



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

KAIO HEMERSON DUTRA

**MONTAGEM E TESTE DE UM NOVO ARRANJO DO DESSALINIZADOR SOLAR
TÉRMICO DE MÚLTIPLOS ESTÁGIOS COM RECUPERAÇÃO DE CALOR**

FORTALEZA

2016

KAIO HEMERSON DUTRA

MONTAGEM E TESTE DE UM NOVO ARRANJO DO DESSALINIZADOR SOLAR
TÉRMICO DE MÚLTIPLOS ESTÁGIOS COM RECUPERAÇÃO DE CALOR

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.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha.

Coorientadora: Prof^a. Maria Eugênia Vieira da Silva, *Ph.D.*

FORTALEZA

2016

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)

D975m Dutra, Kaio Hemerson.

Montagem e teste de um novo arranjo do dessalinizador solar térmico de múltiplos estágios com recuperação de calor / Kaio Hemerson Dutra. – 2016.
83 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2016.

Orientação: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha..

Coorientação: Prof. Dr. Maria Eugênia Vieira da Silva.

1. Dessalinização. 2. Energia solar. 3. Recuperação de calor. I. Título.

CDD 620.1

KAIO HEMERSON DUTRA

MONTAGEM E TESTE DE UM NOVO ARRANJO DO DESSALINIZADOR SOLAR
TÉRMICO DE MÚLTIPLOS ESTÁGIOS COM RECUPERAÇÃO DE CALOR

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 28/06/2016

BANCA EXAMINADORA

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

Prof.^a Dra. Maria Eugênia Vieira da Silva (Coorientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Gustavo Alves de Lima Henn
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

A Deus.

Aos meus pais, por toda dedicação e empenho
em minha formação.

AGRADECIMENTOS

A minha família, por todo apoio essencial na condução da minha vida profissional. Aos Professores Paulo Alexandre Costa Rocha e Maria Eugênia Vieira da Silva, pela excelente orientação. Aos professores participantes da banca examinadora pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões. A CAPES e CNPq pelo auxílio financeiro para construção do protótipo e fornecimento de bolsa.

A todos os colegas bolsistas do Laboratório de Energia Solar e Gás Natural, em especial Diego Caitano de Pinho e Eliezer Batista da Costa Neto, pela ajuda e apoio. Aos colegas da turma de mestrado em especial Valdi Matos de Almeida Júnior, pelas reflexões e construtivas discussões realizadas dentro e fora de sala de aula.

“Insanidade é continuar fazendo sempre a mesma coisa e esperar resultados diferentes.”
(Albert Einstein)

RESUMO

O acesso a água potável é atualmente um problema evidente e crescente, pois apenas 2,5% da água do planeta é doce. No entanto, desta pequena parcela 79,16% estão nas geleiras, ou seja, indisponíveis. Aliado ao problema de abastecimento de água, existe a necessidade da diversificação da matriz energética, devido ao crescente custo e esgotamento das fontes convencionais de energia. A utilização da energia solar em dessalinizadores é uma alternativa ao acesso de água potável a comunidades isoladas que podem não possuir uma infraestrutura adequada. O objetivo deste trabalho é montar e testar um dessalinizador solar de múltiplos estágios com recuperação de calor e aquecimento indireto, bem como viabilizar e garantir o seu funcionamento satisfatório. O dessalinizador é composto por duas unidades. A primeira, denominada unidade de aquecimento, é composta por coletores solares que podem ser montados em duas configurações, com dois ou três coletores. Cada coletor possui 2,57 m² de área útil de absorção de energia solar. A segunda é denominada unidade de dessalinização, que é composta por um tanque de armazenamento de água e até sete estágios montados em série. Água salobra é aquecida na unidade de aquecimento e, por diferença de densidade, através de um ciclo de termosifão, escoar para a torre de dessalinização, onde é armazenada e evaporada, perdendo calor e voltando para a unidade de aquecimento, fechando o ciclo. A massa que é evaporada entra em contato com uma bandeja do primeiro estágio, perde calor para o estágio acima e condensa, sendo coletado por calhas abaixo da bandeja. Para avaliação do sistema, testes de aquecimento e de produção foram realizados. O teste de aquecimento, com o objetivo de avaliar a capacidade térmica da unidade de aquecimento, foi realizado com dois e três coletores, e nas duas configurações os resultados foram satisfatórios, com temperaturas acima de 90°C. Os testes de produção possuem o objetivo de avaliar a produção de água dessalinizada do sistema, onde foram testadas várias configurações, obtendo uma produção máxima de 42 litros por dia utilizando 3 coletores e sete estágios.

Palavras-chave: Dessalinização. Energia Solar. Recuperação de Calor.

ABSTRACT

Access to fresh water is now a clear and growing problem, only 2.5% of the planet's water is potable, however, from this small portion 79.16% is in glaciers, or unavailable. Associated with the water supply problem, there is the need for diversification of energy sources, due to the increasing cost and depletion of conventional energies. The use of solar energy in desalinators is an alternative to access fresh water to isolated communities that may not have adequate infrastructure. The objective of this work was to assemble and test a multi-stage solar desalination with heat recovery and indirect heating, as well as facilitate and ensure their satisfactory operation. The desalinator is composed of two units, the first called heating unit consists of solar collectors and can be assembled in two configurations with two or three collectors. Each collector has 2.57 m² of useful area of solar energy absorption. The second is called desalination unit composed of a water storage tank and until seven stages in series. Brackish water is heated in the heating unit and the density difference, through a thermosyphon loop, flows into desalination tower where it is stored and evaporated, losing heat and returning to the heating unit, closing the cycle. The evaporated mass comes into contact with a tray of the first stage, loses heat to the stage above and condenses, the distillate is collected by gutters beneath the tray. For evaluation of the system, tests of heating and production have been carried out. The heating test in order to evaluate the capability of the heating unit was conducted with two and three collectors, in both configurations, the results were satisfactory, with temperatures above 90 ° C. Production tests evaluated the desalinated water production system, several configurations were tested, obtaining a maximum output of 42 liters per day using three collectors and seven stages.

Keywords: Desalination. Solar Energy. Heat Recovery.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição de água no planeta	16
Figura 2: Diferença entre intensidade de radiação no Sol e na Terra	27
Figura 3: Pireliômetro.....	28
Figura 4: Piranômetro	29
Figura 5: Coletor solar plano	30
Figura 6: Coletor solar plano em corte transversal.....	31
Figura 7: Classificação dos processos de dessalinização	31
Figura 8: Dessalinizador Solar tipo tanque.....	33
Figura 9: Dessalinizador de Múltiplos Efeitos	34
Figura 10: Protótipo "Pithon"	35
Figura 11: Dessalinizador por processo flash de Múltiplos Estágios.....	36
Figura 12: Dessalinizador por Umidificação – Desumidificação.....	37
Figura 13: Dessalinizador solar de múltiplos estágios com recuperação de calor	39
Figura 14: O protótipo	41
Figura 15: Unidade de Aquecimento.....	42
Figura 16: Acoplamento em paralelo dos coletores	44
Figura 17: Unidade de aquecimento com refletor	44
Figura 18: Unidade de dessalinização	45
Figura 19: Prensa da unidade de dessalinização.....	46
Figura 20: Tanque de armazenamento.....	48
Figura 21: Central de aquisição de dados (datalogger)	49
Figura 22: Termopar em bandeja de estágio	51
Figura 23: Condutivímetro OMEGA CDB-70	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificações do coletor solar utilizado no protótipo.....	43
Tabela 2: Pontos de medição de temperatura	50
Tabela 3: Características dos testes de produção.....	53
Tabela 4: Parâmetros de desempenho dos Testes 7 e 8.....	72
Tabela 5: Parâmetros de desempenho dos Testes 9 e 10.....	74
Tabela 6: Parâmetros de desempenho dos testes 10 e 11	76

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Teste de Aquecimento com dois coletores.....	56
Gráfico 2: Teste de aquecimento com três coletores.....	57
Gráfico 3: Produção dos Testes 1 ao 7(maior produção registrada).....	58
Gráfico 4: Condutividade elétrica da água dessalinizada dos Testes 1 ao 7 (maior produção registrada).....	59
Gráfico 5: Temperatura e radiação para o segundo dia do Teste 1	60
Gráfico 6: Temperatura e radiação para o primeiro dia do Teste 2.....	62
Gráfico 7: Temperatura e radiação para o terceiro dia do Teste 3	63
Gráfico 8: Temperatura e radiação para o quarto dia do Teste 4	64
Gráfico 9: Temperatura e radiação para o primeiro dia do Teste 5.....	65
Gráfico 10: Temperatura e radiação para o segundo dia do Teste 6	66
Gráfico 11: Temperatura e radiação para o primeiro dia do Teste 7.....	68
Gráfico 12: COP e GOR para os Testes 1 ao 7	69
Gráfico 13: Taxa de produção (mL/MJ) para os Testes 1 ao 7	69
Gráfico 14: Produção do segundo dia do Teste 8.....	71
Gráfico 15: Temperatura e radiação para o segundo dia do Teste 8	71
Gráfico 16: Temperatura e radiação para o quarto dia do Teste 9	73
Gráfico 17: Temperatura e radiação para o terceiro dia do Teste 10	73
Gráfico 18: Produção do quarto dia do Teste 9 e terceiro dia do Teste 10	74
Gráfico 19: Temperatura e radiação para o primeiro dia Teste 11	75
Gráfico 20: Produção do primeiro dia do Teste 11	76

LISTA DE ACRÔNIMOS

AISI:	American Iron and Steel Institute (Instituto Americano de Ferro e Aço)
AU:	Astronomical Unit (Unidade Astronômica)
COP:	Coefficient of Performance (Coeficiente de Performance)
ED:	Electrodialysis Desalination (Dessalinização por Eletrodiálise)
GOR:	Gain Output Ratio (Ralação de Ganho de Saída)
HDH:	Humidification – DeHumidification Desalination (Dessalinização por Umidificação – Desumidificação)
HT:	High Temperature (Alta Temperatura)
LESGN:	Laboratório de Energia Solar e Gás Natural
MED:	Multieffect Distillation (Destilação de Multi – Efeitos)
MSF:	Multistage Distillation Flash (Destilação Flash de Multi – Estágios)
RO:	Reverse Osmosis (Osmose reversa)
SED:	Simple Effect Distillation (Destilação de Simples Efeito)
UFC:	Universidade Federal do Ceará

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área [m^2]
E	Energia [W]
h	Calor latente [W/Kg °C]
I	Irradiação solar [W/m^2]
m	Massa [Kg]
t	Tempo [s]

SUBSCRITOS

Col	Coletor
fg	Líquido – vapor
T	Total
n	Número de estágios

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	16
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
3.1	Radiação Solar	26
3.1.1	Constante Solar	26
3.1.2	Efeitos da Atmosfera.....	27
3.1.3	Mediação de Radiação	27
3.2	Coletores Solares Planos.....	29
3.3	Principais Tecnologias de Dessalinização	31
3.3.1	Dessalinização por Simple Efeito (Simple Effect Desalination - SED).....	32
3.3.2	Dessalinização por Múltiplos Efeitos (Multieffect Desalination - MED)	33
3.3.3	Dessalinização por Múltiplos Estágios Flash (Multistage Desalination Flash–MSF)	35
3.3.4	Dessalinização por Umidificação – Desumidificação (Humidification - dehumidification – HDH).....	36
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	38
4.1	Princípio de Funcionamento do Dessalinizador Solar de Múltiplos Estágios com Recuperação de Calor.....	38
4.1.1	Parâmetros de Desempenho do Dessalinizador	39
4.2	O Protótipo.....	40
4.2.1	Unidade de Aquecimento.....	41
4.2.2	Unidade de Dessalinização	45
4.2.3	Sistema de Aquisição de Dados	48
4.3	Procedimento de Testes	52

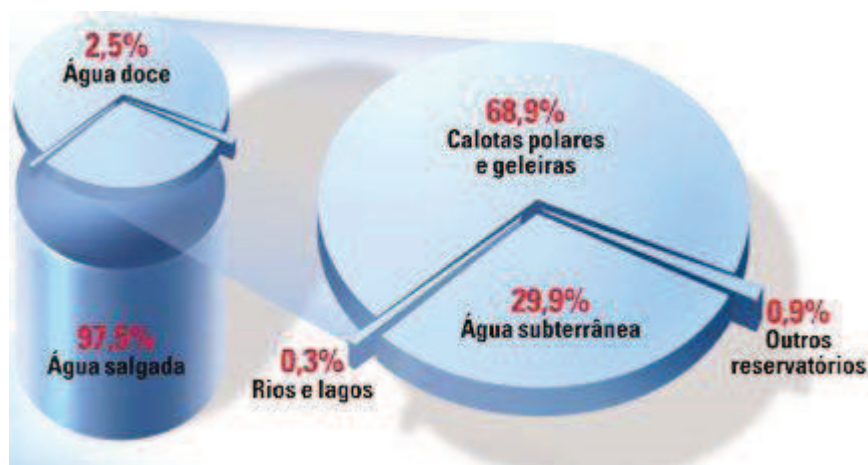
4.3.1	Teste de Aquecimento.....	52
4.3.2	Testes de Produção	52
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
5.1	Resultados – Testes de Aquecimento	55
5.2	Resultados – Testes de Produção	57
5.2.1	<i>Teste 1</i>	60
5.2.2	<i>Teste 2</i>	61
5.2.3	<i>Teste 3</i>	62
5.2.4	<i>Teste 4</i>	64
5.2.5	<i>Teste 5</i>	65
5.2.6	<i>Teste 6</i>	66
5.2.7	<i>Teste 7</i>	67
5.2.8	<i>Avaliação de desempenho dos sete primeiros testes.....</i>	68
5.2.9	<i>Teste 8</i>	70
5.2.10	<i>Testes 9 e 10.....</i>	72
5.2.11	<i>Teste 11</i>	75
6.	CONCLUSÃO	78
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80

1. INTRODUÇÃO

A água é imprescindível para a sobrevivência humana, seu consumo é fundamental para o funcionamento do nosso organismo devido à sua capacidade de mediar reações bioquímicas no interior e arredores das células. Porém, o acesso a água potável tornou-se um problema, pois, no último século, seu consumo aumentou seis vezes, enquanto a população mundial aumentou em quatro vezes (WANG, 2010). Cerca de um terço da população mundial não possui acesso a água potável com tratamento adequado, onde grande parte destas pessoas encontram-se em países subdesenvolvidos (WHO, 2015).

Conforme ilustrado pela Figura 1, a crosta terrestre é composta por 29,1% de área terrestre e 70,9% de água, o que se estima em $1,38 \times 10^9 \text{Km}^3$, onde 97,5% deste recurso é de água salgada e 2,5% de água doce, conforme apresentado na Figura 1. Porém, desta pequena parcela, 68,9% encontram-se nas geleiras, inacessíveis, e 31,1% distribuídos em rios, lagos, reservas subterrâneas e outros reservatórios. Além de tudo, devido à poluição e acesso a água, estima-se que apenas 0,3% da água doce está prontamente adequada ao consumo humano. No entanto, sua distribuição não é uniforme, o que agrava a desigualdade do acesso a água potável (CAENF, 2016).

Figura 1: Distribuição de água no planeta



Fonte: (GALILEU, 2016)

Pelos dados apresentados anteriormente, aliado a crescente poluição e processos industriais, a crise hídrica já é uma dura realidade em muitos países. Por este motivo, muitos pesquisadores vêm desenvolvendo novas técnicas de tratamento de água, tanto para o seu reaproveitamento, reciclando água de esgotos e reservatórios poluídos, como tornando água naturalmente imprópria para consumo humano em água potável, como no caso da dessalinização da água do mar.

Cada vez mais fala-se sobre a necessidade de novos processos de aproveitamento de água, porém esta preocupação é antiga, pois existem registros de que os antigos egípcios utilizaram processos de dessalinização para suprir seu abastecimento de água. Posteriormente gregos e romanos utilizaram processos primitivos de dessalinização através da energia solar (GARCIA-RODRÍGUEZ, 2003).

Juntamente com a problemática do abastecimento de água, os estudos e pesquisas em novas tecnologias de aproveitamento de energias renováveis vêm evoluindo durante os últimos anos. Em 2014, 39,4% da energia consumida pelo Brasil foi oriunda de fontes renováveis, quase três vezes maior quando comparado ao consumo mundial de energia renovável, porém grande parte deste valor é representado pela energia hidráulica. No entanto, o Brasil teve uma queda de 5,6% no abastecimento de energia hidráulica de 2013 para 2014 devido à escassez de água, porém obteve um aumento de 19,5% na geração a partir da energia solar e eólica (EPE, 2015). Estes dados mostram que a matriz energética está passando por um processo de diversificação, o que é muito importante para a diminuição da dependência de fontes de energia sazonais como a energia hidráulica e de fontes não renováveis como o petróleo.

A energia solar já é uma opção à diversificação da matriz energética mundial, por possuir um enorme potencial de geração de energia. Anualmente a terra recebe $1,08 \times 10^{18}$ KWh de energia solar na forma de radiação, o que representa cerca de dez mil vezes a energia consumida anualmente (QUASCHNING, 2005). No entanto, o desenvolvimento de tecnologias avançadas e novos processos de utilização desta energia aliados a um custo vantajoso para sua utilização ainda é um desafio.

Devido a todo contexto acima exposto, este trabalho apresenta uma alternativa aos problemas de abastecimento de água potável e diversificação da matriz energética através da montagem e estudo de um dessalinizador solar térmico com aquecimento indireto de múltiplos estágios com reaproveitamento de calor, construído a partir de tecnologia brasileira. O

dessalinizador é composto por duas unidades, uma de aquecimento composta por coletores solares e uma unidade de dessalinização composta por um tanque de armazenamento e estágios com reaproveitamento de calor.

O objetivo deste trabalho foi a montagem, instalação, testes e aperfeiçoamento deste dessalinizador solar com aquecimento indireto, utilizando coletores de placas planas instalados em paralelo para aquecimento de água, visando à operação de uma torre de dessalinização de sete estágios com canais de escoamento para produção de água dessalinizada em cada um deles.

Como objetivos específicos deste trabalho, têm-se:

1. Montagem e instalação de coletores de energia solar de placa plana, cada um com 2 m² de área útil de absorção de energia.
2. Montagem e instalação de uma torre de dessalinização, composta por um tanque de armazenamento e sete estágios com bandejas para armazenamento de água.
3. Instalação e interligação entre a unidade de aquecimento e a torre de dessalinização, com testes de estanqueidade e isolamento das tubulações.
4. Instalação de sistema de coleta de dados de temperaturas do dessalinizador e coleta de radiação solar.
5. Realização dos seguintes testes de operação no sistema completo:
 - a. Teste de capacidade de aquecimento do sistema utilizando dois e três coletores solares de placa plana;
 - b. Testes de produção de água dessalinizada na torre de dessalinização utilizando a configuração de 1 a 7 estágios utilizando três coletores solares de placa plana;
 - c. Teste de produção de água dessalinizada na torre de dessalinização utilizando a configuração de 7 estágios com dois coletores solares de placa plana.

O dessalinizador foi concebido, instalado e testado no LESGN (Laboratório de Energia Solar e Gás Natural) da Universidade Federal do Ceará (UFC), localizado em Fortaleza, Ceará.

Esta dissertação está concebida em 6 capítulos, a saber:

1. Introdução: Apresentação da contextualização, justificativa e objetivos do trabalho;

2. Revisão Bibliográfica: Apresentação do histórico cronológico de trabalhos publicados na linha de pesquisa desta dissertação;
3. Fundamentação Teórica: Apresentação dos fundamentos necessários para a compreensão e desenvolvimento desta dissertação;
4. Materiais e Métodos: Listagem dos procedimentos e materiais utilizados para a construção do protótipo estudado e testes realizados;
5. Resultados e Discussões: Apresentação dos resultados e discussões dos testes de operação descritos nos objetivos específicos;
6. Conclusão: Apresentação das conclusões constatadas pelos resultados dos testes e considerações finais acerca do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta alguns dos principais trabalhos em dessalinização, visto que existem muitos disponíveis na literatura, por tratar-se de um assunto que ganhou relevância significativa ao longo dos anos, despertando o interesse de muitos pesquisadores. É possível constatar, com os trabalhos abaixo relacionados, a evolução que a dessalinização teve ao longo de anos de estudos e aperfeiçoamento de sistemas. Esta gradual evolução, apresentada nesta revisão visa possibilitar um melhor entendimento a respeito do tema, bem como a garantia de que este trabalho se apresenta como mais um degrau nesta evolução.

Löf *et al.* (1961) apresentaram formulações teóricas de transferência de calor e massa aplicadas a um destilador solar tipo tanque em regime permanente para o cálculo de desempenho, bem como a complementação com dados de operação. Estabeleceram relações entre a produtividade do destilador com os efeitos das variações de parâmetros de projeto: temperatura ambiente, velocidade do vento, radiação solar, capacidade absorptiva e inclinação da cobertura transparente de vidro. A principal conclusão foi a relação direta entre o aumento da produção de destilado com o aumento da diferença entre as temperaturas da cobertura de vidro e a água armazenada no tanque.

Tleimat *et al.* (1965) apresentaram o estudo experimental e teórico de um dessalinizador solar do tipo tanque com vários estágios para avaliação de desempenho e eficiência. Os dados experimentais mostraram que a produção de água está diretamente ligada à reutilização do calor residual da água salobra, bem como do fluxo de alimentação e condições ambientais. O experimento apresentou uma produção média de 0,3 gal/ft² (12,75 l/m²) por dia, que poderia ser aumentada de 2 a 3 vezes através do aumento do reuso do calor da água salobra não destilada (água de desperdício).

Cooper (1973) apresentou o estudo experimental e teórico do comportamento da eficiência de dessalinizadores solares do tipo tanque de simples efeito. Nos resultados, mostrou a dependência direta entre a eficiência dos dessalinizadores e a espessura da lâmina de água armazenada no tanque, a inclinação da cobertura de vidro e o isolamento do tanque. Nas conclusões afirmou que para o sistema estudado a máxima eficiência possível seria de 60%, mas eficiências acima de 50% seriam difíceis de serem obtidas.

Proctor (1973) apresentou um estudo teórico e experimental de um dessalinizador solar do tipo tanque com recirculação de água salobra através de bombeamento forçado. O sistema dinâmico possuía 18,5 m² de área de coleta de radiação e funcionava a uma vazão de 20gal/min (1,26 l/s) com um aproveitamento de 80% do calor absorvido pelo sistema, obtidos pelo isolamento utilizando leito de paredes de concreto e placas de isopor. Os dados mostraram uma produção média de 181 galões (685 litros) de água dessalinizada por dia, resultados de 3 a 8 vezes maiores na produção de água dessalinizada em relação a dessalinizadores convencionais.

Derozier *et al.* (1981) apresentaram um protótipo de dessalinizador solar de múltiplo efeito com 12 estágios. O protótipo era composto por uma torre de dessalinização e vários coletores, totalizando uma área de absorção de radiação solar de 270m², fornecendo água à torre através de bombeamento forçado a temperaturas em torno de 80 a 85°C. A torre, com 12 estágios com recuperação de calor, apresentou uma capacidade de produção de água de 1m³ por hora com temperaturas de 70°C no primeiro estágio, capacidade de armazenamento de 20 m³ e uma produção média diária de 10m³.

Mota e Andrade (1985) apresentaram a concepção de um dessalinizador do tipo tanque com o objetivo de estudar os efeitos da dessalinização da água sobre os microrganismos patogênicos e suas mudanças físico-químicas. Foi constatado que a dessalinização eliminou os microrganismos e gerou várias alterações nos parâmetros físico-químicos da água, tais como: turbidez, dureza, condutividade elétrica, teor de cloretos e alcalinidade.

El-Nashar (1988) descreveu um estudo sobre o primeiro ano de operação de uma planta de dessalinização solar localizada em Abu Dhabi. A planta era composta por 1862m² de superfície coletora de radiação solar de tubos evacuados, tanques de armazenamento de água com capacidade de 300m³ e uma torre de dessalinização com recuperação de calor. A planta apresentou uma produção máxima de 120m³/dia nos meses de maior radiação solar e mínimo de 25m³/dia, mas com uma média anual em torno de 80m³/dia e uma eficiência global variando entre 46 e 53%.

Fernández e Chargoy (1990) desenvolveram um dessalinizador com reaproveitamento de calor baseado no princípio de empilhamento de bandejas, onde o calor era fornecido à primeira bandeja gerando a evaporação da água salobra armazenada. O vapor gerado, por sua vez, condensava na bandeja acima, provocando o aquecimento da água contida nesta bandeja, gerando vapor e condensando na bandeja subsequente. O protótipo apresentou

maior produção em comparação com dessalinizadores do tipo tanque, que até então eram os mais convencionais.

Adhikari *et al.* (1995) apresentaram estudos teóricos e experimentais em dessalinizadores de vários estágios com foco na análise do ganho de produção em relação ao número de estágios. Foram apresentadas simulações computacionais para o cálculo da temperatura média da água em cada estágio, quando operando em regime permanente, o que propiciou o cálculo do número ótimo de estágios. Também foi apresentado um protótipo composto por três estágios para validação dos resultados das simulações. Nas conclusões os autores apresentaram que, em torres de dessalinização solar, após o oitavo estágio não existe ganho significativo em produção, nem no ganho de recuperação de calor.

Rommel (1998) apresentou um sistema de dessalinização solar de água composto por: coletor solar, unidade condensadora- evaporadora e sistema de bombeamento. O sistema operou com o bombeamento de água salobra para o coletor solar, onde, após absorver a radiação solar, entra na unidade condensadora- evaporadora e troca calor com uma serpentina por onde passa água à temperatura ambiente, o vapor é condensado e coletado. O protótipo apresentou temperaturas próximas de 80°C na saída do coletor e produção máxima de 15 L/m²h.

Schwarzer *et al.* (2001) apresentaram um estudo experimental e teórico de uma torre de dessalinização solar onde óleo térmico foi utilizado para transporte de calor do coletor solar, de 2 m² de área útil, para a torre, que, por sua vez, aquecia e evaporava água salobra distribuída em 6 estágios, o que permitia a recuperação de calor entre estágios. Foi apresentado um estudo teórico com balanços de massa e energia, propiciando a apresentação de uma simulação do funcionamento e produção final, que foi posteriormente comparada e discutida com os resultados encontrados nos testes experimentais. O sistema apresentou produção de 25L/m²dia de água operando a uma radiação de 4,8KWh/m²dia e uma eficiência global de 0,5. A água produzida foi de boa qualidade, o que foi constatado nos testes laboratoriais apresentados em condutividade elétrica e pureza. Na comparação dos resultados experimentais e teóricos os resultados foram satisfatórios.

Zhang *et al.* (2003) apresentaram um sistema de dessalinização solar composto por um coletor solar com 18 tubos evacuados (2 m² de área), uma torre de dessalinização, tanque de armazenamento e um separador. O sistema utiliza calor da água salobra de recirculação para pré-aquecer a água que alimenta o coletor solar, e com este aproveitamento verificou-se um aumento de até três vezes na produção de destilado.

Coutinho (2003) apresentou um estudo teórico e experimental de um sistema de dessalinização com coletor de placa plana e instalação de refletores espelhados, bem como uma torre com recuperação de calor composta por seis estágios. O sistema apresentou eficiência global de 22% e temperatura máxima no primeiro estágio de 90°C. Testes físico-químicos do destilado produzido foram apresentados, constatando que o processo eliminou todas as bactérias de grupos coliformes totais, bem como a redução do pH, turbidez e condutividade elétrica.

Lopes (2004) apresentou um sistema de dessalinização solar com aquecimento híbrido, onde água era aquecida através de um coletor solar térmico e através de uma resistência elétrica alimentada por módulos fotovoltaicos. Foi obtida uma produção média de 14 L/m²/dia em 8 horas de operação diária. O sistema também poderia ser operado com uma fonte externa de energia elétrica para alimentação da resistência elétrica, e assim possibilitar a operação noturna do dessalinizador.

Alves (2009) montou e testou um dessalinizador solar térmico com recuperação de calor. O sistema foi formado por coletores solares de alto desempenho e uma unidade de dessalinização operando por evaporação e condensação da água. Foram obtidas temperaturas em torno de 85°C no tanque do dessalinizador, registrando produção de 31 litros por dia e GOR (razão de ganho na saída) de 1,54.

Schwarzer *et al.* (2009) apresentaram um sistema de dessalinização solar com coletores de tubos evacuados e torre com múltiplos estágios e aproveitamento de calor, onde o fluido utilizado para transporte de energia térmica dos coletores para a torre foi a água. Foram feitos experimentos com 5, 6 e 7 estágios e medida uma redução de 99,8% nos sólidos totais na água produzida. Os testes foram feitos em quatro países diferentes, onde produziu em média 15 a 18 L/m²/dia, produção que representa um fator 5 a 6 vezes maior do que a produção de dessalinizadores do tipo tanque. As vantagens deste sistema encontram-se na sua alta produção, baixo custo dos coletores, excelente qualidade da água produzida, fácil ampliação para sistemas que poderiam produzir até 2000 L/dia e possibilidade de utilização de outras energias com operação em 24 h/dia.

Khalifa e Hamood (2009) apresentaram um estudo experimental confrontando a produção de destilado em função da lâmina de água salobra em dessalinizadores solares do tipo tanque. Utilizando vários resultados de experimentos com lâminas de água variando entre 1, 4, 6, 8 e 10cm, é apresentada uma correlação entre as temperaturas máximas atingidas em cada

caso e a produção de destilado. Como resultado foi apresentada a função: $y = 3,17d^{-0,19}$, onde y representa a produção de destilado e d a profundidade da lâmina de água. Pode-se observar que quanto maior a profundidade da lâmina de água, menor seria a produção de destilado, podendo apresentar uma redução de 48% entre a produção com 1 e 10cm.

Rodrigues (2010) montou e testou um dessalinizador solar térmico com aquecimento indireto por coletores solares de tubos evacuados. Utilizando a própria água salobra como fluido de aquecimento, o dessalinizador obteve temperaturas máximas no tanque de armazenamento em torno de 87°C e uma produção de 35 litros por dia.

Rodrigues (2011) apresentou um sistema de dessalinização térmica de água utilizando como fonte de energia a queima controlada de gás natural, o que possibilitou a manutenção de temperaturas pré-estabelecidas e constantes e avaliação dos parâmetros operacionais do sistema. O sistema era composto pelo queimador de gás natural, um tanque de armazenamento de água e uma torre de dessalinização de seis estágios. Foram feitos testes com vários estágios e tipos de queimadores e obtiveram-se melhores resultados com o queimador linear e número ideal de estágios de 6 a 7. Um aumento de 65,59% na produção de água foi observado com o uso de nanopelícula nos estágios, porém não foram apresentados testes químicos de contaminação da água.

Hermosillo *et al.* (2012) apresentaram um sistema de dessalinização de água composto por: coletor solar, unidade condensadora, unidade evaporadora e sistema de ventilação. O sistema operou com a entrada água salobra no condensador e posteriormente no coletor solar onde absorve energia e flui para o condensador. Entre o evaporador e o condensador existe um fluxo de ar forçado, este fluxo de ar leva vapor d'água do evaporador para o condensador, onde é condensado e coletado. O protótipo apresentou uma eficiência máxima de 85% em relação à entrada de calor pela produção de destilado.

Khalil *et al.* (2015) desenvolveram um dessalinizador operando através de um umidificador com bolhas de ar de diâmetro controlado. A água utilizada no umidificador é aquecida por um coletor solar de placas planas e o condensado é coletado em um trocador de calor pós-umidificador. Os resultados obtidos mostram um melhor desempenho para bolhas de ar com diâmetro médio de 1mm. A temperatura de saída do coletor foi de 62 °C e a máxima eficiência foi de 0,53 com uma produção diária de 21Kg.

Diaf *et al.* (2015) realizaram um estudo de viabilidade tecnológica e econômica de uma torre de dessalinização solar de pequeno porte com recuperação de calor composto por múltiplos estágios para atender a demandas pontuais. O protótipo analisado apresentou um custo por litro de água produzida três vezes menor e com qualidade similar ao dessalinizador comercial mais popular com mesma capacidade de produção.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta fundamentos importantes para a compreensão da concepção e funcionamento do Dessalinizador Solar apresentado neste trabalho. O capítulo está dividido em três seções. Na primeira estão apresentados os conceitos fundamentais importantes de radiação solar, no segundo descreve-se sobre coletores solares planos e suas características e por último estão apresentadas as principais tecnologias em dessalinização com enfoque em energia solar térmica.

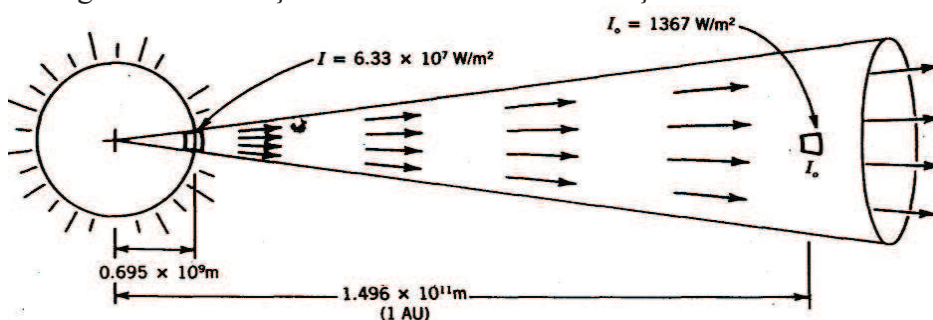
3.1 Radiação Solar

Qualquer corpo que possua temperatura finita emite energia na forma de radiação térmica. Denomina-se radiação solar a energia emitida pelo Sol, estrela central do nosso Sistema Solar que se encontra a temperatura de 5777K em sua superfície. Esta energia, constantemente emitida, é transportada em ondas eletromagnéticas e sua taxa por metro quadrado (W/m^2) é denominada intensidade de radiação (DUFFIE & BECKMAN, 2013).

3.1.1 *Constante Solar*

A intensidade da radiação solar na superfície do Sol é de aproximadamente $6,33 \times 10^7 \text{ W}/\text{m}^2$, esta radiação percorre uma distância média de $1,496 \times 10^{11} \text{ m}$ (distância equivalente da astronomia a uma Unidade Astronômica AU) até chegar à Terra com intensidade praticamente constante de $1367 \text{ W}/\text{m}^2$, como está ilustrado da Figura 2 (STINE & HARRIGAN, 1985).

Figura 2: Diferença entre intensidade de radiação no Sol e na Terra



Fonte: (STINE & HARRIGAN, 1985)

Esta intensidade de radiação extraterrestre que chega à Terra é denominada constante solar. Entretanto, por causa da órbita elíptica da Terra, este valor varia em até $\pm 3,33\%$ durante o ano. A constante solar tem grande importância no estudo da energia solar, pois esta representa um teto para a avaliação da energia que chega à superfície da Terra.

3.1.2 Efeitos da Atmosfera

A Constante Solar que chega à Terra é diferente da intensidade de radiação experimentada pela superfície da mesma, uma vez que os gases presentes na atmosfera absorvem parte desta radiação e, a depender das condições climáticas, esta absorção de radiação pode ser até próxima de 100% em um dia com muitas nuvens. Desta forma, a radiação que chega em uma superfície na Terra pode ser dividida em duas componentes:

Radiação Direta: Representa a radiação recebida diretamente do Sol, ou seja, a parcela que não foi absorvida pela atmosfera.

Radiação Difusa: Esta componente representa a radiação solar que teve sua direção afetada por interferências da atmosfera.

A soma da radiação direta e radiação difusa é denominada radiação global, que representa a intensidade total de energia que chega a uma superfície.

3.1.3 Medição de Radiação

Para analisar sistemas que têm como força motriz a energia solar é de crucial importância o conhecimento da intensidade de energia que chega a este sistema. Existem diversas formas de calcular esta energia, algumas destas estão disponíveis em Duffie & Beckman (2013). Estes cálculos são modelos que fornecem estimativas, porém a intensidade de radiação também pode ser medida por instrumentos específicos para este objetivo. Estes instrumentos estão disponíveis no mercado em vários modelos com sensibilidades e funcionalidades diferentes. Os dois instrumentos mais utilizados são: o pireliômetro e o piranômetro.

O pireliômetro, Figura 3, mede a radiação direta incidente em uma superfície. Este é composto por um tubo reto com uma abertura em uma de suas extremidades e na outra uma termopilha que mede a incidência de energia que chega até ela. O tubo deve estar alinhado com o raio solar de forma que para a análise da radiação direta durante o dia, este instrumento deve sempre acompanhar o movimento do sol.

Figura 3: Pireliômetro



Fonte: Elaborado pelo autor

O piranômetro, Figura 4, mede a radiação global incidente em uma superfície, ou seja, a energia proveniente de todas as direções (radiação direta e difusa). Este instrumento é composto basicamente por uma termopilha instalada dentro de uma semiesfera de vidro.

Figura 4: Piranômetro



Fonte: Elaborado pelo autor.

Existem acessórios que podem ser instalados nos piranômetros para bloquear a radiação direta, fazendo com que este instrumento meça somente a radiação difusa. Outra forma para o conhecimento da radiação difusa, uma vez que se tenham as medições de radiação de um pireliômetro e de um piranômetro, é fazer a diferença entre os valores medidos no piranômetro e pireliômetro (radiação global menos radiação direta).

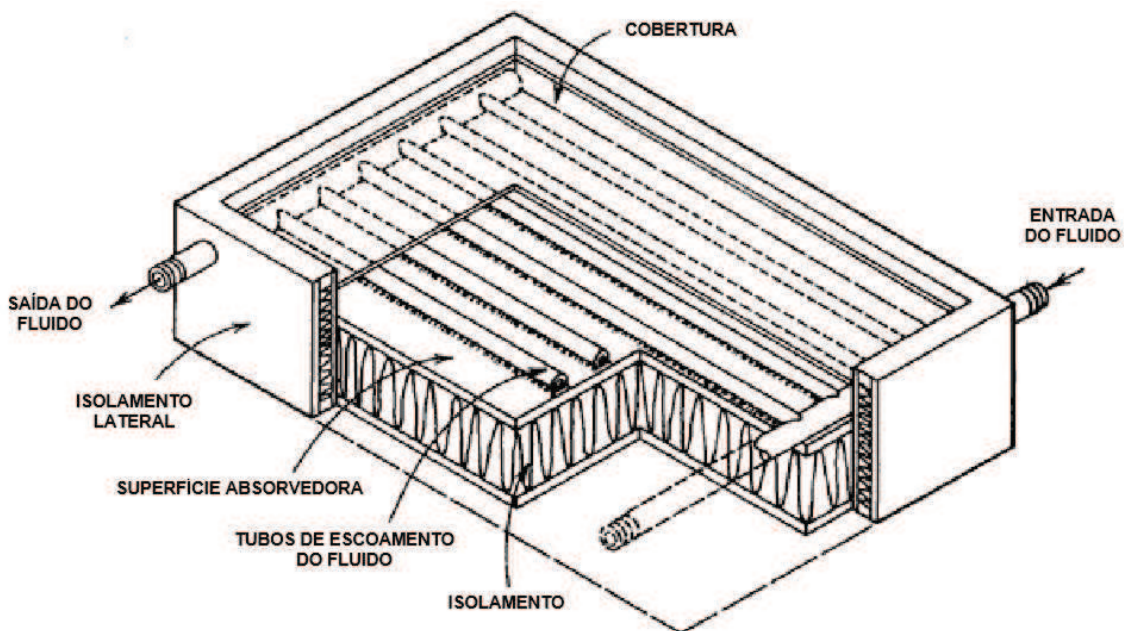
3.2 Coletores Solares Planos

Coletores solares são equipamentos projetados e construídos para absorver a radiação solar e transferi-la para um fluido, aquecendo-o. Os coletores solares podem ser divididos basicamente em coletores planos e concentradores. Os concentradores utilizam diversos aspectos construtivos para concentrar a energia solar em um foco. Estes coletores podem aquecer fluidos a temperaturas muito elevadas, porém necessitam de rastreamento da radiação solar. Coletores planos são mais simples, baratos e não necessitam de rastreamento, e embora a água seja amplamente utilizada, estes podem operar com vários fluidos de trabalho, com faixas de temperatura que podem chegar de 80 a 160°C, a depender dos aspectos construtivos e dos fluidos de trabalho.

Como é possível observar na Figura 5, os coletores solares planos possuem várias características construtivas, o que torna possível encontrar no mercado diversos tipos de coletores planos. Porém seu funcionamento é simples, onde fluido de trabalho escoar no interior de tubos, entrando no coletor por um tubo principal em uma de suas extremidades. Neste, o

fluido é distribuído para ramificações que percorrem o comprimento do coletor até chegar ao tubo principal de saída e sair por sua extremidade. Durante todo o escoamento do fluido o mesmo recebe energia térmica proveniente da radiação solar. Os tubos que percorrem o coletor estão ligados a aletas com superfícies absorvedoras para intensificar a absorção da radiação solar. Estas aletas conduzem calor até os tubos, que por sua vez transmitem para o fluido. Abaixo das aletas e dos tubos são instalados isolamentos térmicos com o objetivo de diminuir as perdas de calor para o ambiente. As laterais do coletor também funcionam como isolantes térmicos, embora possuam também o objetivo de suportar a estrutura do coletor.

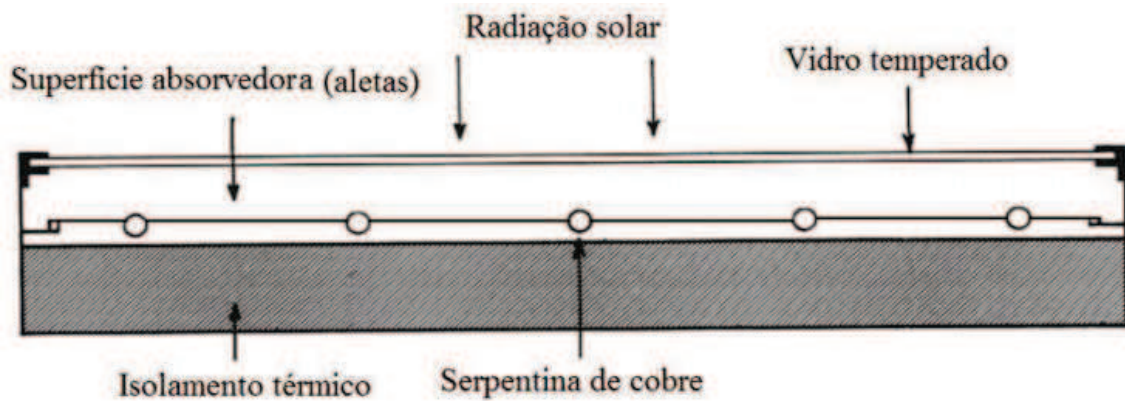
Figura 5: Coletor solar plano



Fonte: Adaptado de (STINE & HARRIGAN 1985)

A Figura 6 mostra o coletor solar em corte, onde uma ou mais coberturas podem ser instaladas acima da superfície absorvedora. Estas coberturas produzem um efeito estufa no coletor, além de diminuir a perda de calor por convecção. Normalmente são utilizadas coberturas de vidro devido à sua transparência e baixa absorção de radiação. Os tubos ou serpentina, conforme ilustrado na Figura 6, são geralmente de cobre devido à sua elevada condutividade térmica e baixo custo, comparando-se com outros materiais também com alta condutividade térmica.

Figura 6: Coletor solar plano em corte transversal

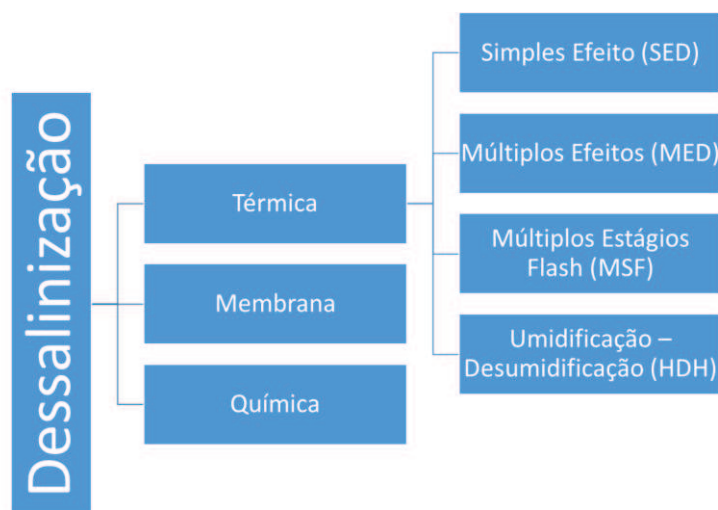


Fonte: adaptado de (DUFFIE & BECKMAN, 2013).

3.3 Principais Tecnologias de Dessalinização

A dessalinização é o processo de separação das moléculas de água dos sais presentes, de forma a transformar água salobra em água potável. Existem diversos tipos de dessalinização, basicamente divididos em três grupos, conforme representado pela Figura 7: Dessalinização Térmica, Dessalinização Por Membrana e Dessalinização Química (YOUSSEF *et al.*, 2014).

Figura 7: Classificação dos processos de dessalinização



Fonte: Elaborado pelo autor

Na dessalinização por membrana a água é bombeada e forçada a passar por filtros compostos de várias camadas de membranas, estas camadas retêm os sais, de forma que após a passagem por vários filtros, a água saia dessalinizada. A Osmose Reversa (RO) é o principal processo de dessalinização por membrana, embora existam outros.

Por sua vez, a dessalinização química utiliza processos químicos para extração dos sais da água. Um destes processos é a Dessalinização por Eletrodialise (ED), onde eletrodos ligados a uma fonte de corrente contínua forçam a retirada dos íons dissolvidos na água através da passagem por membranas, formando soluções com alta e baixa concentração de íons.

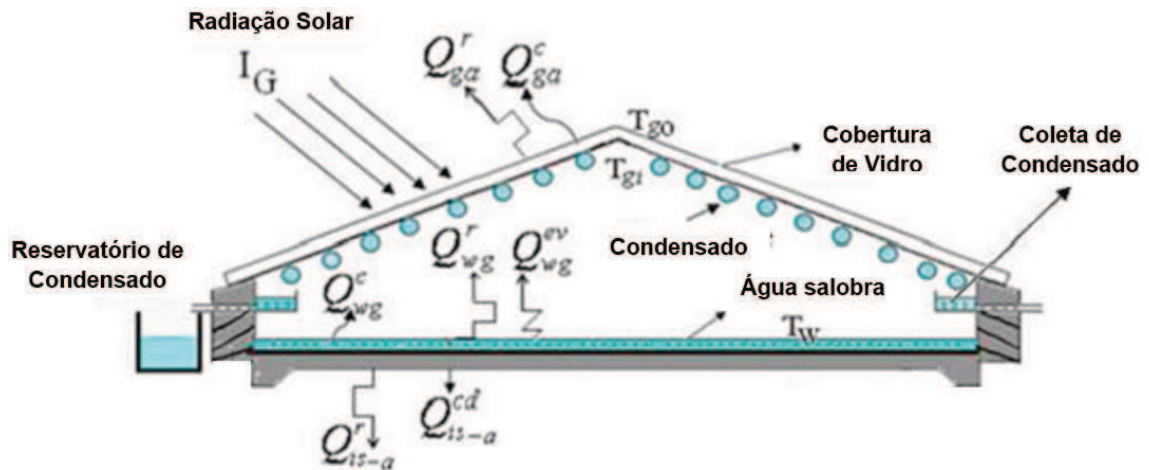
A dessalinização térmica usa energia na forma de calor como força motriz para a dessalinização. O calor pode ser proveniente de várias fontes, tais como: queima de combustíveis fósseis, aquecimento por resistência elétrica, energia solar e reações químicas exotérmicas. Estes sistemas também podem ser híbridos, ou seja, utilizar duas ou mais fontes de energia térmica. Como mostrado na Figura 7, a dessalinização térmica pode ser dividida em quatro principais processos: Dessalinização por Simples Efeito (SED), Dessalinização por Múltiplos Efeitos (MED), Dessalinização por Múltiplos Estágios *Flash* (MSF) e Dessalinização por Umidificação Desumidificação (HDH).

3.3.1 Dessalinização por Simples Efeito (Simple Effect Desalination - SED)

A dessalinização de simples efeito consiste no aquecimento da água até sua evaporação e posteriormente condensação. Este talvez seja o processo de dessalinização mais primitivo, porém, devido sua simplicidade e facilidade de construção, é bastante empregado e estudado.

Para operação deste sistema, normalmente é utilizada a energia solar. A Figura 8 ilustra um Dessalinizador de Simples Efeito (também conhecido como dessalinizador tipo tanque) operando com energia solar. Porém este mesmo sistema poderia operar facilmente com energia elétrica através de dissipação de calor em resistências elétricas ou de forma híbrida, utilizando energia solar durante o dia e energia elétrica à noite.

Figura 8: Dessalinizador Solar tipo tanque



Fonte: adaptado de ABURIDEH *et al.* (2012)

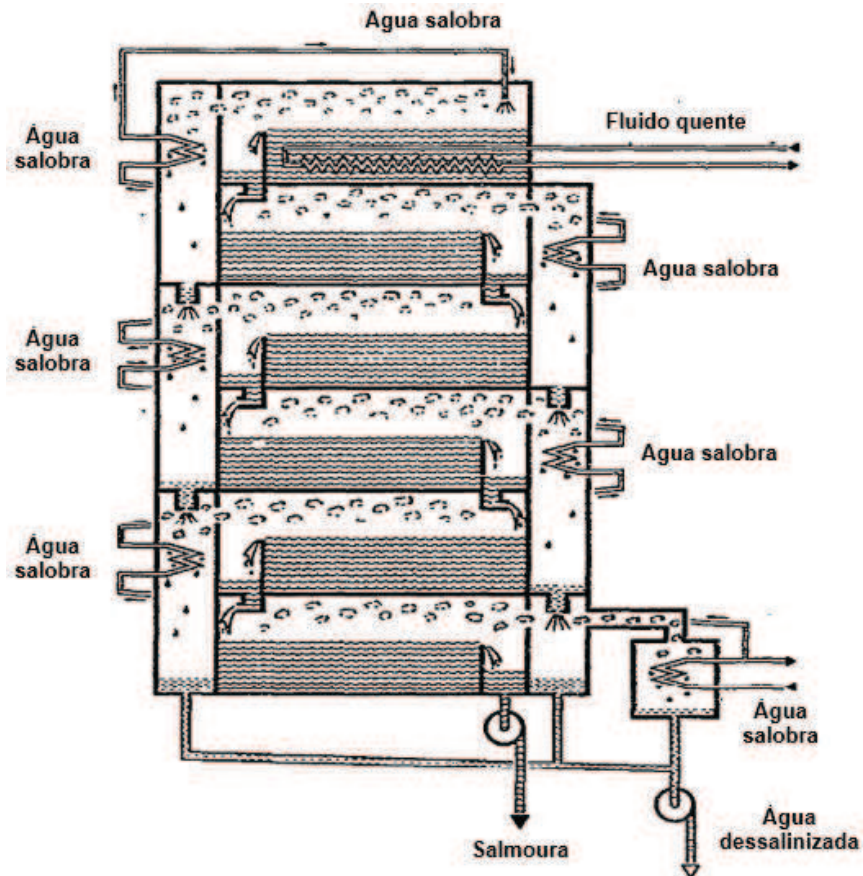
Neste sistema a água salobra é aquecida até sua evaporação, o vapor entra em contato com a cobertura de vidro e perde calor para o ambiente, condensando. O condensado escoava pela cobertura e é coletado por calhas nas laterais do tanque. Deve haver recirculação da água residual no tanque para remoção da salmoura e abastecimento de água para dessalinização.

Parâmetros como: temperatura ambiente, velocidade do vento, radiação solar, capacidade absorptiva e inclinação da cobertura transparente de vidro impactam diretamente na eficiência deste tipo de dessalinizador, no entanto, existe uma relação direta entre a diferença de temperatura da água salobra e a cobertura de vidro com a produção de água dessalinizada (Löf *et al.*, 1961).

3.3.2 Dessalinização por Múltiplos Efeitos (Multieffect Desalination - MED)

O destilador de múltiplos efeitos opera com vários estágios, onde o primeiro recebe calor de um fluido quente, gerando vapor neste e nos estágios seguintes (conforme apresentado na Figura 9), o vapor por sua vez entra em contato com a água salobra de abastecimento, perdendo energia e condensando. Cada estágio representa um efeito na utilização da energia. A produção de cada estágio é canalizada e coletada, e a salmoura é escoada para o estágio inferior e constantemente removida.

Figura 9: Dessalinizador de Múltiplos Efeitos



Fonte: Adaptado de DEROZIER *et al.* (1981)

Dessalinizadores utilizando o processo MED são robustos e ocupam grandes áreas. O protótipo “Pithon”, ilustrado na Figura 10, instalado no sul da França em 1981, utiliza energia solar como fonte de aquecimento do fluido quente, possui 12 estágios com uma temperatura no primeiro estágio de 70°C, volume de armazenamento de fluido quente de 20m³, área útil de coletores solares de 270m² e produção diária de 10m³ (DEROZIER *et al.*, 1981). Outros exemplos de aplicações do processo MED utilizando energia solar como fonte de calor pode-se apresentar: Abu Dhabi nos Emirados Árabes, com capacidade de 120m³/dia, operando com coletores de tubo evacuado; Golfo Árabe, com capacidade de 6000m³/dia, operando com coletores parabólicos; Ilha de Takami no Japão, com capacidade de 16m³/dia, operando com coletores planos (GARCÍA-RODRIGUEZ, 2003).

Figura 10: Protótipo "Python"

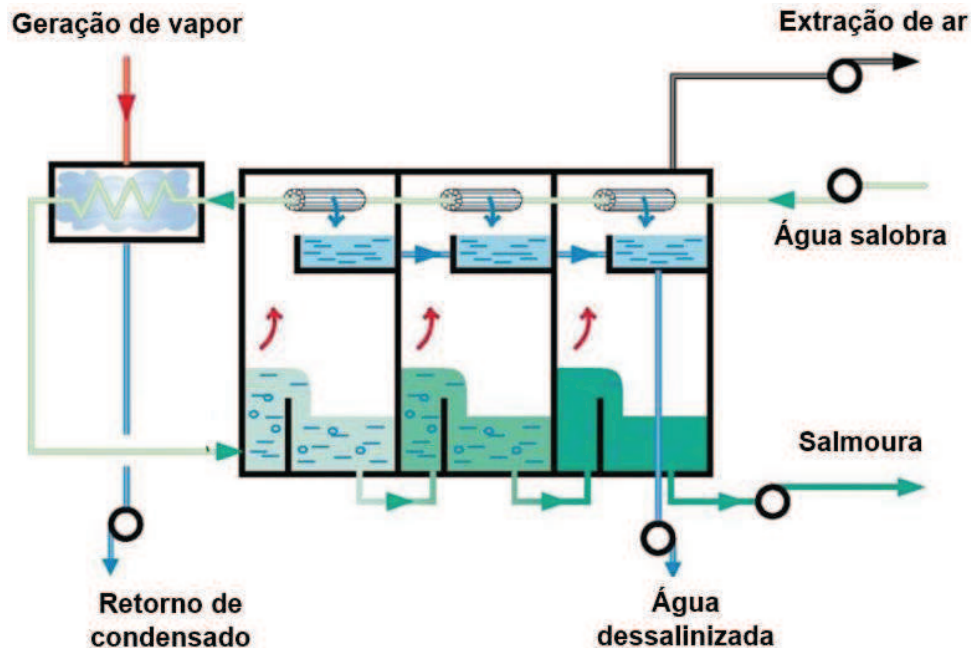


Fonte: DEROZIER *et al.*, (1981)

3.3.3 *Dessalinização por Múltiplos Estágios Flash (Multistage Desalination Flash–MSF)*

A destilação *flash* ocorre a partir da geração de vapor devido à diminuição brusca de pressão da água. No dessalinizador operando segundo a MSF, a água salobra é aquecida e entra em uma câmara de baixa pressão, ocorrendo instantaneamente a geração de vapor. O vapor é então resfriado e condensa ao entrar em contato com um trocador de calor por onde escoa a água salobra de alimentação. A água residual do primeiro processo “flash” é conduzida para outro estágio, também a baixa pressão, porém com pressão superior ao primeiro estágio. O mesmo processo ocorre neste estágio e nos estágios posteriores, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11: Dessalinizador por processo flash de Múltiplos Estágios



Fonte: Adaptado de SIDEM (2016)

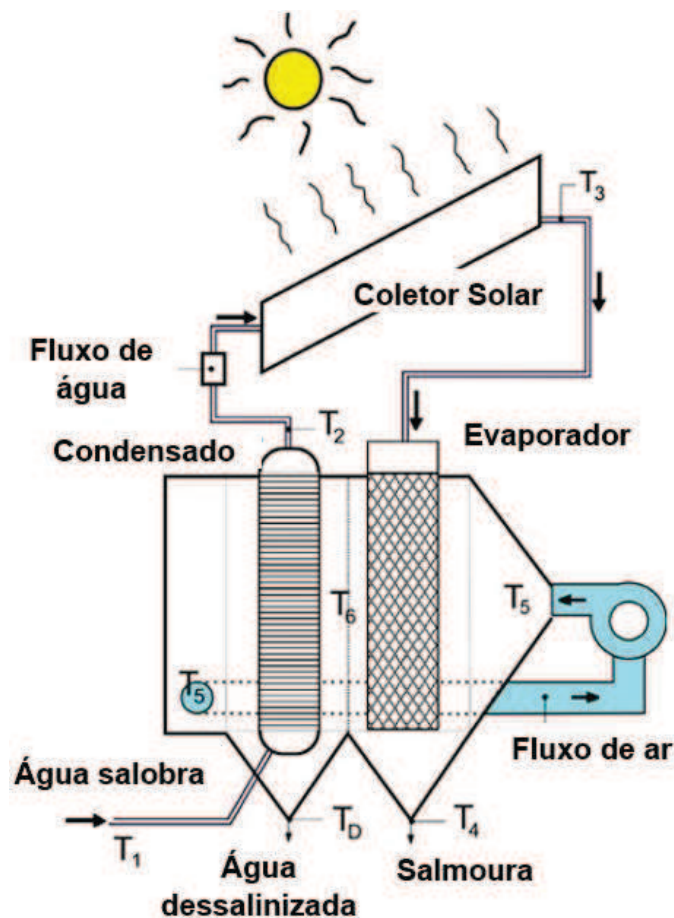
A energia solar é amplamente utilizada como energia motriz para operação do MSF. Estes dessalinizadores possuem grande capacidade de produção operando com vários números de estágios, a exemplo do instalado em La Paz no México, que opera com capacidade de $10\text{m}^3/\text{dia}$, com coletores planos e parabólicos e 10 estágios. Outros exemplos de dessalinizadores utilizando energia solar e o processo MSF podem ser citados: Berken na Alemanha, com capacidade de $10\text{m}^3/\text{dia}$, operando com coletores planos e Kuwait, com capacidade de $100\text{m}^3/\text{dia}$, operando com coletores parabólicos (GARCÍA-RODRIGUEZ, 2003).

3.3.4 Dessalinização por Umidificação – Desumidificação (Humidification - dehumidification – HDH)

Este processo é baseado na transferência de massa onde o ar é umidificado em um evaporador e desumidificado no condensador, possibilitando a remoção do destilado. A HDH pode operar utilizando o aquecimento do ar ou da água. Para o caso do aquecimento do ar, este recebe calor da fonte quente e é posto em escoamento cruzado com água à temperatura

ambiente, umidificando-o, que então perde calor para uma fonte fria no condensador, desumidificando e produzindo destilado. Para o caso onde a água é aquecida, como, por exemplo, por energia solar (como ilustrado na Figura 12), esta recebe energia térmica no coletor solar e é encaminhada para o evaporador, onde entra em contato com o fluxo de ar, umidificando-o, a salmoura é removida e a umidade do ar retirada no condensador, onde o ar é posto em troca de calor com a água salobra de abastecimento (QIBLAWEY E BANAT, 2007)

Figura 12: Dessalinizador por Umidificação – Desumidificação



Fonte: Adaptado de (HERMOSILLO *et al.*, 2012)

Como exemplo de um sistema de dessalinização operando com energia solar e usando a tecnologia HDH, pode-se apresentar um dessalinizador instalado nas Ilhas Canárias com produção diária de 11,8L/m².

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta o dessalinizador solar construído, que opera através de aquecimento indireto, de múltiplos estágios com recuperação de calor, listando seus componentes, materiais, metodologia de montagem, sua operação e metodologia de testes.

Este capítulo está dividido em três partes. Na primeira está descrito o funcionamento do dessalinizador solar de múltiplos estágios com recuperação de calor. Na segunda parte é apresentado o protótipo montado com todas suas características construtivas, materiais e procedimentos utilizados. Por fim, na terceira parte os procedimentos de todos os testes necessários para avaliar o protótipo e descrever suas características de operação são descritos.

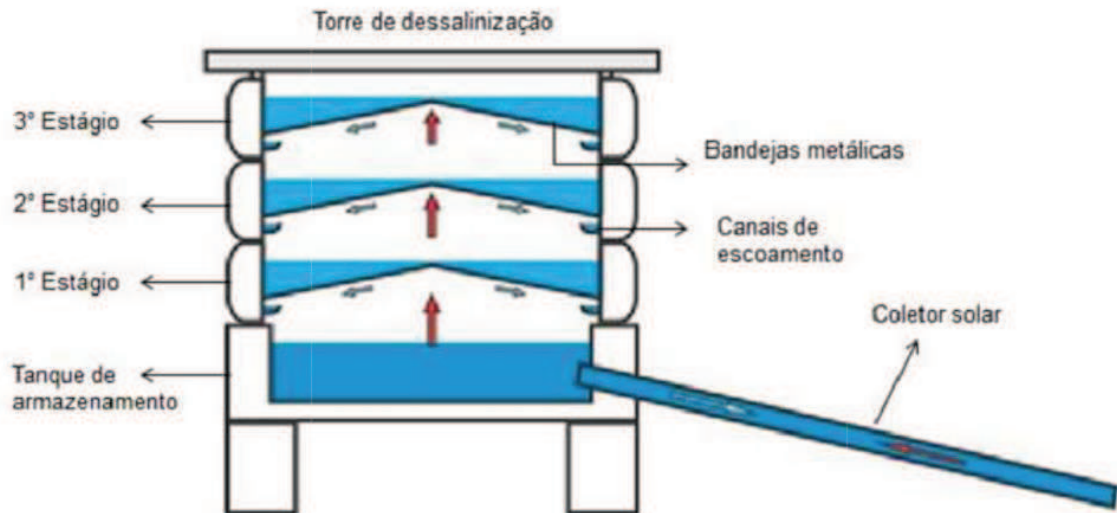
4.1 Princípio de Funcionamento do Dessalinizador Solar de Múltiplos Estágios com Recuperação de Calor

O dessalinizador solar de múltiplos estágios com recuperação de calor está representado esquematicamente pela Figura 13. Neste dessalinizador o fluido de trabalho, no caso a água, é aquecido nos coletores solares. Água a menor temperatura e maior densidade sai do tanque de armazenamento e escoar, por gravidade, para os coletores solares onde recebe calor diminuindo sua densidade e escoando para a entrada do tanque de armazenamento. Este circuito denomina-se termossifão, pois o fluido escoar sem a necessidade de uma bomba, através da diferença de densidade atribuída à expansão ocasionada pelo seu aquecimento. Neste caso, onde o fluido é aquecido em coletores solares e levado ao dessalinizador, denomina-se este tipo de aquecimento como indireto, pois a fonte de calor não incide diretamente no reservatório.

A dessalinização térmica funciona basicamente através de dois processos físicos de mudança de fase: a evaporação e a condensação. Uma vez aquecida, a água no tanque de armazenamento evapora e entra em contato com a superfície da bandeja do primeiro estágio que se encontra a uma temperatura inferior. Neste contato há transferência de calor, o vapor perde energia para a água, o que acarreta na condensação do vapor e aquecimento da água armazenada na bandeja do primeiro estágio. O condensado escoar pela bandeja e é então

coletado nos canais de escoamento. Este condensado representa a produção de água dessalinizada no estágio.

Figura 13: Dessalinizador solar de múltiplos estágios com recuperação de calor



Fonte: Elaborado pelo autor

A água contida na bandeja do primeiro estágio é aquecida conforme recebe calor do vapor gerado no tanque até que obtém energia suficiente para vaporizar-se, então o vapor gerado no primeiro estágio entra em contato com a bandeja do segundo estágio cedendo calor para a água contida neste. Desta forma, o vapor condensa e é coletado nos canais do segundo estágio, acarretando o aquecimento da água contida neste. Este processo de vaporização e condensação repete-se nos múltiplos estágios seguintes sempre recuperando calor do estágio abaixo a fim de vaporizar água e produzir condensado no estágio seguinte.

4.1.1 Parâmetros de Desempenho do Dessalinizador

Na análise do desempenho do dessalinizador de múltiplos estágios com recuperação de calor existem dois parâmetros importantes a serem estudados: A razão do ganho de saída, GOR (*Gain Output Ratio*), e o coeficiente de performance, COP (*Coefficient Of Performance*).

A razão do ganho de saída (GOR) representa a eficiência do dessalinizador e desta forma é definida pela razão entre a energia necessária para evaporar toda a água produzida no dessalinizador pela energia total incidente nos coletores solares.

$$GOR = \frac{\sum m_T \cdot h_{fg}}{E} \quad (1)$$

$$E = \int_{dia} I \cdot A_{col} dt \quad (2)$$

O GOR está representado pela Equação 1, onde h_{fg} representa o calor latente em W necessário para vaporização de 1Kg de água a 100°C; m_T representa a massa total, em Kg, de água dessalinizada produzida em todos os estágios do dessalinizador; e E representa a energia total incidente nos coletores solares e pode ser calculada pela integral apresentada na Equação 2, onde I representa a irradiação solar em W/m² que incide sobre os coletores solares; e A a área total de coleta em m² dos coletores solares.

O coeficiente de performance (COP) para dessalinizadores de múltiplos estágios pode ser definido como a razão entre a massa total de água dessalinizada produzida em todos os estágios pela massa de água produzida pelo primeiro estágio.

$$COP = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{m_1} \quad (3)$$

O COP está representado pela Equação 3, onde n representa o número de estágios, m_i representa a massa em Kg produzida no estágio i , logo m_1 representa a massa produzida no primeiro estágio 1.

4.2 O Protótipo

O protótipo do dessalinizador solar térmico de múltiplos estágios com recuperação de calor e aquecimento indireto (apresentado na Figura 14) foi montado e instalado no Laboratório de Energia Solar e Gás Natural (LESGN) localizado na Universidade Federal do Ceará (UFC) em Fortaleza. Este pode ser basicamente dividido em duas partes: Unidade de aquecimento e Unidade de dessalinização.

Figura 14: O protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor

As unidades estão interligadas por tubulações de cobre de 7/8 pol (aproximadamente 22mm) de diâmetro, foram utilizadas curvas e conexões rosqueadas e soldadas por brasagem. Para minimizar as perdas de calor pelas tubulações, foi instalado isolamento térmico de lã de vidro, que está preso por arame de aço e fita adesiva transparente, posteriormente pintado de preto, conforme mostrado na Figura 14.

4.2.1 Unidade de Aquecimento

Esta unidade tem como função a conversão da energia proveniente da radiação solar em energia útil para aquecimento do fluido de trabalho, que para este protótipo é a água salobra. O fluido deverá circular pela unidade de aquecimento recebendo calor, energia motriz para operação da unidade de dessalinização.

A unidade de aquecimento é composta por coletores solares de placas planas, o protótipo foi montado com duas configurações diferentes da unidade de aquecimento, uma com dois coletores e outra com três coletores. A Figura 14 mostra o protótipo na configuração com três coletores e a Figura 15 mostra a unidade de aquecimento na configuração com dois coletores.

Figura 15: Unidade de Aquecimento.



Fonte: Elaborado pelo autor

Cada coletor utilizado foi fabricado pela Arcon Solvame e possuem área útil de absorção de radiação solar de 2,57 m². As especificações gerais do coletor estão apresentadas na Tabela 1. Sua configuração construtiva segue a ilustração apresentada pela Figura 5, onde cada coletor possui um tubo de distribuição de entrada do fluido de trabalho localizado em sua parte inferior e um tubo de distribuição de saída localizado na parte superior. Estes são tubos de cobre rígido, com diâmetro externo de 7/8pol (aproximadamente 22mm). Quanto às ramificações que percorrem o comprimento do coletor, este possui oito, todas utilizando tubo de cobre rígido de diâmetro de 1/2pol (aproximadamente 12,7mm), cada uma delas fixada a uma aleta revestida com superfície seletiva. O coletor apresenta uma única cobertura de vidro, possui isolamento térmico de lã de vidro e sua estrutura é composta por perfis de alumínio em suas laterais e chapa de aço galvanizado selando sua parte inferior, onde está armazenado o isolamento térmico.

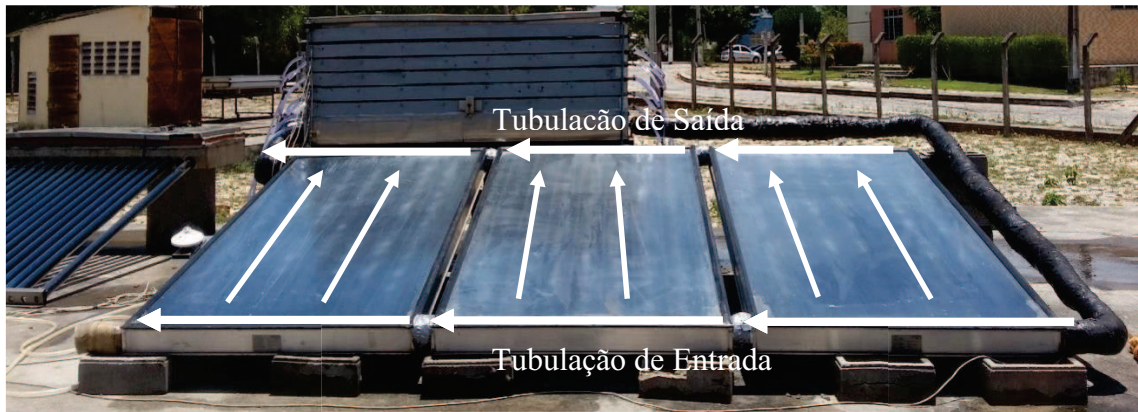
Tabela 1: Especificações do coletor solar utilizado no protótipo.

Fabricante	Arcon Solvame
Modelo	Arcon STU-VNA
Tipo	Placa plana
Pressão de Operação [bar]	6
Pressão de Teste [bar]	7,8
Peso Líquido [Kg]	45
Dimensões [m] (largura x comprimento)	1,22 x 2,26
Área de Absorção [m ²]	2,57
Revestimento das aletas	Superfície Seletiva

Fonte: Elaborado pelo autor

Os coletores foram instalados seguindo uma configuração em paralelo, onde o tubo de entrada é acoplado também no tubo de entrada do outro coletor, e o mesmo para os tubos de saída, conforme está ilustrado na Figura 16, onde as setas simbolizam o caminho percorrido pelo fluxo de trabalho. Esta configuração possibilita maior fluxo de massa circulando através do sistema.

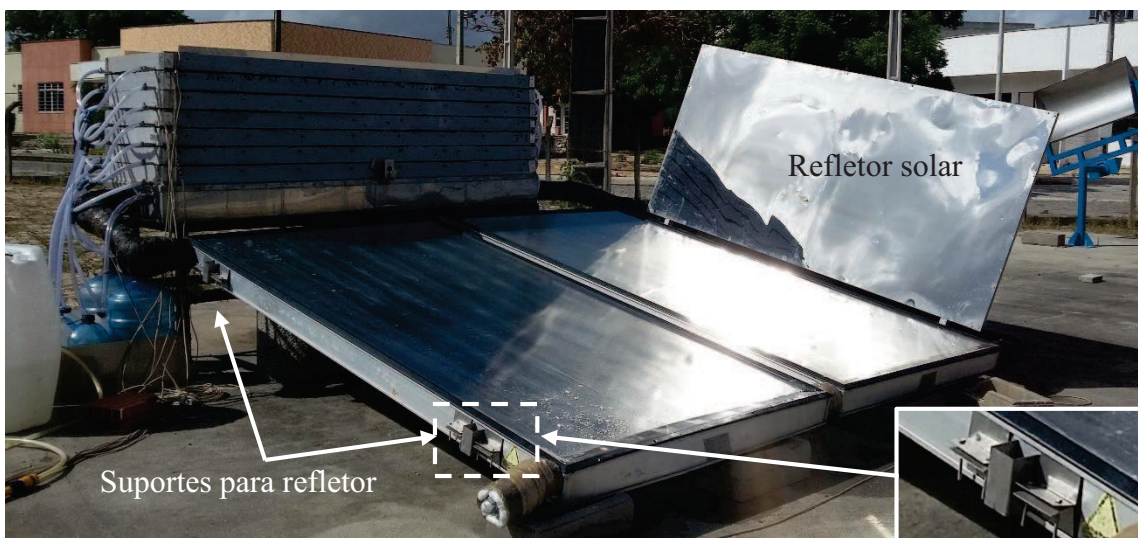
Figura 16: Acoplamento em paralelo dos coletores



Fonte: Elaborado pelo autor

Para maximizar o aquecimento da unidade de aquecimento pode-se usar um refletor solar. Este acessório pode ser instalado na unidade de aquecimento e possui a finalidade de refletir a radiação solar para os coletores, como apresentado pela Figura 17. O refletor solar foi fabricado com perfis quadrados de alumínio de 30mm de lado, estes perfis estão soldados de forma a compor a estrutura do refletor. Uma chapa de aço inoxidável espelhada é então fixada na estrutura utilizando rebites. O refletor é instalado em suportes nas laterais dos coletores e deve ser mudado de posição ao meio dia solar (entre 11:30 e 12:00 horas) para que continuem refletindo a radiação solar durante o período da tarde.

Figura 17: Unidade de aquecimento com refletor



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.2 Unidade de Dessalinização

Esta unidade, onde ocorre o processo de dessalinização, é composta por um tanque de armazenamento e estágios de produção, conforme mostrado na Figura 18. Esta unidade pode operar com até sete estágios, e cada estágio possui dois canais de coleta, por onde é feita a coleta da produção de água dessalinizada.

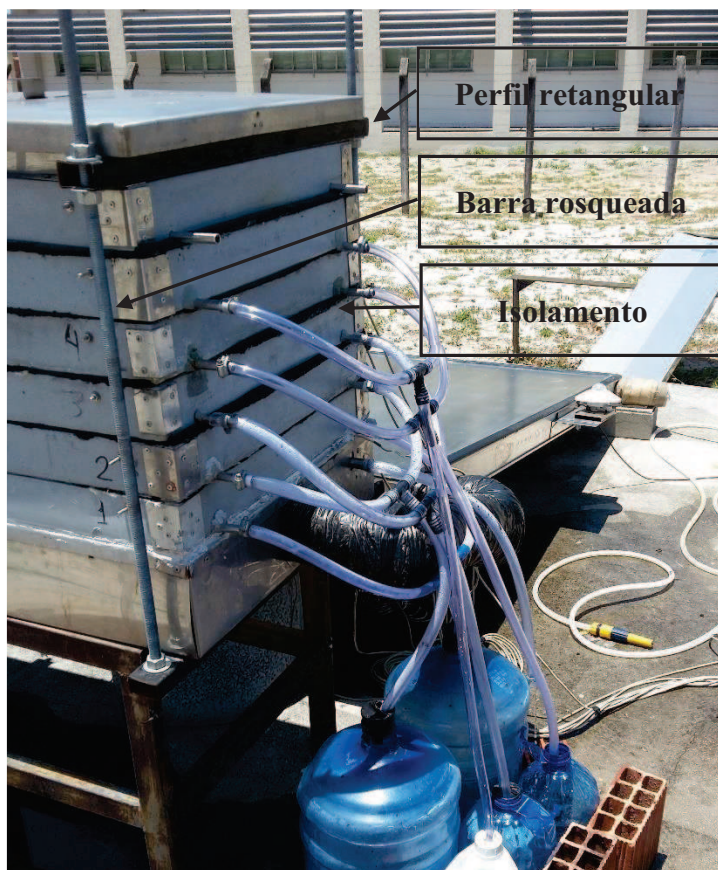
Figura 18: Unidade de dessalinização



Fonte: Elaborado pelo autor

Os estágios são montados um em cima do outro, ficando o conjunto inteiro em cima do tanque. Entre cada um deles foi colado, com silicone, um isolamento feito de borracha elastomérica da linha HT (*High Temperature*), fabricada pela Armacell, que possui a função de vedação entre estágios para evitar a perda de vapor. Os estágios são presos ao tanque utilizando uma prensa fabricada com dois perfis retangulares de aço baixo carbono com dimensões 30x50 mm, ligados por duas barras roscadas de $\frac{3}{4}$ pol de diâmetro, utilizando porcas para ajuste. Os perfis comprimem os estágios e facilitam a vedação da borracha elastomérica, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19: Prensa da unidade de dessalinização



Fonte: Elaborado pelo autor

Cada estágio é composto por perfis de polietileno, dois canais de escoamento e uma bandeja metálica. Os perfis de polietileno formam a estrutura do estágio e atuam também como isolantes térmicos. A estrutura possui comprimento de 2,15m e 0,6m de largura, e seus cantos, cortados em 45°, foram fixados utilizando resina epóxi e cantoneiras de aço com rebites. Em cada estágio foram instalados, em seu comprimento, dois canais de escoamento, cuja função é de captar o condensado e conduzi-lo para os reservatórios coletores. Os canais de escoamento foram fabricados em chapas de aço inoxidável AISI 304, utilizando processos de corte e dobra para obtenção de sua forma final. Em cada extremidade dos canais foram soldados tubos, também de aço inoxidável, para acoplamento das mangueiras. Os canais estão fixos aos perfis de polietileno por parafusos ao longo do seu comprimento.

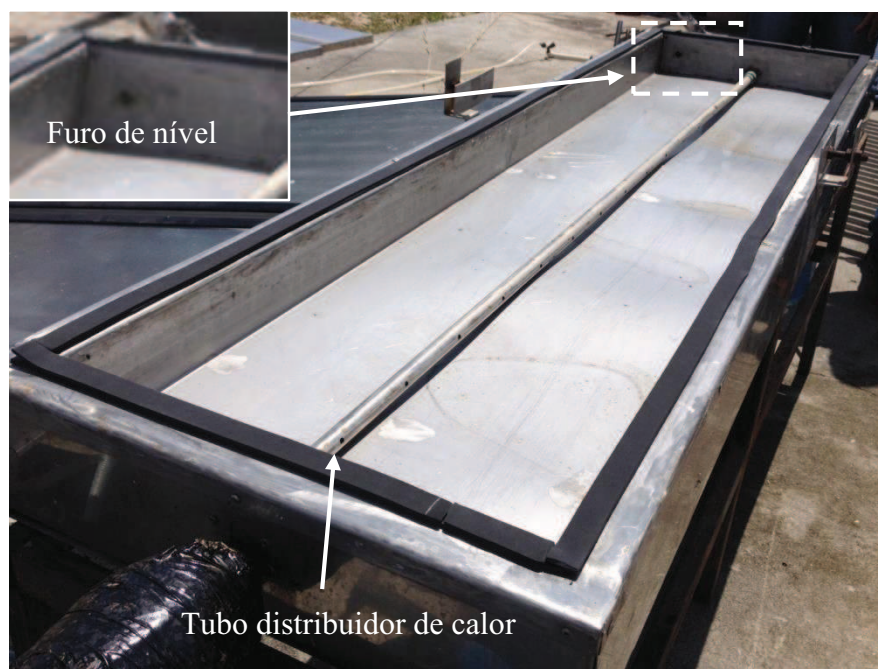
Os canais também são responsáveis por suportar a bandeja no estágio, ficando apoiada em cima destes. Assim como os canais, as bandejas são fabricadas utilizando chapas de aço inoxidável AISI 304 através de processos de corte, dobra e soldagem TIG, formando um

reservatório em W, onde a parte superior armazena a água salobra e parte inferior condensa o vapor d'água produzido no estágio abaixo, que por sua vez escoar até os canais. Cada bandeja possui 2m de comprimento por 0,5m de largura e capacidade de armazenamento de 20 litros de água salobra em seu reservatório superior. Sua linha de centro possui uma angulação, denominada ângulo de condensação que mede aproximadamente 10°.

Cada bandeja possui um furo de 9mm de diâmetro, responsável por delimitar o nível de água, evitando que cada bandeja transborde pelas laterais quando abastecida. Em cada furo está colado, com silicone, um pequeno tubo de borracha que evita que a água, ao transbordar o nível do furo, escoar seguindo o ângulo de condensação da parte inferior da bandeja e caia diretamente na bandeja abaixo. O furo fica localizado próximo à extremidade da bandeja e em sua linha de centro. Na montagem de cada estágio as bandejas são colocadas de forma que os furos não fiquem colineares, e sim postos em posições contrárias. Desta forma, quando abastecida, cada bandeja possui nível regular de água. Seguindo este procedimento, após montados os estágios, o abastecimento de sistema é feito pela bandeja do último estágio que irá transbordar pelo seu furo de nível e alimentar a bandeja abaixo, seguindo este processo até que todas as bandejas estejam cheias e a água chegue ao tanque de armazenamento.

O tanque de armazenamento, mostrado na Figura 20, é responsável por armazenar a água salobra. É neste componente da unidade de dessalinização que ficam acopladas as tubulações que interligam esta unidade à de aquecimento. Desta forma, a água contida neste tanque estará em constante circulação pelos coletores solares, sendo aquecida para a geração de vapor dentro do tanque de armazenamento, proporcionando o funcionamento da unidade de dessalinização.

Figura 20: Tanque de armazenamento



Fonte: Elaborado pelo autor

O tanque de armazenamento possui uma capacidade de 40 litros que é delimitada por um furo de nível, dimensões gerais: 2100 x 600 x 150 mm (comprimento x largura x altura), e isolamento de lã de vidro em suas laterais e inferior, com espessura de 50mm. O tanque foi fabricado com chapas de aço inoxidável AISI 304, utilizando processos de corte e dobra das chapas e fixação das peças utilizando processo de soldagem TIG e rebites. Na admissão do tanque de armazenamento foi instalado um tubo de distribuição de calor, de aço inoxidável (AISI 304), com diâmetro externo de 7/8pol (aproximadamente 22mm), 1,9m de comprimento e com furos transversais passantes de 3/8pol (aproximadamente 9,5mm) de diâmetro com espaçamento de 100mm 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.

4.2.3 Sistema de Aquisição de Dados

Para a realização dos testes é necessário que o protótipo seja monitorado por sensores, visando realizar a coleta de dados, informações importantes na interpretação dos resultados e constatação dos parâmetros de funcionamento.

O dessalinizador possui monitoramento de temperatura, radiação global e condutividade da água produzida. Para a leitura das temperaturas foram utilizados termopares do tipo K (precisão de $41\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) e um sensor de radiação global, piranômetro de modelo CM21 fabricado pela KIPP/ZONEN com sensibilidade de $11,10 \times 10^{-6} \text{V}/\text{Wm}^{-2}$, instalado ao lado esquerdo dos coletores solares na mesma inclinação destes, conforme mostrado na Figura 14.

Os termopares e piranômetro estão conectados a uma central de coleta de dados (*datalogger*) fabricado pela OMEGA de modelo OM-420 com capacidade de leitura simultânea de 16 pontos (canais). Este *datalogger*, mostrado na Figura 21, faz medições a cada um segundo e realiza a média a cada minuto e possui autonomia de 36 horas de armazenamento de dados. Para analisar os dados, estes devem ser transmitidos para um computador, isto ocorre utilizando o *software* Hiperwar específico do fabricante do *datalogger*.

Figura 21: Central de aquisição de dados (datalogger)



Fonte: Elaborado pelo autor

No protótipo, foi necessária a instalação de 10 pontos de medição de temperatura, conforme apresentado na Tabela 2. Para fixação dos termopares na tubulação de cobre de

entrada e saída dos coletores solares foi utilizada uma cola específica para este fim, a *Fast Set Epoxy* OMEGABOND 100, assim como o *datalogger* a cola é fabricada pela OMEGA.

Tabela 2: Pontos de medição de temperatura

Ponto no <i>datalogger</i>	Ponto de Medição no Dessalinizador
Canal 13	Entrada nos coletores solares
Canal 9	Saída dos coletores solares
Canal 3	Tanque de armazenamento
Canal 1	Estágio 1
Canal 11	Estágio 2
Canal 12	Estágio 3
Canal 7	Estágio 4
Canal 4	Estágio 5
Canal 5	Estágio 6
Canal 2	Estágio 7

Fonte: Elaborado pelo autor

Quanto aos outros termopares, estes foram deixados imersos na água em seus pontos de coleta de dados (estágios e tanque). Foi utilizada uma chapa para prevenir que o termopar não tocasse na superfície metálica, garantindo a medição da temperatura da água, conforme mostrado na Figura 22.

Figura 22: Termopar em bandeja de estágio



Fonte: Elaborado pelo autor

Para análise da qualidade da água produzida pelo dessalinizador, foi utilizado um condutivímetro fabricado pela OMEGA, de modelo CDB-70, apresentado na Figura 23. Este aparelho mede a condutividade elétrica da água produzida. Neste caso, quanto menor a condutividade elétrica, menor é a quantidade de íons nela dissolvido, o que representa um parâmetro de pureza.

Figura 23: Condutivímetro OMEGA CDB-70



Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 Procedimento de Testes

Para realizar a análise de desempenho do protótipo do dessalinizador solar de múltiplos estágios com recuperação de calor e aquecimento indireto é necessária a realização de teste de operação.

As unidades de aquecimento e dessalinização foram interligadas utilizando tubulações de cobre soldadas e conexões rosqueadas, conforme descrito no tópico 4.2 deste capítulo. Então, antes de iniciar os testes de operação do sistema, foi necessária a realização de testes de estanqueidade das tubulações e conexões, com o objetivo de garantir que não haja vazamentos do fluido de trabalho durante a operação do protótipo. Para este teste o sistema é posto em operação utilizando água como fluido de trabalho e então é feita a inspeção dos pontos de possíveis vazamentos, tais como: acoplamentos soldados e conexões rosqueadas.

Após os testes de estanqueidade, foi possível a realização dos testes de operação, que puderam ser divididos em duas etapas: testes de aquecimento e testes de produção.

4.3.1 *Teste de Aquecimento*

Os testes de aquecimento possuem o objetivo de avaliar a capacidade da unidade de aquecimento, verificando as temperaturas do fluido de trabalho. Este teste é feito ao longo de um dia completo (24 horas), onde o sistema é abastecido com sua capacidade máxima de fluido de trabalho e posto em operação. Foram feitos testes utilizando duas configurações de unidade de aquecimento, uma com dois coletores solares e outra com três coletores solares. Nestas duas configurações os coletores foram acoplados em paralelo.

4.3.2 *Testes de Produção*

Os testes de produção possuem o objetivo de avaliar a produção de água dessalinizada. Este teste é realizado ao longo de um dia completo (24 horas), onde o sistema é abastecido com sua capacidade máxima de água e posto em operação. Ao longo do dia são

monitoradas as temperaturas dos pontos de medição, apresentados na Tabela 2 e a radiação solar incidente nos coletores. Nestes testes são realizadas duas coletas de água dessalinizada produzida pelo dessalinizador, uma feita no final da tarde, às 18:00 horas, que representa a produção diurna e outra feita no início da manhã do dia seguinte, às 07:00 horas, que representa a produção noturna. Foi medido o volume de água produzida em cada estágio e sua respectiva condutividade térmica.

Com o objetivo de analisar os diversos parâmetros de operação, os testes de produção foram realizados em várias configurações diferentes do dessalinizador. Ao todo foram realizados testes com onze configurações distintas, e em cada configuração destas foram feitos pelo menos quatro dias de testes. A Tabela 3 apresenta as características de cada uma das onze 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, o nono e décimo avaliam o desempenho do dessalinizador com apenas dois coletores utilizando formas diferentes de abastecimento e, finalmente, no décimo primeiro teste, foi instalado um refletor para potencializar a capacidade dos coletores.

Tabela 3: Características dos testes de produção

Teste	Quantidade de testes	Configuração do dessalinizador
Teste 1	4	3 coletores em paralelo; 1 estágio de produção; abastecimento feito pela manhã ou noite.
Teste 2	4	3 coletores em paralelo; 2 estágios de produção; abastecimento feito pela manhã ou noite.
Teste 3	4	3 coletores em paralelo; 3 estágios de produção; abastecimento feito pela manhã ou noite.
Teste 4	4	3 coletores em paralelo; 4 estágios de produção; abastecimento feito pela manhã ou noite.
Teste 5	7	3 coletores em paralelo; 5 estágios de produção; abastecimento feito pela manhã ou noite.

Teste 6	7	3 coletores em paralelo; 6 estágios de produção; abastecimento feito pela manhã ou noite.
Teste 7	12	3 coletores em paralelo; 7 estágios de produção; abastecimento feito pela manhã ou noite.
Teste 8	7	3 coletores em paralelo; 7 estágios de produção; abastecimento contínuo ao longo do dia.
Teste 9	5	2 coletores em paralelo; 7 estágios de produção; abastecimento feito pela manhã ou noite.
Teste 10	5	2 coletores em paralelo; 7 estágios de produção; abastecimento contínuo ao longo do dia.
Teste 11	4	2 coletores em paralelo com refletor; 7 estágios de produção; abastecimento contínuo ao longo do dia.

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme apresentado na Tabela 3, foram realizadas duas formas de abastecimento de água salobra no sistema: abastecimento feito pela manhã ou noite e abastecimento contínuo ao longo do dia. No abastecimento feito pela manhã ou noite, o sistema é abastecido e posto em operação por dois dias, através do seguinte procedimento: nas segundas-feiras o sistema não opera, pois encontra-se vazio devido ao fim de semana, então o sistema é abastecido nas segundas-feiras à noite e opera terça-feira e quarta-feira. Na quinta-feira, após a coleta da produção noturna realizada às 7:00 horas referente à quarta-feira, o sistema é abastecido e posto em operação durante mais dois dias (quinta-feira e sexta-feira). No abastecimento contínuo é usado o seguinte procedimento: nas segundas-feiras o sistema é abastecido à noite e posto para operação na terça-feira, 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.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados experimentais a partir dos testes realizados no dessalinizador solar, bem como as discussões referentes aos resultados obtidos. Os procedimentos adotados para condução dos testes estão descritos na Seção 4.3.

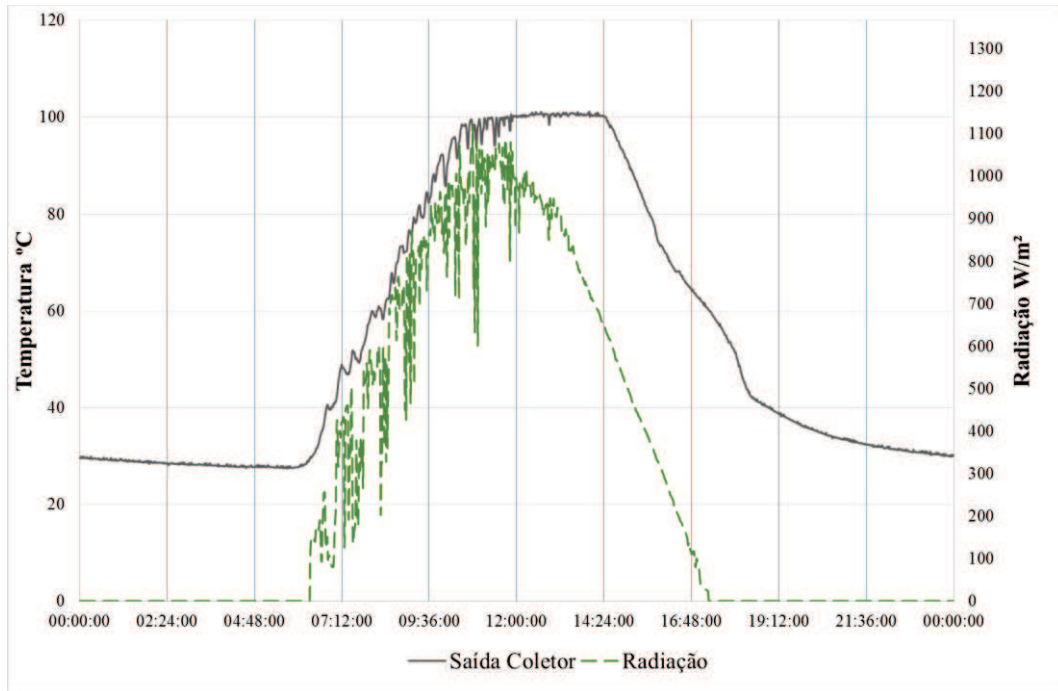
No início dos trabalhos, além da recuperação dos equipamentos, foram realizados testes de estanqueidade, a fim de identificar e corrigir vazamentos no sistema.

5.1 Resultados – Testes de Aquecimento

Os testes de aquecimento foram realizados com os coletores solares em duas configurações diferentes, utilizando duas e três unidades. O objetivo da realização de testes nessas duas configurações é a determinação do melhor arranjo para a operação do dessalinizador, se nenhuma ou até as duas configurações eram possíveis.

O primeiro teste de aquecimento foi realizado com dois coletores solares montados em paralelo e utilizando água como fluido de trabalho; o dia de teste foi de céu limpo com poucas nuvens, e apresentou radiação média de 620 W/m^2 entre 5:30h e 17:30h e 930 W/m^2 entre 10:00h e 14:00h. O Gráfico 1 apresenta as temperaturas da saída dos coletores solares e a radiação solar ao longo do dia de teste. É possível observar que o sistema atingiu temperatura de 100°C por volta das 11:00 horas, mantendo-se neste patamar por 3 horas e meia, até às 14:30 aproximadamente. Este resultado foi satisfatório, visto que temperaturas em torno de 80°C são suficientes para uma boa operação de dessalinizadores solares (conforme protótipos apresentados no Capítulo 2 como: Derozier *et al.*, 1981 e Coutinho, 2003).

Gráfico 1: Teste de Aquecimento com dois coletores

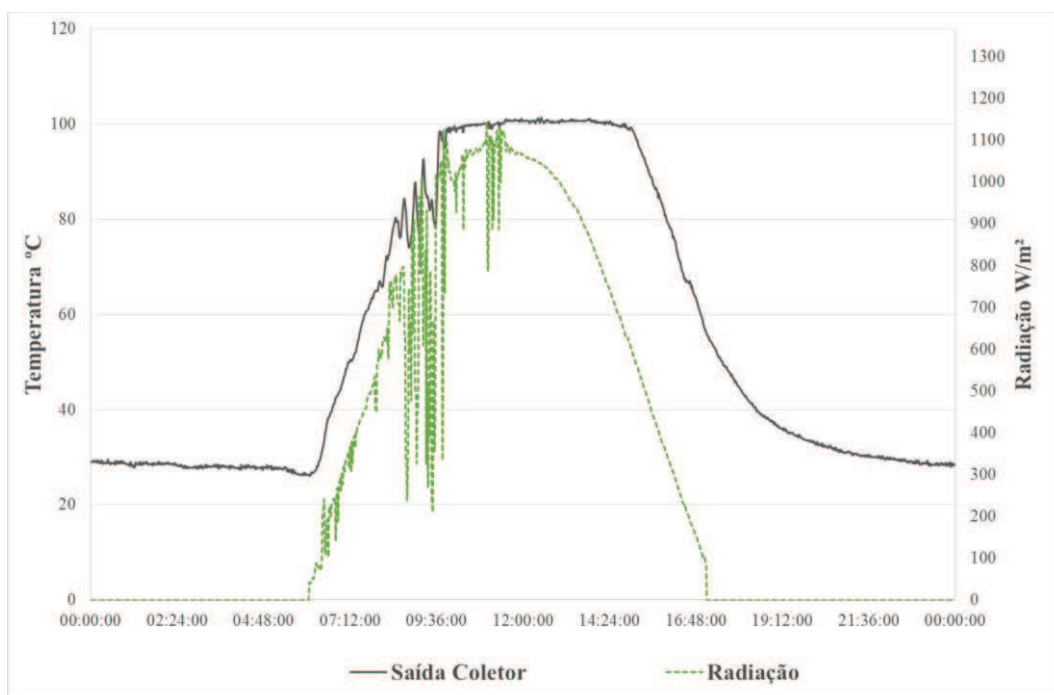


Fonte: Elaborado pelo autor

O segundo teste foi realizado utilizando três coletores solares em paralelo, e os resultados estão apresentados no Gráfico 2. O dia de teste foi de céu limpo, com poucas nuvens, e apresentou radiação média de 630 W/m^2 entre 5:30h e 17:30h e 1002 W/m^2 entre 10:00h e 14:00h. O sistema apresentou temperatura de 100°C por volta das 9:40h e manteve-se neste patamar por 5 horas e meia, até às 15:10h aproximadamente. Uma comparação entre esses dois testes mostra que quando os três coletores solares são usados, obtém-se uma maior permanência do sistema em sua temperatura máxima de operação (100°C) ao longo do dia, em relação à configuração com dois coletores solares.

Com os Gráfico 1 e 2, pode-se concluir que as duas configurações são adequadas para operação, porém não é possível afirmar qual delas apresenta o melhor desempenho. Para tanto, é necessário avaliar a eficiência da unidade de dessalinização nos testes de produção, conforme está apresentado na Seção 5.2, visto que o desempenho da torre de dessalinização é função das temperaturas nos estágios e também das diferenças de temperaturas entre esses.

Gráfico 2: Teste de aquecimento com três coletores

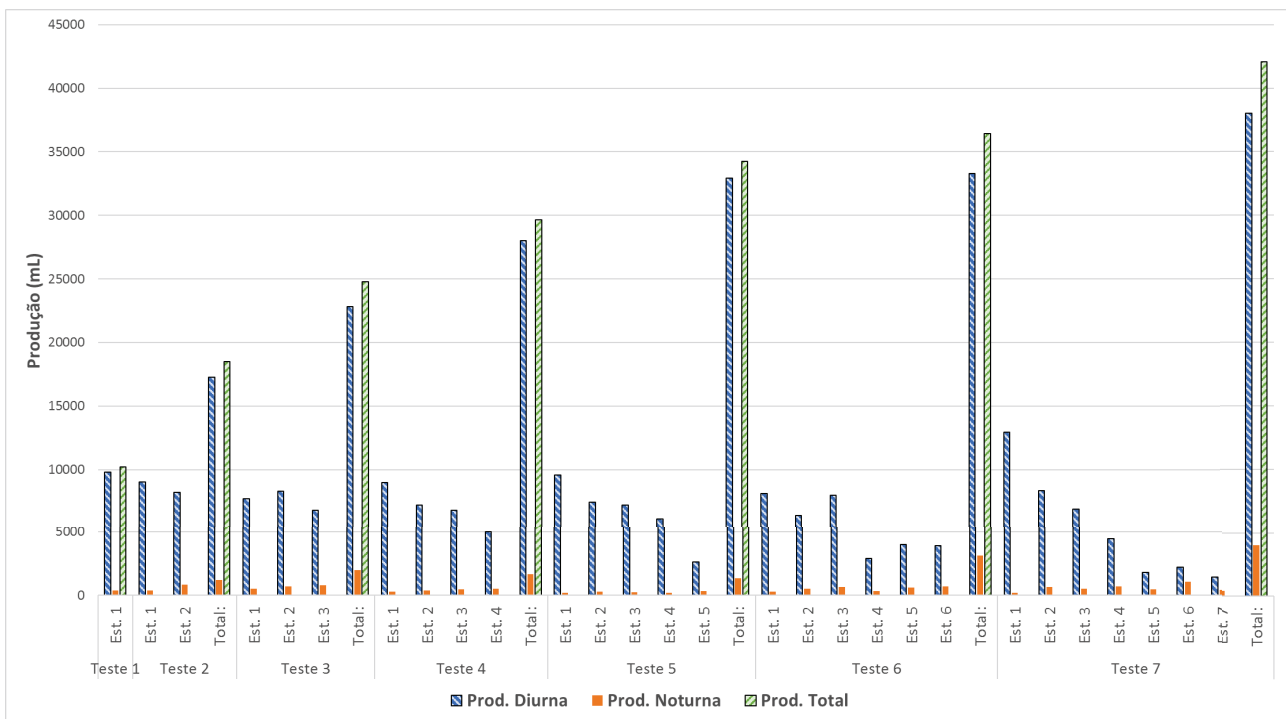


Fonte: Elaborado pelo autor

5.2 Resultados – Testes de Produção

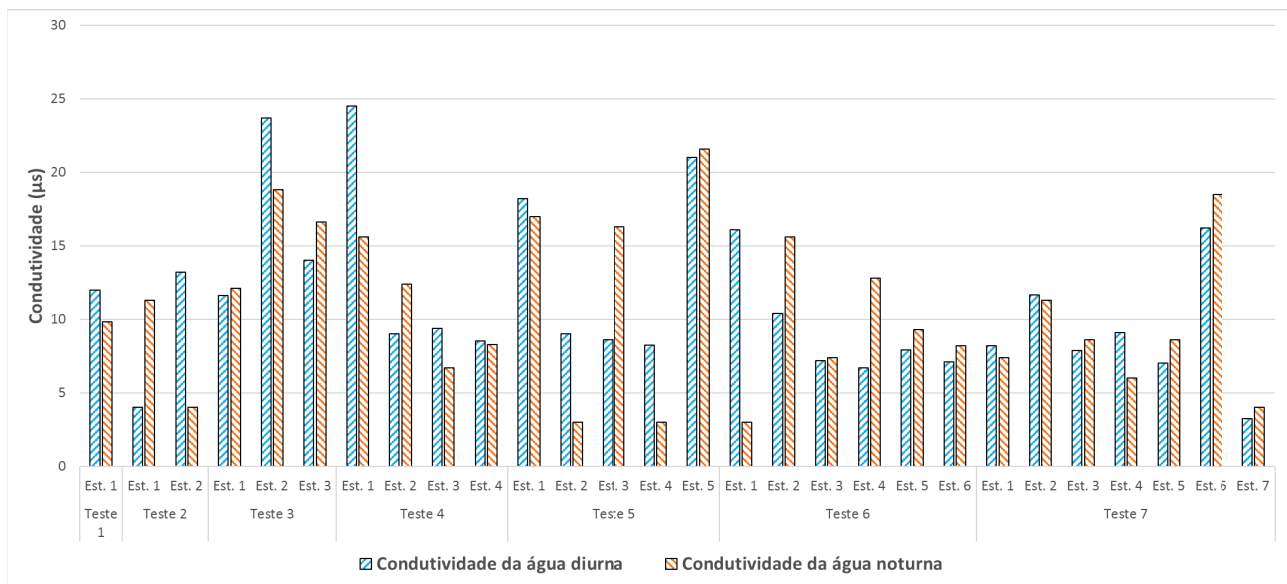
Os testes de produção foram realizados seguindo o procedimento descrito no tópico 4.3.2, utilizando água salobra com uma condutividade elétrica média de $820 \mu\text{s}$. Conforme a Tabela 3, foram realizados onze tipos de testes de produção sendo os sete primeiros com três coletores ligados em paralelo, variando o número de estágios com abastecimento a cada dois dias. O Gráfico 3 apresenta os resultados dos dias de maior produção para cada um dos sete primeiros testes e o Gráfico 4 apresenta as correspondentes medições de condutividade elétrica. O objetivo foi avaliar o desempenho do dessalinizador aumentando-se o número de estágios de um a sete.

Gráfico 3: Produção dos Testes 1 ao 7 (maior produção registrada)



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 4: Condutividade elétrica da água dessalinizada dos Testes 1 ao 7 (maior produção registrada)



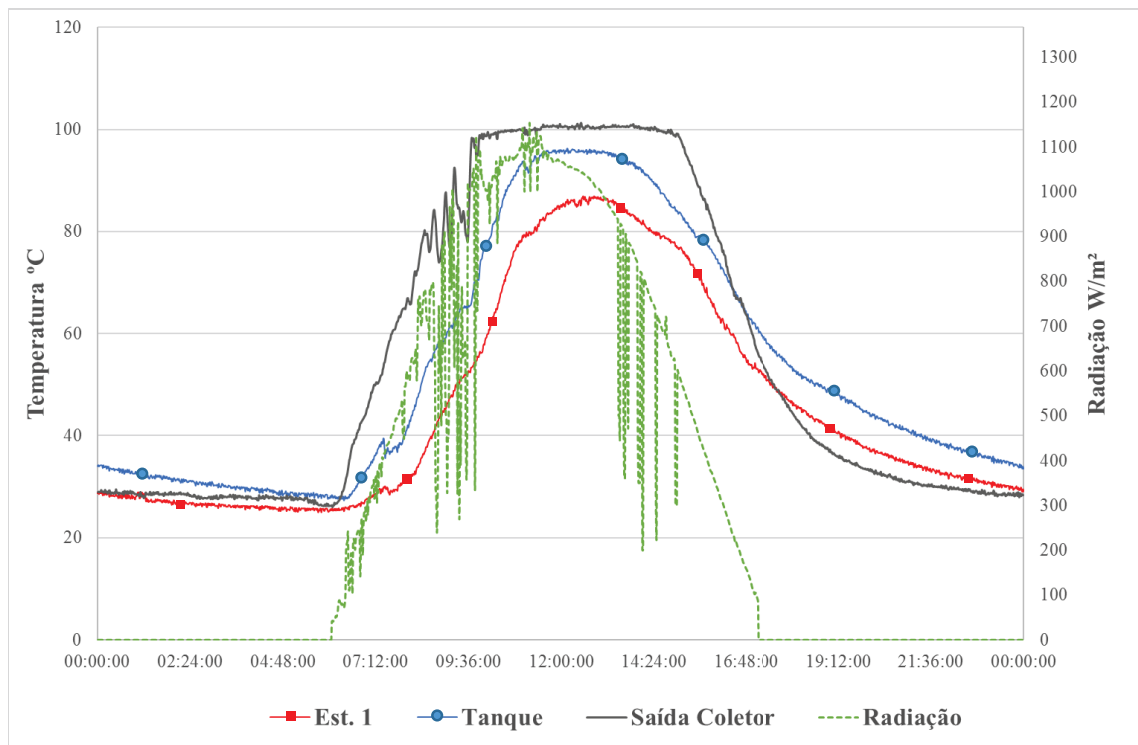
Fonte: Elaborado pelo autor

Os pontos mais relevantes e as discussões de cada teste estão apresentados nas seções seguintes. Pode-se, contudo, observar que a salinidade da água produzida (medições de condutividade elétrica) é baixa, com valores inferiores a $25\mu\text{s}$, quando comparada aos padrões de água potável (50 a $200\mu\text{s}$).

5.2.1 Teste 1

Utilizando três coletores conectados em paralelo, um estágio de produção e abastecimento a cada dois dias, o sistema foi posto em operação por 4 dias. A maior produção foi registrada no segundo dia de testes, com 9,8 litros diurna e 0,4 litros noturna. Neste dia o céu estava claro com poucas nuvens, onde foi registrada uma radiação média de $687,6\text{ W/m}^2$ entre 5:30h e 17:30h e 986 W/m^2 entre 10:00h e 14:00h. O Gráfico 5 apresenta as medições de temperatura e radiação.

Gráfico 5: Temperatura e radiação para o segundo dia do Teste 1



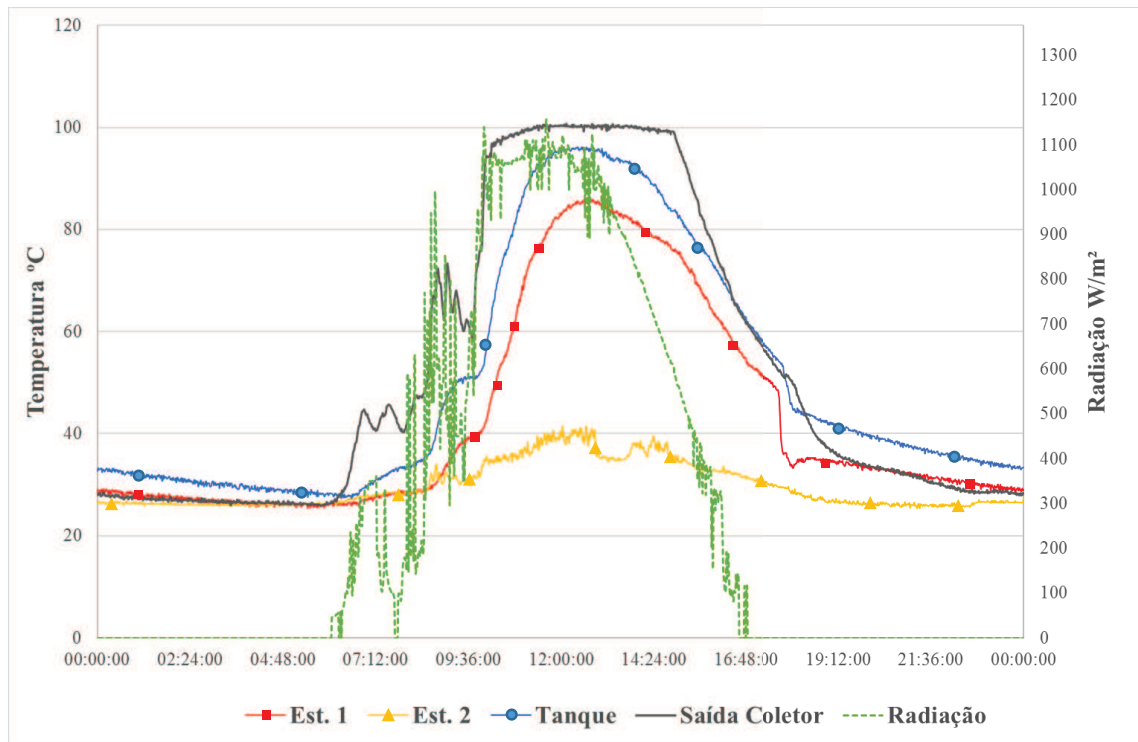
Fonte: Elaborado pelo autor

A condensação da água na parte inferior da bandeja do primeiro estágio dá-se pela troca de calor entre o vapor gerado no tanque e a água contida na mesma. Para tanto, é necessário que haja um diferencial de temperatura, o que pode ser observado no Gráfico 5. As temperaturas do primeiro estágio não ultrapassam 85°C, e no tanque 95°C. É possível observar que, por volta das 19 horas, a temperatura da saída do coletor já se encontrava com valores menores que 40°C, porém, no tanque de armazenamento, a temperatura estava próxima a 50°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.

5.2.2 *Teste 2*

Com três coletores conectados em paralelo, dois estágios de produção e abastecimento a cada dois dias, o sistema foi posto em operação por 4 dias. A maior produção foi registrada no primeiro dia de testes, com 17,26 litros de produção diurna e 1,22 litros noturna. O dia teve manhã de céu parcialmente nublado, porém a tarde foi de céu com poucas nuvens, sendo registrada uma radiação média de 618,3 W/m² entre 5:30h e 17:30h e 1023W/m² entre 10:00h e 14:00h. O Gráfico 6 apresenta as medições de temperatura e radiação.

Gráfico 6: Temperatura e radiação para o primeiro dia do Teste 2



Fonte: Elaborado pelo autor

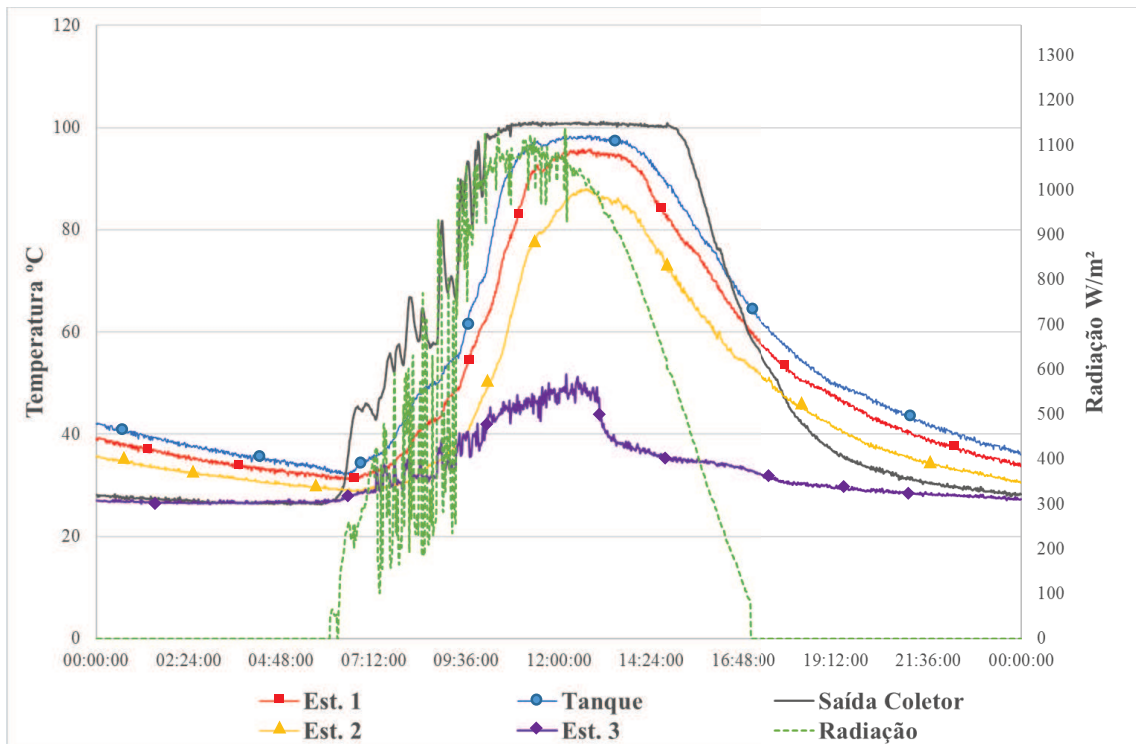
O Gráfico 6 mostra que o dessalinizador operou com algumas oscilações de temperatura na saída do coletor, isto devido a uma manhã de céu parcialmente nublado, mas mesmo assim apresentou temperaturas máximas de 100°C na saída do coletor e em torno de 90°C no primeiro estágio. O segundo estágio apresentou baixas temperaturas, visto que não estava coberto, mas exposto ao ambiente. Essa exposição propiciou perda de calor da água da bandeja por evaporação, convecção e radiação para o ambiente. Por outro lado, também proporcionou uma grande diferença de temperatura entre a bandeja do primeiro estágio e a do segundo, que foi responsável pela produção de valores aproximados de ambos.

5.2.3 Teste 3

No teste com três coletores conectados em paralelo, três estágios de produção e abastecimento a cada dois, o sistema foi abastecido e posto em operação por 4 dias. A maior produção foi registrada no terceiro dia de testes, onde se observou uma produção de 22,8 litros

diurna e 2,0 litros noturna. O dia teve manhã de céu com algumas nuvens, porém próximo ao meio dia e à tarde foram de céu limpo, registrando uma radiação média de 560,5W/m² entre 5:30h e 17:30h e 1015W/m² entre 10:00h e 14:00h. O Gráfico 7 apresenta as medições de temperatura e radiação.

Gráfico 7: Temperatura e radiação para o terceiro dia do Teste 3



Fonte: Elaborado pelo autor

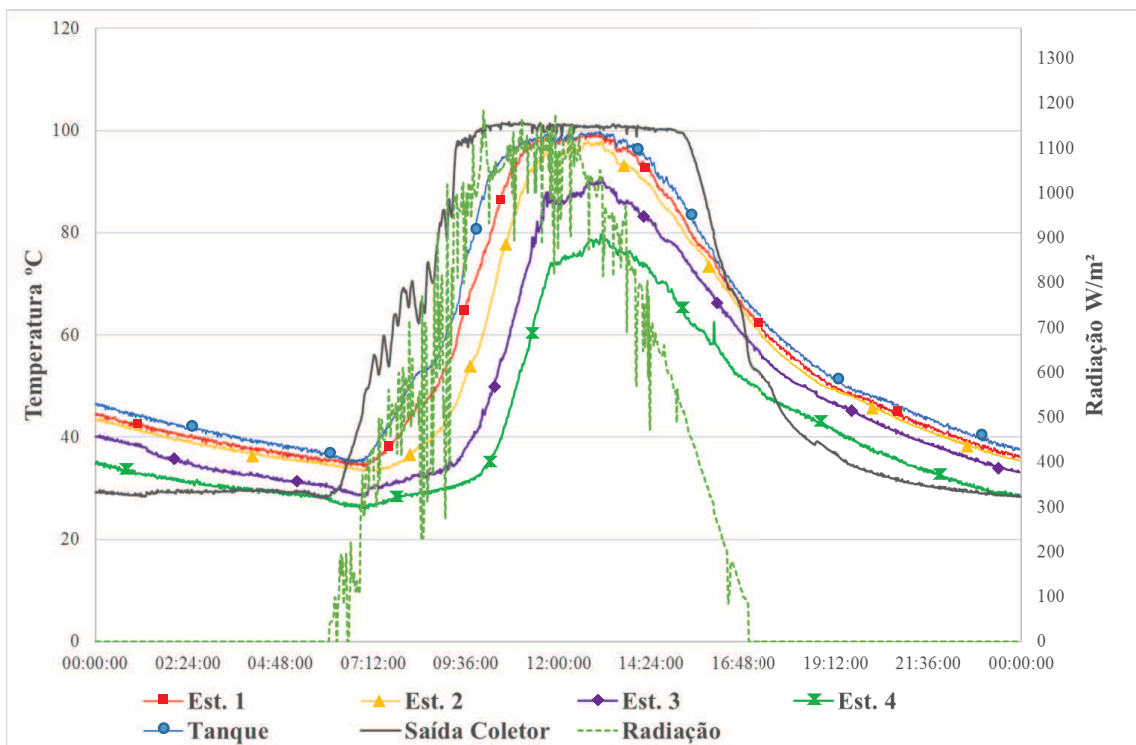
O Teste 3 mostrou que o segundo estágio produziu 8,3 litros, e o primeiro estágio, 7,7 litros. Embora o tanque apresente temperaturas maiores que o primeiro estágio, a diferença de temperatura entre o segundo estágio e o primeiro foi $\Delta T \approx 9^\circ\text{C}$, valor superior à diferença de temperatura entre o tanque e o primeiro estágio, que foi $\Delta T \approx 4^\circ\text{C}$, o que facilita o processo de condensação e propicia uma maior produção. Durante o teste foi possível observar que a água da bandeja do terceiro estágio evaporou totalmente. Este fato pode ser observado no Gráfico 7, entre 12 e 14 horas, quando a temperatura do terceiro estágio cai, o que prejudica a produção deste estágio pela diminuição do processo de transferência de calor. Para evitar a evaporação completa do estágio (bandeja) superior, nos testes seguintes o estágio superior foi isolado termicamente com uma manta de lã de vidro.

5.2.4 Teste 4

Com três coletores conectados em paralelo, quatro estágios de produção e abastecimento a cada dois dias, o sistema foi enchido e posto em operação por 4 dias. A maior produção foi registrada no quarto dia de testes, onde se observou uma produção diurna de 28,0 litros e 1,66 litros noturna. Neste dia o céu foi de poucas nuvens, sendo registrada uma radiação média de 660,9W/m² entre 5:30h e 17:30h e 1024W/m² entre 10:00h e 14:00h.

O Gráfico 8 apresenta as medições de temperatura e radiação. Observa-se que foram registradas temperaturas máximas em torno de 98°C para o tanque e primeiro estágio, 96°C para o segundo estágio, 90°C para o terceiro estágio e 78°C para o quarto estágio. Quanto às diferenças de temperatura, observa-se entre o terceiro e quarto estágios $\Delta T \approx 11^\circ\text{C}$, entre o segundo e terceiro estágios $\Delta T \approx 6^\circ\text{C}$, entre o primeiro e segundo estágios e entre o tanque e primeiro estágio $\Delta T \approx 2^\circ\text{C}$.

Gráfico 8: Temperatura e radiação para o quarto dia do Teste 4



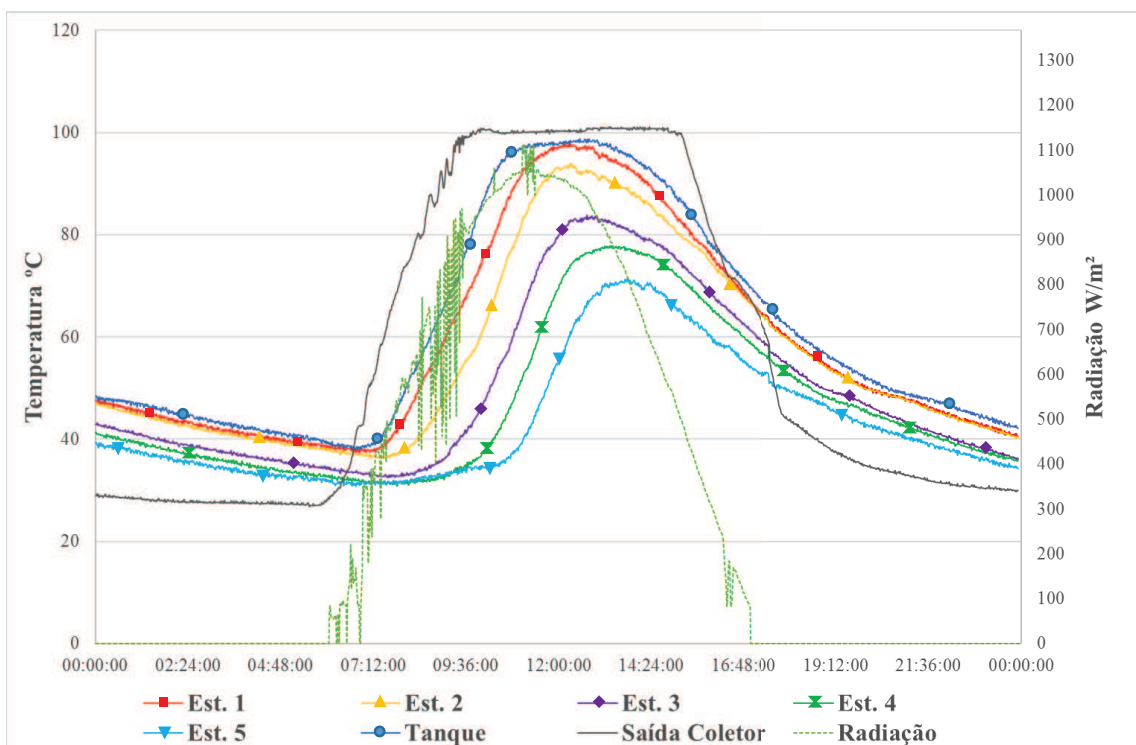
Fonte: Elaborado pelo autor

5.2.5 Teste 5

Com três coletores conectados em paralelo, cinco estágios de produção e abastecimento a cada dois dias, o sistema foi enchido e posto em operação por 7 dias. A maior produção foi registrada no primeiro dia de testes, onde se observou uma produção de 32,94 litros diurna e 1,32 litros noturna. Neste dia a manhã foi de céu com algumas nuvens, porém próximo ao meio dia e a tarde foram de céu limpo, registrando uma radiação média de 677,9W/m² entre 5:30h e 17:30h e 985W/m² entre 10:00h e 14:00h.

O Gráfico 9 apresenta as medições de temperatura e radiação. Observa-se que foram registradas temperaturas máximas em torno de 97°C para o tanque e primeiro estágio, 93°C para o segundo estágio, 82°C para o terceiro estágio, 77°C para o quarto estágio e 70°C para o quinto estágio. Quanto às diferenças de temperatura, observa-se entre o quarto e o quinto, e terceiro e quarto estágios $\Delta T \approx 5^\circ\text{C}$, entre o segundo e terceiro estágios $\Delta T \approx 8^\circ\text{C}$, entre o primeiro e segundo estágios, e entre o tanque e primeiro estágio $\Delta T \approx 4^\circ\text{C}$.

Gráfico 9: Temperatura e radiação para o primeiro dia do Teste 5



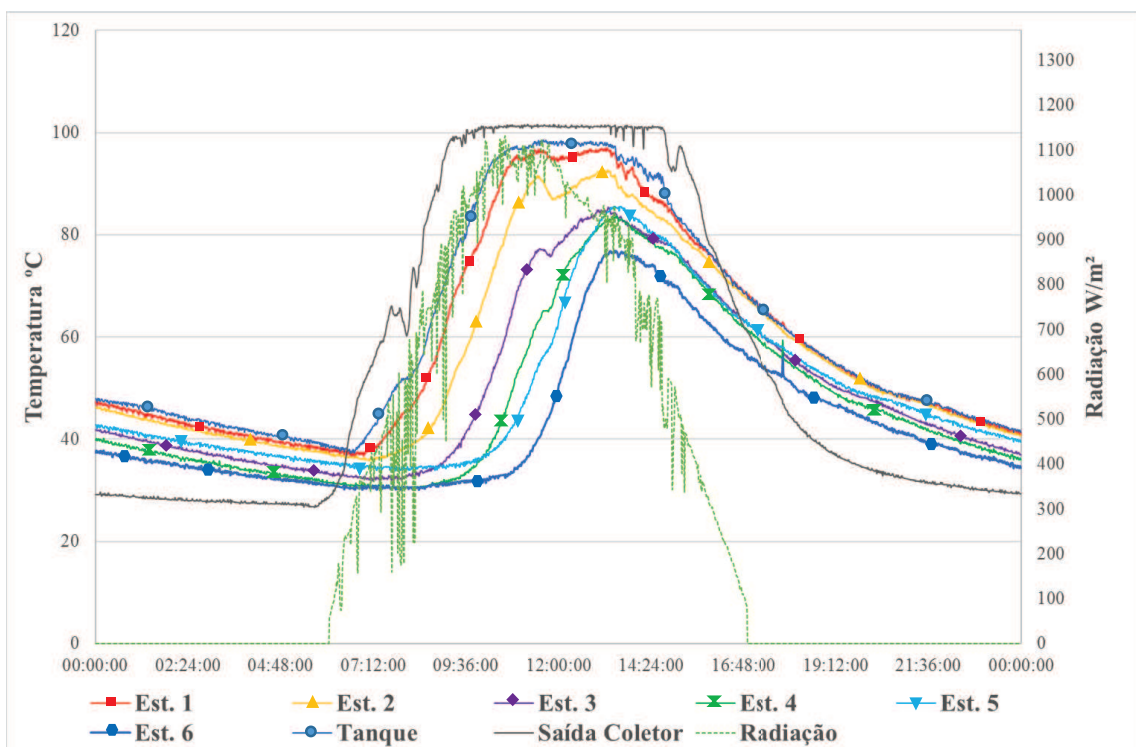
Fonte: Elaborado pelo autor

5.2.6 Teste 6

Com três coletores conectados em paralelo, seis estágios de produção e abastecimento a cada dois dias, o sistema foi enchido e posto em operação por 7 dias. A maior produção foi registrada no segundo dia de testes, onde se observou uma produção diurna de 33,3 litros e 3,12 litros noturna. Neste dia inteiro o céu apresentou poucas nuvens, registrando uma radiação média de 671,8W/m² entre 5:30h e 17:30h e 1010,8W/m² entre 10:00h e 14:00h.

O Gráfico 10 apresenta as medições de temperatura e radiação. Observa-se que foram registradas temperaturas máximas em torno de 97°C para o tanque e primeiro estágio, 92°C para o segundo estágio, 83°C para o terceiro estágio, 82°C para o quarto estágio, 82°C para o quinto estágio e 75°C para o sexto estágio. Quanto às diferenças de temperatura, observa-se entre os estágios mais elevados (a partir do terceiro estágio) $\Delta T \approx 6^\circ\text{C}$, entre o segundo e terceiro estágios $\Delta T \approx 10^\circ\text{C}$, entre o primeiro e segundo estágios $\Delta T \approx 6^\circ\text{C}$ e entre o tanque e primeiro estágio $\Delta T \approx 3^\circ\text{C}$.

Gráfico 10: Temperatura e radiação para o segundo dia do Teste 6



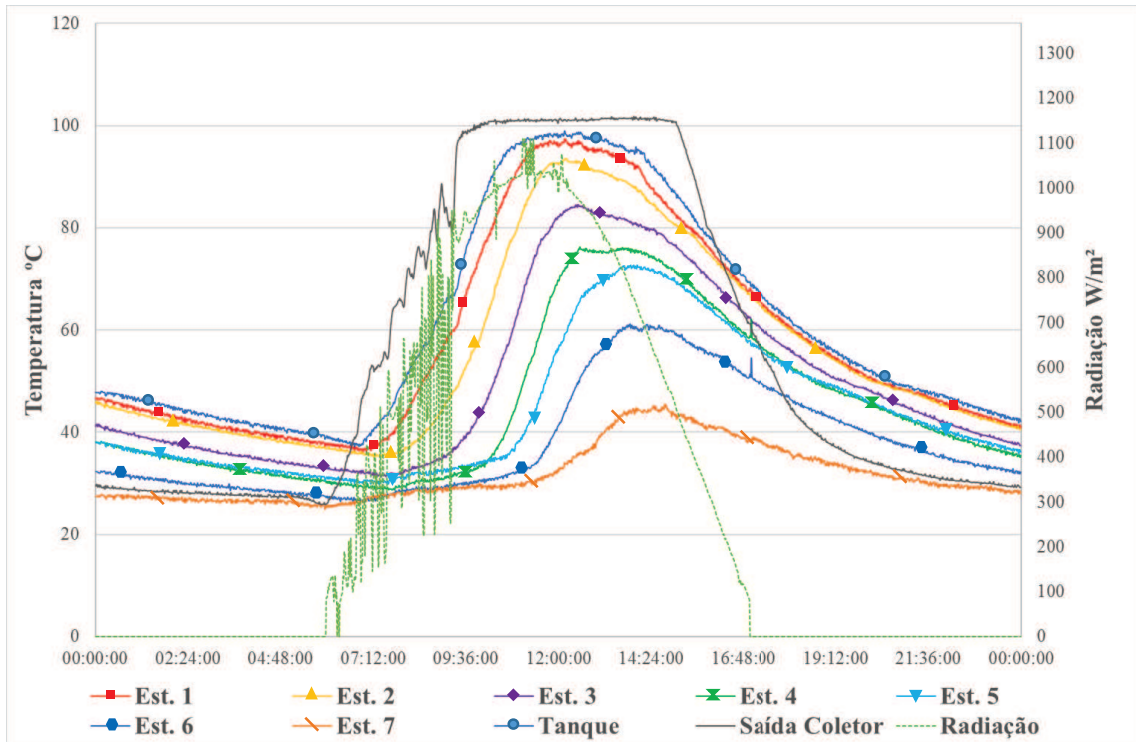
Fonte: Elaborado pelo autor

5.2.7 *Teste 7*

Com três coletores conectados em paralelo, sete estágios de produção e abastecimento a cada dois dias, o sistema foi enchido e posto em operação por 12 dias. A maior produção foi registrada no primeiro dia de testes, onde se observou uma produção diurna de 38,04 litros e 4,04 litros noturna. O dia teve manhã de céu com algumas nuvens, porém próximo ao meio dia e à tarde foi de céu limpo, com radiação média de 620,9W/m² entre 5:30h e 17:30h e 964,3W/m² entre 10:00h e 14:00h.

O Gráfico 11 apresenta as medições de temperatura e radiação. Observa-se que foram registradas temperaturas máximas em torno de 97°C para o tanque e primeiro estágio, 93°C para o segundo estágio, 82°C para o terceiro estágio, 75°C para o quarto estágio, 72°C para o quinto estágio, 60°C para o sexto estágio e 45°C para o sétimo estágio. Quanto às diferenças de temperatura, observa-se entre o sexto e sétimo estágios $\Delta T \approx 13^\circ\text{C}$, entre o quinto e sexto estágios $\Delta T \approx 9^\circ\text{C}$, entre o quarto e quinto estágios $\Delta T \approx 5^\circ\text{C}$, o terceiro e quarto estágios $\Delta T \approx 6^\circ\text{C}$, entre o segundo e terceiro estágios $\Delta T \approx 12^\circ\text{C}$, entre o segundo e primeiro estágio $\Delta T \approx 3^\circ\text{C}$ e entre o tanque e primeiro estágio $\Delta T \approx 2^\circ\text{C}$.

Gráfico 11: Temperatura e radiação para o primeiro dia do Teste 7

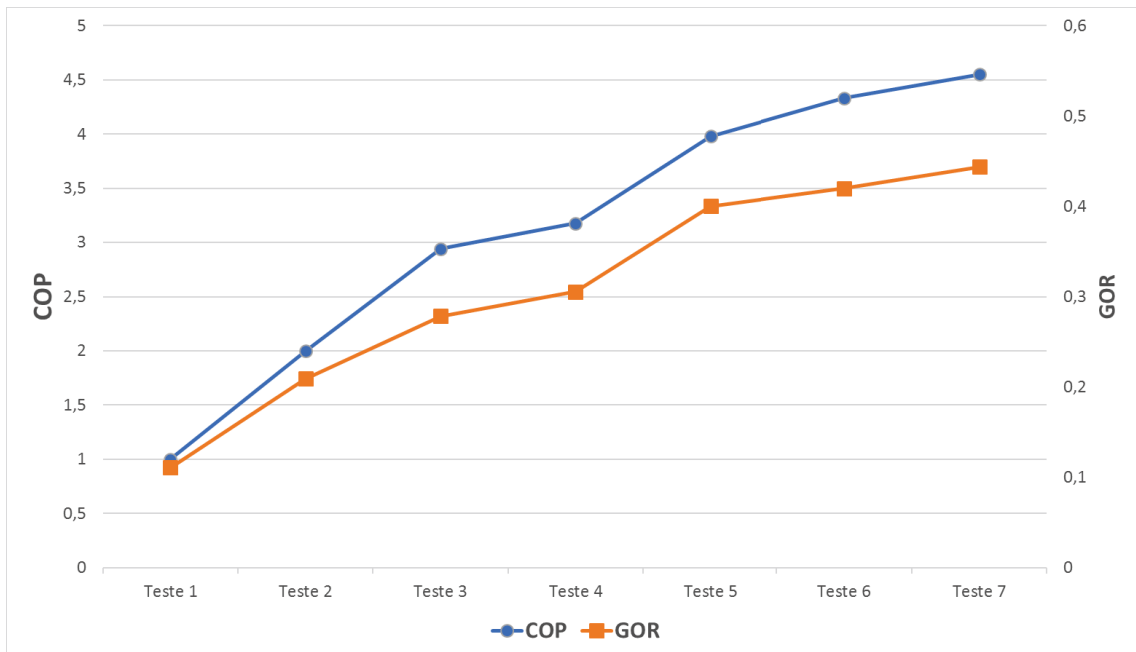


Fonte: Elaborado pelo autor

5.2.8 Avaliação de desempenho dos sete primeiros testes

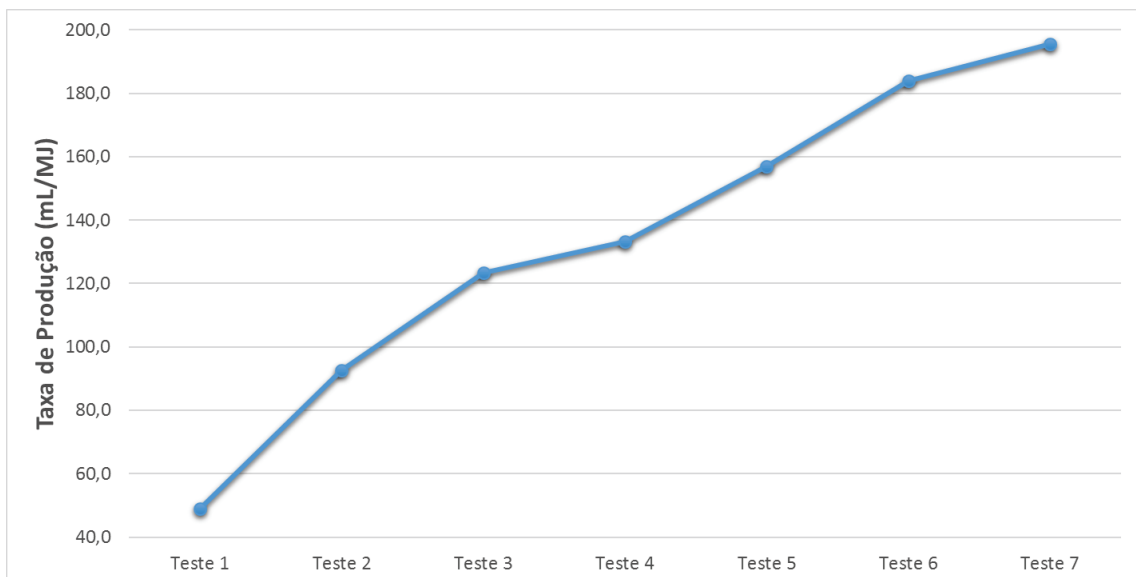
Os Gráficos 5 a 11 das Seções 5.2.1 a 5.2.7 apresentam as temperaturas nos estágios nos dias de maior produção para cada arranjo. Para se visualizar melhor esses resultados, o Gráfico 12 acrescenta os parâmetros de desempenho COP (Equação 3) e GOR (Equação 1), enquanto que o Gráfico 13, a taxa de produção por energia (mL/MJ) para o Testes 1 ao 7.

Gráfico 12: COP e GOR para os Testes 1 ao 7



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 13: Taxa de produção (mL/MJ) para os Testes 1 ao 7



Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme os Gráficos 12 e 13 apresentam, o COP, GOR e a taxa de produção aumentam significativamente do Teste 1 para o Teste 2, porém a velocidade desses acréscimos diminui com o aumento do número de estágios. Observa-se que o acréscimo do GOR e COP

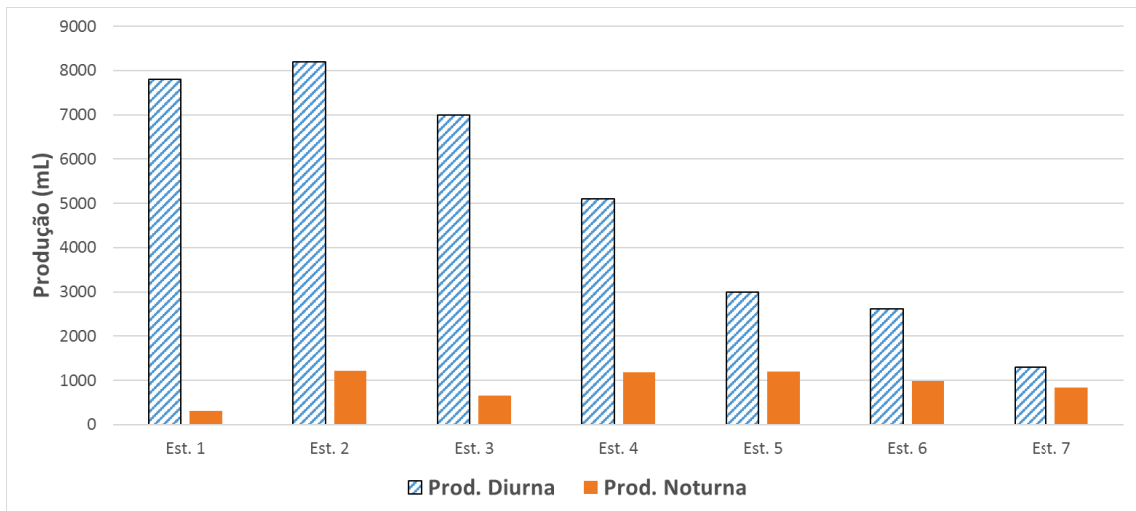
do Teste 6 para o Teste 7 é pouco expressivo e que, pelo formato da curva, existe uma tendência que ela se estabilize e forme uma assíntota horizontal. Isto significa que um aumento do número de estágios para oito não é nem técnico, nem economicamente necessário, visto que a produção máxima foi alcançada. Este comportamento deve-se à capacidade térmica do sistema, pois a energia absorvida nos coletores possui um valor máximo para o conjunto, de forma que se fossem acrescentados mais estágios não haveria energia suficiente para aquecer a água destes e, conseqüentemente, não haveria mais produção significativa.

A limitação energética do sistema pode ser observada também no Gráfico 11, onde as temperaturas máximas no dia diminuem a partir do tanque com 97°C, até o estágio superior (sétimo), onde a temperatura não ultrapassa 45 °C. Devido a este baixo valor de temperatura, a produção registrada neste estágio foi de 2 litros. Em um possível teste com oito estágios a temperatura neste seria ainda menor e possivelmente apresentaria uma produção também menor que 2 litros.

5.2.9 Teste 8

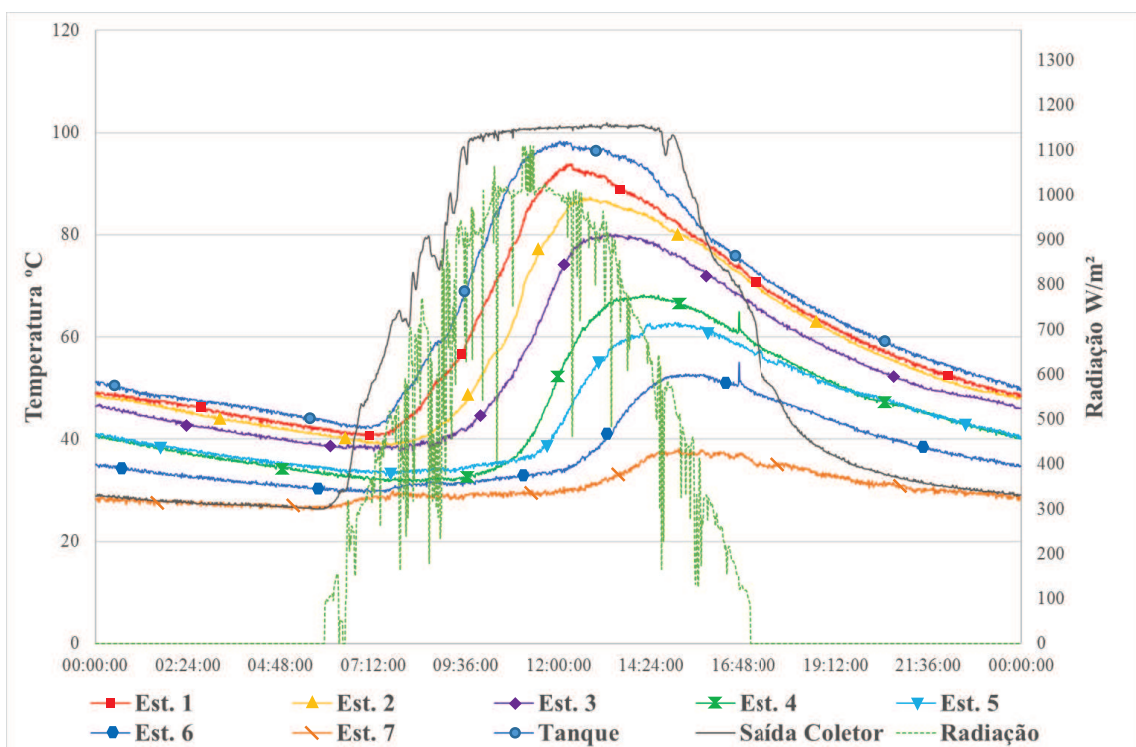
O Teste 8 do sistema foi realizado com abastecimento contínuo da torre, conforme procedimento descrito na Seção 4.3.2. Com três coletores conectados em paralelo e sete estágios de produção, o sistema foi posto em operação por 7 dias. A maior produção foi registrada no segundo dia de testes, onde se observou uma produção diurna de 35 litros e 6,4 litros noturna, totalizando 41,4 litros. O Gráfico 14 mostra a produção por estágio deste teste. Este dia foi de céu claro com poucas nuvens, registrando uma radiação média de 629,3W/m² entre 5:30h e 17:30h e 936,6W/m² entre 10:00h e 14:00h. O Gráfico 15 apresenta as medições de temperatura e radiação.

Gráfico 14: Produção do segundo dia do Teste 8



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 15: Temperatura e radiação para o segundo dia do Teste 8



Fonte: Elaborado pelo autor

Para uma comparação entres os métodos de abastecimento, a Tabela 4 apresenta os parâmetros de desempenho dos Testes 7 e 8. É possível constatar que embora o Teste 7 tenha

apresentado uma produção máxima maior que o Teste 8, este apresentou uma taxa produção por energia (mL/MJ) e coeficientes de desempenho (GOR e COP) mais elevados.

Tabela 4: Parâmetros de desempenho dos Testes 7 e 8

Teste	Número de testes	Rad. Global Média (W/m ²)	Produção Máxima (ml)	Taxa de Produção (ml/MJ)	GOR	COP
Teste 7	12	555,8	42080	195,57	0,44	4,55
Teste 8	7	569,1	41410	203,55	0,46	5,07

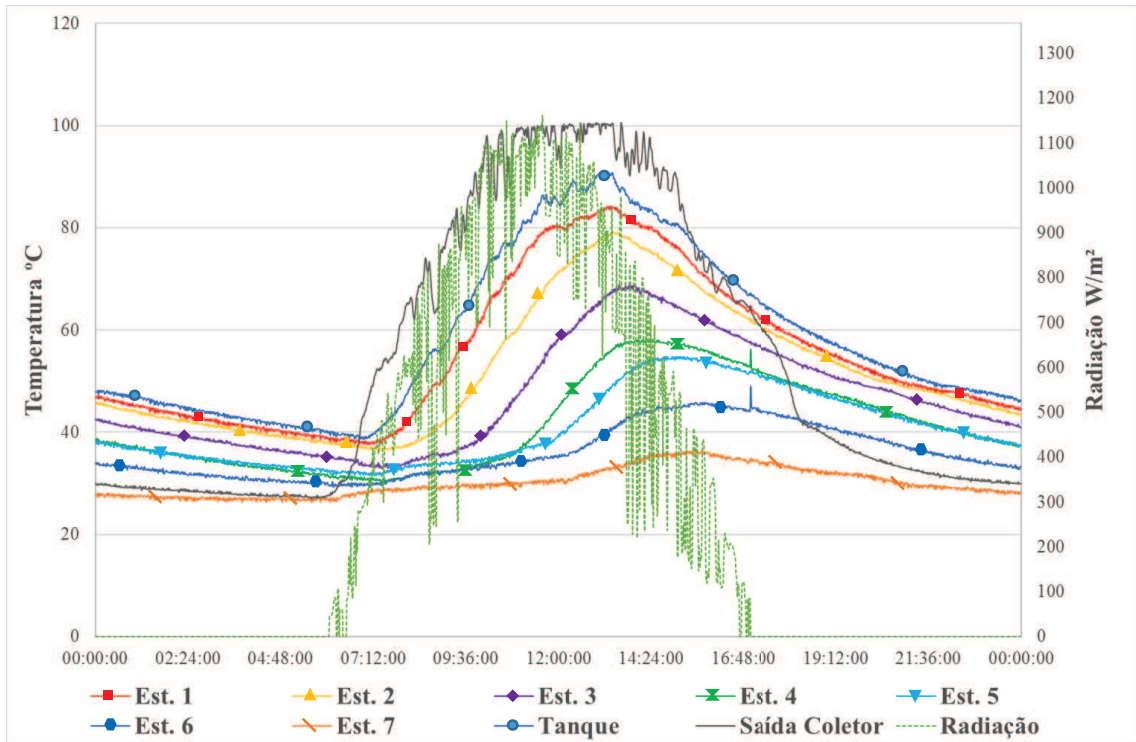
Fonte: Elaborado pelo autor

O abastecimento contínuo mostrou-se mais adequado também na operacionalização do dessalinizador, pois o sistema opera de forma contínua, um período de tempo continuado de até seis meses, quando é necessária a parada para limpeza das bandejas (manutenção). Nessa configuração, necessita-se apenas de uma fonte contínua de água salobra abastecendo a uma vazão média aproximadamente igual à produção média diária do sistema mais as perdas por vapor para o ambiente (entre estágio), que gira em torno de 25%.

5.2.10 Testes 9 e 10

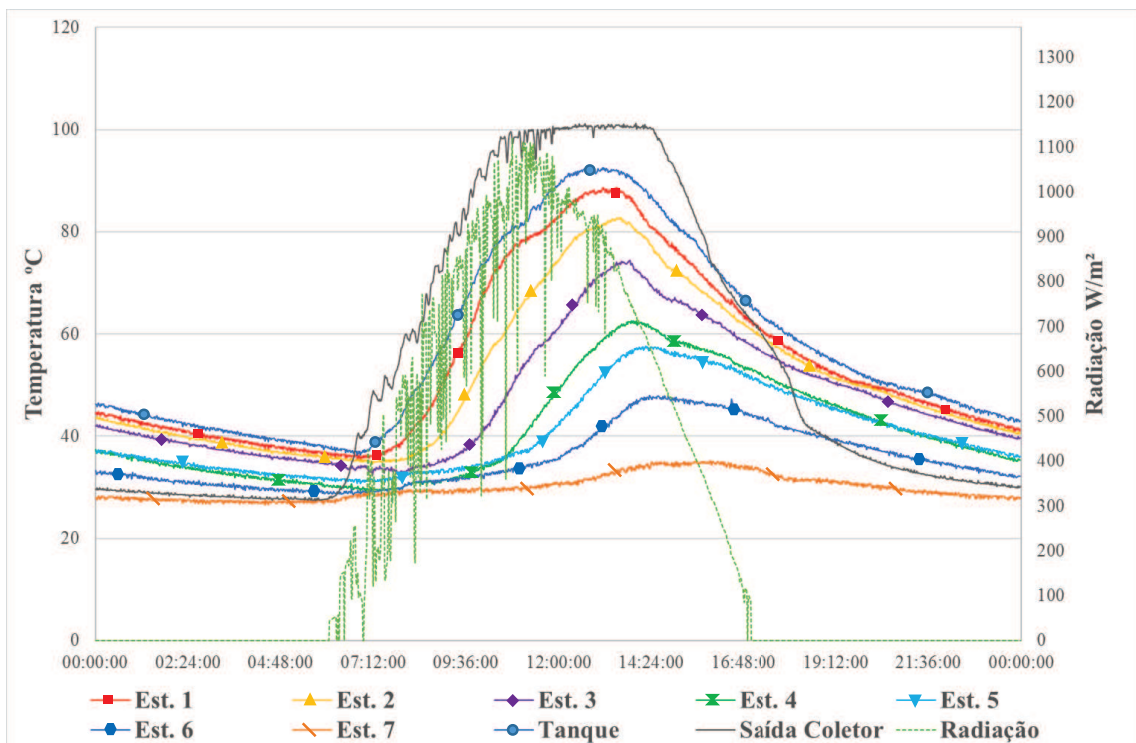
Os Testes 9 e 10 foram realizados com dois coletores solares instalados em paralelo e sete estágios (Figura 15), sendo o Teste 9 com abastecimento a cada dois dias, e o Teste 10 com abastecimento contínuo. A maior produção do Teste 9 foi registrada no quarto dia de teste com 22,4 litros (19,22 litros diurno e 3,18 litros noturno), e o Gráfico 16 apresenta as medições de temperatura e radiação para este dia. Para o Teste 10 a maior produção foi registrada no terceiro dia de teste com 25,2 litros (21,96 litros diurno e 3,24 noturno) e as medições de temperatura e radiação estão apresentadas no Gráfico 17. Para estes dias, a produção geral e por estágio estão registradas no Gráfico 18, é possível constatar que o teste com abastecimento contínuo apresentou maior produção, com 25,2 litros.

Gráfico 16: Temperatura e radiação para o quarto dia do Teste 9



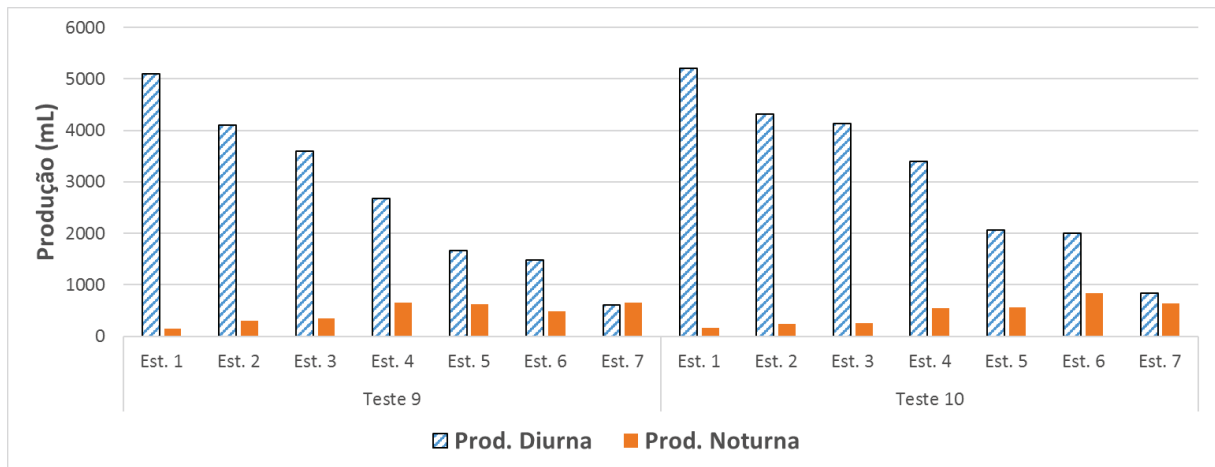
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 17: Temperatura e radiação para o terceiro dia do Teste 10



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 18: Produção do quarto dia do Teste 9 e terceiro dia do Teste 10



Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que devido à utilização de 2 coletores (Gráficos 16 e 17), os patamares de temperatura diminuíram para todos os estágios, quando comparados aos testes com 3 coletores (Gráficos 11 e 15), onde a temperatura do tanque atingiu valores máximos em torno de 97°C. A diminuição da capacidade de aquecimento é refletida na produção do dessalinizador, visto que nos testes com 3 coletores foi registrada uma produção máxima de 42,08 litros, e para 2 coletores, 25,2 litros.

A título de comparação dos experimentos com dois coletores (Testes 9 e 10), a Tabela 5 apresenta seus parâmetros de desempenho. É possível constatar que, assim como o ocorrido com a comparação utilizando os testes com 3 coletores, a taxa de produção por energia (mL/MJ) também foi maior para os testes com abastecimento contínuo com valor de 204,07 mL/MJ. Os coeficientes de desempenho COP e GOR foram superiores para o abastecimento contínuo, 4,3 e 0,46, respectivamente.

Tabela 5: Parâmetros de desempenho dos Testes 9 e 10

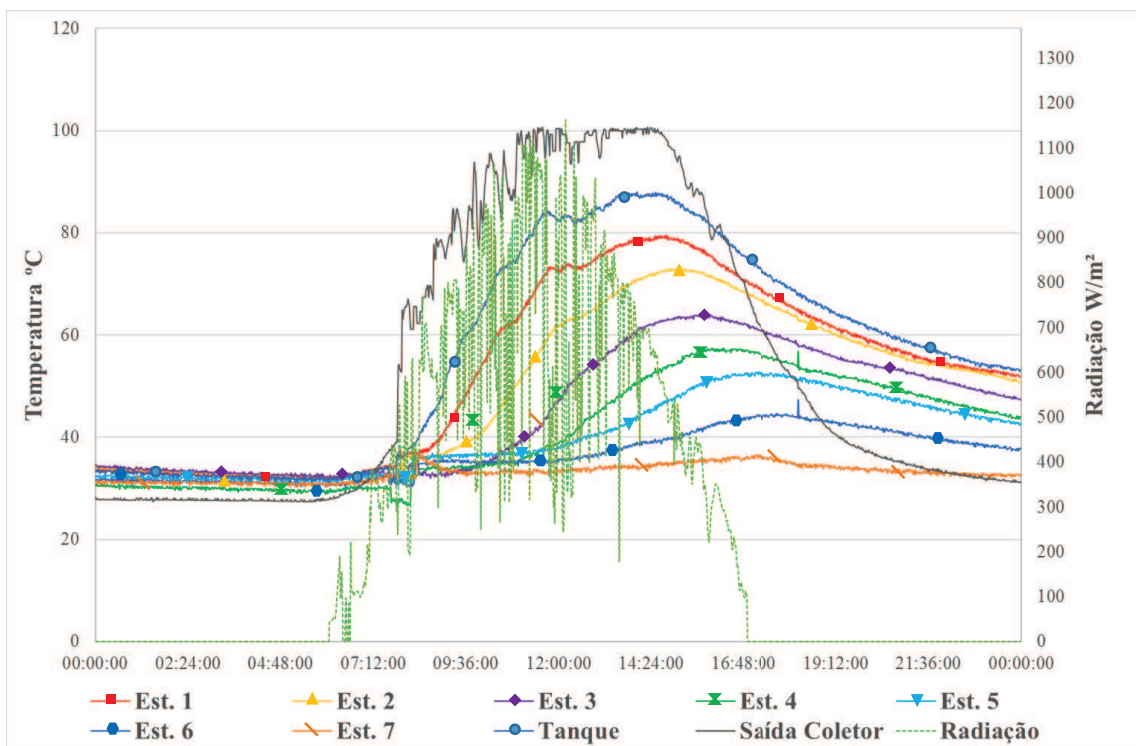
Teste	Número de testes	Rad. Global Média (W/m ²)	Produção Máxima (ml)	Taxa de Produção (ml/MJ)	GOR	COP
Teste 9	5	428,9	22400	197,38	0,44	3,97
Teste 10	5	575,1	25200	204,07	0,46	4,30

Fonte: Elaborado pelo autor

5.2.11 Teste 11

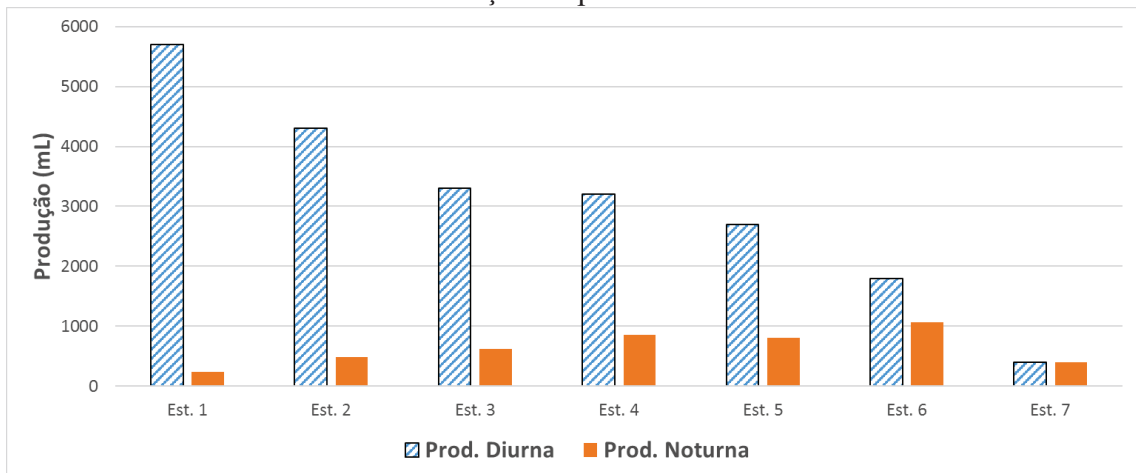
O Teste 11 foi realizado com dois coletores solares instalados em paralelo, com refletor (Figura 17), 7 estágios e abastecimento contínuo. O uso de refletor é uma alternativa de baixo custo para potencializar a utilização da unidade de aquecimento, visto que o custo da sua instalação é menor que o custo do acréscimo de outro coletor solar. As duas semanas do Teste 11 foram de muitas nuvens com alguns dias de chuva, a maior produção deste arranjo foi registrada no primeiro dia de teste com 25,86 litros (21,4 litros diurna e 4,46 litros noturna). O Gráfico 19 apresenta as medições de temperatura e radiação e o Gráfico 20 a produção registrada em cada estágio.

Gráfico 19: Temperatura e radiação para o primeiro dia Teste 11



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 20: Produção do primeiro dia do Teste 11



Fonte: Elaborado pelo autor

A fim de realizar a análise da operação do dessalinizador com dois coletores e refletor, a Tabela 6 apresenta seus parâmetros de desempenho mostrando também os valores do Teste 10, no qual o dessalinizador também operou com 2 coletores, 7 estágios e abastecimento contínuo, porém sem o uso de refletor.

Tabela 6: Parâmetros de desempenho dos testes 10 e 11

Teste	Número de testes	Rad. Global Média (W/m^2)	Produção Máxima (ml)	Taxa de Produção (ml/MJ)	GOR	COP
Teste 10	5	575,1	25200	204,07	0,46	4,30
Teste 11	4	456,7	25860	247,85	0,56	4,14

Fonte: Elaborado pelo 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 em 21,4%. O GOR foi maior para o teste 11, com um aumento de 21,7%. O COP reduziu 3,7%, uma vez que com uma radiação global menor devido às condições climáticas, menos energia foi absorvida pelos coletores.

Na comparação do Teste 8 (3 coletores, sete estágios e abastecimento contínuo) com o Teste 11 (2 coletores com refletor, sete estágios e abastecimento contínuo) observa-se pela Tabela 5 que a produção máxima utilizando 3 coletores no Teste 8 foi de 41,4 litros e a taxa de produção por energia foi de 203,55 mL/MJ, enquanto que no teste com 2 coletores

(Teste 11) a produção máxima foi de 25,86 litros, apresentando redução de 37,5%. No entanto a taxa de produção por energia foi de 247,85 mL/MJ, um aumento de 21,7%.

6. CONCLUSÃO

O dessalinizador solar térmico de múltiplos estágios e com recuperação de calor foi montado a partir de componentes de outros protótipos de forma a possibilitar um novo arranjo pelo uso de coletores planos e encontrando-se apto a operação imediata. Quando comparado ao dessalinizador apresentado por Rodrigues (2010), que obteve temperatura em torno de 87°C no tanque e uma produção total de 35 litros, e outros protótipos também descritos na revisão bibliográfica deste trabalho, o dessalinizador comportou-se de forma satisfatória atingindo temperaturas máximas de 98°C no tanque de armazenamento, na configuração com três coletores, e de 90°C na configuração com dois coletores. Quanto à produção máxima, foram registrados valores de 42,08 litros por dia na configuração com 3 coletores, e 25,86 litros por dia na configuração com 2 coletores com refletor solar, valores também satisfatórios quando comparados com outros dessalinizadores solares de mesma capacidade.

Quanto ao número de estágios, os testes de produção mostraram que a operação com até sete estágios registrou um ganho significativo em produção, porém, conforme apresentado no Gráfico 12, as curvas de taxa de GOR e COP sinalizam que a operação com um oitavo estágio não seria vantajosa pelo ganho em produção e pela capacidade térmica do sistema.

Com relação à forma de abastecimento, o processo contínuo apresentou maiores valores de taxa de produção por energia absorvida, registrando, em relação ao abastecimento a cada dois dias, aumento de 4% na configuração com 3 coletores e sete estágios, e aumento de 3,4% na configuração com 2 coletores e sete estágios. Além do bom resultado na produção, o abastecimento contínuo mostrou-se vantajoso também em sua operação, pois não é necessária a parada do sistema para o reabastecimento.

O uso do refletor na configuração com dois coletores proporcionou um aumento na taxa de produção por energia absorvida de 21,4% em relação à configuração com dois coletores sem refletor. Porém, seu uso requer interatividade ativa com um operador, visto que o refletor deve ser mudado de posição ao meio dia e ao final do dia, de forma que não proporcione sombra para os coletores. Embora seja necessária uma interação ativa, esta representa um esforço pequeno visto que o refletor pesa em torno de 10Kg e é facilmente encaixado na estrutura dos coletores.

Certamente, as maiores características do dessalinizador são sua robustez, sua facilidade de manutenção e operação e, uma vez instalado e montado, não necessita de mão de obra especializada para sua operação. Sua manutenção consiste basicamente na limpeza das bandejas dos estágios, que são de fácil desmontagem. Esta limpeza trata-se da remoção da salmoura e sugere-se que deva ocorrer a cada 6 meses de operação contínua. Uma vez por semana é necessário realizar limpeza da superfície dos coletores solares, simplesmente para remoção de poeira ou sujeiras. Esta frequência pode mudar a depender das condições onde o equipamento será instalado. O dessalinizador não necessita de energia elétrica para seu funcionamento, de forma que a escolha de seu local de instalação está associada à intensidade da radiação solar da região.

Com uma produção diária de 42 litros e as características mostradas neste estudo, pode-se afirmar que o sistema de dessalinização apresentado está em condições de ser instalado, e uma única unidade pode abastecer até 4 famílias ou, através da instalação de várias unidades, pode abastecer instituições como escolas e creches.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABURIDEH, H.; DELIOU, A.; ABBAD, B.; ALAOU, F.; TASSALIT, D.; TIGRINE, Z. **An Experimental Study of a Solar Still: Application on the sea water desalination of Fouka.** Procedia Engineering, v. 33, p. 475-484, 2012.

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 torre de dessalinização térmica com recuperação de calor.** 2009 Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil. 2009.

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

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

COUTINHO, L. D. E. **Protótipo experimental de um dessalinizador solar com recuperação de calor.** 2003 Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil. 2003.

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

DIAF, A.; CHERFA, A.; KARADANIZ, L.; TIGRINE, Z. **A Technical–Economic Study of Solar Desalination.** Desalination, v. 377, p. 123-127, 2015.

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

EL-NASHAR A. M., **Performance of solar desalination plant at Abu Dhabi.** Desalination, v. 72, p. 405-424, 1989.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2015 – Ano base 2014: Relatório Síntese.** Rio de Janeiro, 2015.

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

GALILEU. **A liquidez do mundo.** Disponível em: http://galileu.globo.com/edic/119/rep_agua1p2.htm. Acesso em janeiro de 2016.

GARCÍA-RODRÍGUEZ, L. **Renewable energy application in desalination: state of the art.** Solar Energy, vol. 75, p. 381-393, 2003.

HERMOSILLO, J. J.; ARANCIBIA-BULNES, C. A.; ESTRADA, C. A. **Water desalination by air humidification: Mathematical model and experimental study.** Solar Energy, v. 86, p. 1070-1076, 2012.

KHALIFA, A. J. N.; HAMOOD, A.M. **On the verification of the effect of water depth on the performance of basic type solar still.** Solar Energy, v. 83, p. 1312-1321, 2009.

KHALIL, A.; EL-AGOUZ, S. A.; EL-SAMADONY, Y.A.F.; AHMED ABDO. **Solar water desalination using an air bubble column humidifier.** Desalination, v. 372, p. 7-16, 2015.

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

LOPES, J. T. **Dimensionamento e análise térmica de um dessalinizador solar híbrido.** 2004 Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Campinas, São Paulo, 2004

MOTA, S.; ANDRADE, M. A. N. **Uso da destilação solar no tratamento de águas contaminadas por microrganismos. Aplicações às pequenas comunidades.** XII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Maceió, 1985.

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

QUIBLAWEY, H. M.; BANAT, F. **Solar Thermal Desalination Technologies.** Desalination, vol. 220, p. 633-644, 2007.

QUASCHNING, Volker. **Understanding Renewable Energy Systems.** 3rd ed. London: Earthscan, 2005.

RODRIGUES, A. P. **Estudo experimental de uma dessalinizador térmico com aquecimento controlado**. 2011 Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

RODRIGUES, F. P. **Desempenho de uma torre de recuperação de calor com canais sintéticos de poliuretano para dessalinizador solar térmico**. 2010 Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil. 2010.

ROMMEL, M. **Solar thermally driven desalination systems with corrosion-free collectors**. Renewable Energy, v. 14, p. 275-280, 1998.

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.; VIEIRA, M. E.; FABER, C.; MÜLLER, C. **Solar termal desalination system with heat recovery**. Desalination, v. 137, p. 23-29, 2001.

SIDEM. **Multiple Stage Flash Processes**. Disponível em: <http://www.sidem-desalination.com/en/Process/MSF/>. Acesso em janeiro de 2016.

STINE, W. B.; HARRIGAN, R. W. **Solar Fundamentals and Design**. 1. ed. John Wiley & Sons, 1985.

TLEIMAT, B. W.; HOWE, E. D. **Nocturnal production of solar distillers**. Solar Energy, v. 10, p. 61-66, 1965.

WANG, L. k.; JOO-HWA, T.; LEE, S. T.; HUNG, Y. T. **Environmental Bioengineering**. Springer vol. 11, Humana Press; 2010

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Heatwaves and Health: Guidance on Warning-System Development**. Genebra: WMO e WHO, 2015.

YOUSSEF, P. G.; AL-DADAH, R. K.; MAHMOUD, S. M. **Comparative Analysis of Desalination Technologies**. Energy Procedia, v. 61, p. 2604-2607, 2014.

ZHANG, L.; ZHENG, H.; WU, Y. **Experimental study on a horizontal tube falling film evaporation and closed circulation solar desalination system**. Renewable Energy, v. 28, p. 1187-1199, 2003.