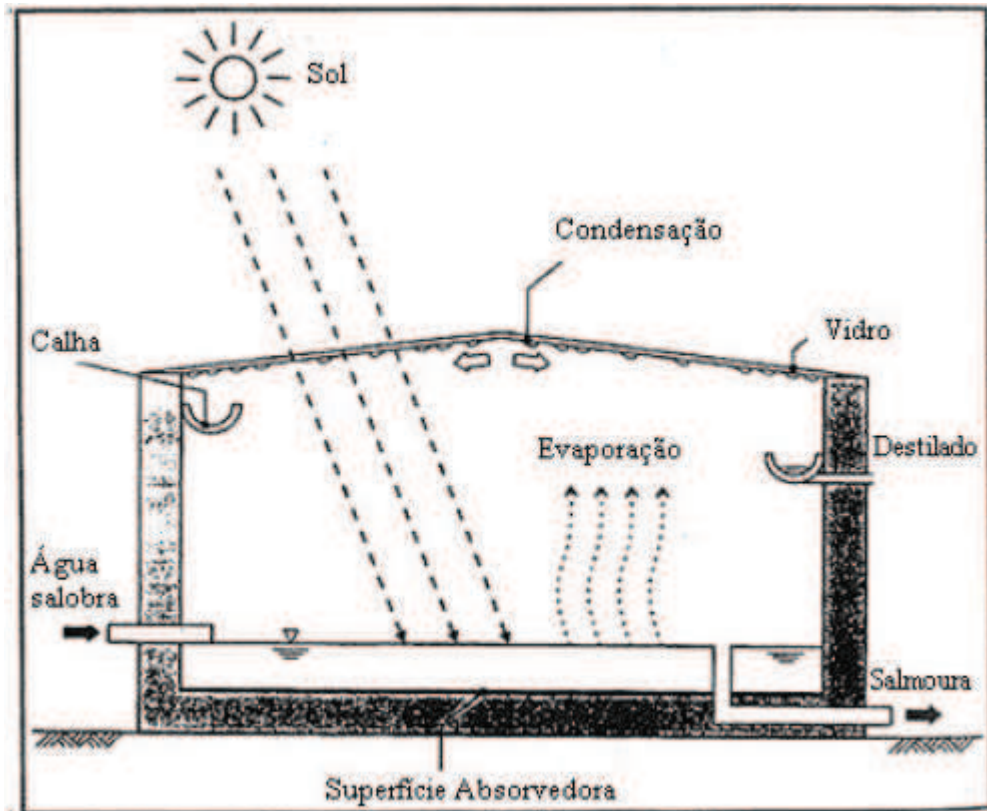
#### 4.1.2.4 Destilação Solar Térmica

Os processos de dessalinização térmica podem ocorrer com o aquecimento direto ou indireto da água salgada ou salobra. No processo direto, a radiação solar incidente sobre a água salgada é transformada em calor sensível, elevando a sua temperatura. No aquecimento indireto, um fluido de trabalho é usado como meio de transporte de energia, absorvendo a radiação solar em coletores e transportando esse calor para a água salgada em uma torre de dessalinização.

Um dos primeiros protótipos do dessalinizador é o tipo tanque, apresentado na Figura 6. A radiação incidente aquece a água no tanque, e parte dessa água evapora e sobe, indo condensar nas paredes da cobertura transparente que estão em uma temperatura inferior, e então escoam em direção às calhas, onde é coletada. Este tipo de destilação tem sido pesquisada e utilizado há algum tempo (Löf *et al.*, 1961).



Figura 6: Princípio de Funcionamento DS.



Fonte: United Nations Environment Programme - UNEP (2009).

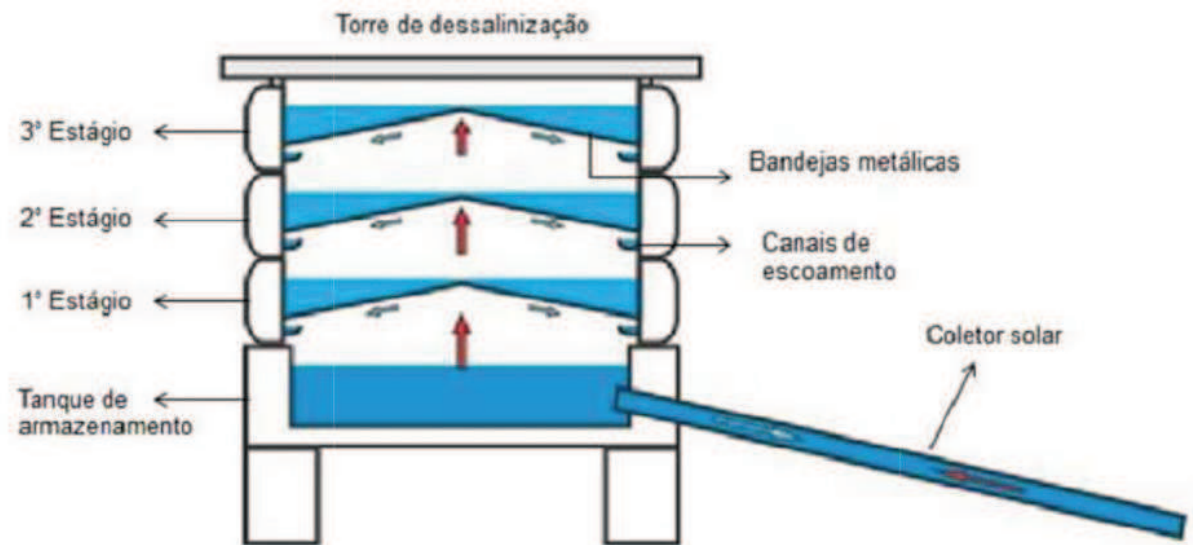
Nos dessalinizadores com aquecimento indireto, que normalmente são compostos pela unidade de aquecimento (coletores) e uma unidade de dessalinização. Nesse caso, o fluido que circula pelos coletores, através de termossifão ou bomba, é que fornece calor para a água presente no dessalinizador.

De modo geral, os dessalinizadores de aquecimento indireto produzem mais água dessalinizada em relação aos de aquecimento direto, entretanto são mais complexos e possuem custos mais elevados para construção e instalação do sistema.

#### 4.2 Dessalinizador Solar Térmico com Recuperação de calor

O dessalinizador solar térmico com recuperação de calor, ilustrado na Figura 7, é um sistema que utiliza a energia térmica de forma mais eficiente devido aos estágios de recuperação de calor, possibilitando uma maior produção de água dessalinizada.

Figura 7: Esquema de um dessalinizador solar térmico com recuperação de calor.



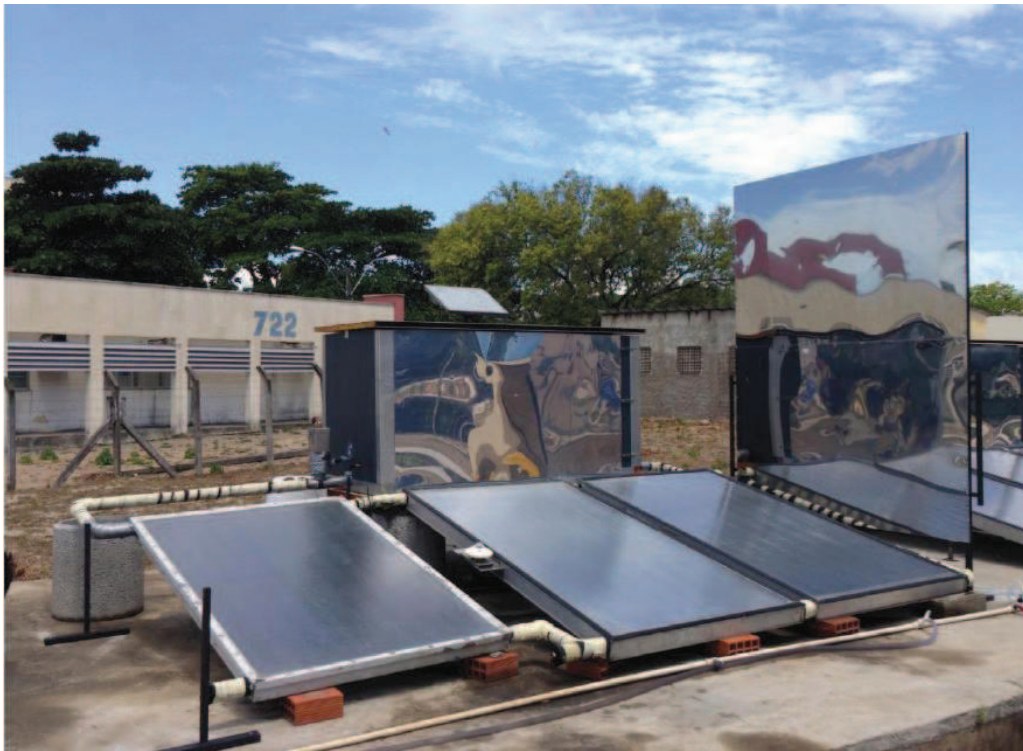
Fonte: Mendonça *et al.* (2014).

O sistema é formado por duas unidades: a unidade de aquecimento e a unidade de dessalinização. A unidade de aquecimento é formada por coletores solares responsáveis por absorver a radiação solar, causando o aquecimento do fluido de trabalho, que escoam em um circuito de termossifão ou por um sistema de bombeamento, para o tanque de armazenamento da torre. A unidade de dessalinização é composta pelo tanque de armazenamento e múltiplos estágios de recuperação de calor posicionados verticalmente. Cada estágio é formado por canais de escoamento, bandeja metálica e perfis retangulares.

Na torre, a dessalinização opera através dos processos de evaporação e condensação. O fluido de trabalho é aquecido nos coletores e escoam até o tanque de armazenamento, parte da água presente no tanque evapora e condensa ao entrar em contato com a superfície da bandeja do primeiro estágio, que possui temperatura inferior. O condensado escorre nas superfícies inclinadas da bandeja e flui pelos canais de escoamento, onde é armazenado e coletado no lado de fora da torre. Este processo de vaporização e condensação se repete nos múltiplos estágios seguintes.

A Figura 8 apresenta o dessalinizador solar térmico com recuperação de calor montado no LESGN.

Figura 8: Dessalinizador Solar Térmico com Recuperação de Calor.



Fonte: Pinheiro (2014).

### 4.3 Parâmetros de desempenho de um dessalinizador

Dois parâmetros são importantes para analisar o desempenho de um dessalinizador: A Razão de Ganho de Saída (*Gain Output Ratio* – GOR) e o Coeficiente de Desempenho (*Coefficient of Performance* – COP).

A Razão de Ganho de Saída (GOR) é definida como a razão entre a energia necessária para evaporar toda a água produzida no dessalinizador pela energia total incidente nos coletores solares, Equação 1:

$$GOR = \frac{\sum m_T \cdot h_{fg}}{\int_{dia} G_T \cdot A_{col} dt} \quad (1)$$

no qual,  $m_T$  representa a massa total de água dessalinizada na torre,  $h_{fg}$  representa a entalpia de vaporização da água,  $G_T$  é a radiação solar incidente no coletor e  $A_{col}$  a área total do coletor. O GOR é uma expressão da eficiência térmica de todo o sistema, composto de torre e unidade de captação de energia solar.

O Coeficiente de Desempenho (COP) é definido como a razão entre toda massa de água dessalinizada produzida pela torre e a massa de água produzida no primeiro estágio, Equação 2:

$$COP = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{m_1} \quad (2)$$

no qual,  $n$  representa o número de estágios,  $m_i$  representa a massa produzida no estágio  $i$  e  $m_1$  representa a massa produzida no primeiro estágio. O COP é um parâmetro usado na determinação do número ideal de estágios da torre de dessalinização.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados na realização dos trabalhos com o dessalinizador solar térmico de múltiplos estágios com recuperação de calor e aquecimento indireto da torre de dessalinização. Estão apresentados os trabalhos de modificações no circuito de circulação de óleo e nos coletores solares, assim como os procedimentos dos testes necessários para avaliar o protótipo. O fluido de trabalho utilizado foi o Dowtherm A, porque apresenta elevado coeficiente de expansão térmica, cujas propriedades estão apresentadas no Anexo A.

### 5.1 Componentes principais da torre de dessalinização

A torre de dessalinização empregada neste trabalho foi testada com água como fluido de trabalho por Mendonça *et al.* (2014).

O tanque de armazenamento de água salgada ou salobra foi projetado e fabricado por Praciano (2009). O tanque possui as seguintes dimensões: 2100 x 600 x 150 mm (comprimento x largura x altura); a sua capacidade de armazenamento é de 40 litros, que é delimitada por um furo de nível. O tanque foi fabricado com chapas de aço inoxidável AISI 304 e possui isolamento de lã de vidro em suas paredes laterais e na parte inferior com espessura de 50 mm. Para operação com água como fluido de trabalho, foi instalado na admissão do tanque um tubo de distribuição de calor, mesmo tubo utilizado por Alves (2009), de aço inoxidável (AISI 304) com diâmetro externo de aproximadamente 22 mm, 1,9 m de comprimento e com furos transversais passantes de aproximadamente 9,5 mm de diâmetro com espaçamento de 100 mm entre furos. Com a utilização deste tubo, a água aquecida pela radiação solar que entra no tanque de armazenamento é distribuída de forma homogênea ao longo do tanque, evitando que o calor se concentre apenas nas proximidades da admissão do mesmo. A Figura 9 apresenta o tubo de distribuição de calor conectado ao tanque.

Figura 9: Tanque de armazenamento



Fonte: Alves (2009)

Os estágios da torre de dessalinização foram formados por perfis retangulares de polietileno, bandejas metálicas inclinadas e canais de escoamento.

Os perfis de polietileno foram anteriormente utilizados por Mendonça *et al.* (2014). Os perfis atuavam como isolantes térmicos e davam suporte aos canais de escoamento e às bandejas metálicas. A moldura dos perfis possuía 2,15 m de comprimento e 60 cm de largura. Visando aumentar a superfície de contato e a melhor união do material, os cantos dos perfis foram cortados em ângulo de 45°, fixados usando resina epóxi e cantoneira de aço com rebites. Os canais de escoamento foram construídos de tal forma a facilitar o empilhamento dos estágios.



Figura 10: Perfil de polietileno

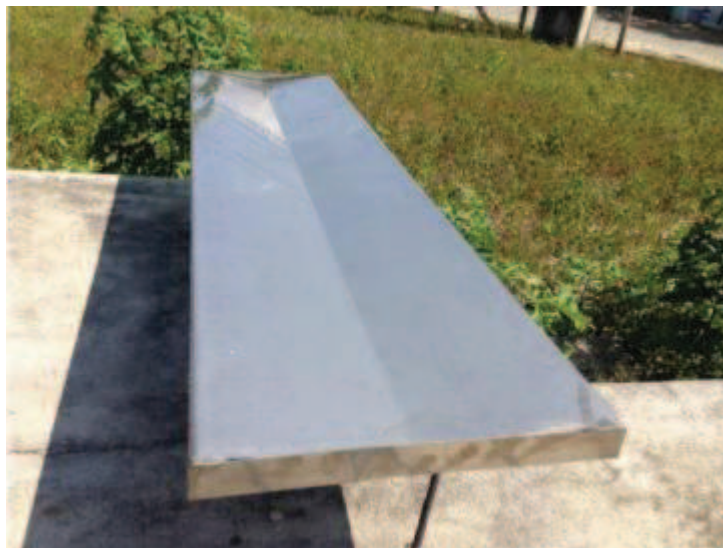


Fonte: Mendonça *et al.* (2014)

As calhas foram fabricadas de chapas de aço inoxidável AISI 304 em formato de “L”. Foram soldados tubos de aço nas extremidades dos canais para conectar às mangueiras de coleta. Os canais de escoamento foram fixados por meio de parafusos ao longo dos perfis de polietileno.

As bandejas metálicas, Figura 11, tinham como finalidade armazenar a água salobra e permitir que o vapor d’água no estágio abaixo condense em sua parede inferior. Cada bandeja possuía um furo de 9 mm de diâmetro, responsável por delimitar o nível de água, evitando que cada bandeja transborde pelas laterais quando abastecida. As bandejas foram fabricadas com chapas de aço AISI 304 através de processos de corte, dobra e soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*), formando um reservatório em “W”. As dimensões finais das bandejas são de 2 m de comprimento por 50 cm de largura e ângulo de condensação de 10°. Cada bandeja podia armazenar até 20 Litros de água.

Figura 11: Bandeja em W



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

## **5.2 Modificações realizadas para operação com óleo térmico**

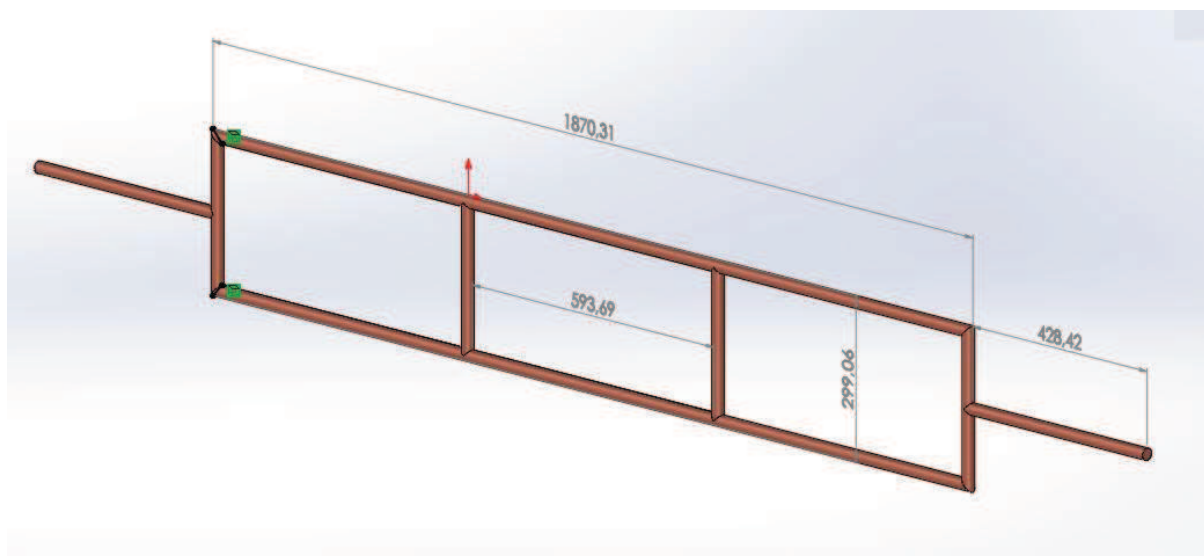
Para operação do dessalinizador com óleo térmico como fluido de trabalho, foi necessário realizar modificações na torre de dessalinização existente e a instalação de um circuito de óleo térmico. Foram recuperados também coletores já utilizados em trabalhos anteriores. Estão descritos a seguir as modificações e a recuperação realizada no sistema:

### **a) Torre de dessalinização**

No tanque, foi fabricado e instalado um trocador de calor no formato de uma grade com o objetivo de distribuir, de forma homogênea ao longo do tanque, o calor do óleo aquecido nos coletores. Esse trocador difere do anteriormente usado na operação com água, por não apresentar furos, evitando a contaminação da água salobra e infiltrações no fluxo de óleo térmico. Para sua fabricação foram utilizados tubos de cobre aproximadamente 22 mm de diâmetro, tubos de aço inoxidável na extremidades da grade com mesmo diâmetro, curvas e conexões rosqueadas e soldadas por brasagem do tipo foscope e prata. A Figura 12 apresenta o trocador de calor com suas respectivas dimensões.



Figura 12: Trocador de calor



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

#### b) Unidade de captação de energia solar

Na recuperação dos três coletores foi percebido que os vidros estavam com um alto grau de opacidade provocado por incrustações. Um dos coletores também apresentava a primeira cobertura transparente interior (película) danificada. Para recuperação, os vidros temperados foram retirados para uma completa limpeza, tendo sido lavados com jatos de água. Foi trocada também a película do coletor que estava deteriorada. Essa película é instalada entre a cobertura de vidro (externa) e a placa absorvedora. Ela tem por função diminuir as perdas óticas do coletor e substitui a segunda cobertura de vidro do coletor, tendo a vantagem de ser mais leve. Ao final da limpeza, os vidros dos coletores não apresentavam a transparência de vidros novos, mas houve uma melhora em relação as condições encontradas inicialmente.

Para circulação do óleo térmico, foi instalado um sistema de bombeamento composto por uma bomba volumétrica (ou deslocamento positivo) acoplada a um motor elétrico. Foi utilizado um motor monofásico de corrente alternada, para acionamento da bomba, ligado à rede elétrica com potência nominal de 300 W. A bomba foi instalada na saída do tanque de expansão. A Figura 13 apresenta a bomba instalada, durante a montagem do sistema.

Figura 13: Bomba de deslocamento positivo acoplada ao sistema.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

A instalação do tanque de expansão é necessário no sistema devido à expansão térmica do óleo causada pela variação da densidade do óleo com a temperatura. O tanque de expansão instalado nesse sistema é usado para “absorver” as variações volumétricas do líquido mantendo o circuito na pressão atmosférica. A Figura 14 mostra o tanque de expansão com abertura para atmosfera.

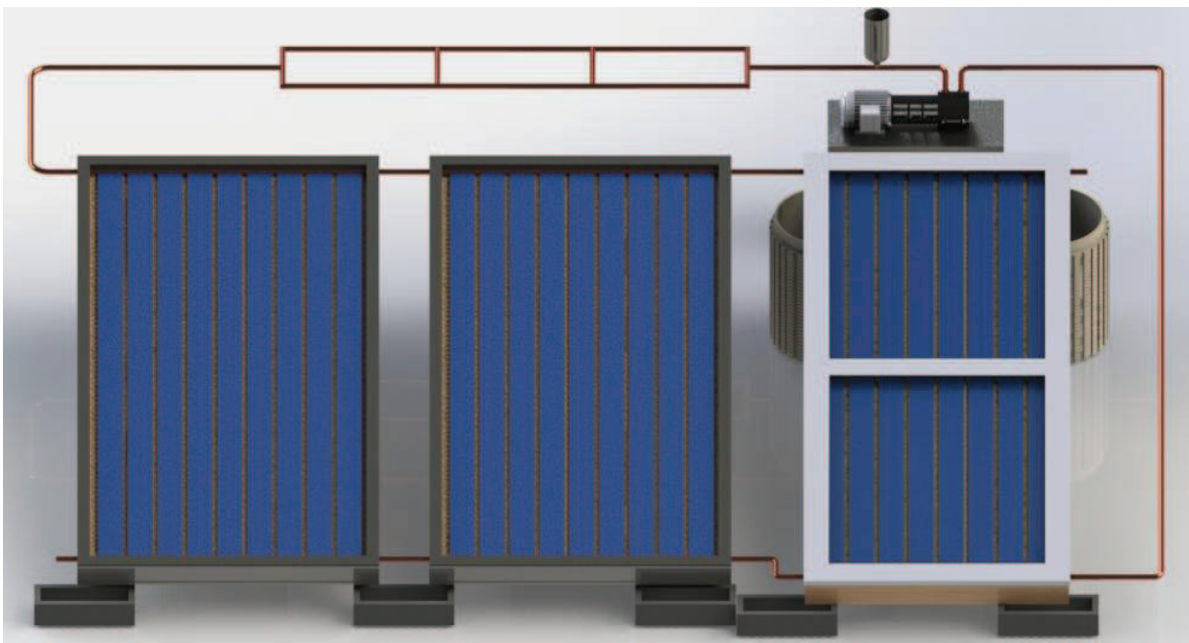
Figura 14: Tanque de expansão



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

A Figura 15 apresenta um desenho esquemático dos componentes com a unidade de aquecimento, o trocador de calor, a bomba e o tanque de expansão (circuito de óleo).

Figura 15: Circuito do óleo térmico



Fonte: Elaborada pelo próprio autor



### 5.3 O Protótipo Final

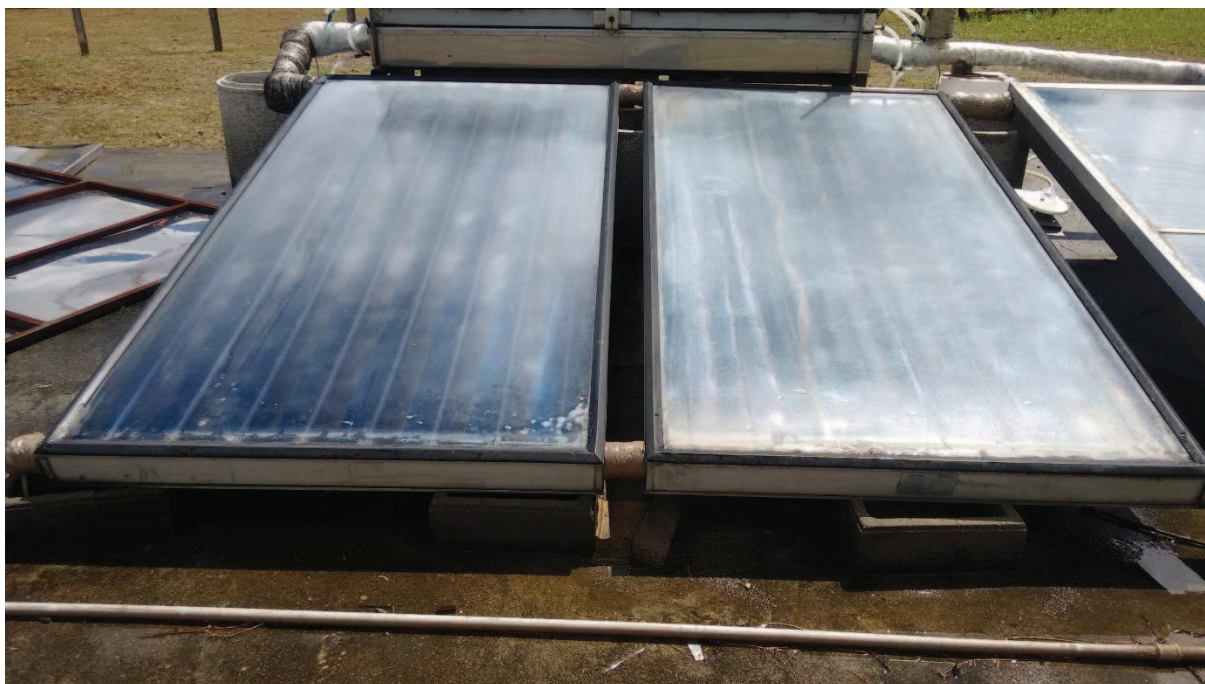
O dessalinizador solar térmico com recuperação de calor foi instalado no LESGN. Este protótipo experimental possui duas unidades, uma de aquecimento e outra de dessalinização.

#### 5.3.1 Unidade de Aquecimento

A unidade de aquecimento é formada por três coletores solares placa plana com uma área total de absorção de 7,3 m<sup>2</sup>. Os coletores foram ligados em paralelo. Dois coletores foram fabricados por Arcon Solvane e o terceiro coletor fabricado no laboratório. Os três coletores foram parcialmente recuperados, devido ao alto grau de opacidade no vidro e desgaste na placa absorvedora.

Os dois coletores fabricados por Arcon Solvane, Figura 16, são similares, com as características dos utilizados por Dutra (2016). Contudo, devido ao uso e exposição ao Sol os coletores não apresentavam as mesmas condições.

Figura 16: Coletores do mesmo fabricante

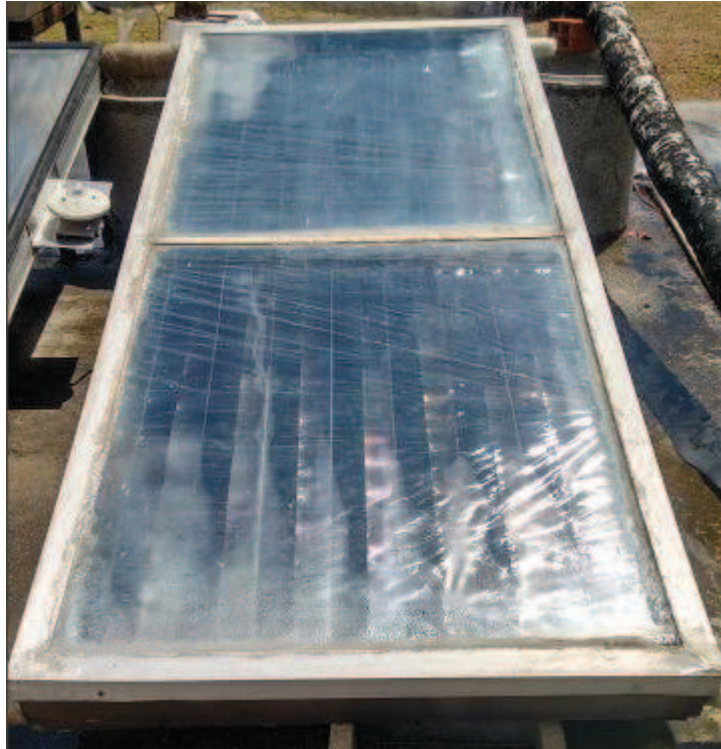


Fonte: Elaborado pelo autor

O coletor fabricado no laboratório, Figura 17, que possui área útil de 2,20 m<sup>2</sup>, apresenta as seguintes características:

1. Suporte do coletor – fabricado com madeira muiracatiara, tem como finalidade suportar todos os outros componentes que compõe o coletor;
2. Fabricação das aletas – chapas finas de cobre com uma superfície seletiva, que têm como característica possuir alta absorção solar e baixa emissão térmica. Foram soldadas por ultrassom aos tubos de cobre de  $\frac{1}{2}$  " de diâmetro (canais de escoamento do coletor). Posteriormente, foram colocados dentro da caixa de madeira, a qual possui furos laterais passantes para apoiar os tubos de escoamentos;
3. A união dos tubos com aletas à tubulação de entrada e saída do coletor foram feitas por brasagem;
4. Na parte inferior do coletor foram fixadas chapas de aço galvanizadas para evitar infiltrações e perda de calor;
5. Isolamento – foram instaladas lã de vidro flexível e rígida para diminuir as perdas térmicas para o ambiente;
6. Fixação da primeira cobertura transparente do coletor solar. Essa cobertura tem como características e finalidade, respectivamente, ser de material resistente à radiação solar e diminuir as perdas por emissão de radiação térmica da placa absorvedora;
7. Instalação da segunda cobertura do coletor solar, formada por dois vidros temperados. Estes vidros possuem um recobrimento intenso com película, com alto grau de transparência, fabricado de fluorpolímero, resistente às intempéries, aos raios ultravioleta (UV) e a temperatura altas (150 °C a 200 °C).

Figura 17: Coletor fabricado no LESGN



Fonte: Elaborado pelo autor

### 5.3.2 Unidade de dessalinização

A unidade de dessalinização é formada pelo tanque de armazenamento e pelos estágios horizontais. Cada estágio é composto por perfil, bandeja e canais de escoamento. A Figura 18 apresenta a torre de dessalinização do protótipo.

Figura 18: Torre de dessalinização



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Os perfis, as bandejas e o tanque de armazenamento foram os mesmos utilizados por Dutra (2016). Entretanto, no interior do tanque foi instalado um trocador de calor no formato de uma grade, com o objetivo de distribuir de forma homogênea ao longo do tanque o calor sensível do óleo aquecido pela radiação solar. A Figura 19 apresenta o trocador de calor instalado no tanque de armazenamento

Figura 19: Trocador de calor instalado no tanque de armazenamento



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

A Figura 20 apresenta o dessalinizador solar térmico instalado e em operação no LESGN.



Figura 20: O protótipo



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

As unidades de aquecimento e dessalinização foram interligadas por tubulação de cobre de 22 mm de diâmetro, utilizando curvas e conexões rosqueadas e soldadas por brasagem do tipo foscope e prata. Foi instalado isolamento térmico do tipo lã de vidro, da ISOVER, com espessura de 25 mm nas tubulações para diminuir as perdas de calor para o ambiente.

#### 5.4 Medições Experimentais

Para coleta de dados é necessário que o dessalinizador tenha sensores em alguns pontos específicos.

As medições de temperatura e radiação global foram realizadas, respectivamente, através de termopares tipo K, com precisão de  $41 \mu V/^{\circ}C$ , e por um piranômetro de modelo CM21 fabricado pela KIPP/ZONEN com sensibilidade de  $11,10 \times 10^{-6} V/W m^{-2}$ ; instalado na mesma inclinação do coletor, já os termopares foram instalados na entrada e saída da torre de dessalinização e nos estágios de recuperação de calor.

Os termopares e o piranômetro foram conectados a um *datalogger* modelo OM-420 da OMEGA com capacidade de registrar dados de 16 canais simultaneamente, realizando medições a cada segundo e armazenando a média de cada minuto.

Para medições de salinidade foi utilizado um condutímetro modelo CDB-70 da OMEGA. Neste caso, quanto menor o valor da condutividade medida, menor a quantidade de sais dissolvidos, ou seja, mais bem sucedido é o processo de dessalinização.



No Anexo D são apresentados o datalogger, piranômetro e o condutivímetro utilizados neste trabalho.

## 5.5 Procedimento de testes

Primeiramente, antes da execução dos testes de produção, foi realizado o teste de estanqueidade das tubulações e conexões que compõem o protótipo, com a finalidade de garantir que não houvesse vazamentos no protótipo.

A produção de água dessalinizada foi medida diariamente. Em cada dia as medições foram realizadas em dois períodos, sendo realizada manualmente e se utilizando de uma proveta graduada. A primeira coleta do dia era feita às 7:00 horas, que representa o volume produzido durante a noite, e a segunda coleta às 18:00 horas, que representa a produção diurna. O protótipo foi capaz de produzir água mesmo sem radiação incidente nos coletores, devido ao armazenamento térmico da sua estrutura. Foi medido o volume de água produzida em cada estágio e sua respectiva condutividade térmica. Nos testes, a bomba foi ligada às 7:00 horas da manhã e ficou em funcionamento até às 18:00 horas da noite, mesmo horário das coletas.

Com o objetivo de analisar os parâmetros de operação, os testes de produção foram realizados em várias configurações diferentes do dessalinizador. Ao todo foram realizados testes com 9 configuração distintas. A Tabela 1 apresenta as características de cada um das nove configurações testadas. Os sete primeiros testes possuem o objetivo de avaliar o desempenho do dessalinizador, variando o seu número de estágios, começando com um estágio no primeiro teste e finalizando com sete estágios no sétimo teste. O oitavo teste possui o objetivo de avaliar o desempenho modificando a forma de abastecimento, e finalmente, o nono teste, foi instalado um refletor para potencializar a capacidade de um coletor. Devido à movimentação do planeta Terra ao longo do dia, existe a necessidade de mudança de posicionamento do refletor a cada turno. Essas mudanças de posição eram feitas duas vezes ao dia, ao meio dia e a cada pôr do sol. Todos os testes foram realizados utilizando uma cobertura de lã de vidro com espessura de 2 cm, condutividade térmica de  $0,036 \text{ W/mK}$  e dimensões (comprimento x largura) 2 m x 0,5 m, que possuía a função de evitar a perda de calor para o ambiente externo.

Tabela 1: Características dos testes de produção

Teste	Quantidade de Testes	Configuração do Dessalinizador	Mês do Teste
Teste 1	5	3 coletores em paralelo; 1 estágio de produção; abastecimento feito pela manhã	Agosto
Teste 2	5	3 coletores em paralelo; 2 estágio de produção; abastecimento feito pela manhã	Agosto
Teste 3	5	3 coletores em paralelo; 3 estágio de produção; abastecimento feito pela manhã	Agosto
Teste 4	5	3 coletores em paralelo; 4 estágio de produção; abastecimento feito pela manhã	Setembro
Teste 5	5	3 coletores em paralelo; 5 estágio de produção; abastecimento feito pela manhã	Setembro
Teste 6	5	3 coletores em paralelo; 6 estágio de produção; abastecimento feito pela manhã	Setembro
Teste 7	5	3 coletores em paralelo; 7 estágio de produção; abastecimento feito pela manhã	Outubro
Teste 8	5	3 coletores em paralelo; 7 estágios de produção; abastecimento contínuo ao longo do dia.	Outubro
Teste 9	4	3 coletores em paralelo com refletor em um coletor; abastecimento feito pela manhã.	Novembro

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Conforme apresentado na Tabela 1, foram realizadas duas formas de abastecimento de água salobra no sistema: abastecimento feito pela manhã e abastecimento contínuo ao longo do dia. No abastecimento feito pela manhã, o sistema é abastecido e posto em operação por dois dias. No abastecimento contínuo é usado o seguinte procedimento: o sistema é abastecido com sua capacidade máxima na noite do dia anterior que o sistema é posto em operação, e no dia de operação o sistema é ligado às 07:00 horas, e ligada uma mangueira com água salobra a uma vazão contínua, de forma que esta vazão supra o equivalente à produção de água dessalinizada. Neste tipo de abastecimento não é necessária a parada para abastecer o sistema, pois o mesmo sempre se encontrará cheio.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados teóricos e experimentais obtidos a partir dos testes realizados, bem como as discussões.

### 6.1 Resultados – Testes de Produção

Os testes de produção foram realizados para avaliar o desempenho do dessalinizador em função da variação do número de estágios, de um a sete. Os procedimentos foram descritos na Seção 5.4, e a água de alimentação era salobra, com uma condutividade elétrica de  $820 \mu S$ .

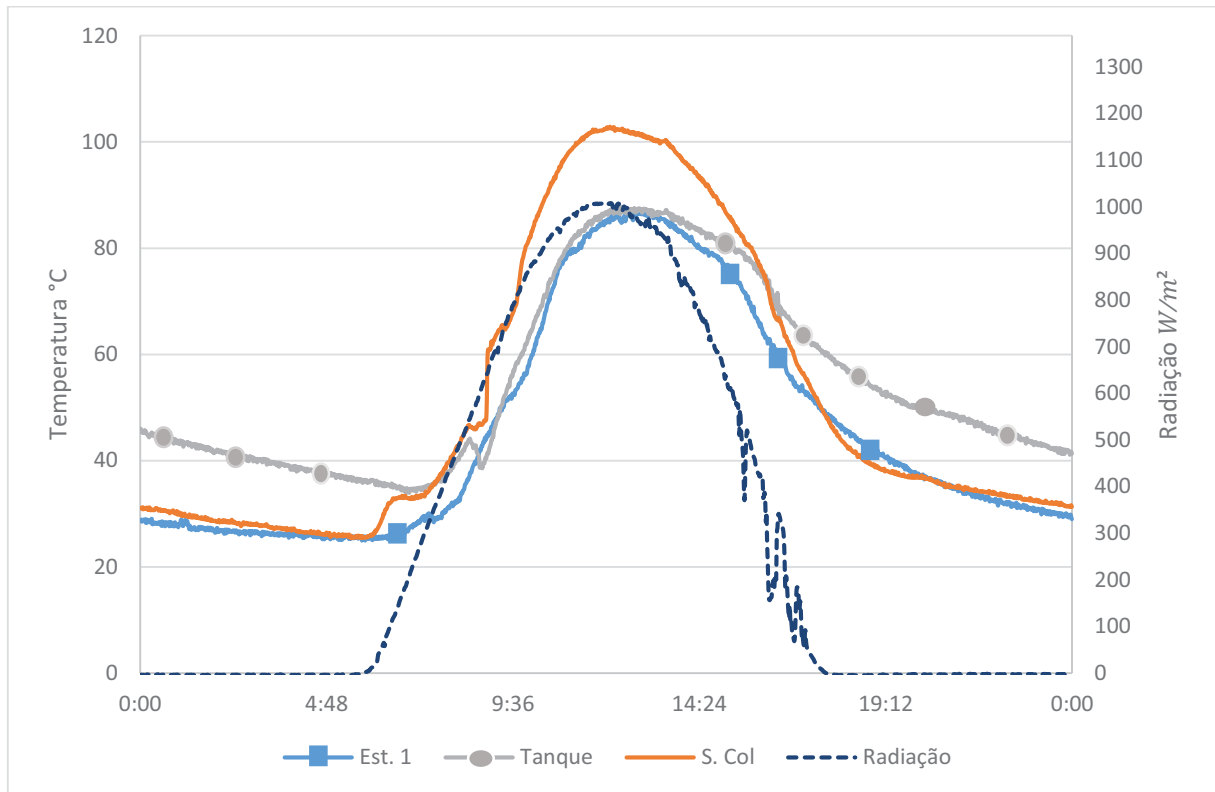
Todos os testes foram realizados com a cobertura de lã de vidro, descrita na Seção 5.4. Essa cobertura isolava a torre de dessalinização do ambiente externo.

Para simplificar as discussões dos resultados, foi utilizado a notação  $T_n$ , para identificar a temperatura da água, onde o índice  $n$  é o número do estágio. Ou seja, a temperatura da água no estágio 1 é  $T_1$ , no estágio 2 é  $T_2$  e assim sucessivamente. Para identificar a temperatura da água no tanque de armazenamento a notação utilizada foi  $T_0$ .

#### 6.1.1 – Teste 1 – Um Estágio de Produção

Utilizando um estágio de produção na torre de dessalinização e abastecimento a cada dois dias, o sistema foi posto em operação durante cinco dias. A maior produção foi registrada no primeiro dia de testes, com 9,1 L de produção diurna e 0,6 L de produção noturna, totalizando 9,7 L/dia. No dia do teste o Céu estava claro com poucas nuvens, e foi registrada uma radiação média de  $662,1 W/m^2$  entre 5:30h e 17:30 e  $957,5 W/m^2$  entre 10h e 14h. O Gráfico 1 apresenta as medições de temperatura e radiação global. O Teste 1 foi executado no mês de Agosto.

Gráfico 1: Temperatura e radiação para o primeiro dia do teste 1



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

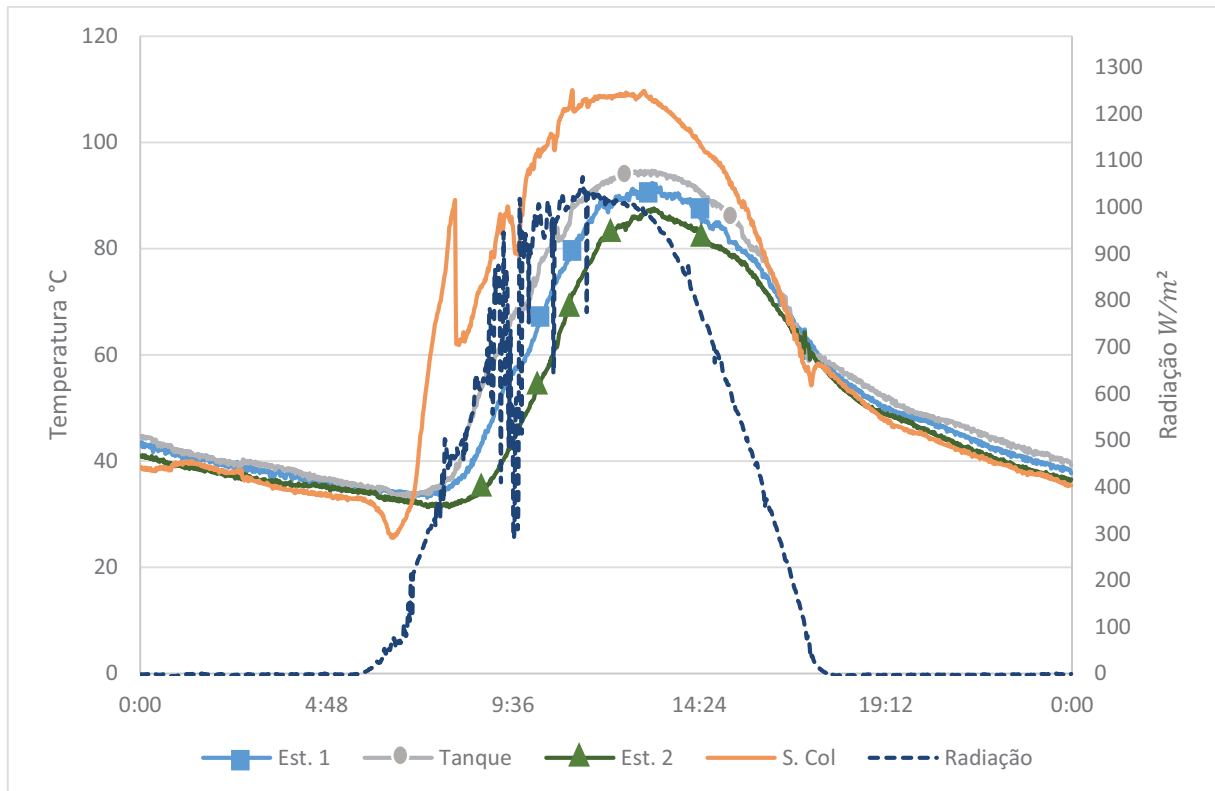
No Gráfico 1, a diferença de temperatura entre a água no tanque e na bandeja do estágio 1 pode ser observado. Essa diferença que influencia diretamente a taxa de evaporação – condensação, teve os valores de  $T_0 - T_1 \approx 7^\circ\text{C}$  (8:00h), de  $T_0 - T_1 \approx 5^\circ\text{C}$  (12 horas), de  $T_0 - T_1 \approx 12^\circ\text{C}$  (19:00 horas), onde  $T_0$  é a temperatura da água no tanque de armazenamento, e  $T_1$  a temperatura da água no primeiro estágio. As temperaturas do primeiro estágio não ultrapassaram  $85^\circ\text{C}$ , e no tanque  $90^\circ\text{C}$ . É possível observar que, por volta das 19 horas, a temperatura da saída do coletor já se encontrava com valores menores que  $40^\circ\text{C}$ , porém, no tanque de armazenamento, a temperatura estava próxima a  $50^\circ\text{C}$ . Este valor é devido ao armazenamento de calor nas partes metálicas do dessalinizador, o que possibilita a continuação da evaporação mesmo sem a incidência de radiação solar nos coletores.

### 6.1.2 Teste 2 – Dois Estágios de Produção

Com dois estágios de produção na torre de dessalinização e abastecimento a cada dois dias, o sistema foi posto em operação durante cinco dias. A maior produção foi registrada no primeiro dia de testes, com 14,5 L de produção diurna e 1,5 L de produção noturna, totalizando 16 L/dia. Pela manhã, entre 8:45h e 11:30h, o Céu estava parcialmente nublado,

porém a tarde foi de Céu com poucas nuvens. A radiação média entre 5:30h e 17:30h foi de  $684,5 \text{ W/m}^2$  e  $978,1 \text{ W/m}^2$  entre 10h e 14h. O Gráfico 2 apresenta as medições de temperatura e radiação.

Gráfico 2: Temperatura e radiação para o primeiro dia do teste 2



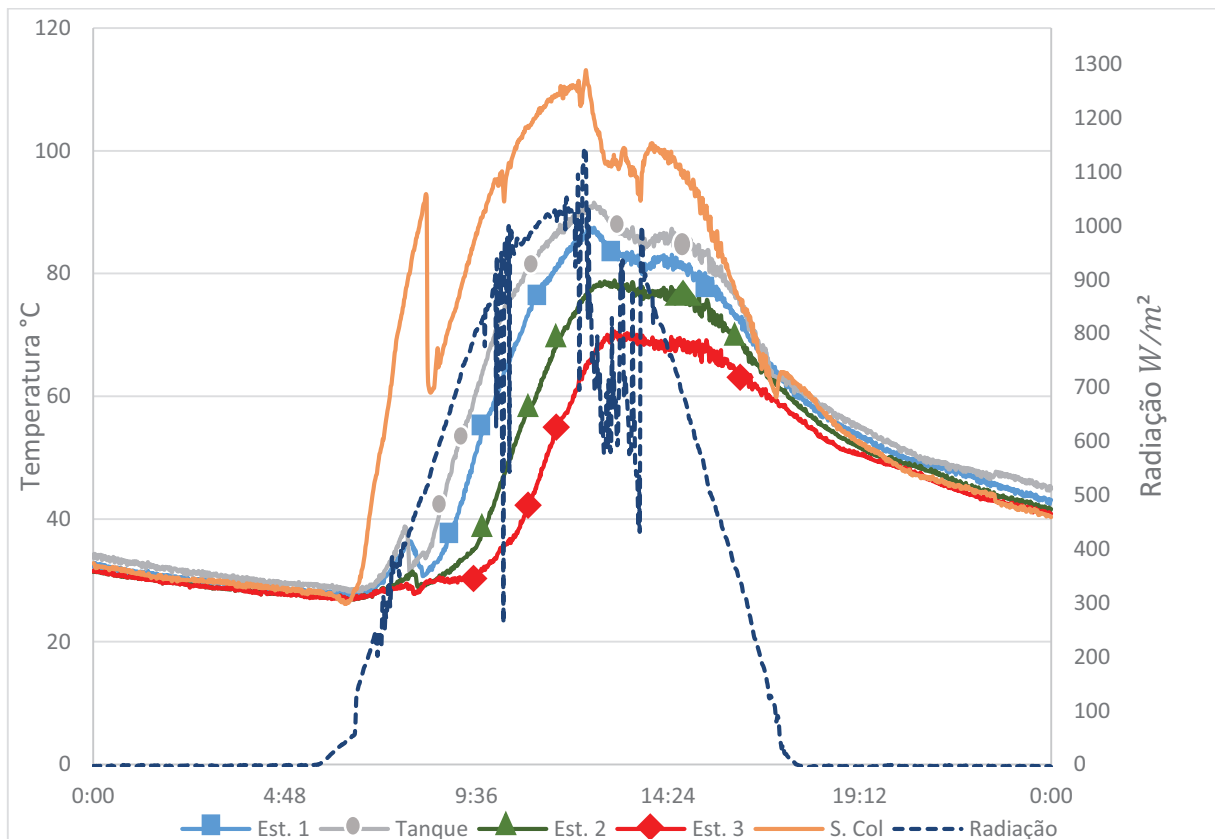
Fonte: Elaborada pelo próprio autor

O Gráfico 2 mostra também que o dessalinizador operou com alguns oscilações de temperatura na saída do coletor, com uma oscilação mais acentuada por volta das 7:50 h, devido ao abastecimento com água salobra (temperatura ambiente). O acionamento da bomba de circulação de óleo também contribui para essa diminuição na temperatura de saída do coletor, visto que há um aumento na velocidade de circulação do óleo nos tubos da placa absorvedora do coletor, e conseqüente, melhoria na transferência de calor do coletor para a torre. As temperaturas máximas alcançadas foram de  $109^{\circ}\text{C}$  na saída do coletor, de  $95^{\circ}\text{C}$  no tanque,  $93^{\circ}\text{C}$  no primeiro estágio e  $87^{\circ}\text{C}$  no segundo estágio. As diferenças de temperatura  $T_1 - T_2 \approx 6^{\circ}\text{C}$ , valor superior à diferença de temperatura entre o tanque e o primeiro estágio,  $T_0 - T_1 \approx 2^{\circ}\text{C}$ . Essa diferença mais elevada facilita o processo de condensação e propicia uma maior produção neste estágio.

### 6.1.3 Teste 3 – Três Estágios de Produção

Com três estágios de produção e abastecimento a cada dois dias, o sistema foi posto em operação durante 5 dias. A maior produção foi registrada no primeiro dia de testes, com um valor de 20,9 L de produção diurna e 1,9 L de produção noturna, totalizando 23 L/dia. Na maior parte deste dia o Céu estava limpo, porém pela manhã entre 10h e 13:30h e pela tarde entre meio dia e 14h o Céu estava nublado. A radiação média registrada foi de  $665,1 \text{ W/m}^2$  entre 5:30h e 17:30 e  $945,8 \text{ W/m}^2$  entre 10h e 14h. O Gráfico 3 apresenta as medições de temperatura e radiação global.

Gráfico 3: Temperatura e radiação para o primeiro dia do Teste 3



Fonte: Elaborada pelo autor

Observa-se uma queda acentuada na saída do coletor por volta das 8:15h, devido ao abastecimento do sistema. A saída do coletor atingiu uma temperatura máxima de 111°C. A Tabela 2 mostra os valores máximos e as diferenças de temperatura nos estágios e tanque de armazenamento.

Tabela 2: Temperatura máxima e suas diferenças nos estágios e tanque no teste 3

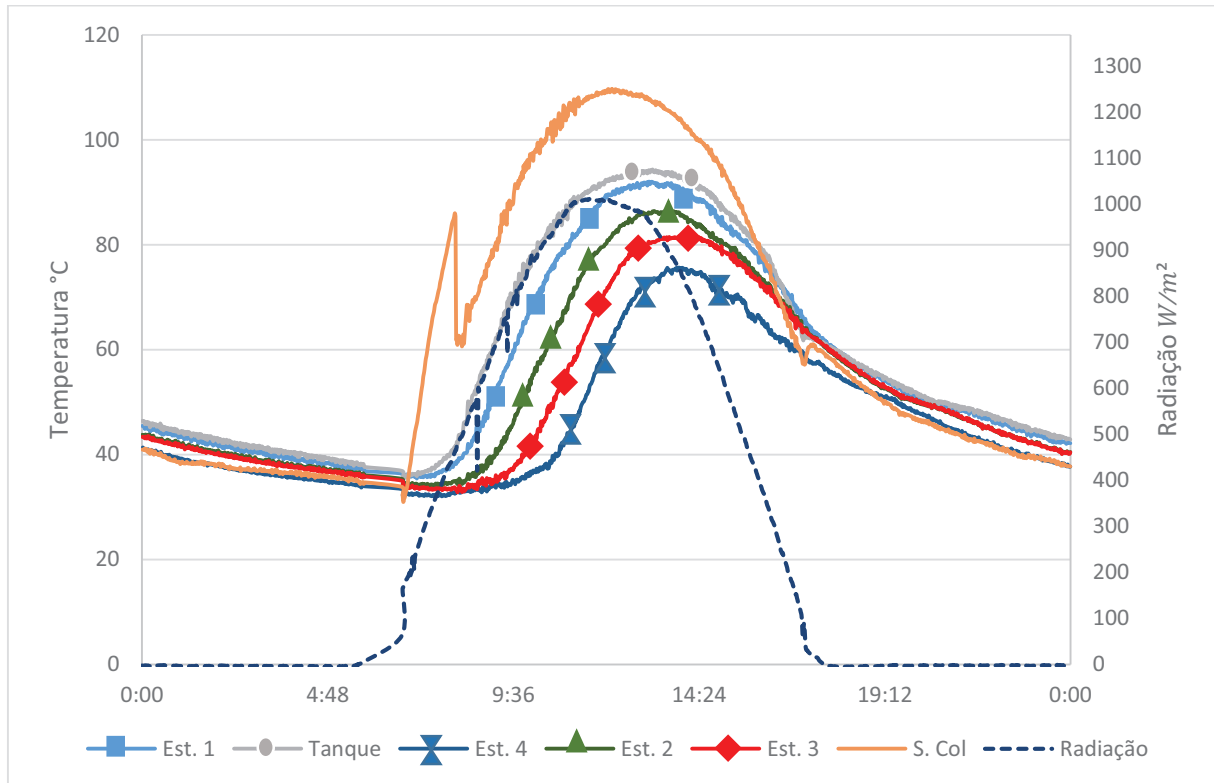
Temperatura (°C)	$\Delta T$ (°C)
$T_0 = 91$	$T_0 - T_1 = 4$
$T_1 = 87$	$T_1 - T_2 = 9$
$T_2 = 78$	$T_2 - T_3 = 8$
$T_3 = 70$	-

Fonte: Elaborada pelo autor

#### 6.1.4 Teste 4 – Quatro Estágios de Produção

Com quatro estágios de produção e abastecimento a cada dois dias, o sistema foi posto em operação durante 5 dias. A maior produção foi registrada no primeiro dia de teste, com 23,7 L de produção diurna e 1,5 L de produção noturna, totalizando 25,2 L/dia. Neste dia o céu estava limpo, sendo registrada um radiação média foi de  $680,4 \text{ W/m}^2$  entre 5:30h e 17:30 e  $979 \text{ W/m}^2$  entre 10h e 14h. O Gráfico 4 apresenta as medições de temperatura e radiação.

Gráfico 4: Temperatura e radiação para o primeiro dia do Teste 4



A Tabela 3 mostra os valores máximos e as diferenças de temperatura nos estágios e tanque de armazenamento.

Tabela 3: Temperatura e suas diferenças nos estágios e tanque no teste 4

Temperatura (°C)	$\Delta T$ (°C)
$T_0 = 94$	$T_0 - T_1 = 3$
$T_1 = 91$	$T_1 - T_2 = 5$
$T_2 = 86$	$T_2 - T_3 = 5$
$T_3 = 81$	$T_3 - T_4 = 6$
$T_4 = 75$	-

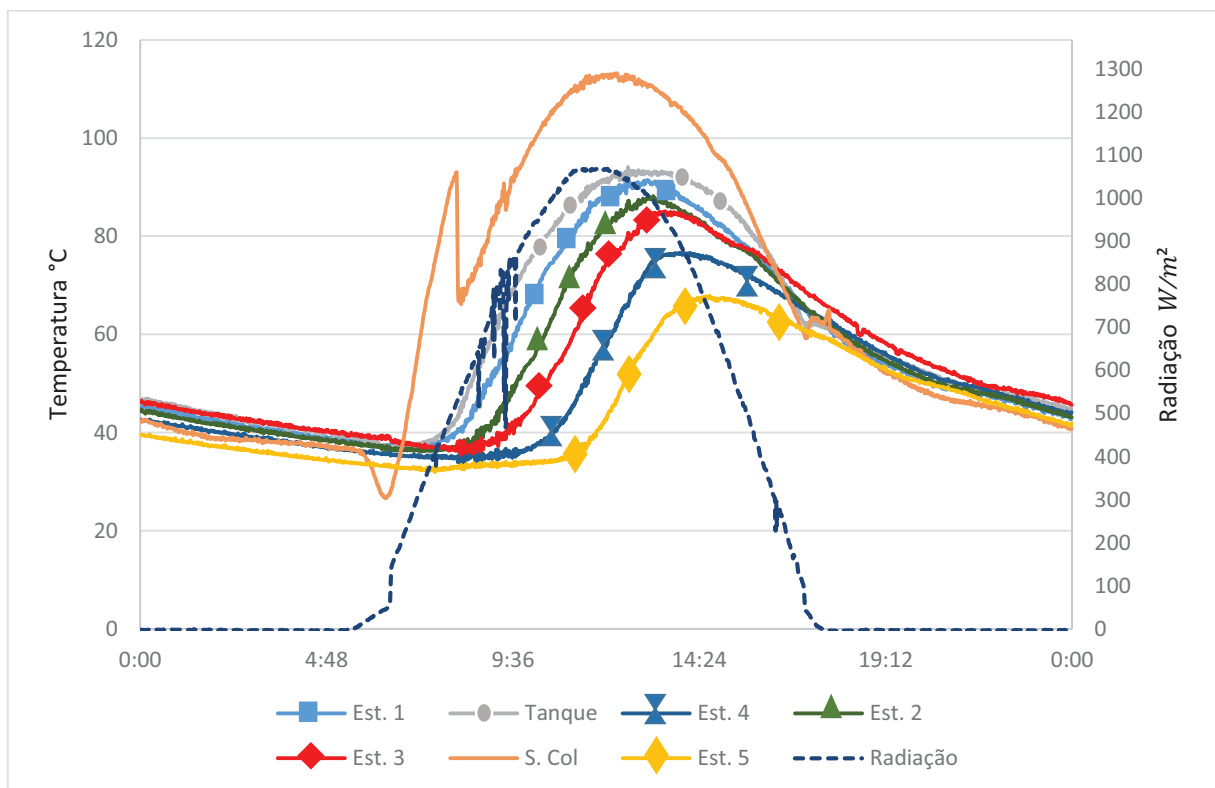
Fonte: Elaborada pelo autor



### 6.1.5 Teste 5 – Cinco Estágios de Produção

Com cinco estágios e abastecimento a cada dois dias, o sistema foi posto em operação durante 5 dias. A maior produção foi registrada no quarto dia de teste, com 29 L de produção diurna e 2 L de produção noturna, totalizando 31 L/dia. Neste dia, o Céu estava limpo, sendo registrada um radiação média foi de  $704,6 \text{ W/m}^2$  entre 5:30h e 17:30 e  $1023,8 \text{ W/m}^2$  entre 10h e 14h. O Gráfico 5 apresenta as medições de temperatura e radiação.

Gráfico 5: Temperatura e radiação para o quarto dia do Teste 5



Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 4 mostra os valores máximos e as diferenças de temperatura nos estágios e tanque de armazenamento.

Tabela 4: Temperatura máxima e suas diferenças nos estágios e tanque no teste 5

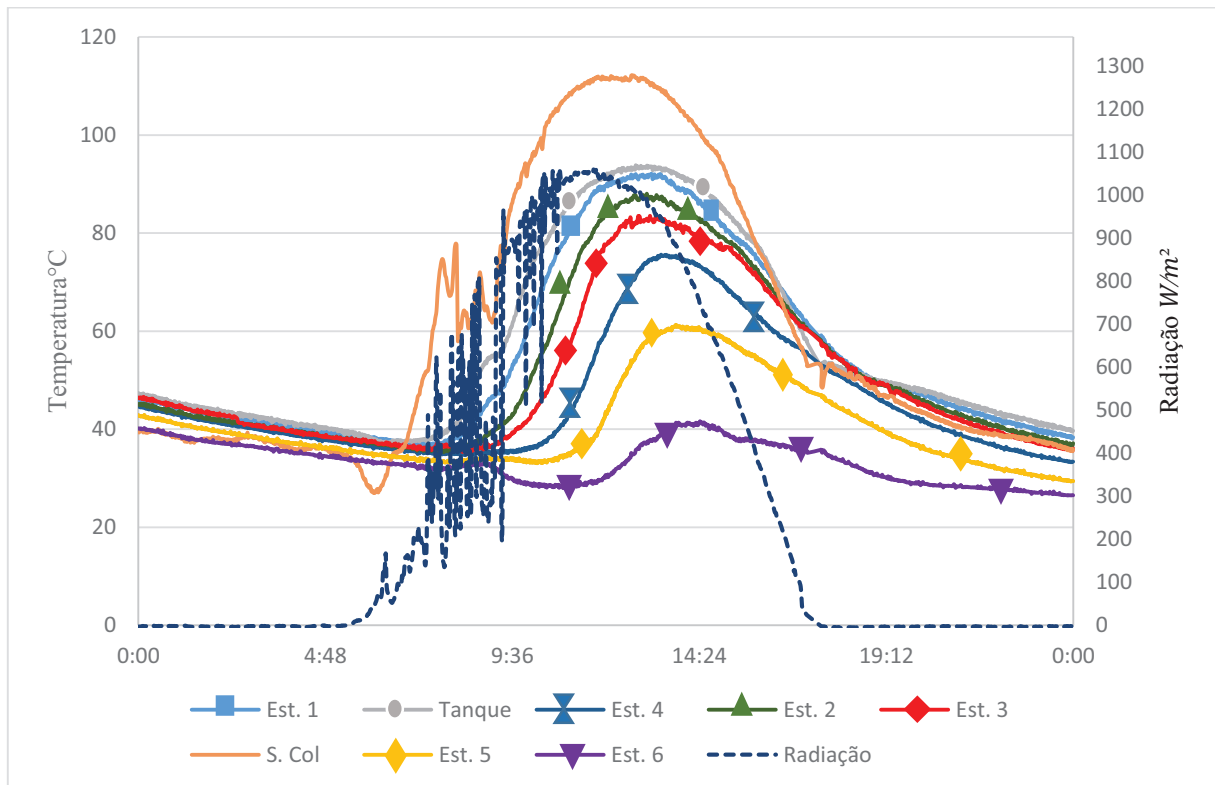
Temperatura (°C)	$\Delta T$ (°C)
$T_0 = 93$	$T_0 - T_1 = 2$
$T_1 = 91$	$T_1 - T_2 = 3$
$T_2 = 88$	$T_2 - T_3 = 4$
$T_3 = 84$	$T_3 - T_4 = 7$
$T_4 = 77$	$T_4 - T_5 = 10$
$T_5 = 67$	-

Fonte: Elaborada pelo autor

### 6.1.6 Teste 6 – Seis Estágios de Produção

Com seis estágios e abastecimento a cada dois dias, o sistema foi posto em operação durante 5 dias. A maior produção foi registrada no quinto dia de teste, com 29,2 L de produção diurna e 2,7 L de produção noturna, totalizando 31,9 L/dia. Neste dia, pela manhã, o céu estava parcialmente nublado, porém a tarde foi de céu com poucas nuvens. A radiação média entre 5:30h e 17:30h foi de  $659,9 \text{ W/m}^2$  e  $992,8 \text{ W/m}^2$  entre 10h e 14h. O Gráfico 6 apresenta as medições de temperatura e radiação

Gráfico 6: Temperatura e radiação para o quinto dia do Teste 6



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

A Tabela 5 mostra os valores máximos e as diferenças de temperatura nos estágios e tanque de armazenamento.

Tabela 5: Temperatura e suas diferenças nos estágios e tanque no teste 6

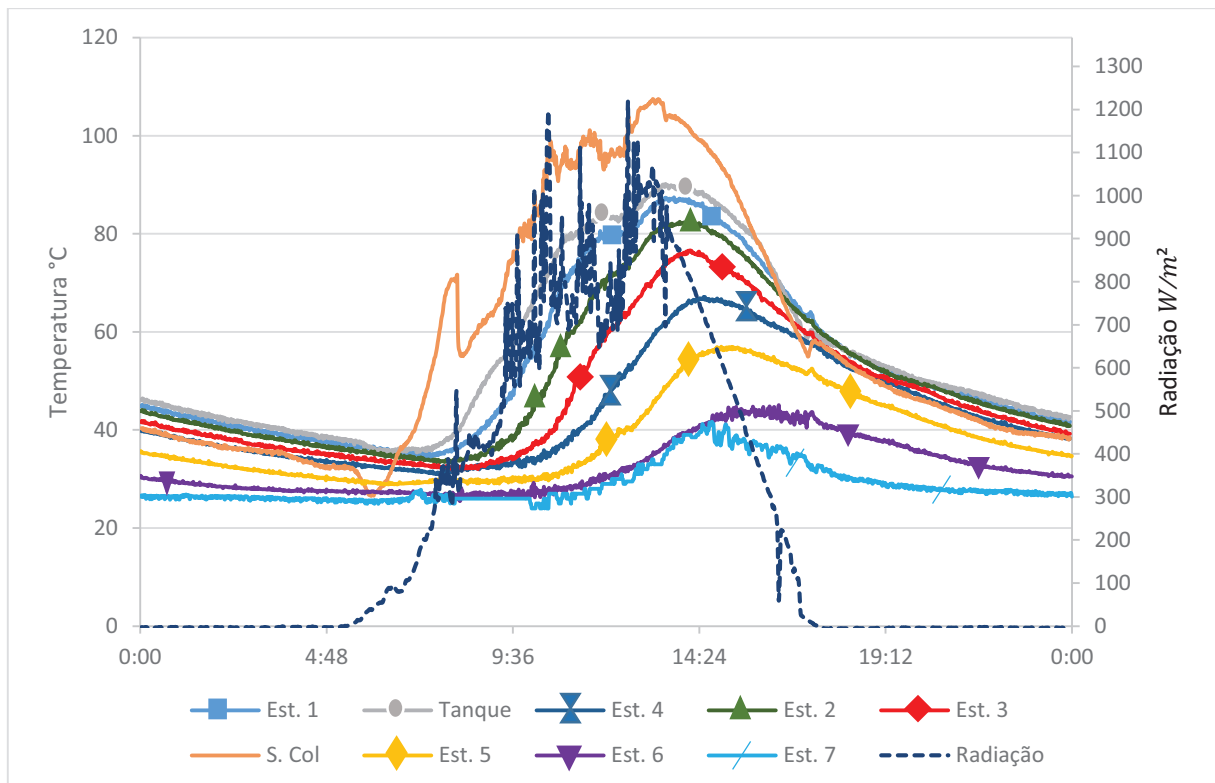
Temperatura (°C)	$\Delta T$ (°C)
$T_0 = 93$	$T_0 - T_1 = 2$
$T_1 = 91$	$T_1 - T_2 = 4$
$T_2 = 87$	$T_2 - T_3 = 4$
$T_3 = 83$	$T_3 - T_4 = 8$
$T_4 = 75$	$T_4 - T_5 = 14$
$T_5 = 61$	$T_5 - T_6 = 20$
$T_6 = 41$	-

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

### 6.1.7 Teste 7 – Sete Estágios de Produção

Com sete estágios e abastecimento a cada dois dias, o sistema foi posto em operação durante 5 dias. A maior produção foi registrada no terceiro dia de teste, com 29,4 L de produção diurna e 3 L de produção noturna, totalizando 32,4 L/dia. Neste dia, entre 9:30h e 13:40h o céu estava parcialmente nublado. A radiação média entre 5:30h e 17:30h foi de  $577,3 \text{ W/m}^2$  e  $853,1 \text{ W/m}^2$  entre 10h e 14h. O Gráfico 7 apresenta as medições de temperatura e radiação

Gráfico 7: Temperatura e radiação para o terceiro dia do Teste 7



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

A Tabela 6 mostra os valores máximos e as diferenças de temperatura nos estágios e tanque de armazenamento.

Tabela 6: Temperatura máxima e suas diferenças nos estágios e tanque no teste 7

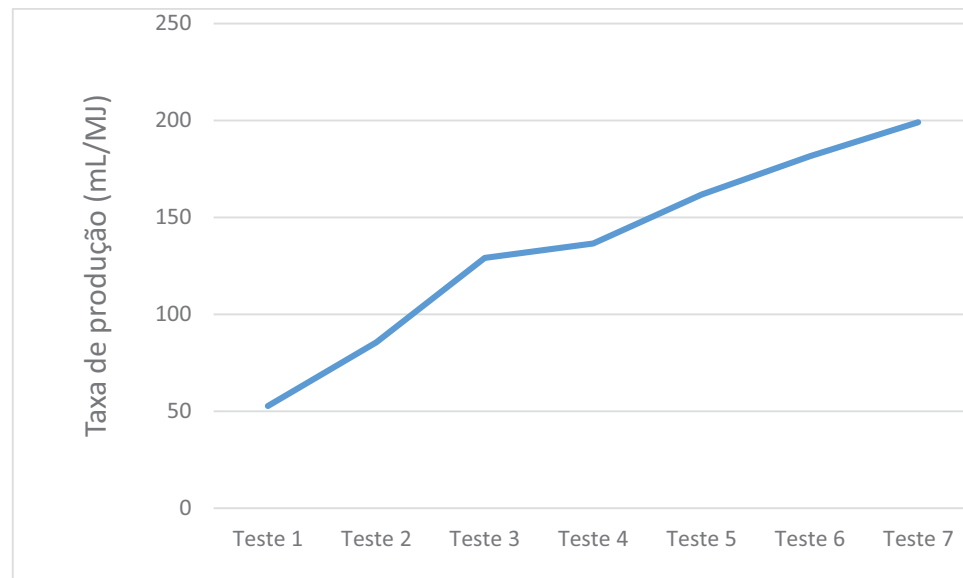
Temperatura (°C)	$\Delta T$ (°C)
$T_0 = 90$	$T_0 - T_1 = 3$
$T_1 = 87$	$T_1 - T_2 = 5$
$T_2 = 82$	$T_2 - T_3 = 6$
$T_3 = 76$	$T_3 - T_4 = 9$
$T_4 = 67$	$T_4 - T_5 = 11$
$T_5 = 56$	$T_5 - T_6 = 12$
$T_6 = 44$	$T_6 - T_7 = 3$
$T_7 = 41$	-

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

### 6.1.8 Avaliação de desempenho da torre

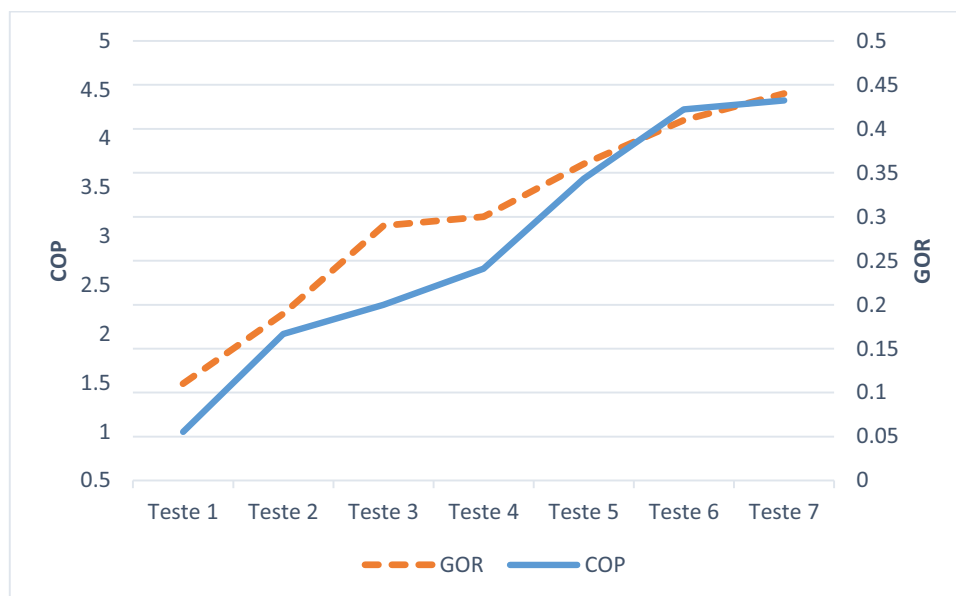
Para avaliar o desempenho da torre de dessalinização com até sete estágios, foi calculado a taxa de produção por energia (mL/MJ), conforme apresentado no Gráfico 8. Os parâmetros GOR (Equação 1) e COP (Equação 2) para cada teste, apresentado no gráfico 9.

Gráfico 8: Taxa de produção (mL/MJ)



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Gráfico 9: COP e GOR para os testes 1 ao 7



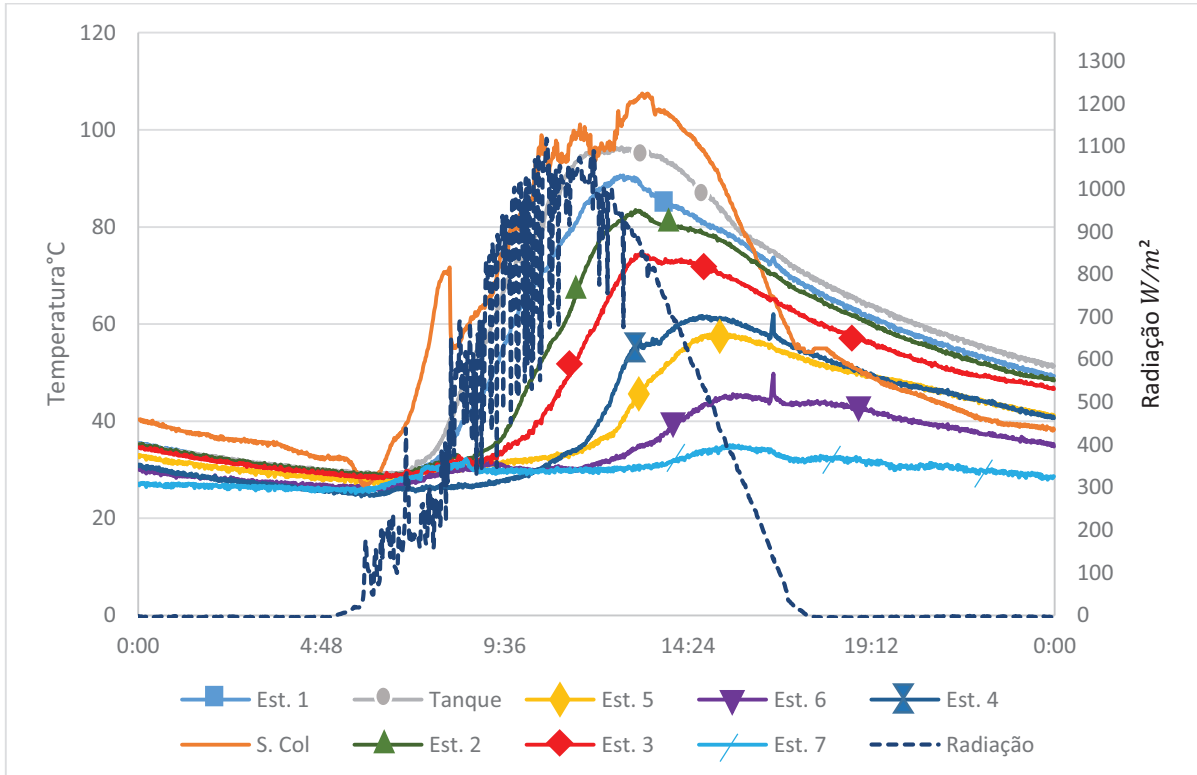
Fonte: Elaborada pelo próprio autor

De acordo com Schwarzer *et al.* (2009), o número ideal de estágios com recuperação de calor varia de 5 a 7 estágios. Dessa forma, como pode ser observado no Gráfico 9, o GOR e o COP do teste com seis estágios (Teste 6) para o teste com sete estágios (Teste 7) é pouco significativo, como pode ser visto pelo formato da curva, tendo aumentado de 4,31 para 4,32 no COP e de 0,41 para 0,44 no GOR. Com esses resultados espera-se que caso o estágio 8 fosse utilizado, a curva tenderia a estabilizar-se. Desse modo, a utilização de oito estágios não seria economicamente viável. Este comportamento deve-se a capacidade térmica desse sistema, visto que a energia absorvida nos coletores possui um valor máximo para o conjunto, de modo que se fossem acrescentados mais estágios não haveria mais produção significativa.

### 6.1.9 Teste 8 – Abastecimento contínuo

Com sete estágios de produção e abastecimento contínuo da torre, o sistema foi posto em operação durante 5 dias. A maior produção foi registrada no segundo dia de testes, com 30,4 L de produção diurna e 3,6 L de produção noturna, totalizando 34 L/dia. Neste dia, pela manhã, o Céu estava parcialmente nublado. A radiação média entre 5:30h e 17:30h foi de 600,2  $W/m^2$  e 915,8  $W/m^2$  entre 10h e 14h. O Gráfico 10 apresenta as medições de temperatura e radiação para este dia de teste.

Gráfico 10: Temperatura e radiação para o segundo dia do Teste 8



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

A Tabela 7 mostra os valores máximos e as diferenças de temperatura nos estágios e tanque de armazenamento.

Tabela 7: Temperatura máxima e suas diferenças nos estágios e tanque no teste 8

Temperatura (°C)	$\Delta T$ (°C)
$T_0 = 96$	$T_0 - T_1 = 6$
$T_1 = 90$	$T_1 - T_2 = 7$
$T_2 = 83$	$T_2 - T_3 = 9$
$T_3 = 74$	$T_3 - T_4 = 13$
$T_4 = 61$	$T_4 - T_5 = 4$
$T_5 = 57$	$T_5 - T_6 = 8$
$T_6 = 49$	$T_6 - T_7 = 15$
$T_7 = 34$	-

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Para se comparar os métodos de abastecimento, a Tabela 8 apresenta os valores dos parâmetros de desempenho do Teste 7 (sete estágios e abastecimento a cada dois dias) e Teste 8 (sete estágios e abastecimento contínuo).

Tabela 8: Parâmetros de desempenho dos Testes 7 e 8

Teste	Número de testes	Rad. global média ( $W/m^2$ )	Produção máxima (L)	Taxa de produção (mL/MJ)	GOR	COP
Teste 7	5	577,7	32,4	196,5	0,44	4,32
Teste 8	5	600,2	34,0	198,1	0,44	4,41

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

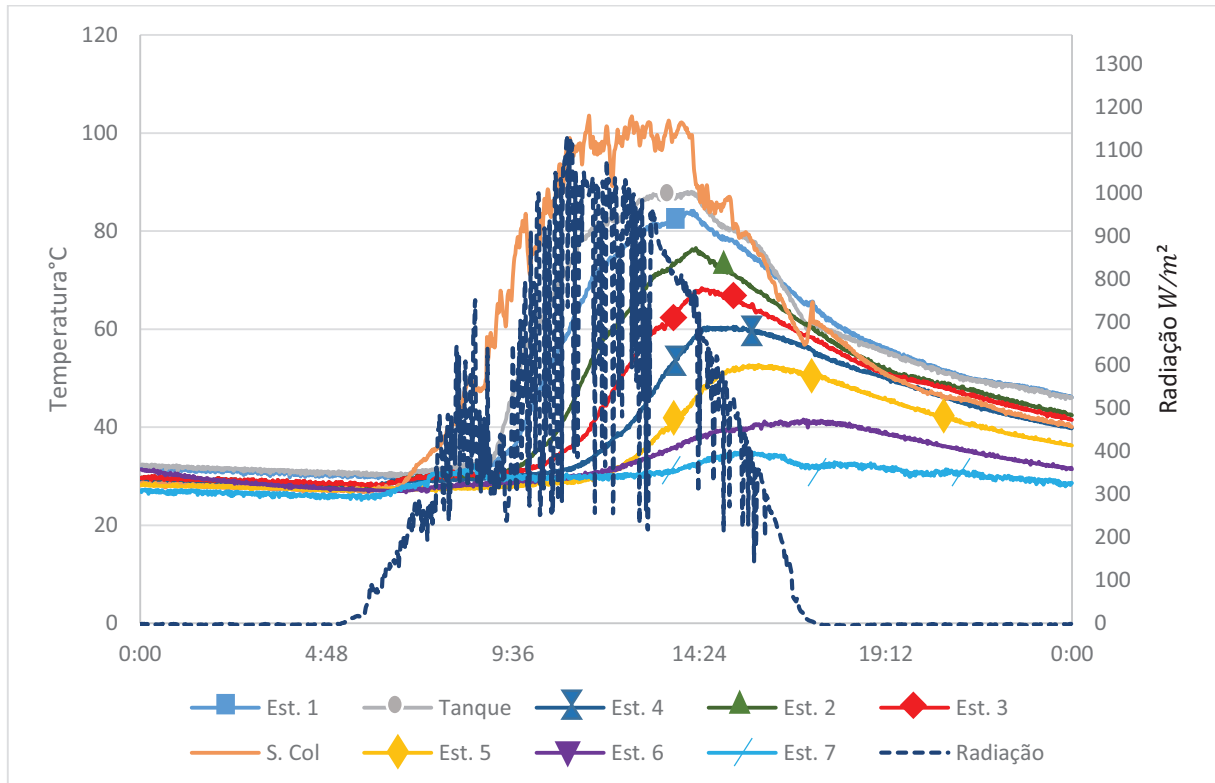
O abastecimento contínuo mostrou-se um pouco mais apropriado para operação do dessalinizador, haja vista o Teste 8 ter apresentado uma taxa de produção por energia (mL/MJ) e COP um pouco mais elevados. Esta forma de abastecimento, permite que o sistema seja abastecido por um período de tempo ininterrupto. Uma parada do sistema seria necessária para limpeza das bandejas (2 a 3 meses). Além disto, necessita-se apenas de uma fonte contínua de água salobra abastecendo a uma vazão média aproximadamente igual à produção média diária do sistema somado as perdas de vapor para o ambiente.

#### 6.1.10 Teste 9 - Uso de um Refletor Plano

Com sete estágios de produção, abastecimento a cada dois dias, três coletores instalados em paralelo e utilizando um refletor plano com dimensões (comprimento x largura) 2 m x 1 m; fabricada com perfis quadrados de alumínio e uma chapa de aço inoxidável espelhada, o sistema foi posto em operação durante 4 dias. O uso do refletor é uma alternativa para aumento da radiação incidente sobre o coletor. A maior produção foi registrada no segundo dia de teste, no valor 30,6 L (26 litros diurna e 4,6 litros noturna). Neste dia, o Céu estava parcialmente nublado, sendo registrada uma radiação média entre 5:30h e 17:30h foi de 640,5  $W/m^2$  e 985,2  $W/m^2$  entre 10h e 14h. . O Gráfico 11 apresenta as medições de temperatura e radiação para este dia de teste.



Gráfico 11: Temperatura e radiação para o segundo dia do Teste 9



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

A Tabela 9 mostra os valores máximos e as diferenças de temperatura nos estágios e tanque de armazenamento.

Tabela 9: Temperatura máxima e suas diferenças nos estágios e tanque no teste 9

Temperatura (°C)	$\Delta T$ (°C)
$T_0 = 88$	$T_0 - T_1 = 4$
$T_1 = 84$	$T_1 - T_2 = 8$
$T_2 = 76$	$T_2 - T_3 = 8$
$T_3 = 68$	$T_3 - T_4 = 7$
$T_4 = 61$	$T_4 - T_5 = 9$
$T_5 = 52$	$T_5 - T_6 = 11$
$T_6 = 41$	$T_6 - T_7 = 6$
$T_7 = 35$	-

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Para se comparar os resultados dos testes com o dessalinizador operando com 7 estágios de produção, abastecimento a cada dois dias, com refletor (Teste 9) e sem o uso de refletor (Teste 7), a Tabela 10 foi elaborada e apresenta os parâmetros de desempenho.

Tabela 10: Parâmetros de desempenho dos Testes 7 e 9

Teste	Número de testes	Rad. global média (W/m <sup>2</sup> )	Produção máxima (L)	Taxa de produção (mL/MJ)	GOR	COP
Teste 7	5	577,7	32,4	196,5	0,44	4,32
Teste 9	4	533,7	30,6	204,0	0,46	4,49

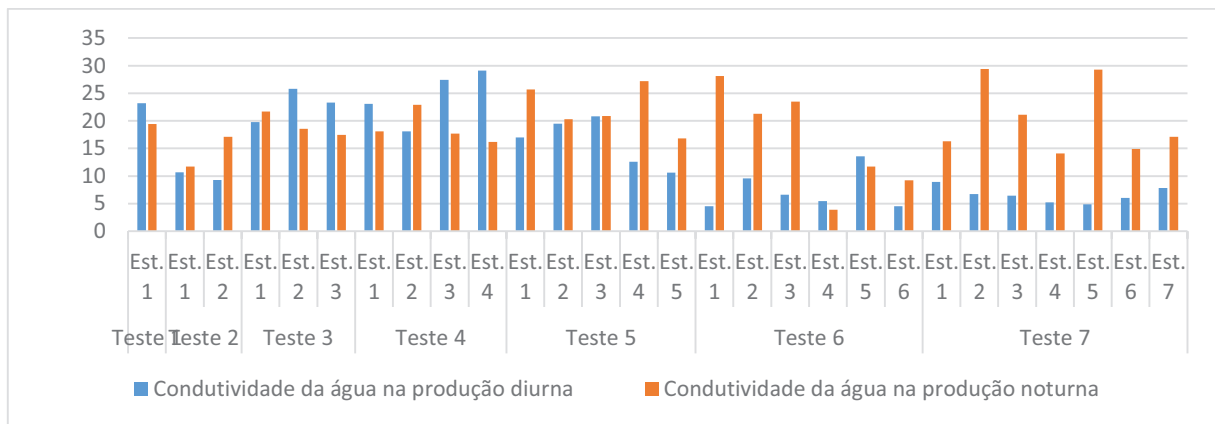
Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Na análise da taxa de produção por energia (mL/MJ) observa-se que o sistema apresentou melhor desempenho com o uso de refletor, tendo sua taxa aumentada 3,8%. O GOR foi maior para o Teste 9, com um aumento de 4,5% e o COP de 3,9%. Portanto, com a utilização do refletor houve um pequeno aumento da eficiência térmica do sistema (GOR), apesar da presença de grande quantidade de nuvens durante a semana do Teste 9, terceira semana de novembro, pode ser verificado no Gráfico 11. Além disso, o refletor possui área equivalente à de um coletor e refletia sobre o coletor da extremidade do arranjo.

## 6.2 Análise da condutividade elétrica

Para que fosse medida a concentração de íons dissolvidos na água, foram realizadas medições da condutividade elétrica da água coletada em cada estágio para cada teste de produção. O Gráfico 12 apresenta as medições de condutividade elétrica nos dias de maior produção para cada um dos sete primeiros testes.

Gráfico 12: Condutividade elétrica da água dessalinizada dos testes 1 ao 7



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Observa-se que a salinidade da água produzida em cada teste é baixa, com valores inferiores a  $30 \mu S$ , quando comparada aos padrões de água potável ( $50$  a  $200 \mu S$ ). Portanto, o processo de dessalinização foi efetivo, pois reduziu o valor da condutividade elétrica da água bruta, ou seja, a concentração de sais na água diminuiu. Como os valores encontrados nos experimentos foram todos abaixo de  $30 \mu S$ , faz-se necessário a adição de sais minerais para adequá-la ao consumo humano.

Não foram realizados testes bacteriológicos nas águas brutas e dessalinizadas. Porém, espera-se uma redução significativa nas taxas de coliformes, tendo-se como base os resultados apresentados por (LIMA, 2000) e (COUTINHO, 2003), nos quais foi verificada ausência de coliformes após o processo de dessalinização. Esse resultado é decorrente da elevada temperatura nas bandejas e dificuldade de arraste dos microrganismos.

## 7 CONCLUSÃO

O dessalinizador apresentou uma produção máxima de 34 litros (Teste 8), taxa de produção 196,5 *ml/MJ* e alcançou uma temperatura de 96 °C no tanque de armazenamento. Verifica um desempenho próximo ao dessalinizador apresentado por Dutra (2016), que obteve temperatura de 98 °C no tanque, uma produção máxima de 42 litros e taxa de produção 195,5 *ml/MJ*. Há duas diferenças significativas em relação ao trabalho deste autor. Dutra (2016) utilizou coletores seminovos e água como fluido de trabalho. Esses coletores para água não foram usados no presente trabalho porque tornariam inviável seu uso com água novamente, após terem sido utilizados com óleo como fluido de trabalho.

Com relação à análise do sistema, os testes de produção mostraram que a operação com sete estágios apresentou um ganho em produção, mas, de acordo com os Gráficos 8 e 9, as curvas de taxa de GOR e COP mostraram que a operação com oito estágios não seria viável, pelo ganho em produção e capacidade térmica do sistema.

Quanto à forma de abastecimento com o sistema operando com sete estágios de produção, o processo contínuo apresentou valores de taxa de produção por energia absorvida um pouco melhor, verificando um aumento em relação ao abastecimento a cada dois dias de 0,8%. Além disso, o abastecimento contínuo apresentou-se vantajoso em sua operação, pois opera de forma continuada, não sendo necessário a parada do sistema para reabastecimento. Entretanto, uma desvantagem nesse tipo de abastecimento é a necessidade de um profissional especializado para regular a vazão da água que abastece o sistema.

Com sete estágios e utilizando o refletor em apenas um coletor, o sistema apresentou um aumento na taxa de produção absorvida. Neste caso, é necessário apenas que o refletor seja mudado de posição ao meio dia e ao final do dia, de forma que não proporcione sombra sobre os coletores.

Com os resultados de produção alcançados, concluiu-se que o sistema pode representar uma fonte de água dessalinizada residencial e/ou institucional em comunidades que apresentem um bom nível de radiação solar e recursos de água salgada.

O uso de uma bomba de óleo com acionamento fotovoltaico possibilitaria a integração do dessalinizador com outros equipamentos térmicos (aquecedores de água, fogões solares, refrigeradores entre outros), através de um único circuito primário de circulação de óleo. Além disso, viabilizaria a instalação em regiões onde não há rede elétrica disponível, uma vez que a utilização dos painéis fotovoltaicos independem da rede elétrica.

## REFERÊNCIAS

ADHIKARI, R.S.; KUMAR, A.; SOOHA, G. D. Simulation studies on a multi-stage stacked tray solar still. **Solar Energy**, v. 54, p. 317-325, 1995.

ALVES, R. D. B. **Sistema de captação de energia solar para uma nova torre de dessalinização térmica com recuperação de calor**. 2009. 56p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) UFC, Fortaleza.

BADRAN, O. O. Experimental study of the enhancement parameters on a single slope solar still productivity. **Desalination**, Amman, Jordânia, v. 209, p. 136-146, 2007.

BAUMGARTNER, T.; JUNG, D.; KOSSINGER, F. Multi-effect ambient pressure desalination with free circulation of air. Solar World Congress. **Proceedings of the Biennial Congress of the International Solar Energy Society**. Colorado, p. 2259-2263, 1991.

CAENF – COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DE NOVA FRIBURGO. Disponível em: <http://www.grupoaguasdobrasil.com.br/aguas-novafriburgo/>. Acesso em janeiro de 2016.

CRESESB. **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf)  
Acesso em: Março de 2015

COOPER, P. I. The maximum efficiency of single-effect solar stills. **Solar Energy**, v. 15, p. 205-217, 1973.

COSTA, I. S. **Novos protótipos de dois dessalinizadores térmicos para operação no fogão solar com aquecimento indireto.** 2013. Dissertação (Mestrado em Eng. Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

COUTINHO, L. D. E. **Protótipo experimental de um dessalinizador solar com recuperação de calor.** 2003. 90 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química – UFC, Fortaleza.

CHENDO, M. A. C.; EGARIEWE, S. U. Effects of pebbles and wick on the performance of a shallow basin solar still. Solar World Congress. **Proceedings of the Biennial Congress of the International Solar Energy Society.** Colorado, p. 2264-2269, 1991.

DEPINÉ, H. **Dessalinização térmica da água do mar com recuperação dos sais.** 2012. 182 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2012.

DERONZIER, J. C., LAURO, R.; PLOYART, R. Solar desalination: Prototype “pithon” a special solar multiple-effect distiller. **Desalination**, v. 39, p. 117-123, 1981.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes.** 4. ed, John Wiley & Sons, 2013.

DUTRA, K. H. **MONTAGEM E TESTE DE UM NOVO ARRANJO DO DESSALINIZADOR SOLAR TÉRMICO DE MÚLTIPLOS ESTÁGIOS COM RECUPERAÇÃO DE CALOR.** 2016. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, CCT, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

FERNÁNDEZ, J. L.; CHARGOY, N. Multi-stage, indirectly heated solar still. **Solar Energy**, v. 44, n. 4, p. 215-223, 1990.

FOCUSOLAR. Disponível em: <http://focusolar.com.br/potencial-solar-brasileiro/> Acesso 14 março de 2016

GRASSI, M. T. Águas do planeta Terra. In: GRASSI, M. T. **Cadernos temáticos de química nova na escola**. 2001.

HERCULANO, R. T. **Protótipo de panela-dessalinizador circular para fogão solar com aquecimento direto**. 2015. 65 f. Dissertação (Mestrado em Eng. Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

KALOGIROU, S. Survey of solar desalination system and system selection. **Energy**, v. 22 (1), p. 69-81, 1997.

LIMA, C. A. **Dessalinizador solar térmico com recuperação de calor – análise térmica e resultados experimentais**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Saneamento Ambiental, UFC. 2000.

LIU, ZHEN-HUA; GUAN, HONG-YANG; WANG, GUO-SHAN. Performance optimization study on an integrated solar desalination system with multi-stage evaporation/heat recovery processes. **Energy**, v. 76, p. 1001-1010, 2014.

LÖF, G.; ELBLING, J.A.; BLOEMER, J.W. Energy balances in solar distillers. **Alche Journal**, v.7, n.4, p.641-649, 1961.

MARINHO, F. J. L.; UCHOA, T. R.; LEITE, S. F.; AGUIAR, R. L.; NASCIMENTO, A. S. **Dessalinizador solar associado a coletor de água de chuvas para fornecer água potável**. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v. 11, n. 20, p. 68-82, 2015.

MENDONÇA, S. P.; SILVA, M. E. V.; MENDONÇA, O. A. **Aperfeiçoamento Tecnológico de um Dessalinizador Solar com Recuperação de Calor**. 2014. Disponível em: <<http://www.prppg.ufc.br/eu/2014/index.php/trabalhos-aceitos/por-titulo>>. Acesso em: 23 jan. 2017.

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

PINHEIRO, F. N. **Desenvolvimento de um novo protótipo do dessalinizador térmico com recuperação de calor acionado por fonte controlada de energia elétrica**. 2013. 73 f. Dissertação (Mestrado em Eng. Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

PINHEIRO, J. V. G. **Estudo experimental de um dessalinizador solar acionado por circuito de óleo térmico**. 2014. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – UFC, Fortaleza.

PORTA, M. A.; CHARGOY, N.; FERNANDEZ, J. L. Extreme operating conditions in shallow solar stills. **Solar Energy**, v. 61, n.4, p. 279-286, 1997.

PRACIANO, P. E. B. S.; SILVA, M. E. V.; DUTRA, K. H.; PEIXOTO, S. T.; FILHO, F. E. L. U.; RODRIGUES, F. P.; SAKUMOTO, A. C. **Novas Bandejas Para um Dessalinizador Solar Com Recuperação de Calor**. 2009. Disponível em: <<http://www.prppg.ufc.br/eu/2009/index.php/trabalhos-aceitos/por-titulo>>. Acesso em: 23 jan. 2017.

PRACIANO, P. E. B. S. **Projeto e fabricação de um tanque de armazenamento de água para um sistema de dessalinização solar térmica**. 2009. 47 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

PROCTOR, D. The use of waste heat in a solar still. **Solar Energy**, v. 14, p. 433-449, Great Britain: Pergamon Press, 1973.

RODRIGUES, F. P. **Desempenho de uma torre de recuperação de calor com canais sintéticos de poliuretano para um dessalinizador solar térmico**. Dissertação de Mestrado, Fortaleza, p. 69f, 2010.



RODRIGUES, A. P. **Estudo experimental de um dessalinizador térmico com aquecimento controlado**. 2011. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – UFC, Fortaleza.

SCHWARZER, K.; SILVA, E. V.; HOFFSCHMIDT, B.; SCHWARZER, T.A New solar desalination system with heat recovery for decentralized drinking water production. **Desalination**, v. 248, p. 204-211, 2009

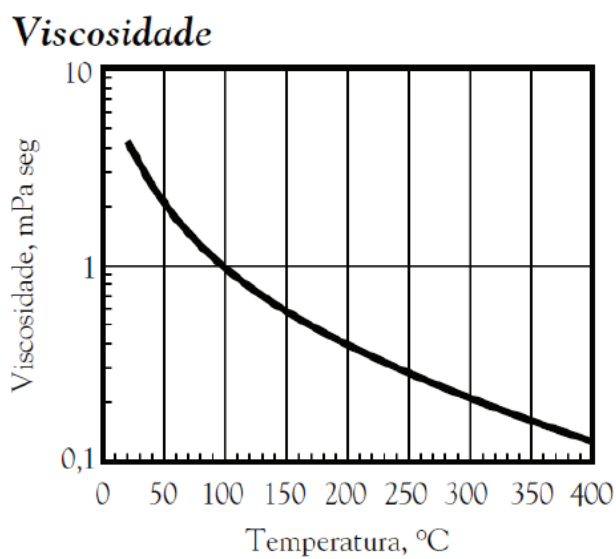
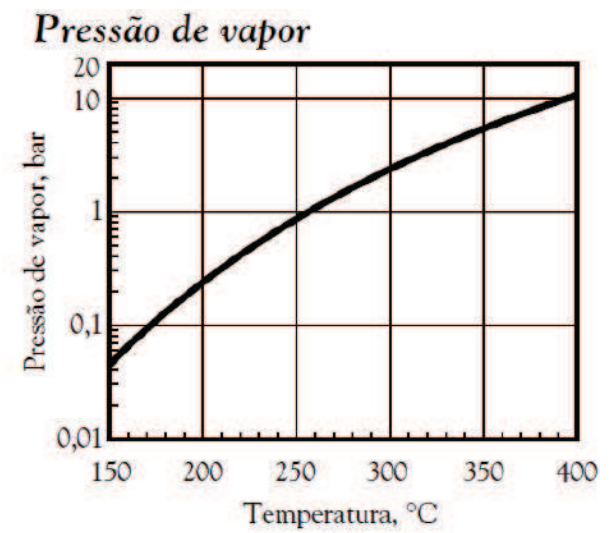
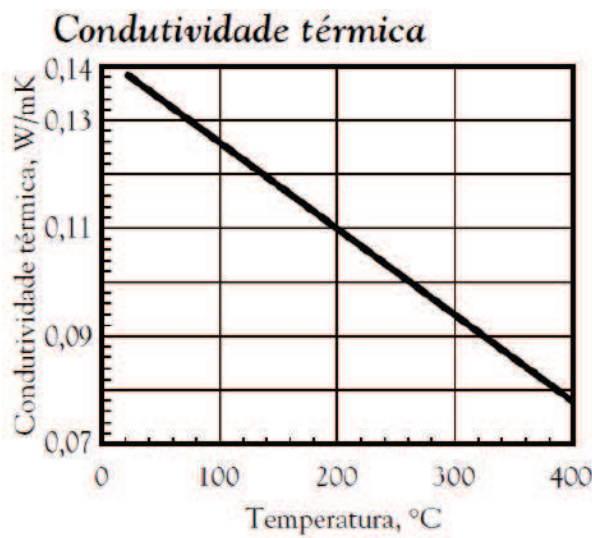
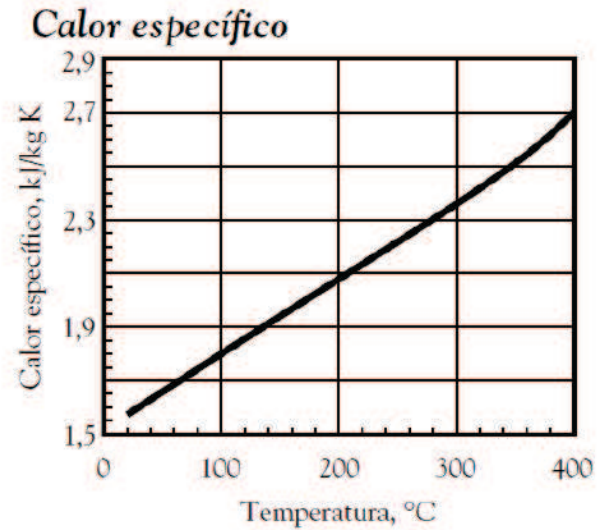
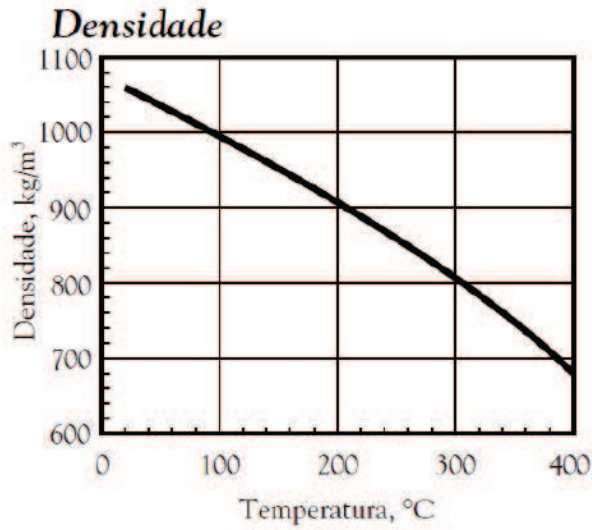
SCHWARZER, K.; EUGENIA, M.; FABER, C.; MULLER, C. **Solar thermal desalination system with heat recovery**. *Desalination*, v. 137, p. 23-29, 2001.

STUDIOEQUINÓCIO. **O Mercado Mundial e Brasileiro de Aquecedores Solares**. Disponível em: <http://slideplayer.com.br/slide/1875374/>. Acesso 09 Março 2016

SOUZA, L. F. **Análise Térmica de um Dessalinizador de Múltiplos Efeitos Para Obtenção de Água Potável**. 2002. 56p. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2002.

UNEP – United Nations Environment Programme. Disponível em [www.unep.or.jp/.../techrub-8d/desalination.asp](http://www.unep.or.jp/.../techrub-8d/desalination.asp). Acessado em Março de 2016.

## ANEXO A – CARACTERÍSTICAS DO ÓLEO DOWTHERM A



## ANEXO B – COLETORES SOLARES PLANOS

O coletor solar de placa plana é um tipo especial de trocador de calor que transforma a radiação solar em energia térmica. Podem ser projetados para aplicações que exigem o fornecimento de energia a temperaturas moderadas, em torno de 100°C acima da temperatura ambiente. Além de absorver tanto a radiação solar direta quanto difusa, não necessitam de acompanhamento do sol, e exigem pouca manutenção (DUFFIE & BECKMAN, 2013).

O coletor solar placa plana, apresentado na Figura 23, possui basicamente quatro componentes principais: cobertura transparente, placa absorvedora, isolamento térmico e a estrutura de suporte.

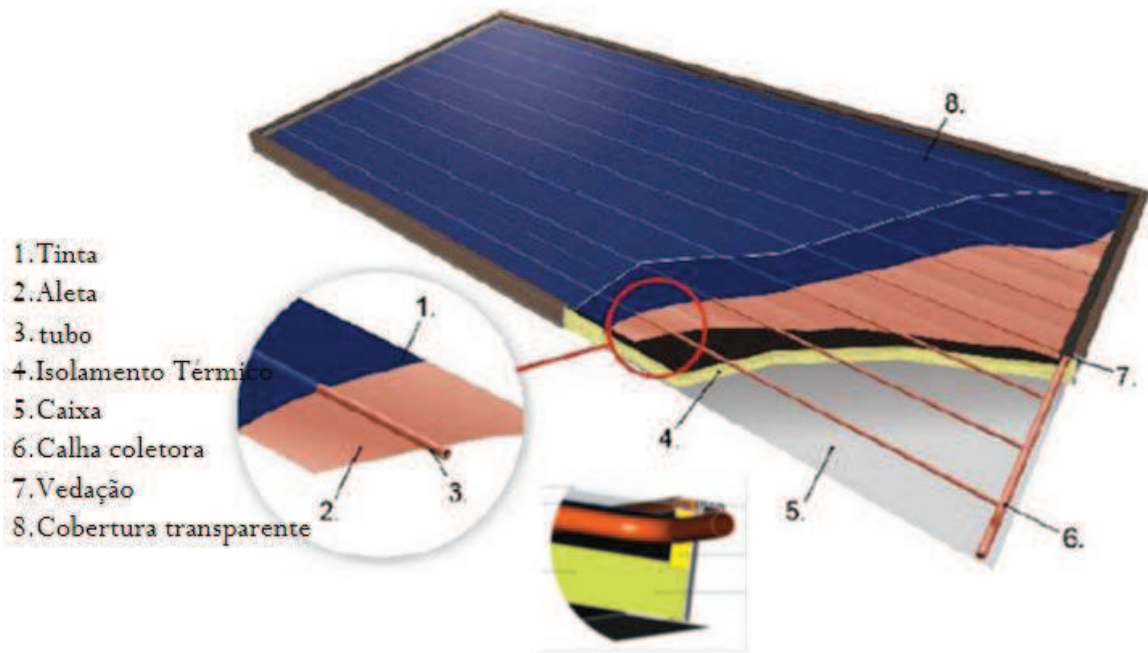
A placa absorvedora ou aleta, geralmente pintada de preto na superfície exposta a radiação solar, é responsável pela absorção da radiação solar incidente e transmissão do calor para o fluido de trabalho.

Na cobertura transparente normalmente é utilizado vidro pra cobrir o coletor e evitar a maior parte das perdas por convecção, além do que produz um efeito de estufa dentro do coletor. O vidro reflete parte da radiação térmica proveniente da placa absorvedora.

O isolamento térmico é responsável por reduzir as perdas de calor para o ambiente. Para coletores com uma maior eficiência, que possuem superfície seletiva, normalmente são usadas mantas de lã de vidro ou lã de rocha, capazes de suportar temperaturas de 300°C e 500°C, respectivamente.

O suporte do coletor ou caixa é a parte responsável por suportar e proteger os componentes que compõem o coletor solar, e pode ser feita de plástico, metal ou madeira.

Figura B.1: Coletor solar plano

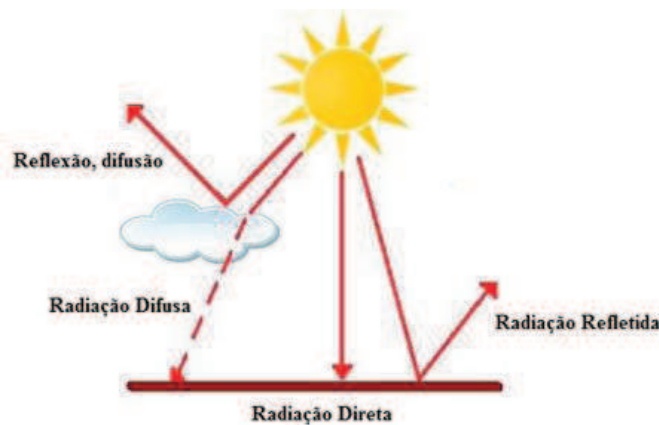


Fonte: Studio Equinócio (2015)

## ANEXO C – RADIAÇÃO SOLAR

A radiação solar é uma variável de fundamental importância em estudos climáticos e projetos que tenham como objetivo o aproveitamento da energia solar. O valor da radiação solar medida fora da atmosfera terrestre em uma superfície perpendicular ao raio incidente é assumido com uma constante igual a  $1367 \text{ W/m}^2$ . Entretanto ao atravessar a atmosfera sofre dispersão, reflexão e outros fenômenos. Diferentemente dos raios solares extraterrestres que são paralelos, os raios terrestres possuem duas componentes, que são apresentadas na Figura 24: a direta e a difusa.

Figura C.1: Radiação solar atravessando a atmosfera



Fonte: Focusolar (2015)

A radiação solar direta é a parte mais importante para a geração solar térmica, onde não há reflexões, ou seja, é a parte recebida diretamente do sol. É muito variável ao longo do dia, devido às condições atmosféricas. Já a radiação difusa é dispersa e atenuada pela reflexão nos componentes atmosféricos, tais como: nuvens, poeira, vapor d'água e outros. A radiação global é, então, a soma das duas componentes, ou seja,

$$E_g = E_r + E_f \quad (\text{C.1})$$

Onde,  $E_g$  é a radiação global,  $E_r$  é a radiação direta e  $E_f$  é a radiação difusa.

A medição dos dados solares tem como objetivo a obtenção experimental do valor instantâneo da irradiância ou irradiação ao longo do tempo (minuto, hora, dia ou ano). São utilizados, comumente, dois instrumentos para medição da radiação solar: o piranômetro e o pireliômetro.

O piranômetro termoeletrico, Figura 25, mede a irradiância global normalmente no plano horizontal. Ele tem como sensor uma termopilha colocada no interior de duas semiesferas

de vidro concêntricas. A termopilha é construída com múltiplos termopares em série, com a junção quente enegrecida faceando o sol e a junção fria na parte inferior (CRESESP, 2014)

Figura C.2 : Piranômetro termoelétrico



Fonte: CRESESP (2014)

O pireliômetro, Figura 26, é um instrumento utilizado para medir a irradiância direta com incidência normal à superfície, podendo ser com rastreamento solar em 1 ou 2 eixos. Bloqueia-se a radiação difusa instalando o sensor termoelétrico dentro do tubo de colimação, com paredes enegrecidas e apontado diretamente ao Sol. O pireliômetro apresenta uma pequena abertura de forma para visualizar apenas o disco solar e a região vizinha denominada circunsolar (CRESESP, 2014).

Figura C.3: Pireliômetro instalado em um rastreador



Fonte: CRESESP (2014)



## ANEXO D – APARELHOS DE MEDIÇÃO

Figura D.1: Condutivímetro



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Figura D.2: Datalogger



Fonte: Elaborada pelo próprio autor



Figura D.3: Piranômetro na mesma inclinação do coletor



Fonte: Elaborada pelo próprio autor