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

RAFAEL TEIXEIRA HERCULANO

PROTÓTIPO DE PANELA-DESSALINIZADOR CIRCULAR PARA FOGÃO SOLAR COM AQUECIMENTO INDIRETO

FORTALEZA
2015

RAFAEL TEIXEIRA HERCULANO

PROTÓTIPO DE PANELA-DESSALINIZADOR CIRCULAR PARA FOGÃO SOLAR COM AQUECIMENTO INDIRETO

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha

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

FORTALEZA
JULHO, 2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

H464p Herculano, Rafael Teixeira.
Protótipo de panela-dessalinizador circular para fogão solar com aquecimento indireto / Rafael Teixeira Herculano. – 2015.
64 f. : il. color., enc. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2015.
Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.
Orientação: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha.
Coorientação: Profa. Dra. Maria Eugênia Vieira da Silva.

1. Engenharia Mecânica. 2. Energia solar. 3. Calor - Recuperação. 4. Dessalinização da água. I. Título.

CDD 620.1

RAFAEL TEIXEIRA HERCULANO

PROTÓTIPO DE PANELA-DESSALINIZADOR CIRCULAR PARA FOGÃO SOLAR COM AQUECIMENTO INDIRETO

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para o título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Aprovada em ____/____/2015

BANCA EXAMINADORA

_____

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

_____

Profa. Maria Eugênia Vieira da Silva, Ph.D.
Universidade Federal do Ceará - UFC

_____

Prof. Dr. Daniel Albiero
Universidade Federal do Ceará – UFC

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pela dedicação e inspiração durante toda minha vida.

Ao meu orientador, Paulo Alexandre, pela atenção e esforço para o sucesso deste trabalho.

À Maria Eugênia, pela transmissão essencial de conhecimento.

A minha namorada, Kherlianne de Sá, pelo apoio indispensável.

Ao mestre Isaías Silva, pela ajuda sobre o funcionamento do fogão solar.

Aos colegas do LESGN, pelo auxílio nos experimentos e pela descontração.

À CAPES, pela concessão de bolsa de mestrado

A Deus, pelos citados acima.

RESUMO

Extensivas atividades de pesquisa e desenvolvimento vêm sendo conduzidas para explorar oportunidades de métodos sustentáveis e viáveis de produção de água potável utilizando energia solar. Este projeto abrange uma nova configuração para o fogão solar com aquecimento indireto operar também como dessalinizador. O objetivo foi desenvolver uma nova panela que pode ser acoplada com uma torre de três estágios de dessalinização. Assim, a panela pode ser utilizada tanto para cozinhar ou como o tanque de armazenamento da torre de dessalinização. Esta nova panela foi instalada em um fogão solar com aquecimento indireto e todo o sistema foi testado em condições de campo. O acoplamento foi otimizado, aumentando a produção total em relação ao projeto anterior. O sistema produziu mais de 5,7L de água dessalinizada, com condutividade elétrica média abaixo de 10μS/cm, COP, 1,77 e GOR 0,35, valores compatíveis com a literatura e acima dos valores obtidos com a panela original.

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

ABSTRACT

Extensive research and development activities have been conducted to explore opportunities for sustainable and viable methods of producing potable water using solar energy. This project included a new configuration for the solar cooker with indirect heating, which also operates as a desalination unit. The objective was to develop a new cooking pan which could be coupled with a three-stage desalination tower. Thus, the pan could be used for cooking or as the storage tank of the desalination tower. This new pan was installed in a solar cooker with indirect heating and the complete system was tested under field conditions. The sealing was improved, and the system produced more than 5.7L, with electrical conductivity lower than 10μS/cm, COP, 1.77 and GOR, 0,35, values consistent with the literature and above the values obtained with the original pan.

Keywords: Solar cooker. Desalination. Solar Energy. Heat Recovery.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Fogões solares com aquecimento direto e indireto. 12
Figura 1.2 – Distribuição de água doce no planeta..... 13
Figura 4.1 – Processos em um coletor de placa plana. 24
Figura 4.2 – Processos na placa de vidro do coletor solar..... 24
Figura 4.3 – Perdas em superfícies com diferentes tipos de revestimento 26
Figura 4.4 – Desenho esquemático do processo de termossifão. 27
Figura 4.5 – Balanço de energia na panela 30
Figura 4.6 – Dessalinização Flash de Múltiplos Estágios (MSF)..... 32
Figura 4.7 – Dessalinização de Múltiplo Efeito (MED)..... 33
Figura 4.8 – Dessalinizador tipo tanque. 33
Figura 4.9 – Dessalinizador com recuperação de calor. 34
Figura 4.10 – Diagrama de blocos do sistema fogão solar com dessalinizador. 35
Figura 5.1 – Panela original montada no fogão solar. 37
Figura 5.2 – Corte a plasma das peças para montagem..... 38
Figura 5.3 – Peças circulares cortadas..... 39
Figura 5.4 – Guilhotina..... 39
Figura 5.5 – Detalhe da rebarba após o corte a plasma e o resultado do lixamento..... 40
Figura 5.6 – Calandra e peças calandradas..... 40
Figura 5.7 – Peças soldadas..... 41
Figura 5.8 – Furo para passagem do óleo..... 41
Figura 5.9 – Detalhe do acoplamento com porca sextavada. 42
Figura 5.10 – As duas configurações do fogão, como equipamento de cozimento (esquerda) e como dessalinizador (direita). 43
Figura 5.11 – Localização dos termopares. 45
Figura 6.1 – Perfil de temperaturas e radiação para quatro litros na panela, com refletor e isolamento lateral..... 47
Figura 6.2 – Perfis de temperaturas e radiação para seis litros na panela, com refletor e isolamento lateral..... 48
Figura 6.3 – Perfis de temperaturas e radiação para oito litros na panela, com refletor e isolamento lateral..... 49
Figura 6.4 – Perfis de temperaturas e radiação para onze litros na panela, com refletor e isolamento lateral..... 50

Figura 6.5 – Razão mL/MJ para cada volume inicial na panela 51
Figura 6.6 – Perfil de temperaturas e radiação para 11 litros de água na panela, sem refletor e com isolamento lateral. 52
Figura 6.7 – Perfil de temperaturas e radiação para 11 litros na panela, sem refletor e sem isolamento lateral. 53
Figura 6.8 – Variação da vazão mássica do óleo térmico dentro do circuito. 54
Figura 6.9 – Gráfico de temperaturas no teste de perda de calor sem insolação. 55
Figura 6.10 – Imagem térmica dos dessalinizadores em operação. 55

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Comparação de propriedades de vidros com e sem materiais seletivos. 26
Tabela 6.1 – Resultado para experimento com refletor, com isolamento lateral e com 4L na panela. 47
Tabela 6.2 – Resultado para experimento com refletor, com isolamento lateral e com 6L na panela. 48
Tabela 6.3 – Resultado para experimento com refletor, com isolamento lateral e com 8L na panela. 49
Tabela 6.4 – Resultado para experimento com refletor, com isolamento lateral e com 11L na panela. 50
Tabela 6.5 – Resumo das produções para os experimentos com volumes iniciais na panela de 11L, 8L, 6L e 4L. 51
Tabela 6.6 – Resultado para experimento sem refletor, com isolamento lateral e com 11L na panela. 52
Tabela 6.7 – Resultado para experimento sem refletor, sem isolamento lateral e com 11L na panela. 53

LISTA DE SÍMBOLOS

$\boldsymbol{\phi}$	Energia radiante	
ρ	Refletância	
α	Absortância	
τ	Transmitância	
η	Desempenho, Eficiência	
Q	Energia	[kJ]
A	Área	[m²]
G	Radiação solar incidente	[W/m²]
S	Radiação solar total absorvida pelo coletor	[W/m²]
U	Coeficiente de transferência de calor	[W/m².K]
T	Temperatura	[K]
c	Calor Específico	[kJ/kg.K]
D	Diâmetro do tubo de cobre	[m]
W	Distância entre eixos dos tubos de cobre	[m]
h	Entalpia	[kJ/kg]
m	Massa	[kg]
COP	Coeficiente de desempenho	
GOR	Razão de ganho de saída	

LISTA DE SUBSCRITOS

$\boldsymbol{e}$	Emitida
$\boldsymbol{a}$	Absorvida
$\boldsymbol{\rho}$	Refletida
$\boldsymbol{\varepsilon}$	Reemitida
u	Útil
col	Coletor
t	Total
am	Média do absorvedor
ab	Do absorvedor
a	Ambiente
in	Entrada
out	Saída
fg	Vaporização

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12

2 OBJETIVOS 16

2.1 Geral **16**

2.2 Específicos **16**

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 23

4.1 Coletor Solar **23**

4.1.1 Balanço de energia para coletor de placa plana *28*

4.2 Panela **29**

4.2.1 Balanço de Energia para a panela *29*

4.3 Dessalinizador **31**

4.3.1 Desempenho do dessalinizador *35*

5 METODOLOGIA 37

5.1 Processos de fabricação da Panela **38**

5.2 Preparação do fogão **42**

5.3 Experimentos **43**

6 RESULTADOS 46

7 CONCLUSÃO 57

8 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS 58

9 REFERÊNCIAS 59

ANEXO 1 – Propriedades do fluido térmico *DOWTHERM A* 63

APÊNDICE – Resumo de resultados 64

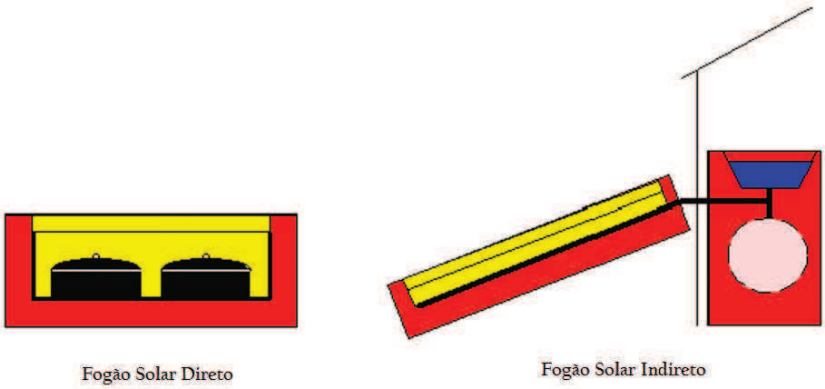
1 INTRODUÇÃO

Apesar da queima de madeira não ser a causa principal do desmatamento de florestas tropicais, chega a representar até 90% da energia usada em alguns países em desenvolvimento. Na Índia, 47% da energia para cozinhar vêm da madeira e em muitos países africanos este valor é maior que 75%, tal como em Mali e Burkina Faso, que alcança 95% (Schwarzer e Krings, 1996).

Em muitas regiões em desenvolvimento, fogões solares podem substituir totalmente ou parcialmente o uso de lenha, que é necessária também para pequenos processos industriais, tais como fabricação de tijolos e em padarias. Parte da razão de utilizar lenha vem do alto preço do petróleo causado pela alta demanda dos países industrializados, fazendo com que a lenha seja a única alternativa viável para muitas famílias. A solução para este problema não depende apenas do cultivo de florestas, uso de combustíveis fósseis e na aplicação de fogões à lenha eficientes. Parte da solução está na utilização de uma fonte de energia abundante nessas regiões, como a energia solar.

O fogão solar utiliza a radiação para preparar alimentos para o consumo familiar ou em pequenas indústrias. Dependendo do mecanismo de transferência do calor para a panela, os fogões solares podem ser classificados em dois tipos, diretos e indiretos (Figura 1.1). Os fogões solares diretos usam a radiação solar diretamente no processo de cozimento, enquanto os indiretos usam a radiação para aquecer um fluido de trabalho que transporta esse calor para o local onde ocorre o processo de cozimento.

Figura 1.1 – Fogões solares com aquecimento direto e indireto.



Fonte: Schwarzer e Silva (2008)

Além da crescente demanda por energia para a preparação de alimentos, há um aumento no consumo de água em todo o planeta, a água determina e impulsiona a economia e consequentemente a maneira de viver da sociedade. A escassez de água potável é um dos maiores problemas mundiais, especialmente em zonas áridas remotas e países considerados não desenvolvidos.

Aproximadamente 70% da superfície da Terra é coberta de água, mas 97,5% dessa água é salina e está nos oceanos. Dos 2,5% que é água doce, 79,16% está nas geleiras, indisponível para o consumo (Figura 1.2). Apenas 0,52% da água total disponível está na forma que pode ser tratada para consumo humano (CAENF, 2009).

Figura 1.2 – Distribuição de água doce no planeta.

Fonte: Disponível em: <www.aguasdenovafriburgo.com.br> Acessado em Dezembro de 2009.

Desde o último século, estas fontes de água potável, tanto da superfície quanto subterrâneas, têm sido esgotadas devido ao aumento da população mundial, poluição e sobre-exploração. Houve também o aumento do nível de salinidade da água por causa da insuficiência de chuvas e gerenciamento inadequado dos recursos hídricos.

Muitas doenças podem ser causadas pela ingestão de água contaminada. A cólera, por exemplo, pode matar em questão de horas. A diarreia, também causada pela ingestão de água contaminada, é a segunda causa de morte entre crianças com menos de 5 anos em todo o

mundo, segundo o Fundo das Nações Unidas para a Infância (Unicef, 2013). Também segundo esse fundo, a falta de água de qualidade mata uma criança a cada 15 segundos no mundo.

Uma das formas mais antigas de tratamento de água é a dessalinização, que ainda é uma solução popular no mundo inteiro. Este processo também ocorre na natureza quando a radiação absorvida pelo oceano provoca a evaporação da água. O vapor é resfriado até atingir o ponto de orvalho, condensa e água potável desce em forma de chuva.

A dessalinização utiliza uma grande quantidade de energia para remover uma porção de água pura da fonte de água salobra. Foi estimado que a produção de 25.000.000m³ por dia de água potável no mundo inteiro, utilizando todos os métodos de dessalinização, requer 230 milhões de toneladas de petróleo por ano (Kalogirou, 2004). Grandes instalações comerciais de dessalinização que utilizam combustíveis fósseis estão em funcionamento em países ricos em petróleo para complementar as fontes tradicionais de abastecimento de água, porém, este é um gasto de energia que poucas áreas com escassez de água podem dispor. Por isso se faz necessário o aprimoramento de uma tecnologia que utilize uma energia abundante em várias regiões do planeta, que é a radiação solar.

Uma das principais vantagens do processo de dessalinização térmica é que requer aquecimento a baixas temperaturas, que pode ser suprido por energia solar, uma energia renovável, limpa e presente em muitas partes do mundo. De forma similar aos sistemas de fogão solar, os dessalinizadores podem usar diretamente a radiação no processo de evaporação, como nos dessalinizadores tipo tanque, ou utilizarem um fluido de transferência de calor, que é aquecido pela radiação solar e transfere esse calor para a água salobra a ser dessalinizada, tipo adotado neste trabalho.

Este trabalho possui como justificativa a necessidade de aprimorar um método de obtenção de água potável a partir de água salobra, para que se torne viável e prático de ser implementado em regiões onde há escassez de água potável utilizando uma das panelas de um fogão solar com aquecimento indireto (Schwarzer *et al.*, 2008). O objetivo do trabalho foi o desenvolvimento de uma nova panela para o fogão solar com ou sem armazenamento de calor para permitir o acoplamento de uma torre circular de dessalinização.

Esta panela é um trocador de calor que opera recebendo um fluxo de óleo quente de um coletor solar plano de boa eficiência em altas temperaturas e transfere esse calor para uma massa de água salobra ou salgada a ser dessalinizada em uma torre acoplada sobre a panela. Dando continuidade aos trabalhos iniciados no Instituto Solar de Jülich, na Alemanha, e que

atualmente estão sendo realizados no LESGN (Laboratório de Energia Solar e Gás Natural) na UFC, esse novo protótipo tem como característica a diminuição das perdas de água dessalinizada na forma de vapor no encaixe entre a panela do fogão e a torre de dessalinização.

Procurou-se garantir que o encaixe entre a panela e o dessalinizador fosse ser o melhor possível para evitar as perdas de vapor e também simples o suficiente para permitir a retirada da torre e possibilitar o uso da panela na preparação de alimentos, quando assim for necessário.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

O objetivo geral deste trabalho foi projetar, construir e avaliar um novo modelo de panela para o fogão solar com ou sem armazenamento temporário de calor que possibilita o acoplamento de uma torre de dessalinização. Desta forma, o fogão solar pode ser utilizado tanto para o cozimento de alimentos quanto para a produção de água dessalinizada, adequada ao consumo humano.

2.2 Específicos

Os objetivos específicos ou metas são as etapas de trabalho necessárias no desenvolvimento de um novo componente, neste caso, uma panela especial para um sistema de energia solar. As etapas foram as seguintes:

- Concepção e projeto de um novo modelo de panela;
- Construção e montagem da panela no fogão solar;
- Recuperação e reativação do fogão solar existente no laboratório;
- Realização de medições experimentais;
- Comparação de resultados com os resultados anteriores;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Sobre o tema dessalinização solar e fogão solar a quantidade de trabalhos é vasta e bastante diversificada. Foram escolhidos e apresentados neste capítulo alguns dos principais trabalhos que mais se adequam ao escopo da pesquisa aqui desenvolvida e que de alguma forma deram suporte para o direcionamento da mesma e para o desenvolvimento, tanto de fundamentos teóricos como experimentais.

Löf (1963) descreveu os princípios do cozimento solar. A energia necessária para um processo específico de cozimento não é sempre bem definida e varia bastante com o método. Durante o cozimento, 20% do calor é gasto em levar a comida à temperatura de ebulição, 35% é gasto na vaporização da água e 45% é perdido por convecção. O uso de isolamento nas laterais da panela e uma tampa reduzem consideravelmente as perdas.

Satcunanathan *et al*. (1973) construíram um dessalinizador tipo cascata com inclinação e distância entre as superfícies condensadora e evaporadora, podendo ser modificadas para determinar a influência destas variáveis no desempenho do dessalinizador. Foi encontrada uma inclinação ótima de 25°. A distância entre as superfícies condensadora e evaporadora tem maior efeito no desempenho e, quanto maior o valor da variável, melhor o resultado. Também foi constatado que o resfriamento da cobertura aumenta a eficiência e existe uma temperatura ótima para que a produção de água dessalinizada seja máxima.

Al-Dallal *et al*. (1984) realizaram testes para comparar a água obtida a partir do dessalinizador solar com água de torneira. Os ensaios mostraram que as impurezas tais como nitratos, cloretos, ferro e sólidos dissolvidos na água são completamente removidas durante o processo. Outro estudo foi realizado por Schwarzer *et al*. (2009) com um dessalinizador com recuperação de calor utilizando água do mar altamente poluída. Foi realizado um teste microbiológico e químico da água produzida e mostrou-se que todos os resultados foram muito abaixo do máximo permitido pela Organização Mundial de Saúde. O resultado de contaminação microbiológica mostrou ausência de *Escherichia coli*, coliformes e estreptococcus fecais. A alta temperatura de operação elimina grande quantidade de bactérias da água.

Adhikari *et al*. (1995) apresentaram um estudo teórico e desenvolveram um sistema de diferentes números de estágios para analisar o aumento da produção de água dessalinizada com o aumento do número de estágios num dessalinizador com recuperação de calor. Os autores concluíram que, para sistemas com número de estágios superiores a oito, não ocorre

um ganho significativo na produção de água dessalinizada, nem no valor da razão de ganho de saída da torre de recuperação de calor.

Kumar e Tiwari (1996) desenvolveram um modelo matemático para prever a transferência convectiva de massa em sistemas de destilação solar. O modelo é baseado em análise de regressão simples e foi utilizado um conjunto de dados experimentais obtidos em rigorosos testes em condições climáticas de verão. Os erros teóricos se encontravam dentro de uma precisão de 12%. Também foi concluído que os valores de C e n da equação de Nusselt devem sempre ser validados experimentalmente para que o desempenho seja avaliado. Silva et al. (2013) também analisaram a correlação de transferência de massa para processos térmicos de evaporação e condensação. Foi construído um dessalinizador de um estágio com temperaturas controladas para se chegar a constantes necessárias para calcular o número de Sherwood. O estudo é valido para um intervalo de temperaturas de 70°C a 95°C.

Balzar *et al*. (1996) realizaram estudos com fogão solar utilizando coletores de tubo evacuado. Foi demonstrado que altas temperaturas de cozimento (até 250°C) são alcançadas com água como fluido de trabalho. O desempenho do sistema foi excelente para condições de início tanto quente como frio. As velocidades de aquecimento foram maiores que utilizando coletores convencionais.

Porta *et al*. (1997) construíram e mostraram que a inércia térmica dos sistemas de dessalinização solar de tanque raso reside no tipo de coberta de vidro, na composição dos materiais utilizados no isolamento e na qualidade e quantidade de sais na água utilizada. A combinação destes fatores com as variáveis ambientais e com a radiação solar manteve a eficiência global do tanque. Esses autores observaram também que as condições climáticas influenciavam na variação da taxa de produção em função das diferenças de temperatura, do coeficiente de transferência de calor, e da quantidade inicial de água salgada contida no tanque.

Schwarzer *et al*. (2001) descreveram de maneira simplificada um sistema de dessalinização solar térmica com recuperação de calor como sendo composto de um coletor solar plano e uma torre de dessalinização. Uma tubulação de cobre conecta os dois componentes e um fluido de trabalho tem a função de transportar calor do coletor para a água do primeiro estágio da torre. A transferência do calor do fluido para a água é feita por evaporação, radiação e convecção. A água evaporada, ao entrar em contato com a parede inferior do próximo estágio, condensa e escorre em um canal onde é depois coletada do lado

de fora da torre. O calor perdido na condensação aquece a água do próximo estágio e o processo se repete.

Adsten *et al*. (2002) fizeram um estudo para saber a variação do desempenho de coletores solares dos tipos plano e de tubo evacuado operando a uma temperatura constante de 50°C e em um período de vinte anos, utilizando um programa de simulação. Os dados utilizados são reais e foram coletados durante este período. O desvio máximo do valor médio de energia térmica produzida no período para coletores planos foi de 20% e para coletores de tubo evacuado foi de 15%.

Hellstrom *et al*. (2003) estudaram a relação do desempenho de coletores solares com seus parâmetros óticos. Através da utilização de diferentes materiais, variaram a absortância e a emissividade do absorvedor e a reflexividade do vidro. Incluindo um filme de teflon "favo de mel" no absorvedor, o desempenho aumentou em 12% a 50°C. Com tratamento anti-reflexo no vidro o aumento do calor transferido anualmente é de 11%. Com o filme e o tratamento o desempenho subiu 24,6%. Foi utilizado um programa de simulação para realizar os testes.

Esen (2004) fez um estudo comparativo com três refrigerantes (Freon 22, Freon, 134a e Freon 407C) em um fogão solar com coletor do tipo tubo evacuado. Mobiltherm 605 foi o fluido utilizado no condensador, um reservatório que cobre a panela nas laterais e no fundo, que recebe o calor do refrigerante e transfere para a panela. Os testes foram realizados em dias claros, das 8:00 às 18:00, onde o período até as 11:00 consistia de um pré-aquecimento antes de preencher a panela. Quando utilizado óleo de cozinha, este alcançou 175°C. Foram cozidos diversos alimentos separadamente e os melhores resultados foram obtidos como o Freon 407C como fluido de trabalho. O autor afirmou que provavelmente isso ocorre por causa do ponto de ebulição mais baixo e o calor latente mais alto deste refrigerante.

Pucar e Despic (2005) fizeram um estudo comparativo entre três tipos de coletores, um fixo e dois móveis, sendo um rastreando o sol e outro buscando a maior incidência de luz. Os móveis conseguiram absorver maior quantidade de energia térmica em relação ao fixo e dos móveis, o que rastreia o sol possui maior eficiência, sendo ultrapassado apenas em casos extremos com céu 95% coberto e de manhã e ao anoitecer. Outro resultado apresentado foi a contribuição da radiação difusa em relação à radiação total, que chegou ao valor de 40%, tendo uma média anual de 33,8%.

Karagiannis *et al*. (2008) fizeram um estudo comparativo dos custos do metro cúbico de água dessalinizada de diferentes tipos de dessalinizadores disponíveis. A comparação foi

feita a partir de dados de pesquisas de outros autores e foram comparados custos de acordo com o tipo de energia utilizada: convencional (óleo, gás, eletricidade) e energias renováveis (eólica, solar, geotérmica). O custo da produção de água dessalinizada através de sistemas que utilizam coletores solares (3.50€/m³ – 8.00€/m³) é bastante elevado em relação a sistemas que utilizam energia convencional (0.35€/m³ – 2.70€/m³). Entretanto, os autores afirmaram que esses sistemas podem ser atrativos pelos benefícios ambientais.

Nassar *et al*. (2007) projetaram e fabricaram um dessalinizador solar evacuado. O objetivo foi diminuir o ponto de ebulição da água. O equipamento consistia de um reservatório metálico de formato elíptico suspenso sobre dois espelhos côncavos. O vapor de água produzido era bombeado para um condensador e a água era então coletada. O experimento produziu uma média de 20 litros de água dessalinizada por metro quadrado por dia. Outra conclusão do estudo foi que este equipamento utilizava 10% da energia de um dessalinizador tipo tanque para cada quilo de água dessalinizada.

Schwarzer *et al*. (2008) classificaram os fogões solares em 4 tipos diferentes e expuseram parâmetros para estes poderem ser comparados entre si. Estes parâmetros foram o período de rastreio, que indica a frequência com que o fogão solar deve ser direcionado ao sol, as perdas de calor sem insolação, que caracteriza as perdas para o ambiente quando não há sol, o cozimento contínuo, que indica a capacidade de cozimento contínuo durante um dia inteiro, e o período de cozimento desacompanhado, que indica o tempo no qual o fogão consegue trabalhar sem a intervenção do usuário.

Alves (2009) apresentou um dessalinizador solar do tipo torre com recuperação de calor no qual a água como fluido de trabalho era distribuída no tanque de armazenamento por um tubo de aço inoxidável com furos passantes igualmente espaçados ao longo do comprimento. Com esta configuração, esperava-se uma melhor distribuição de água quente no tanque de armazenamento. A temperatura no tanque de armazenamento alcançou valores próximos de 85°C e a produção diária foi de 31 litros de água dessalinizada por dia.

Rodrigues (2010) desenvolveu um dessalinizador solar do tipo torre com recuperação de calor com canais sintéticos de poliuretano. Este material foi escolhido para melhorar a conservação de energia no interior dos estágios e diminuir as perdas por vazamento de vapor de água. O equipamento era composto de 5 estágios e o coletor era do tipo tubo evacuado e produziu 35 litros de água dessalinizada por dia.

Muthusivagami *et al*. (2010) fizeram estudos com diversos tipos de fogão solar e citaram as vantagens do fogão solar do tipo com aquecimento indireto. São elas a

possibilidade de um rápido processo de cozimento, grandes volumes de panela e possibilidade de cozimento dentro do local. Algumas desvantagens são os fatos de o desempenho se deteriorar devido ao ciclo reverso durante a noite e períodos nublados do dia e as panelas não serem removíveis, dificultando a limpeza e manutenção.

Auti (2012) projetou e construiu um dessalinizador solar parabólico. O sistema trabalhou durante 6 horas diárias e produziu 20 litros por dia. O melhor horário para a dessalinização foi entre 11h e 13h.

Costa e Silva (2012) Estimaram numérica e experimentalmente a vazão mássica de circulação de um circuito de sifão térmico solar para aquecimento em processos solares como cozimento, dessalinização e refrigeração. Para não interferir com a perda de carga no circuito, foi utilizado um sensor externo que opera com ondas sonoras. Os resultados mostraram que, para radiação de 900W/m², a vazão mássica medida pelo instrumento é equivalente à medida pela equação e alcança valores em torno de 16g/s.

Costa (2013) fabricou e testou dois dessalinizadores que operam em um fogão solar do tipo indireto. Em um deles, denominado tipo A, a água da panela era dessalinizada, além de trocar calor com o próximo estágio, enquanto no outro, denominado tipo B, a água da panela era utilizada apenas como meio de troca de calor, não havendo alteração no volume de água. Foram testados arranjos com um, dois e três estágios. Foi observado que para o tipo A deve-se usar três estágios e para o tipo B, dois estágios. As quantidades máximas de água dessalinizada produzidas foram 4,72L e 3,50L, respectivamente.

Pinheiro (2013) projetou e fabricou um dessalinizador com aquecimento controlado por energia elétrica com a finalidade de estudar a influência das variáveis de processo e dos parâmetros geométricos construtivos. Foram utilizadas bandejas de alumínio, aço cromado, aço polido e aço inoxidável. Foi constatado que quanto maior a rugosidade da bandeja, maior a produção de água dessalinizada, porém, rugosidades muito elevadas atrapalham no escoamento de água condensada até a calha. Neste parâmetro, o melhor material foi o alumínio. Outra conclusão tirada foi que o alumínio possui o menor coeficiente global de transferência de calor, mas a produção foi maior porque possuía a menor perda de água na bandeja.

Tian *et al*. (2013) fizeram uma ampla revisão sobre coletores solares. As seguintes conclusões foram tomadas: Vidro com baixa porcentagem de ferro possui maior desempenho como material para a cobertura do coletor, por apresentar alta transmitância da radiação solar e baixa transmitância de radiação térmica; Superfícies seletivas desejáveis geralmente

consistem de uma camada superior fina, que é altamente absorvente de ondas curtas de radiação solar, mas relativamente transparente a radiação térmica de onda longa, e uma fina camada inferior que tem uma elevada reflectância e uma emissividade baixa para a radiação de ondas longas; Coletores solares com inserções porosas na tubulação podem apresentar um aumento no desempenho de até 64,3%.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são descritas as principais partes construtivas do sistema de fogão solar com aquecimento indireto e dessalinizador:

- Coletor Solar;
- Panela com bordas de fixação;
- Dessalinizador circular.

Também são expostas as equações de governo dos processos que ocorrem no sistema.

4.1 Coletor Solar

Coletor solar é o componente responsável por receber a radiação do sol, converter a energia para a forma de calor e transportá-la para a panela através de um fluido de trabalho.

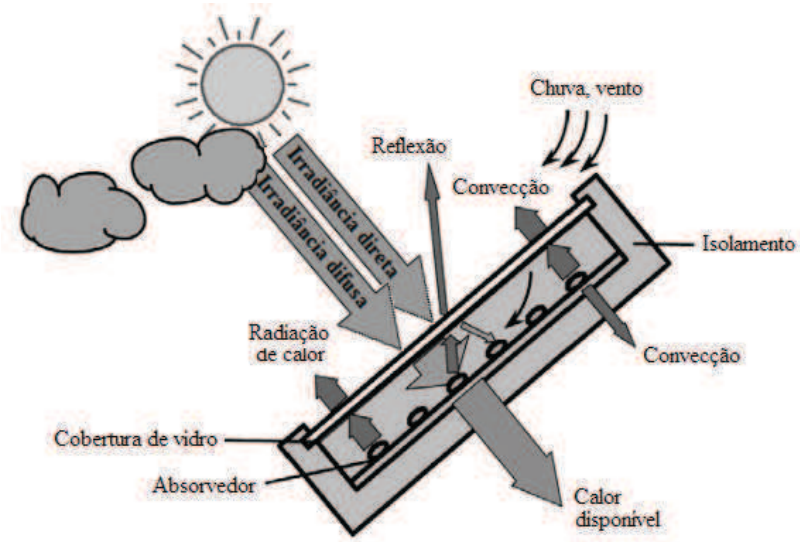
O coletor solar mais comum para sistemas domésticos de aquecimento de água em muitos países é o de placa plana. Os conceitos e equações de governo dos processos que ocorrem no coletor solar encontram-se em diversas literaturas, como Quaschning (1969), que foi a utilizada no presente texto. O coletor solar consiste basicamente de três componentes:

* Cobertura transparente
* Suporte
* Absorvedor

O absorvedor fica dentro do suporte. Este componente converte a luz do sol em calor e o transfere para o fluido de trabalho dentro dos tubos, que passam através do sistema. O suporte do coletor é altamente isolado na parte de trás e nas laterais para reduzir as perdas de calor o máximo possível, entretanto, sempre haverá algumas perdas que dependem da diferença de temperaturas entre o absorvedor e o ar ambiente. Essas perdas são divididas em perdas por convecção e por radiação.

Uma placa de vidro cobre o coletor e evita a maioria das perdas por convecção. Além disso, reduz a radiação de calor do absorvedor para o ambiente, como em uma estufa. Entretanto, o vidro também reflete uma pequena parte da luz do sol, o que representa perda de energia útil.

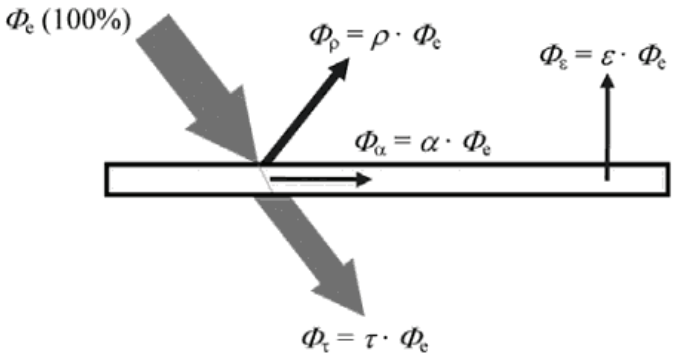
Figura 4.1 – Processos em um coletor de placa plana.



Fonte: Adaptado de Quaschning, 1969

A tampa de vidro da frente reflete e absorve uma pequena parte da energia radiante, $\boldsymbol{\Phi}_c$, como mostrado na Figura 4.2. Porém a maior parte da radiação solar passa através do vidro.

Figura 4.2 – Processos na placa de vidro do coletor solar.



Fonte: Quaschning, 1969

A refletância ρ, a absortância α e a transmitância τ podem descrever este processo. Valores comuns para estes parâmetros serão mostrados posteriormente, na Tabela 4.1. A soma destes três valores deve sempre ser um:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \qquad (1)$$

A absorção da radiação solar aquece a placa de vidro. Se o vidro está em equilíbrio térmico, ele deve emitir a radiação absorvida. Então a energia radiante emitida, $\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{e}}$, é igual à energia radiante absorvida, $\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{a}}$.

Por um lado, a placa frontal deveria deixar a maior parte da radiação solar passar, por outro, deve também reter a radiação de calor do absorvedor e reduzir as perdas por convecção para o ambiente. A maioria dos coletores usa uma camada de vidro solar tratado termicamente e com baixo teor de ferro. Esse vidro possui alta transmitância ($\tau \rightarrow 1$) e boa resistência às influências do ambiente.

Vidros duplos podem resultar em maior redução de perda de calor, mas também reduzem a energia solar transmitida e aumentam o custo.

O uso de materiais especiais para a placa frontal pode aumentar a eficiência do coletor. Esses materiais devem permitir a passagem da radiação solar, mas refletir as emissões infravermelhas do absorvedor. Vidros refletores de infravermelho tais como $\mathrm{In_2O_3}$ ou $\mathrm{ZnO_2}$ com alta transmitância para luz visível e alta refletância para o infravermelho atendem estes requerimentos, porém, altos custos e pobre transmitância para a luz visível impediram a difusão do uso desses materiais.

O suporte do coletor pode ser feito de plástico, metal ou madeira. Deve selar a tampa de vidro frontal para que nenhum calor escape e nenhuma impureza, animal ou umidade alcancem o interior do coletor.

O material para o isolamento térmico posterior deve ser resistente à temperatura e altamente isolante. Materiais adequados são a espuma de poliuretano ou placa de fibra mineral. O isolamento não pode ter agentes de ligação que possam evaporar porque podem condensar na placa de vidro frontal e reduzir a radiação solar incidente.

O coletor pode atingir temperaturas de estagnação de cerca de 200ºC e todos os materiais devem resistir a estas temperaturas. Como resultado, o absorvedor é normalmente feito de metal, tal como cobre, aço ou alumínio.

Absorvedores de cobre soldado são os mais comuns atualmente. Alumínio é pouco utilizado porque não possui resistência à corrosão e sua produção exige muito mais energia.

É bem conhecido que materiais negros absorvem a luz do sol muito bem e aquecem a temperaturas maiores. Entretanto, materiais metálicos não têm superfícies negras naturalmente e devem ser revestidos. Laquê preto resistente à temperatura serve a esse propósito, porém uma superfície preta aquecida emite parte da energia absorvida em forma de radiação de calor. Os chamados revestimentos seletivos absorvem a luz solar quase tão bem

quanto superfícies pintadas de preto, mas emitem de volta uma menor quantidade, significativa, de radiação de calor. Materiais utilizados para esses revestimentos avançados incluem cromo preto, níquel preto ou TiNOX, porém eles precisam de processos de revestimento mais complicados que o laquê preto e por isso, ficam sujeitos a custos maiores.

Figura 4.3 – Perdas em superfícies com diferentes tipos de revestimento

Fonte: Adaptado de Quaschning, 1969

A Tabela 4.1 resume os valores dos parâmetros de materiais seletivos e não-seletivos.

Tabela 4.1 – Comparação de propriedades de vidros com e sem materiais seletivos.

	Visível			Infra-vermelho		
Material	$\alpha = \varepsilon$	τ	ρ	$\alpha = \varepsilon$	τ	ρ
Vidro de Janela	0.02	0.97	0.01	0.94	0	0.06
In_2O_3	0.10	0.85	0.05	0.15	0	0.85
ZnO_2	0.20	0.79	0.01	0.16	0	0.84

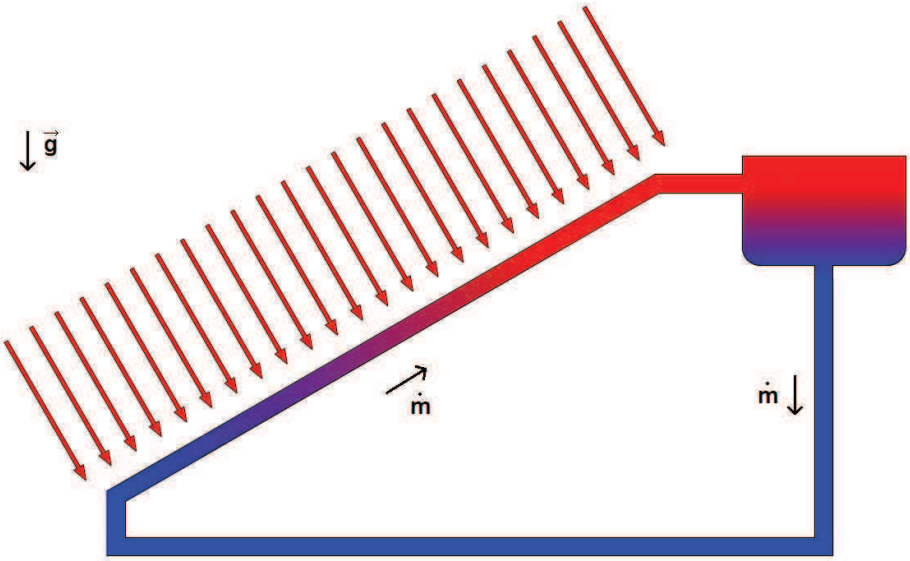
Fonte: Adaptado de Quaschning, 1969

Vácuo entre a cobertura frontal de vidro e o absorvedor pode reduzir significativamente as perdas de calor por convecção, devido ao movimento do ar dentro do coletor. Entretanto, é difícil manter o vácuo durante um longo período de tempo. O ar quase sempre encontra um caminho entre o vidro e o suporte e por isso o coletor deve ser evacuado periodicamente.

A movimentação do fluido de trabalho (água ou óleo térmico) dentro do circuito pode ser realizada por meio da utilização de uma bomba elétrica, no caso de sistemas de circulação forçada, ou pelo efeito de termossifão, em sistemas com circulação natural.

O sistema termossifão faz uso da gravidade. O fluido frio possui densidade mais alta que o fluido quente, sendo então mais pesado e forçado a descer para o fundo do coletor. Quando este aquece o fluido, ele sobe novamente para a panela, perdendo calor para a água e esfriando novamente, repetindo o ciclo. Por este motivo a panela deve estar sempre acima do nível do coletor, como mostra a Figura 4.4.

Figura 4.4 – Desenho esquemático do processo de termossifão.



Fonte: Próprio autor

Em um sistema com circulação natural, a razão de massa que escoa precisa ser determinada. Este valor foi calculado considerando o fato de que, num circuito fechado, a diferença de pressão para uma volta completa é zero (COSTA *et al.*, 2012). Ou seja, a pressão total muda devido à diferença de densidade nos dois lados do circuito. A força de empuxo é equilibrada pelas perdas por fricção através do circuito fechado, logo:

$$(\Delta P)_{Empuxo} = (\Delta P)_{Fricção} \quad (2)$$

na qual o $(\Delta P)_{Empuxo}$ é a diferença de pressão da fonte quente em relação à fonte fria e $(\Delta P)_{Fricção}$ é o comprimento equivalente de perda de carga do sistema.

A mudança na pressão devido à mudança na densidade é dada por:

$$(\Delta P)_{Empuxo} = (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot \Delta X_g \quad (3)$$

na qual ρ_2[Kg/m³] é a densidade do óleo na entrada do coletor, ρ_1[Kg/m³] é a densidade do óleo na saída do coletor, g [m/s²] é a aceleração da gravidade e ΔXg [m] é a diferença de altura entre a entrada e saída do coletor.

E, de acordo com Sissom e Pitts (1972), a queda de pressão por atrito para escoamento laminar interno viscoso e incompressível é dada por:

$$(\Delta P)_{Fricção} = \frac{128 \cdot \dot{m} \cdot \mu \cdot \Delta X_F}{\pi \cdot \rho \cdot D^4} \quad (4)$$

Onde μ é a viscosidade dinâmica, D é o diâmetro do tubo e ΔX_F é o comprimento equivalente do percurso do fluido no trocador de calor.

Para o escoamento laminar em baixas velocidades, a vazão mássica de circulação é então dada por:

$$\dot{m} = \frac{(\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot \Delta X_g \cdot \pi \cdot \bar{\rho} \cdot D^4}{128 \cdot \mu \cdot \Delta X_F} \quad (5)$$

Esta equação foi utilizada para calcular a energia transferida do óleo para a água salobra e, posteriormente, o desempenho da panela.

4.1.1 Balanço de energia para coletor de placa plana

Em regime permanente, o desempenho de um coletor solar é descrito pela razão entre energia útil e a energia solar incidente.

$$\eta = \frac{\int Q_u dt}{A_{col} \int G_T dt} \quad (6)$$

A radiação solar total absorvida pelo coletor, S, é igual a diferença entre a radiação solar incidente e as perdas ópticas. A energia térmica perdida por condução, convecção e radiação pode ser representada pelo produto do coeficiente global de transferência de calor, U_{abs}, vezes a diferença entre a temperatura média do absorvedor, T_{ma}, e a temperatura ambiente, T_a.

A energia útil de um coletor de área A_{col} é a diferença entre a radiação solar absorvida e a perda térmica:

$$Q_u = A_{col}[S - U_{abs}(T_{ma} - T_a)] \quad (7)$$

Porém existe certa dificuldade de calcular ou medir a temperatura média do absorvedor, por ser função do projeto deste, da radiação solar incidente e das condições de entrada do fluido. Duffie e Beckman (1980) reformularam essa equação para que fosse expressa em termos da temperatura de entrada do fluido e um parâmetro chamado fator de remoção de calor, que pode ser avaliado analiticamente com princípios básicos ou medido experimentalmente. Utiliza-se uma quantidade que relaciona o ganho de energia útil real de um coletor com o ganho útil se toda a superfície do coletor estivesse à temperatura do fluido na entrada. Esta quantidade é chamada de fator de remoção de calor do coletor, F_R:

$$F_R = \frac{\dot{m}c}{A_{col}U_L}\left[1 - \exp\left(\frac{A_{col}U_{abs}F'}{\dot{m}c}\right)\right] \quad (8)$$

Na qual F' é o fator de eficiência do coletor, que representa a razão entre o ganho útil real e o ganho útil que resultaria se a superfície do absorvedor estivesse à temperatura do fluido naquele local. F' é dado pela seguinte equação:

$$F' = \frac{1/U_{abs}}{W\left[\frac{1}{U_{abs}[D+(W-D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}}\right]} \quad (9)$$

Onde C_bé a condutância da solda.

$$C_b = \frac{k_b b}{\gamma} \quad (10)$$

k_b é a condutividade térmica da cola, b é a largura e γ é a espessura.

Na equação (9) a função F é a eficiência de uma aleta reta de perfil retangular.

$$F = \frac{\tanh[m(W-D)/2]}{m(W-D)/2} \quad (11)$$

Na qual W é a distância entre os centros dos tubos e D é o diâmetro externo do tubo.

Assim, a energia útil de um coletor pode ser calculada como uma função da temperatura do fluido na entrada:

$$Q_u = A_{col}F_R[S - U_{abs}(T_{in} - T_a)] \quad (12)$$

E o desempenho do coletor é:

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - F_R U_{abs}\left(\frac{T_{in} - T_a}{G_t}\right) \quad (13)$$

Na qual T_e é a temperatura de entrada do fluido, T_a é a temperatura ambiente e G_T é a radiação incidente na superfície do coletor.

4.2 Panela

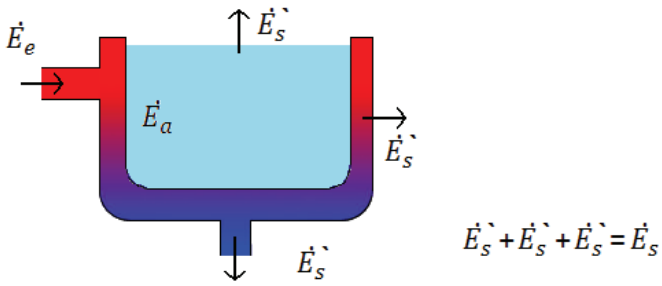
A panela é constituída de duas paredes, denominadas parede interna e parede externa. E no espaço entre elas circula o óleo térmico que transfere calor para a água. O fluido também perde calor pela parede externa, então a panela deve ser bem isolada por fora.

4.2.1 Balanço de Energia para a panela

A energia armazenada na água e na panela é dada pela diferença entre a energia que entra na panela e a energia que sai (Figura 4.5):

$$\dot{E}_e - \dot{E}_s = \dot{E}_a \quad (14)$$

Figura 4.5 – Balanço de energia na panela



Fonte: Próprio autor

Na qual:

$$\dot{E}_e = \dot{m}.c_p.(T_e - T_{ref}) \tag{15}$$

$$\dot{E}_s = \dot{m}.c_p.(T_s - T_{ref}) + \dot{m}_{água}.h_{fg} + \dot{Q}_{perdas} \tag{16}$$

e

$$\dot{E}_a = \left[M.c_p.\frac{dT}{dt}\right]_{\substack{partes \\ metálicas}} + \left[M_{agua}.c_p.\frac{dT_a}{dt}\right]_{\substack{água \\ panela}} \tag{17}$$

Mas o fogão trabalha em regime permanente, ou seja, a energia armazenada não varia, então:

$$\dot{E}_e = \dot{E}_s \tag{18}$$

Substituindo e organizando:

$$[\dot{m}.c_p.(T_e - T_s)]_o.\Delta t = [m_{água}.h_{fg}]_{evap} + \dot{Q}_{perdas}.\Delta t \tag{19}$$

$\dot{Q}_{perdas}$ é a perda de calor pelo isolamento na parede externa da panela. Substituindo pela equação de condução de calor, onde k é a condutividade térmica e Δx é a espessura do isolamento:

$$[\dot{m}.c_p.(T_e - T_s)]_o.\Delta t = [m_{água}.h_{fg}]_{evap} + \left[\frac{k}{\Delta x}.A.(T - T_\infty)\right]_p.\Delta t \tag{20}$$

Isolando a massa de água evaporada:

$$m_{agua} = \frac{[\dot{m}.c_p.(T_s - T_e)]_o - \left[\frac{k}{\Delta x}.A.(T - T_\infty)\right]_p}{h_{fg}} \cdot \Delta t = m_{evap} \tag{21}$$

O resultado desta equação é utilizado na equação do desempenho da panela:

$$\eta_{panela} = \frac{m_{evap}.h_{fg}}{[m.c_p.\Delta T]_{óleo}} \tag{22}$$

4.3 Dessalinizador

Dessalinização é o processo de remoção de sais e outros minerais da água. É uma maneira de purificar a água para torná-la potável. Existem diferentes métodos para realizar esse processo, que podem ser classificados em métodos de membrana e processos térmicos.

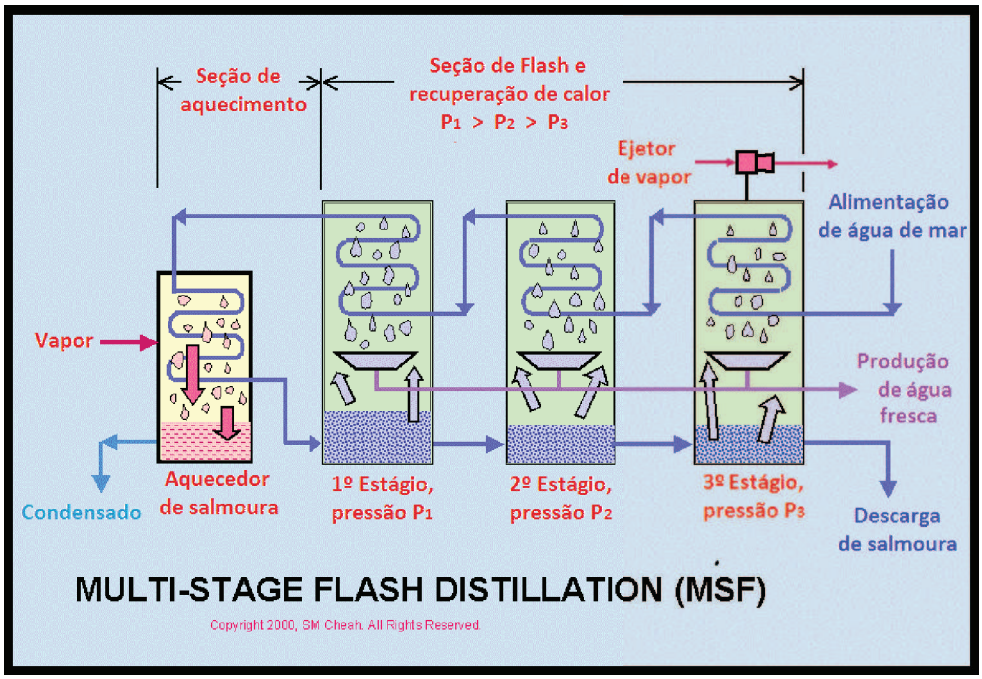
O primeiro método, como o nome indica, utiliza uma membrana para separar as impurezas das moléculas de água e se divide em duas técnicas: osmose reversa, onde se faz uso de pressão para forçar a passagem da água pela membrana, servindo como um filtro e dessalinização por eletrodiálise, que ocorre com auxílio de eletrodos para atrair as partículas para as membranas.

Dentre os processos térmicos estão:

- Dessalinização Flash de Múltiplos Estágios [MSF];
- Dessalinização de Múltiplo Efeito [MED];
- Dessalinização Solar Térmica [DS];

Na dessalinização Flash de Múltiplos Estágios (Multistage Flash – MSF), ilustrada na Figura 4.6, água salobra que circula dentro de tubos em um aquecedor é aquecida pela passagem de vapor. Este condensa e é coletado. A água aquecida entra no primeiro estágio, onde a pressão reduzida faz com que ela vaporize imediatamente, como uma explosão (flash), o vapor deste estágio condensa ao entrar em contato com tubos por onde circula água salobra e o resto da água que não evaporou passa para o segundo estágio, onde a pressão é ainda menor, repetindo o que acontece no primeiro estágio. A água salobra que circula nos tubos é pré-aquecida ao trocar calor com o vapor em cada estágio, antes de chegar ao aquecedor.

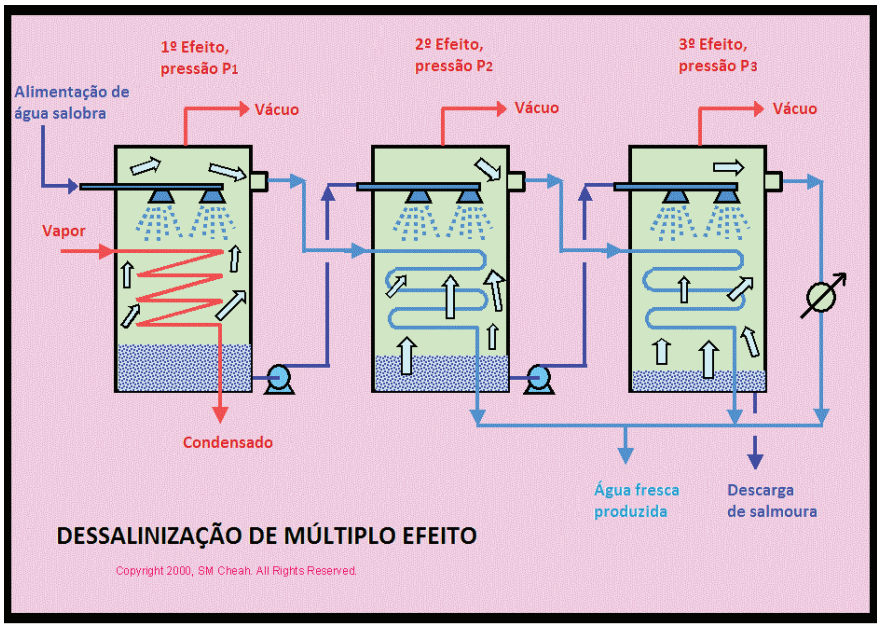
Figura 4.6 – Dessalinização Flash de Múltiplos Estágios (MSF).



Fonte: Disponível em<http://www.separationprocesses.com/Distillation/Fig078a.htm> Acesso em: 30 jun.2014.

Na dessalinização de Efeito Múltiplo (Multiple Effect Destilation – MED), vapor aquece a água salobra que é borrifada no aquecedor e é coletada ao condensar, como no método anterior. O vapor produzido a partir da água salobra passa para o próximo estágio, por uma tubulação que é resfriada pela água salobra que restou do estágio anterior ou de outra alimentação. A água salobra evapora e vai para o próximo estágio, repetindo o processo. Este método pode ser visualizado na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Dessalinização de Múltiplo Efeito (MED).

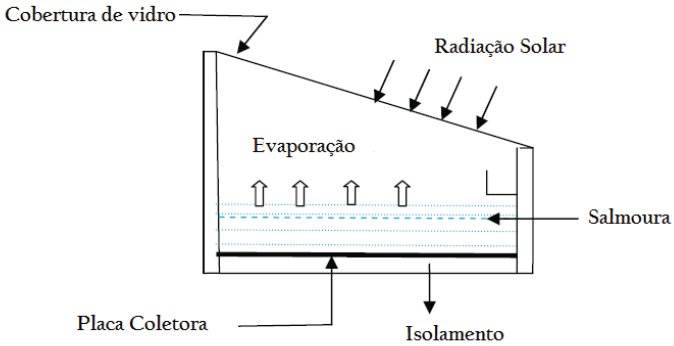


Fonte: Disponível em<http://www.separationprocesses.com/Distillation/Fig078b.htm> Acesso em: 30 jun.2014.

A dessalinização solar térmica pode ser dividida em direta e indireta, dependendo da forma como o calor chega à água a ser dessalinizada.

O dessalinizador de tanque (Figura 4.7) é um tipo de dessalinizador solar direto. É constituído de um tanque com tampa inclinada de vidro e preenchida com água. A radiação solar aquece a água até evaporar e esta condensa ao entrar em contato com a tampa, escoando até um coletor de água dessalinizada.

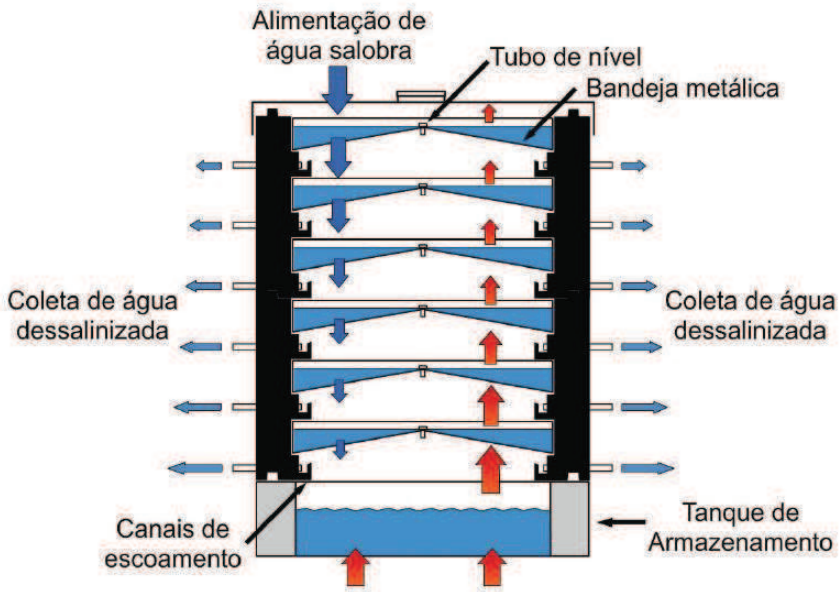
Figura 4.8 – Dessalinizador tipo tanque.



Fonte: Adaptado de Rajan e Kaushik (2013)

Os dessalinizadores solares indiretos são os que utilizam um fluido de trabalho para transportar o calor recebido da radiação solar para o componente onde está localizada a água salobra. Um exemplo é o dessalinizador com recuperação de calor, também conhecido como tipo torre. O fluido de trabalho recebe calor do coletor e transporta para a água do primeiro estágio da torre. A transferência do calor do fluido para a água é feita por evaporação, radiação e convecção. A água evaporada, ao entrar em contato com a parede inferior do próximo estágio, condensa e escorre em um canal onde é depois coletada do lado de fora da torre. O calor perdido na condensação aquece a água do próximo estágio e o processo se repete.

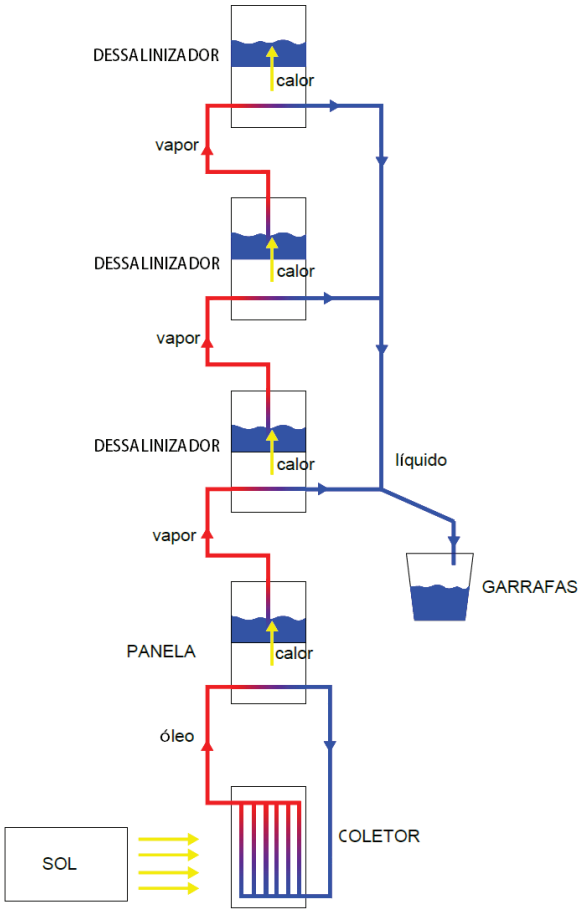
Figura 4.9 – Dessalinizador com recuperação de calor.



Fonte: Rodrigues (2011).

Este é o tipo do dessalinizador utilizado no fogão solar do presente estudo. Na Figura 4.10 está um diagrama de blocos ilustrando os processos que ocorrem no sistema.

Figura 4.10 – Diagrama de blocos do sistema fogão solar com dessalinizador.



Fonte: Próprio autor.

4.3.1 Desempenho do dessalinizador

Dois parâmetros importantes são utilizados para avaliar o desempenho do dessalinizador: O COP (*Coefficient of Performance*), ou coeficiente de desempenho, e o GOR (*Gain Output Ratio*), ou razão de ganho de saída.

O primeiro parâmetro é definido como a razão entre a quantidade mássica de água dessalinizada em todos os estágios e a quantidade produzida somente no primeiro estágio, é uma medida do aproveitamento do calor na torre de dessalinização.

$$COP = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i}{m_1} \tag{23}$$

Onde, m_i é a massa de água dessalinizada no estágio i e m_1, é a massa de água dessalinizada no primeiro estágio.

A razão de ganho de saída é uma medida da quantidade de energia térmica consumida no processo de dessalinização. É definida como a razão entre a energia necessária para vaporizar a água produzida e a energia transferia do fluido térmico para a água na panela.

$$GOR = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i . h_{fg}}{\sum G_t \cdot A_{col}} \tag{24}$$

Onde, h_{fg}é a entalpia de vaporização da água, G_t é a radiação solar eA_{col} é a área do coletor.

Esses parâmetros foram calculados a partir de valores medidos durante os experimentos.

Para calcular a eficiência de cada estágio de dessalinização, utilizou-se a seguinte equação:

$$\eta_i = \frac{[m_c . h_{fg}]_i}{[m_c . h_{fg}]_{i-1}} \tag{25}$$

5 METODOLOGIA

Com este sistema o fogão solar possui duas utilidades, o cozimento de alimentos e a dessalinização de água. Quando utilizado como dessalinizador, a panela funciona como câmara de vaporização de água e não pode cozer alimentos, pois a panela não trabalha nos dois modos ao mesmo tempo. Porém o fogão solar possui duas panelas, podendo os dois processos acontecerem simultaneamente.

O conjunto panela-dessalinizador deve ser robusto, com bastante espaço para água salobra, para que se atinja uma boa produção de água dessalinizada, leve, com o objetivo de ser facilmente manuseado, e simples, a fim de que qualquer pessoa com um mínimo de experiência possa utilizar facilmente.

O principal problema do conjunto existente Figura 5.1 era o vazamento de vapor na junção entre a panela e o primeiro estágio, problema o qual era contornado vedando-se a junção com silicone. Porém isto não é uma solução adequada, devido à possível contaminação da água da panela e também ao tempo gasto para a preparação do conjunto. Desta forma, um anel de aço no topo da panela foi proposto para servir como guia e melhorar o encaixe.

Outra modificação realizada foi nas dimensões da panela, que ganhou um diâmetro maior para melhor assentar o primeiro estágio de dessalinização. A profundidade da panela foi reduzida a fim de manter o volume de água próximo ao da panela antiga.

Figura 5.1 – Panela original montada no fogão solar.

Fonte: Próprio autor.

A nova panela foi fabricada com chapa de aço inoxidável de 1,2mm de espessura. É o mesmo material de construção dos estágios de dessalinização já existentes.

A panela passou por dois modelos virtuais até chegar no final, considerado de fabricação mais simples. Para o desenho esquemático tridimensional foi utilizado o software de desenho assistido por computador *AutoCAD 2010*.

Por motivos de patenteamento da ideia, os desenhos não estão apresentados neste trabalho.

5.1 Processos de construção mecânica e acoplamento da Panela

A chapa utilizada foi a chapa inox #18, que tem 1,2mm de espessura.

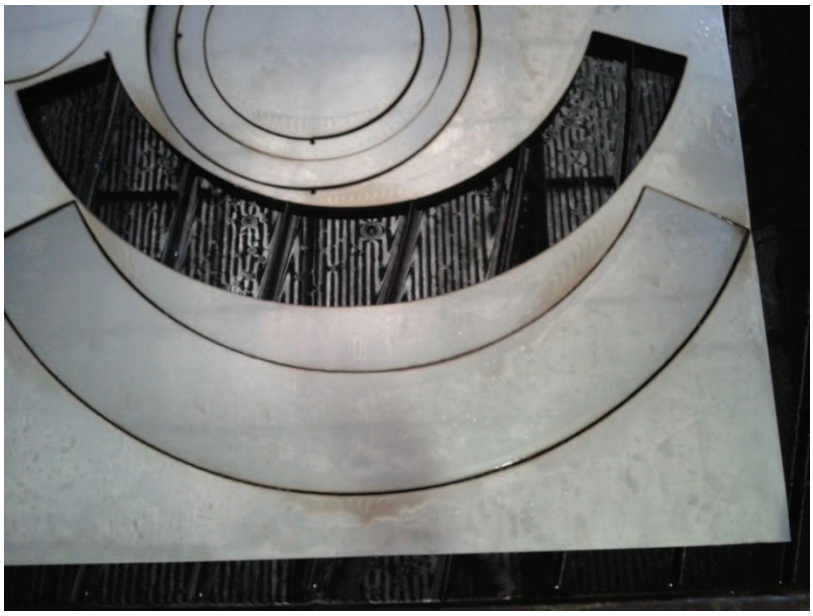
Foi feito um desenho com cada peça a ser cortada e suas respectivas medidas. O mesmo não está apresentado por motivos de patente.

As peças circulares, que fazem os fundos da panela e a aba superior, e as curvas, que formam as paredes laterais, foram cortadas utilizando em uma máquina CNC de corte a plasma (Figura 5.2 e Figura 5.3).

Figura 5.2 – Corte a plasma das peças para montagem.

Fonte: Próprio autor.

Figura 5.3 – Peças circulares cortadas.



Fonte: Próprio autor.

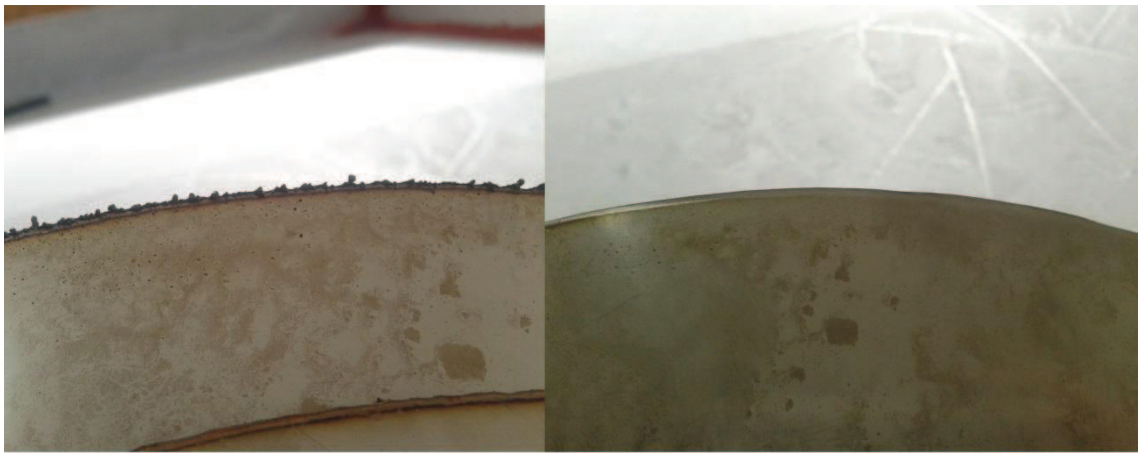
A peça reta, que forma a guia vertical, foi cortada em uma guilhotina (Figura 5.4).

Figura 5.4 – Guilhotina.

Fonte: Próprio autor.

As peças cortadas a plasma formaram rebarbas, que são indesejáveis para os próximos estágios de construção. As rebarbas foram retiradas com uma lixadeira.

Figura 5.5 – Detalhe da rebarba após o corte a plasma e o resultado do lixamento.



Fonte: Próprio autor.

O próximo estágio foi a calandragem das peças curvas, que formam as paredes interna e externa da panela, e da peça reta, que forma a guia (Figura 5.6).

Figura 5.6 – Calandra e peças calandradas.

Fonte: Próprio autor.

Para a solda foi utilizado o processo MIG. As extremidades a serem soldadas foram lixadas e limpas antes do processo. Logo após verificada a estanqueidade da panela preenchendo-a de água e deixando por três dias. O nível de água não desceu, confirmando a estanqueidade (Figura 5.7).

Figura 5.7 – Peças soldadas.

Fonte: Próprio autor.

O próximo passo foi furar as aberturas para entrada e saída do óleo. Um terceiro furo tinha a função de permitir que o óleo fosse para um tanque de expansão. A Figura 5.8 mostra um dos furos. Deve-se perceber que somente a parede externa é furada, para que o óleo tenha acesso à parte interna da panela.

Figura 5.8 – Furo para passagem do óleo.

Fonte: Próprio autor.

Pontas de rosca foram soldadas nos furos para permitir o acoplamento da panela e a tubulação de cobre do fogão, utilizando porcas sextavadas de latão (Figura 5.9).

Figura 5.9 – Detalhe do acoplamento com porca sextavada.

Fonte: Próprio autor.

5.2 Preparação do fogão

Acopladas às panelas, duas longarinas foram adicionadas na parte inferior das mesmas para suportar o peso total destas com os três estágios de dessalinização, sem forçar a tubulação.

A próxima etapa foi preencher o circuito com o óleo para saber se tinha algum vazamento. No primeiro teste foram encontrados dois vazamentos, um na solda de cobre e outro em um dos acoplamentos. O problema foi resolvido e então os termopares foram colados em alguns pontos de interesse. Foram escolhidos, na tubulação, quatro locais para medição da temperatura: saída do coletor, entrada da panela, saída da mesma, e retorno para o coletor (Figura 5.11).

Foi utilizado isolamento de lã de vidro da *Isover* de 25mm na tubulação e nas panelas. Foram feitas duas camadas, totalizando uma espessura média de 50mm.

Depois que as chapas ao redor do fogão foram instaladas, iniciaram-se os experimentos definitivos.

A Figura 5.10 mostra as duas configurações do fogão, como equipamento de cozimento e como dessalinizador.

Figura 5.10 – As duas configurações do fogão, como equipamento de cozimento (esquerda) e como dessalinizador (direita).

Fonte: Próprio autor.

5.3 Experimentos

A coleta da água dessalinizada foi feita utilizando mangueiras guiando a água produzida da saída do dessalinizador para garrafas localizadas junto ao fogão solar. Cada estágio possui um próprio sistema de coleta para permitir a medição da produção dos estágios separadamente e o estudo da produtividade de cada estágio.

A produção de água dessalinizada era contabilizada somente na manhã do dia seguinte às 6:00, quando o sistema de aquisição de dados já tinha sido retirado para tratamento dos dados, o sistema esfriara e as gotas nas paredes dos dessalinizadores já tinham escorrido para as garrafas.

Havia um refletor vertical na lateral do coletor cuja posição e direção foram alternados manualmente entre 11:50 e 12:10, quando o sol está exatamente acima do coletor.

Foram realizados experimentos com diversas configurações, com o objetivo de conseguir a melhor produção e ter conhecimento do ganho de cada parâmetro.

Os seguintes parâmetros foram testados:

- Volume inicial na panela: 4L, 6L, 8Le 11L (máximo suportado pela panela);
- Refletor vertical: Com refletor e sem refletor;
- Isolamento do primeiro estágio: Com isolamento e sem isolamento;

O isolamento é do tipo lã de vidro, da ISOVER, e possui 25mm de espessura.

O sistema foi inicialmente testado com oito litros de água na panela, utilizando o refletor vertical, que ao meio dia era alternado de posição, e com isolamento no primeiro estágio.

Nos testes seguintes foi variado o volume de água, para encontrar o volume inicial ideal, que resultaria na maior produção de água dessalinizada.

Utilizando o volume inicial ideal encontrado nos primeiros testes, o refletor e o isolamento foram removidos e iniciou-se um novo conjunto de testes para saber o ganho de produção com o mesmo.

Por último, o sistema foi testado sem o refletor vertical, com o volume inicial ideal e com o isolamento lateral.

Foram realizados cinco testes em cada configuração e os melhores resultados de cada foram expostos em tabelas.

Outro teste realizado foi o da perda de calor da panela sem insolação, proposto por Schwarzer e Silva (2008) para o fogão solar. Para este experimento não foram utilizados os estágios de dessalinização. A água foi aquecida até 100°C e então o coletor foi coberto com uma tela opaca, para que não receba mais radiação solar. O resultado a ser medido é o tempo para que a água resfrie até alcançar 80°C. Foi utilizado um volume de 8L na panela, que foi fechada com uma tampa isolante para evitar perda por vaporização.

Durante os experimentos foram medidos ainda a radiação solar incidente e a temperatura em diferentes pontos do sistema.

O fluido de trabalho utilizado no sistema foi o Dowtherm A, cujas propriedades estão apresentadas no Anexo 1. Esse fluido foi desenvolvido para processos de transferência de calor, sendo ideal para o fogão solar.

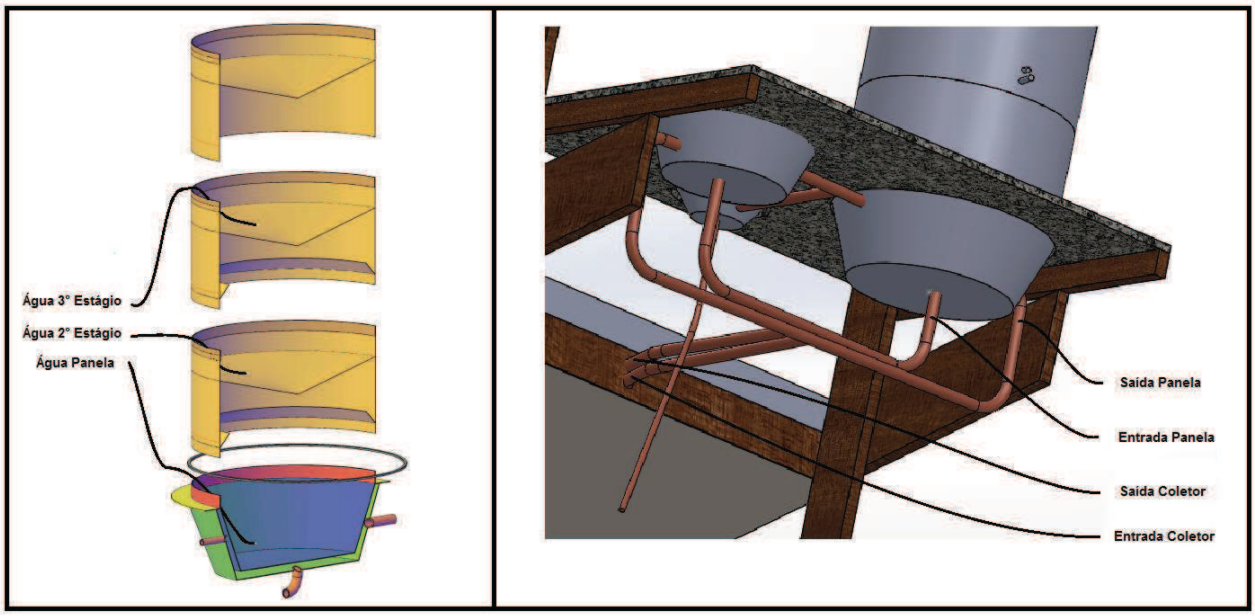
5.3.1 Medições experimentais

Os termopares utilizados são do tipo K, com fios de Cromo e Alumel, uma liga de Níquel e Alumínio, e foram conectados em um Datalogger modelo RDXL12SD da OMEGA, que é programado para medir de 6:30 às 17:30 com intervalo de amostras de dois minutos. Este intervalo é o mesmo do piranômetro utilizado, aparelho que mede e registra radiação solar total. A Figura 5.11 mostra a localização dos termopares utilizados para a medição da temperatura.

Um dos testes realizados foi o da condutividade elétrica da água produzida em cada estágio. Este parâmetro está relacionado com a concentração de íons dissolvidos na água e é uma medida indireta da qualidade da água. Quanto menor a condutividade elétrica apresentada, menor é a quantidade de íons dissolvidos e mais apropriada para o consumo humano. Foi utilizado para esse teste um condutivímetro de bancada CDB-70 da OMEGA. Como a condutividade elétrica varia com a temperatura, as amostras deviam entrar em equilíbrio térmico com o ambiente antes de serem analisadas.

Outro parâmetro medido foi a quantidade de água dessalinizada produzida. Os volumes de água em cada estágio e total foram registrados.

Figura 5.11 – Localização dos termopares.



Fonte: Próprio autor.

6 RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentados e discutidos os resultados alcançados e dos experimentos realizados no fogão solar com o novo conjunto panela-dessalinizador.

O primeiro objetivo deste trabalho foi o de projetar e construir um protótipo de uma nova panela para o fogão solar. A panela foi construída e montada no sistema e houve um bom acoplamento com a torre de dessalinização.

Os resultados dos experimentos estão apresentados em gráficos e tabelas informando o volume de água dessalinizada, a condutividade elétrica (qualidade da água) e a radiação solar. Os gráficos foram elaborados para mostrar a variação das temperaturas em diversos locais do sistema e a radiação solar.

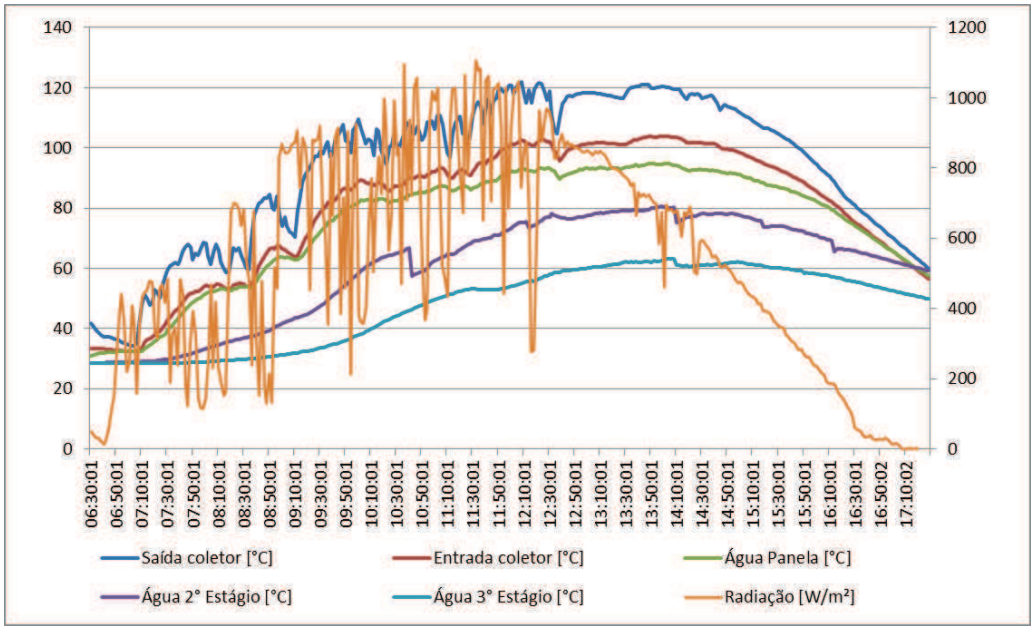
Para todos os testes foram utilizados 3,5L de água salobra em cada um dos três estágios. Para aumentar a incidência de radiação solar sobre o coletor térmico, foi utilizado um refletor plano lateral, eixo leste-oeste, que era trocado de posição ao meio dia. Esse refletor aumentava de 15 a 20% a incidência da radiação solar.

O experimento cujo gráfico de temperatura e radiação global está apresentado na Figura 6.1 foi realizado com 4L de água na panela. Para uma valor de radiação diária de 5,804kW.h/m² (20,893MJ/m²) e potência média de 513W/m², a temperatura máxima alcançada no óleo (saída do coletor) foi de 122°C e da água salobra na panela foi de 94°C. Foi produzido um total de 4,62L de água dessalinizada no período de 24 horas (produção diurna e noturna).

A produção diurna é a que acontece durante o período de insolação, entre 6:30 e 17:30h, enquanto a produção noturna é a que acontece quando não há radiação sobre o coletor térmico. O motivo pelo qual o sistema ainda produz água dessalinizada durante a noite é que o óleo ainda está bastante aquecido, acima de 50°C, assim como as partes metálicas e a própria água a ser dessalinizada.

A qualidade da água foi medida indiretamente pelos valores da condutividade elétrica, que teve média de 2,51uS/cm. Esse valor indica uma salinidade de aproximadamente 1,606 ppm, valor que qualifica a água como consumível, com relação a este parâmetro.

Figura 6.1 – Perfil de temperaturas e radiação para quatro litros na panela, com refletor e isolamento lateral.



Fonte: Próprio autor.

A

Tabela 6.1 apresenta os resultados das medições de, produção por estágio, a eficiência da panela, equação (22), a eficiência dos estágios, equação (25), o COP, equação (23), e o GOR, equação (24).

Tabela 6.1 – Resultado para experimento com refletor, com isolamento lateral e com 4L na panela.

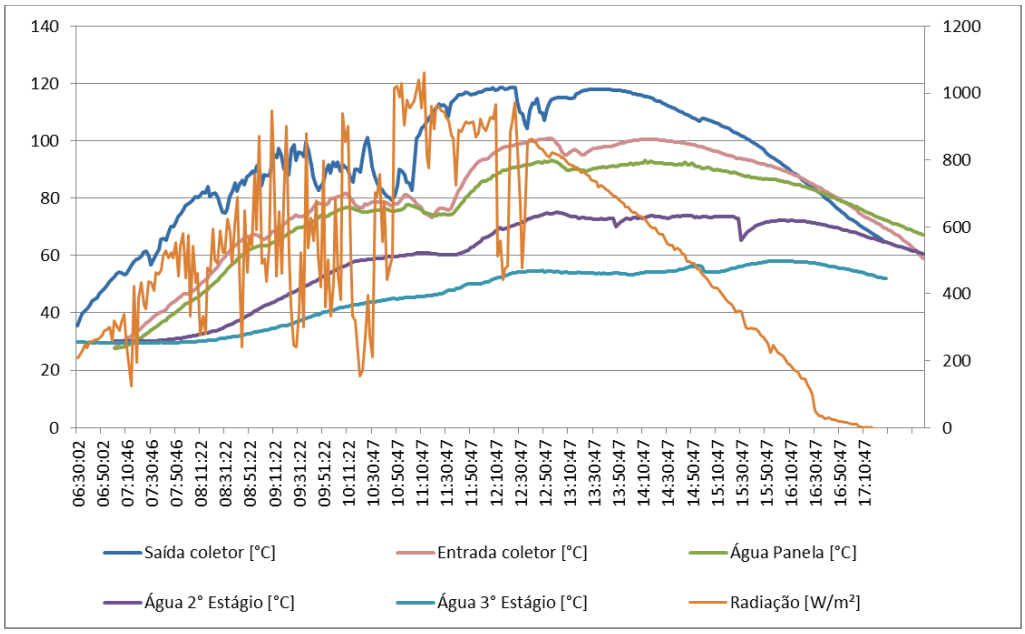
Local	Produção (mL)	Eficiência (%)	COP	GOR	mL/MJ
Panela (1º Estágio)	2430	78,3	-	-	-
2° Estágio	1590	65,4	-	-	-
3° Estágio	600	37,7	-	-	-
Total	4620	-	1,9	0,29	126

Fonte: Próprio autor.

Para o experimento com 6L de água na panela, a Figura 6.2 mostra os valores medidos das temperaturas no sistema e da radiação solar, para uma valor de radiação diária de 5,61kW.h/m² (20,20MJ/m²) e potência média de 510W/m². A temperatura máxima alcançada

no óleo (saída do coletor) foi de 118,9°C e da água salobra na panela foi de 93,3°C. Foi produzido um total de 4,57L de água dessalinizada no período de 24 horas.

Figura 6.2 – Perfis de temperaturas e radiação para seis litros na panela, com refletor e isolamento lateral.



Fonte: Próprio autor.

A

Tabela 6.2 apresenta os resultados das medições de produção por estágio, a eficiência da panela e dos estágios, o COP e o GOR.

Tabela 6.2 – Resultado para experimento com refletor, com isolamento lateral e com 6L na panela.

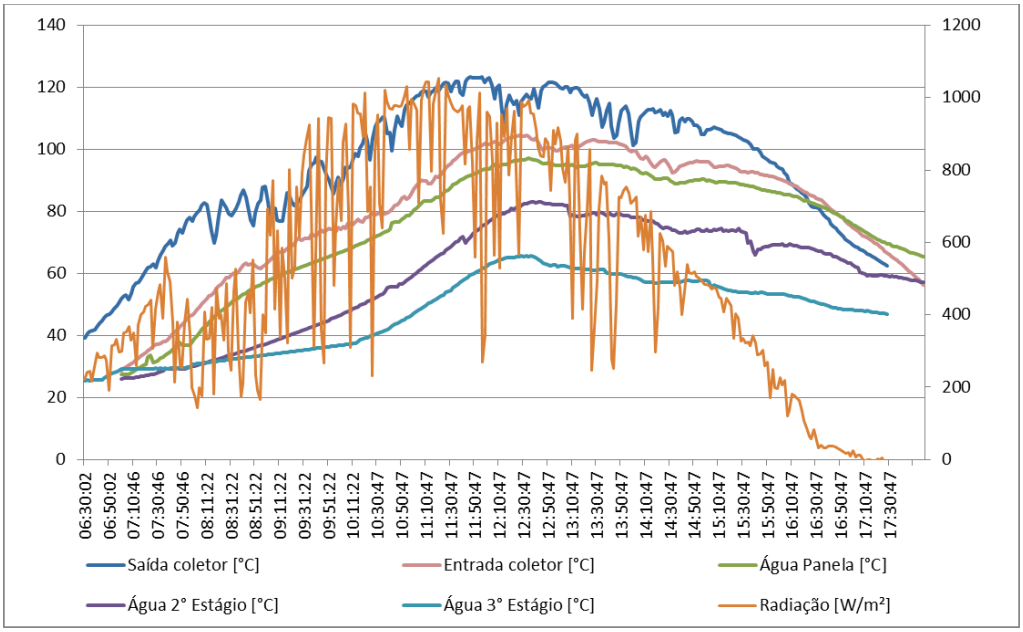
Local	Produção (mL)	Eficiência (%)	COP	GOR	mL/MJ
Panela (1º Estágio)	2550	70,19	-	-	-
2° Estágio	1430	56,08	-	-	-
3° Estágio	590	41,26	-	-	-
Total	4570	-	1,79	0,30	129

Fonte: Próprio autor.

A Figura 6.3 mostra os valores medidos das temperaturas no sistema e da radiação solar para 8 litros de água salobra na panela e uma valor de radiação diário de 5,73kWh/m²

(20,65MJ/m²) e potência média de 514W/m². A temperatura máxima alcançada no óleo (saída do coletor) foi de 123°C e da água salobra na panela foi de 97°C. Foi produzido um total de 4,78L de água dessalinizada no período de 24 horas.

Figura 6.3 – Perfis de temperaturas e radiação para oito litros na panela, com refletor e isolamento lateral.



Fonte: Próprio autor.

A

Tabela 6.3 apresenta os resultados das medições de produção por estágio, a eficiência da panela e dos estágios, o COP e o GOR.

Tabela 6.3 – Resultado para experimento com refletor, com isolamento lateral e com 8L na panela.

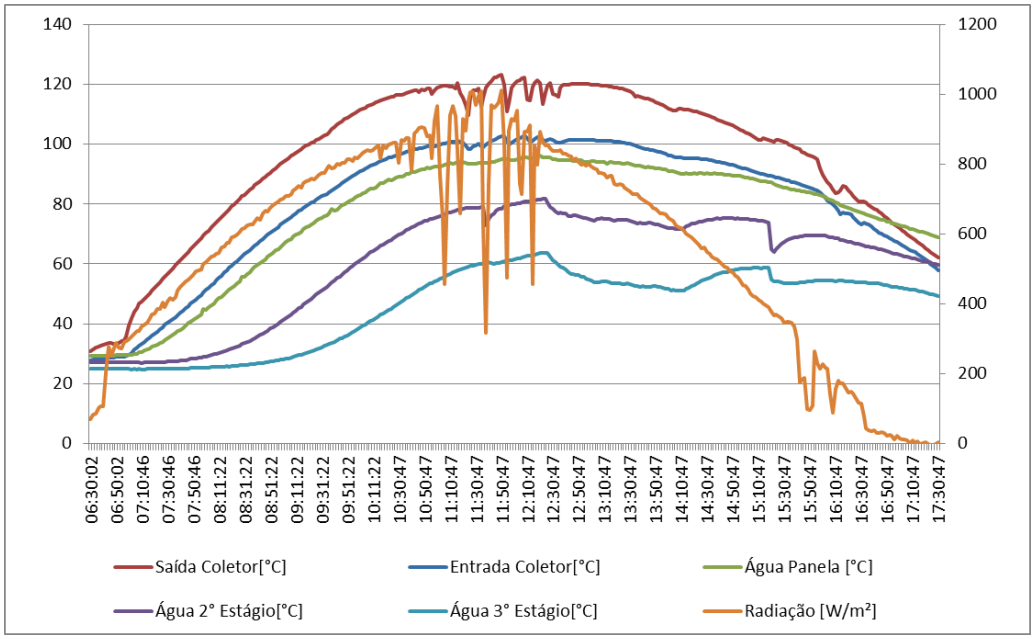
Local	Produção (mL)	Eficiência (%)	COP	GOR	mL/MJ
Panela (1º Estágio)	2780	70,56	-	-	-
2° Estágio	1380	49,64	-	-	-
3° Estágio	620	44,92	-	-	-
Total	4780	-	1,72	0,31	132

Fonte: Próprio autor.

Percebe-se que há uma relação direta do volume inicial na panela com a produção total do sistema. Então foi realizado um experimento com o volume máximo suportado pela panela, 11 litros A

Figura 6.4 mostra os valores medidos das temperaturas no sistema e da radiação solar para 11 litros de água salobra na panela e um valor de radiação diário de 6,109kWh/m² (21,991MJ/m²) e potência média de 555W/m². A temperatura máxima alcançada no óleo (saída do coletor) foi de 123°C e da água salobra na panela foi de 96°C. Foi produzido um total de 5,73L de água dessalinizada.

Figura 6.4 – Perfis de temperaturas e radiação para onze litros na panela, com refletor e isolamento lateral.



Fonte: Próprio autor.

A

Tabela 6.4 apresenta os resultados das medições de produção por estágio, a eficiência da panela e dos estágios, o COP e o GOR, para 11 litros de água salobra na panela.

Tabela 6.4 – Resultado para experimento com refletor, com isolamento lateral e com 11L na panela.

Local	Produção (mL)	Eficiência (%)	COP	GOR	mL/MJ
Panela (1º Estágio)	3240	67,11	-	-	-

2° Estágio	1840	56,79	-	-	-
3° Estágio	650	35,32	-	-	-
Total	5730	-	1,77	0,35	149

Fonte: Próprio autor.

Dos quatro volumes testados, o que resultou na maior produção foi onze litros, com produção total de 5,75l para uma radiação total de 21,990W/m², fazendo uma razão de 149ml/MJ.

A Tabela 6.5 apresenta um resumo das produções diárias para os quatro volumes de água (11L, 8L, 6L e 4L) na panela.

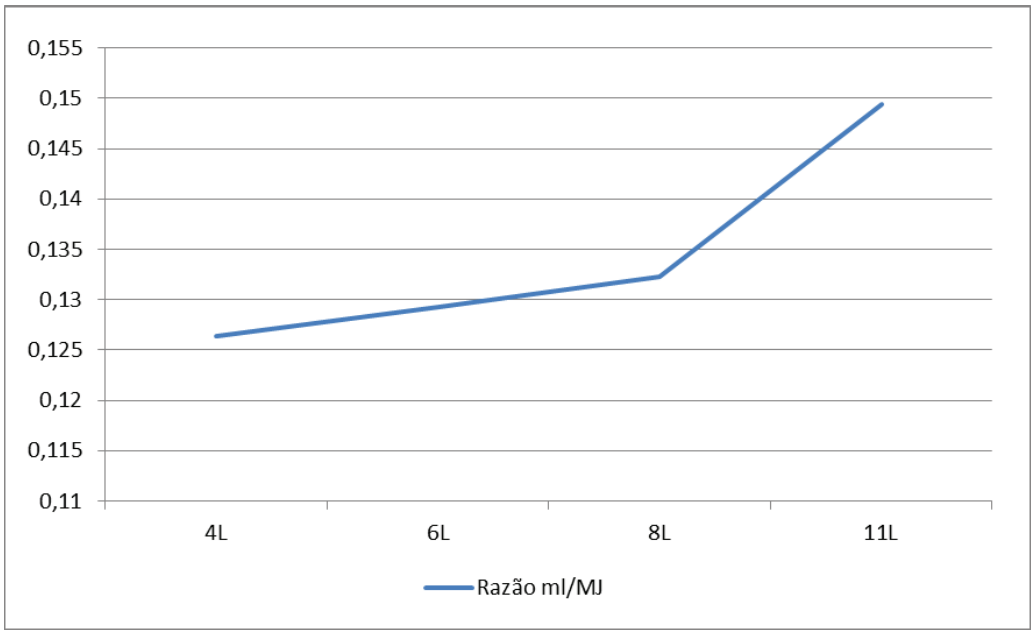
Tabela 6.5 – Resumo das produções para os experimentos com volumes iniciais na panela de 11L, 8L, 6L e 4L.

Volume inicial	**Produção (mL)**	**Radiação (MJ/m²)**	**mL/MJ**
11L	5,75	21,99	0,149
8L	4,78	20,65	0,132
6L	4,16	20,20	0,129
4L	4,62	20,89	0,126

Fonte: Próprio autor.

A Figura 6.5 mostra a variação da razão ml/MJ do sistema para cada volume inicial na panela.

Figura 6.5 – Razão mL/MJ para cada volume inicial na panela

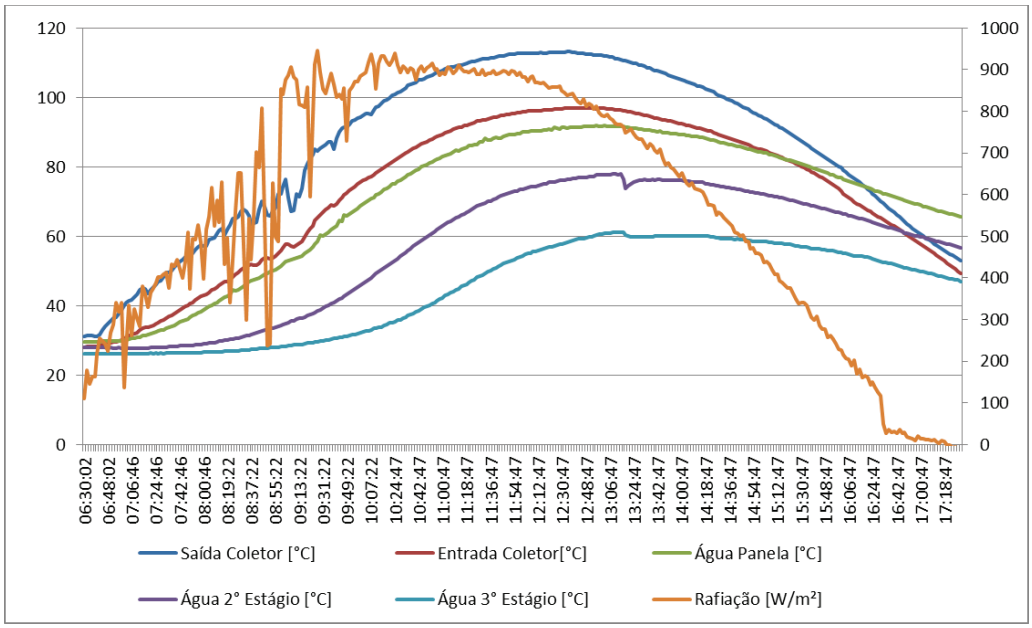


Fonte: Próprio autor.

Para essa situação de melhor produção, com 11L de água na panela, foram realizados novos experimentos para que fossem verificadas as influências de outros parâmetros: uso de refletor e isolamento lateral no primeiro estágio.

No experimento sem o refletor lateral (Figura 6.6) a produção foi de 4,51L, para uma radiação total de 22,524MJ/m². A razão de água produzida por MJ foi de 114,42ml/MJ, o que é 23% menor do que a produção com refletor.

Figura 6.6 – Perfil de temperaturas e radiação para 11 litros de água na panela, sem refletor e com isolamento lateral.



Fonte: Próprio autor.

A

Tabela 6.6 apresenta os resultados das medições de temperatura nos estágios, produção por estágio, a eficiência da panela e dos estágios, o COP e o GOR, para 11 litros de água salobra na panela sem o refletor.

Tabela 6.6 – Resultado para experimento sem refletor, com isolamento lateral e com 11L na panela.

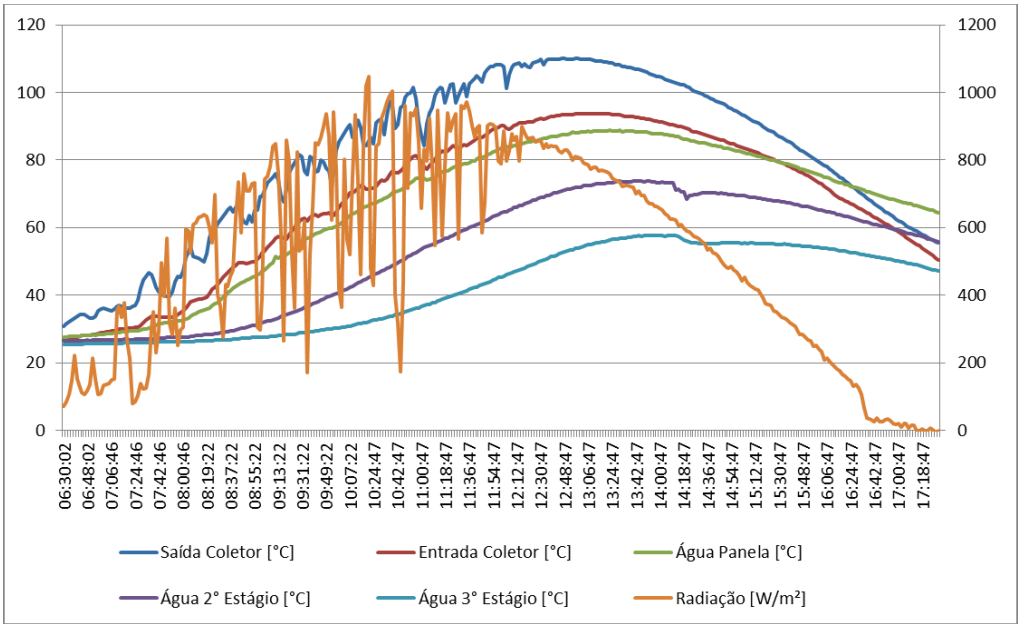
Local	Produção (mL)	Eficiência (%)	COP	GOR	mL/MJ
Panela (1º Estágio)	2370	79,70	-	-	-
2° Estágio	1520	64,14	-	-	-
3° Estágio	620	40,79	-	-	-
Total	4510	-	1,93	0,27	114

Fonte: Próprio autor.

Já no experimento sem refletor e sem isolamento lateral do primeiro estágio a produção foi de 3,69L, com uma radiação total de 20,629MJ/m². A razão de água produzida

por MJ foi de 102,21ml/MJ, o que é 10,7% menor do que a produção sem refletor e com isolamento e 31,4% menor que a produção com refletor e isolamento.

Figura 6.7 – Perfil de temperaturas e radiação para 11 litros na panela, sem refletor e sem isolamento lateral.



Fonte: Próprio autor.

A

Tabela 6.7 apresenta os resultados das medições de produção por estágio, a eficiência da panela e dos estágios, o COP e o GOR, para 11 litros de água salobra na panela sem o refletor.

Tabela 6.7 – Resultado para experimento sem refletor, sem isolamento lateral e com 11L na panela.

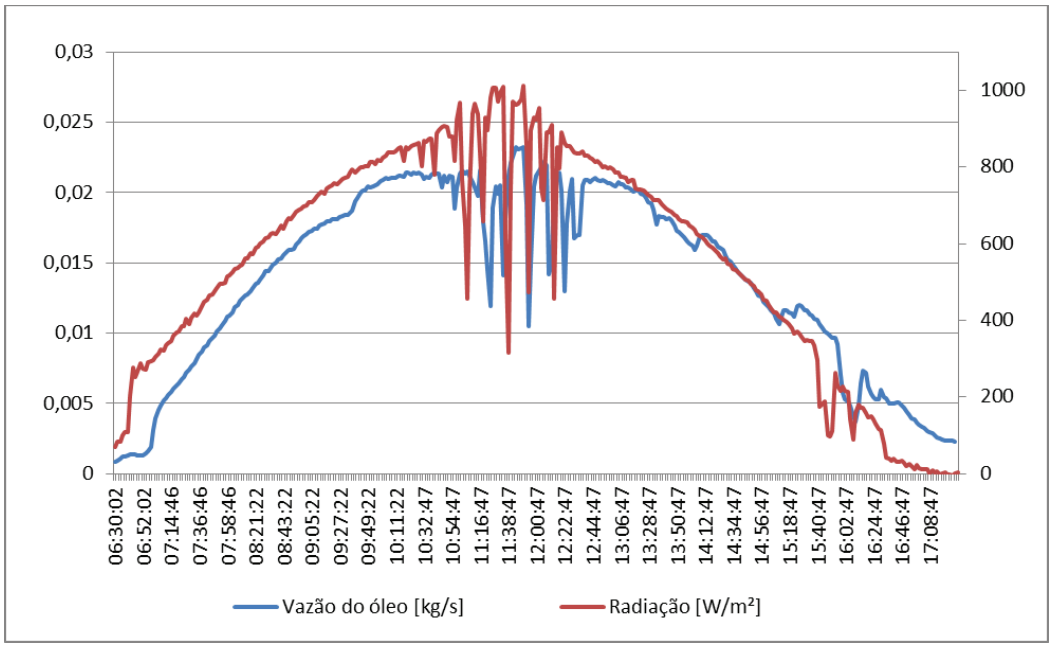
Local	Produção (mL)	Eficiência (%)	COP	GOR	mL/MJ
Panela (1º Estágio)	2110	79,59	-	-	-
2° Estágio	1090	51,66	-	-	-
3° Estágio	490	44,95	-	-	-
Total	3690	-	1,75	0,24	102

Fonte: Próprio autor.

Para o cálculo da eficiência da panela e do GOR foi necessário conhecer o perfil de vazão mássica do óleo que circula no circuito de sifão térmico, que foi calculado a partir do perfil de temperaturas medido e utilizando as equações (22) e (4), respectivamente. Esse cálculo foi realizado utilizando-se a equação (5) e as medições experimentais de temperatura e radiação. A Figura 6.8 mostra a variação da vazão mássica do óleo no circuito durante o período de insolação. Os dados de temperatura e radiação são os da

Figura 6.4.

Figura 6.8 – Variação da vazão mássica do óleo térmico dentro do circuito.



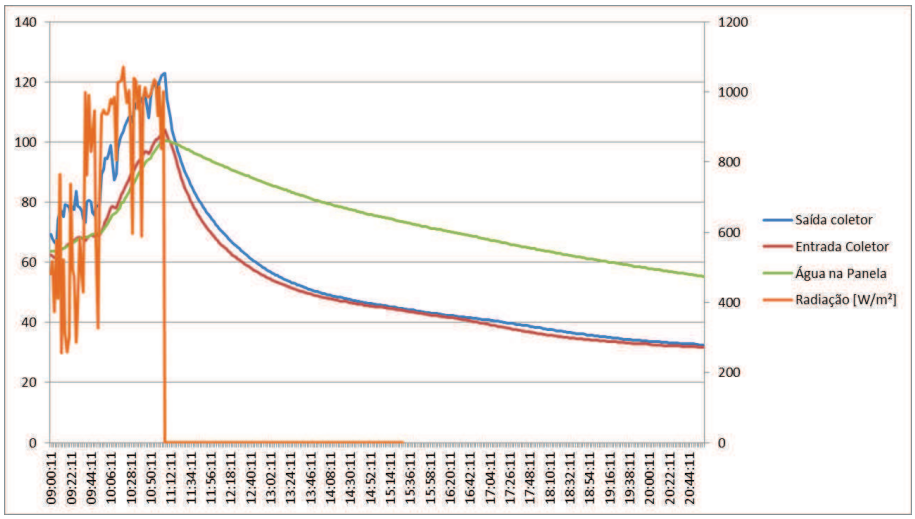
Fonte: Próprio autor.

Durante o dia, o circuito de termossifão apresentou uma vazão mássica média de 11,93g/s.

O teste da perda de calor da panela sem insolação resultou em um tempo de 2h54min para a água resfriar de 100°C para 80°C. Este teste não pode ser comparado com o proposto por Schwarzer *et al*. (2008) porque foi utilizado água no presente projeto, para não contaminar a panela, em vez de óleo, como no teste proposto.

A Figura 6.9 mostra a variação da temperatura da água na panela e do óleo na entrada e saída do coletor durante o processo. O coletor foi totalmente coberto às 11h06min e a água alcançou 80°C às 14h00min. A temperatura da água na panela ainda era de 60°C às 19h16min da noite.

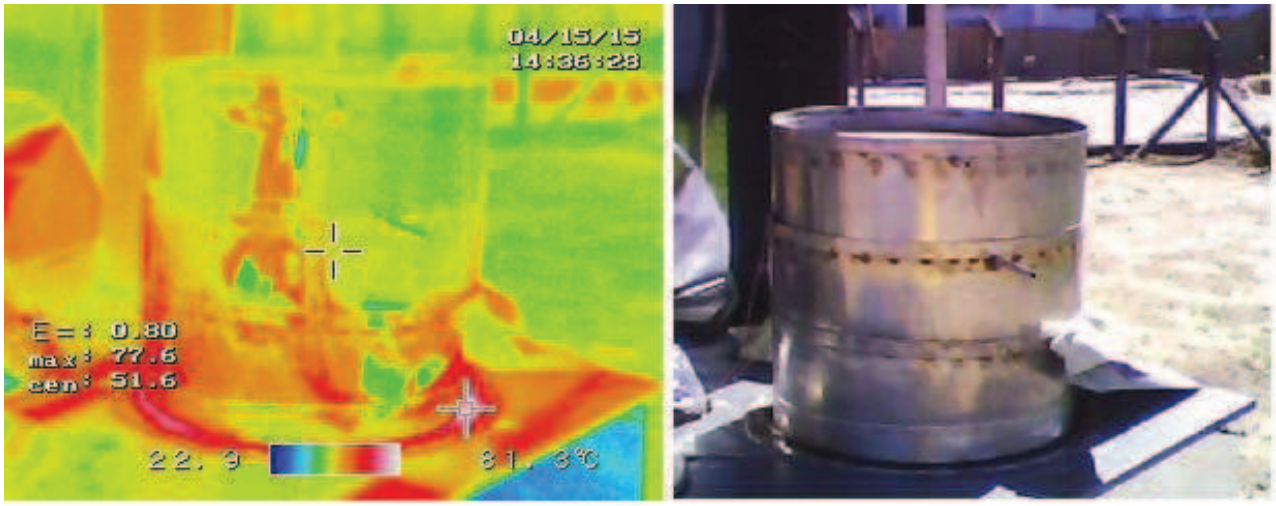
Figura 6.9 – Gráfico de temperaturas no teste de perda de calor sem insolação.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 6.10, é apresentada uma imagem térmica dos dessalinizadores mostrando o perfil de temperatura na parede dos mesmos. A parede do primeiro estágio alcançou 77°C. Isso representa uma perda de calor muito grande, que poderia estar sendo aproveitada para aquecer a água dos próximos estágios. Por este motivo foi utilizado o isolamento lateral no primeiro estágio. Como se pode verificar nos resultados das configurações B e C, a contribuição do isolamento lateral foi de 10% no aumento da produção de água dessalinizada.

Figura 6.10 – Imagem térmica dos dessalinizadores em operação.



Fonte: Próprio autor.

No Apêndice encontra-se o resumo dos resultados com todas as configurações testadas para efeito de comparação.

Para cada volume inicial, o GOR e a razão entre volume de água dessalinizada e radiação total aumentam da configuração C (sem isolamento e refletor) para B (com isolamento mas sem refletor) até a configuração A (com isolamento e refletor).

Dentro de cada configuração dessas, a razão volume dessalinizada por radiação total e o GOR variam diretamente com o volume de água salobra inicial na panela.

A configuração que resultou na maior produção de água dessalinizada foi com onze litros de água na panela, utilizando o isolamento lateral no primeiro estágio e o refletor para o coletor. Para este volume inicial temos COP = 1,768, GOR = 0,35 e η_{panela} = 67,11%.

7 CONCLUSÃO

Um novo modelo de panela foi projetado tendo como base as dimensões do dessalinizador e o volume da unidade anterior. A nova panela foi construída e instalada no fogão solar existente no laboratório. Após recuperação do fogão e alguns testes iniciais de estanqueidade da tubulação e principalmente nas conexões da panela com o fogão, os experimentos tiveram início.

O acoplamento entre os estágios e a panela foi bastante otimizado no novo modelo. A produção máxima de água dessalinizada foi de mais de 5,7L. A água que resultou do processo possui condutividade elétrica abaixo de 10μS/cm. Este baixo valor indica que as impurezas foram efetivamente retiradas da água. O Ministério da Saúde não tem valores mínimos e máximos para uma água potável quanto à condutividade elétrica, porém ele explica que as águas naturais têm esses valores variando entre 10 e 100 μS/cm. Os valores encontrados nos experimentos foram, em sua maioria, abaixo de 10 μS/cm, portanto podem ser ingeridas ou utilizadas para cozimento. O corpo humano deve ingerir água com dezenas de sais minerais que não estão presentes na água dessalinizada, porém a ingestão da mesma não causa problemas.

Os valores de desempenho do sistema, COP, GOR e η_{panela}, são compatíveis com os encontrados na literatura e estão acima dos valores obtidos por Costa (2013), utilizando a panela original do fogão solar.

8 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

É importante citar alguns pontos que podem futuramente ser estudados e implementados no sistema para melhorar ainda mais o desempenho e a usabilidade do mesmo.

Em relação ao desempenho, dois refletores em vez de um aumentaria a incidência da radiação para o coletor. Um sistema para transformar refletor fixo em inclinável também poderia melhorar a incidência. Outra alteração seria o acréscimo de um coletor, também para aumentar a transferência de calor para o óleo.

Quanto à usabilidade, um tubo atravessando as duas paredes do fundo da panela permitiria a passagem de água para facilitar a limpeza da panela. Durante o funcionamento do sistema, o tubo seria fechado por baixo com uma tampa roscada para evitar vazamento da água que está sendo utilizada..

9 REFERÊNCIAS

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

ADSTEN , M.; PERERS, B.; WÄCKELGARD, E. The influence of climate and location on collector performance. **Renewable Energy**, v. 25, p.499–509, 2002.

ALVES, R. D. B. **Desempenho de uma torre de recuperação de calor com canais sintéticos de poliuretano para um dessalinizador solar térmico**. 2009. 56 f. Dissertação (Mestrado em Eng. Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

AUTI, A. B. Domestic Solar Water Desalination System. **Energy Procedia**, v. 14, 1774 – 1779, 2012.

BALZAR, A.; STUMPF, P.; ECKHOFF, S.; ACKERMANN, H.; GRUPP, M. A solar cooker using vacuum-tube collectors with integrated heat pipes. **Solar Energy**, v. 58, Nos 1-3, p. 63-68, 1996.

CAENF – Companhia de água e esgoto de Nova Friburgo. Disponível em: <www.aguasdenovafriburgo.com.br>. Acesso em: 15 dez. 2009.

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

COSTA, I. S. ; ARAUJO, M. E. ; SILVA, M. E. V. ; MENDONÇA, O. A. ; PINHEIRO, F. N. . **Determinação numérica e experimental da eficiência de um circuito de sifão térmico de aquecimento solar.** In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), 2012, São Luis- Maranhão, 2012.

DUFFIE, JOHN A.; BECKMAN, WILLIAM A. **Solar engineering of thermal processes**.2.ed. Wiley-Interscience, 1991. 944 p.

ESEN, M. Thermal performance of a solar cooker integrated vacuum-tube collector with heat pipes containing different refrigerants. **Solar Energy** v. 76, p.751–757, 2004.

HELLSTROM, B.; ADSTEN, M.; NOSTELL, P.; KARLSSON, B.; WACKELGARD, E. The impact of optical and thermal properties on the performance of flat plate solar collectors. **Renewable Energy**, v. 28, p. 331–344, 2003.

KALOGIROU, S.A., 2004. Solar thermal collectors and applications.Progress in Energy and Combustions Science 30, 231–295.

KARAGIANNIS , I. C.; SOLDATOS, P. G. Water desalination cost literature: review and assessment. **Desalination**, v. 223, p. 448–456, 2008.

KUMAR, S.; TIWARI, G. N. Estimation of convective mass transfer in solar distillation systems. **Solar Energy**, v. 57, No. 6, p. 459-464, 1996.

LOF, G. O. G. Recent Investigations in the Use of Solar Energy for Cooking.**Solar Energy**, v. 7, No. 3, 1963.

MUTHUSIVAGAMI, R. M.; VELRAJ, R.; SETHUMADHAVAN, R. Solar cookers with and without thermal storage–A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.14, p. 691–701, 2010.

NASSAR, Y. F.; YOUSIF, S. A.; SALEM, A. A.The second generation of the solar desalination systems. **Desalination**, vol , p. 177–181, 2007.

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

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

PUCAR, M.; DESPIC, A. The effect of diffuse/indirect light on the energy gain of solar thermal collectors. **Renewable Energy**, v. 30, p. 1749–1758, 2005.

RODRIGUES, F. P. **Desempenho de uma torre de recuperação de calor com canais sintéticos de poliuretano para um dessalinizador solar térmico**. 2010. 70 f. Dissertação (Mestrado em Eng. Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

QUASCHNING, V.; **Understanding renewable energy systems**.1.ed. Earthscan London, 2005. 290p.

SATCUNANATHAN , S.; HANSEN, P. An investigation of some of the parameters involved in solar distillation. **Solar Energy**, vol. 14, p. 353-363, 1973.

SCHWARZER, K.; SILVA, M. 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.; SILVA, M. E. V.; FABER, C.; MIILLER, C. Solar thermal desalination system with heat recovery. **Desalination**, vol 1, p. 23-29, 2001.

SCHWARZER, K.; SILVA, M.E.V. Characterisation and design methods of solar cookers. **Solar Energy**, v. 82, 157–163, 2008.

SILVA, M.E.V.; SCHWARZER, K.; HOFFSCHMIDT, B.; RODRIGUES, F. P.; SCHWARZER, T.; ROCHA, P. A. C. Mass transfer correlation for evaporation-condensation thermal process in the range of 70°C e 95°C. **Renewable Energy**, v. 53, p. 174–179, 2013.

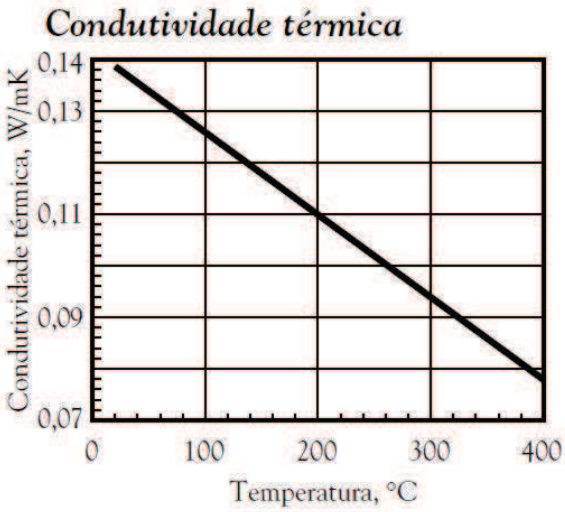
SISSOM, L. E., PITTS D. R. **Elements of transport phenomena.** Nova York: McGraw-Hill, 1972.

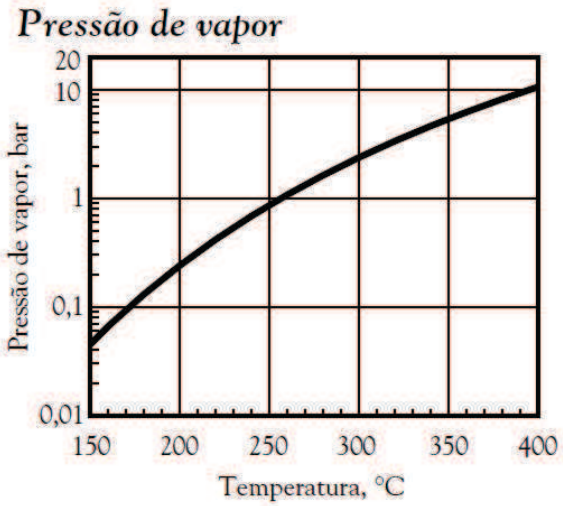
SOUZA, L. F. **Análise térmica de um dessalinizador de múltipos efeitos para obtenção de água potável**. 2002. 56p. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – UFPB- João Pessoa, 2002.

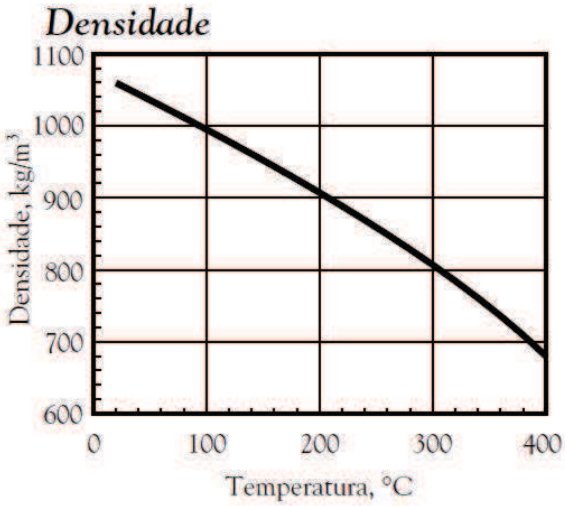
TIAN, Y.; ZHAO, C. T.A review of solar colletors and thermal energy storage in solar thermal applications. **Applied Energy**, v. 104, p. 538-553, 2013.

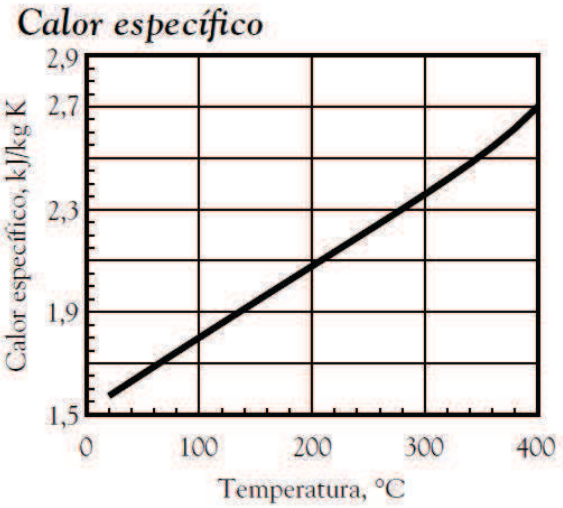
TIWARI, G. N.; SINGH, H. N.; TRIPATHI, R. Present status of solar distillation. **Solar Energy**, v. 75, p. 367–373, 2003.

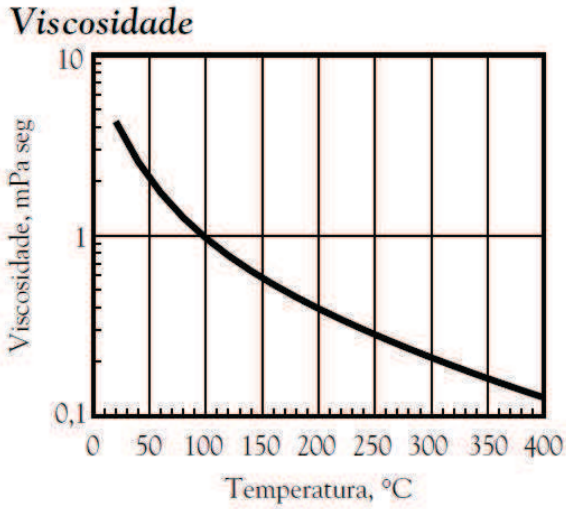
ANEXO 1 – Propriedades do fluido térmico *DOWTHERM A*











Fonte: Catálogo DOWTHERM A

APÊNDICE – Resumo de resultados

11 LITROS						
Modo	Produção Total [L]	Radiação [MJ]	[L/MJ]	COP	GOR	η_panela
A	5,73	21,991	0,148892	1,768	0,348127	67,11
B	4,51	22,524	0,114418	1,903	0,269079	79,7
C	3,69	20,629	0,102214	1,749	0,241256	79,59

8 LITROS						
Modo	Produção Total [L]	Radiação [MJ]	[L/MJ]	COP	GOR	η_panela
A	4,78	20,646	0,132298	1,719	0,309589	70,56
B	4,26	21,971	0,110795	1,89	0,260789	82,87
C	3,39	21,03	0,092113	1,695	0,216874	78,528

6 LITROS						
Modo	Produção Total [L]	Radiação [MJ]	[L/MJ]	COP	GOR	η_panela
A	4,57	20,204	0,129253	1,792	0,302578	70,19
B	4,35	22,57	0,110134	1,899	0,258608	79,58
C	3	19,95	0,085929	2,11	0,202721	64,99

4 LITROS						
Modo	Produção Total [L]	Radiação [MJ]	[L/MJ]	COP	GOR	η_panela
A	4,62	20,893	0,126358	1,901	0,295867	78,63
B	3,48	19,924	0,099808	1,803	0,234539	82,38
C	3,06	22,113	0,079074	1,611	0,185997	75,95

CONFIGURAÇÕES:	
A	**COM** isolamento no primeiro estágio; **COM** refletor
B	**COM** isolamento no primeiro estágio; **SEM** refletor
C	**SEM** isolamento no primeiro estágio; **SEM** refletor