

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

ISAIAS SILVA DA COSTA

NOVOS PROTÓTIPOS DE DOIS DESSALINIZADORES TÉRMICOS PARA OPERAÇÃO NO FOGÃO SOLAR COM AQUECIMENTO INDIRETO

FORTALEZA

2013

ISAIAS SILVA DA COSTA

NOVOS PROTÓTIPOS DE DOIS DESSALINIZADORES TÉRMICOS PARA OPERAÇÃO NO FOGÃO SOLAR COM AQUECIMENTO INDIRETO

Dissertação submetida à Coordenação do Curso 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.

Orientadora: Prof.^a Maria Eugênia Vieira da Silva, PhD.

FORTALEZA

AGOSTO, 2013

	Dados Internacionais de Catalogação na Publicação Universidade Federal do Ceará Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE
C 872n	Costa Isoing Silva da
06/211	Novos protótipos de dois dessalinizadores térmicos para operação no fogão solar com
aquecimento	novos prototipos de dois dessaninzadores termicos para operação no togao solar com
	indireto. / Isaias Silva da Costa. – 2013
	75 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
	Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento
	de Engenharia Mecânica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2013.
	Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.
	Orientação: Prof ^a . Dr ^a . Maria Eugênia Vieira da Silva.
	1. Engenharia Mecânica. I. Título.
	CDD 620.

ISAIAS SILVA DA COSTA

NOVOS PROTÓTIPOS DE DOIS DESSALINIZADORES TÉRMICOS PARA OPERAÇÃO NO FOGÃO SOLAR COM AQUECIMENTO INDIRETO

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

Aprovada em ____/___/2013

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Maria Eugênia Vieira da Silva, PhD (Orientadora) Universidade Federal do Ceará - UFC

> Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof.^a Dra. Idalina Maria Moreira de Carvalho Universidade Federal do Ceará - UFC

Dedico este trabalho aos meus pais Luiz Alves da Costa e Maria da Luz Silva da Costa, pelo carinho, amor, dedicação e pela forma que tão bem souberam me educar e mostrar os melhores caminhos a seguir.

AGRADECIMENTOS

A Deus. O grande autor do universo e da minha vida.

À minha família inteira, que sempre me apoiou em tudo e sempre acreditou no meu potencial, mas, principalmente, aos meus pais, que tão bem souberam me educar.

À minha tia Maria Liduína Silva, que ajudou costurando os tecidos utilizados no isolamento lateral dos protótipos de dessalinizadores circulares.

À minha orientadora Maria Eugênia Vieira da Silva, por sua competência, dedicação, generosidade, gentileza e atenção tanto comigo, quanto com o trabalho, quanto com o laboratório (LESGN).

À equipe de professores da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, por sua dedicação e competência e por serem sempre bem solícitos a ajudar os alunos de mestrado.

A todos os meus amigos do mestrado, em especial Francisco Nascélio Pinheiro, por ter me acompanhado e ajudado em todo o trabalho desde o início.

Aos secretários da Pós-Graduação Valdi Matos e Juliana Arruda pela prontidão em ajudar sempre que necessário durante todo o período do mestrado.

Aos meus amigos do laboratório: Osvaldo Assunção, Sávio Bezerra, João Vítor Goes, Oseas Carlos, Jardel de Queiroz, Paulo Candeira e Larissa Colares.

À mestre em Engenharia Mecânica Maria Elieneide Araújo, que me ajudou desde o início do trabalho e tirou muitas dúvidas com total solicitude.

Aos amigos do laboratório que ajudaram no início do trabalho e mudaram de laboratório ou tiveram que se ausentar: Karine Pereira, Mateus Magalhães e José Victor Girão.

À servidora do LESGN dona Francisca, pela presença sempre agradável.

Ao técnico José Airton Pereira (pai da Karine), por ter me ajudado a entender o princípio de funcionamento do medidor de fluxo utilizado neste trabalho.

Ao técnico Bonfim, por sua disponibilidade para soldar os pontos de vazamento na tubulação do fogão utilizado neste trabalho.

À minha namorada Juliana, por sempre me apoiar e me proporcionar momentos de alegria e aconchego.

À CAPES, pelo apoio financeiro através da bolsa.

A todos os demais, que porventura não foram citados aqui e que contribuíram direta ou indiretamente para a concretização do trabalho.

"Quem olha para fora sonha. Quem olha para dentro desperta."

Carl Jung

RESUMO

Este trabalho apresenta dois novos protótipos de um dessalinizador circular para operação em um fogão solar de aquecimento indireto. O primeiro protótipo, denominado Tipo A, produz água dessalinizada a partir da água salobra depositada na panela do fogão solar. No segundo protótipo, o Tipo B, a água salobra da panela é usada apenas como meio de transferência de calor para a primeira bandeja da torre de dessalinização. Estes protótipos foram fabricados e testados no LESGN (Laboratório de Energia Solar e Gás Natural). Sua estrutura é formada por chapas de aço inoxidável com bandejas circulares e inclinadas para baixo, com bandejas circulares para facilitar o escoamento da água condensada, "cachimbos", que colhem a água dessalinizada e levam para fora dos estágios e calhas laterais, que colhem a água que condensa pelas paredes laterais. A torre de dessalinização foi formada por um conjunto de bandejas para facilitar o manuseio e operação. Os experimentos foram realizados entre 7 e 17 hs e o número máximo de estágios foi três. Os experimentos com 2 e 3 estágios confirmaram o processo de recuperação de calor, ou seja, a utilização repetida do calor armazenado na água dessalinizada em um estágio inferior pelo estágio superior. Os resultados experimentais mostraram que as máximas produções diárias foram, para o Tipo A, de 4,72 L com 3 estágios, e para o dessalinizador Tipo B, 3,50 L com 3 estágios. Verificou-se que a eficiência do dessalinizador Tipo A era superior ao do Tipo B, o que se explica por o Tipo B ter uma resistência a transferência de calor a mais. Por outro lado, o protótipo Tipo B permite uma operação continuada da torre de dessalinização, não sendo necessário a sua desmontagem após cada esvaziamento da água na panela.

Palavras-chave: Dessalinização solar, fogão solar, recuperação de calor.

ABSTRACT

This work presents two new prototypes of a circular desalinator operation in a solar cooker for indirect heating. The first prototype, called Type A, produces desalinated water from brackish water deposited in the pan solar cooker. In the second prototype, the Type B, the brackish water pan is used only as a means of transfering heat to the first tray tower desalination. These prototypes were fabricated and tested in LESGN (Solar Energy Laboratory and Natural Gas). Its structure consists of stainless steel plates, trays with circular and inclined downwards (with circular trays to facilitate the flow of condensed water) and "pipes" (that harvest desalinated water and take out the stages and side rails, harvesting the water that condenses the side walls). The desalting tower was formed by a set of trays to facilitate the handling and operation. The experiments were conducted between 7.00am and 5.00pm and the maximum number of stages was three. Experiments with 2 and 3 stages confirmed the heat recovery process, in other words, the repeated use of the heat stored in the desalinated water in a lower stage by stage above. The experimental results showed that the maximum production were daily for the Type A, 4.72 L with 3 stages, and the desalinator Type B 3.50 L also with 3 stages. It was found that the efficiency of desalination type A was greater than that of Type B, which explains why Type B has a further resistance to heat transfer. On the other hand, Type B prototype allows continued operation of the desalination tower, not requiring the dismantling after each emptying process of the water in the pan.

Keywords: solar desalination, solar cooker, heat recovery.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1-	Fogão solar com aquecimento direto	15
Figura 1.2-	Fogão solar com aquecimento indireto	16
Figura 4.1-	Transferências de calor no dessalinizador Tipo A	26
Figura 4.2-	Transferências de calor no dessalinizador Tipo B	29
Figura 5.1-	Desenho técnico do dessalinizador Tipo A	32
Figura 5.2-	Desenho técnico do dessalinizador Tipo B	33
Figura 5.3-	Protótipo do dessalinizador Tipo A	34
Figura 5.4-	Protótipo do dessalinizador Tipo B	34
Figura 5.5-	Isolamento lateral	35
Figura 5.6-	Coletor de dados OMEGA OM-DAQPRO 5300	36
Figura 5.7-	Ultrassom no interior do tubo (modo V)	38
Figura 6.1-	Gráfico de temperatura e radiação solar do dessalinizador Tipo A com 3,0 L	
	de água na panela	45
Figura 6.2-	Gráfico de temperatura e radiação solar do dessalinizador Tipo A com 4,0 L	
	de água na panela	46
Figura 6.3-	Gráfico de temperatura e radiação solar do dessalinizador Tipo A com 5,0 L	
	de água na panela	46
Figura 6.4-	Gráfico de temperatura e radiação solar do dessalinizador Tipo A com 6,0 L	
	de água na panela	47
Figura 6.5-	Gráfico de temperatura e radiação solar do dessalinizador Tipo A com 7,0 L	
	de água na panela	48
Figura 6.6-	Gráfico de temperatura e radiação solar do dessalinizador Tipo A com 0,5 L	
	de água na panela	49
Figura 6.7-	Gráfico de temperatura e radiação solar do dessalinizador Tipo A com 1,0 L	
	de água na panela	50
Figura 6.8-	Gráfico de temperatura e radiação solar do dessalinizador Tipo A com 2,0 L	
	de água na panela	50
Figura 6.9-	Gráfico de temperatura e radiação solar do dessalinizador Tipo A com 3,0 L	
	de água na panela	51
Figura 6.10-	- Gráfico de temperatura e radiação solar do dessalinizador Tipo A com 4,0 L	
	de água na panela	52

Figura 6.11- Gráfico de temperatura e radiação solar do dessalinizador Tipo A com 5,0 L	
de água na panela	52
Figura 6.12- Gráfico de temperatura e radiação solar do dessalinizador Tipo A com 6,0 L	
de água na panela	53
Figura 6.13- Gráfico de temperatura e radiação solar do dessalinizador Tipo A com 7,0 L	
de água na panela	54

LISTA DE TABELAS

Fabela 6.1- Produção de água dessalinizada do dessalinizador Tipo A, sem isolamento	
lateral e 1 estágio	43
Tabela 6.2- Produção de água dessalinizada do dessalinizador Tipo A, com isolamento	
lateral e 1 estágio	44
۲abela 6.3- Produção de água dessalinizada no dessalinizador Tipo A para 1 estágio4	-8
Tabela 6.4- Produção de água dessalinizada no dessalinizador Tipo B para 1 estágio	54
Tabela 6.5- Produção de água dessalinizada no dessalinizador Tipo A para 2 estágios	55
Fabela 6.6- Produção de água dessalinizada no dessalinizador Tipo A para 3 estágios	56
Tabela 6.7- Produção de água dessalinizada no dessalinizador Tipo B para 2 estágios	56
Tabela 6.8- Produção de água dessalinizada no dessalinizador Tipo B para 3 estágios	57
Tabela 6.9- Condutividade elétrica das águas do dessalinizador Tipo A para 1 estágio	57
Tabela 6.10- Condutividade elétrica das águas do dessalinizador Tipo A para 3 estágios	
e com 6,0 L de água na panela	58
Fabela 6.11- Condutividade elétrica das águas do dessalinizador Tipo B para 1 estágio	58
Tabela 6.12- Condutividade elétrica das águas do dessalinizador Tipo B para 3 estágios	
e com 2,0 L de água na panela	58
Tabela 6.13- Eficiências globais e da panela nos experimentos dos	
dessalinizadores	59
Fabela 6.14- Eficiências da torre de dessalinização para os melhores resultados	60
Гabela 6.15- GOR para os protótipos Tipo A e Tipo B	60

LISTA DE SÍMBOLOS

- A área [m²]
- C_p calor específico [J/Kg.K]
- COP coeficiente de desempenho
- *D* diâmetro do tubo [m]
- *E* Energia [J]
- *Ė* Taxa de Energia [W]
- *F* fator de eficiência [adimensional]
- F_r fator de remoção de calor [adimensional]
- g aceleração da gravidade [9,8 m/s²]
- Gt Radiação Incidente [W/m².K]
- *h* coeficiente de transferência de calor [W/m².K], entalpia [J/Kg]
- h_{fg} calor latente de vaporização [J/kg]
- *k* condutividade térmica do material [W/m.K]
- *m* massa [Kg]
- *Nu* Número de Nusselt [adimensional]
- \dot{Q} Taxa de transferência de calor [W]
- *Ra* Número de Rayleigh [adimensional]
- t tempo [s]; [min]
- T temperatura [°C]

 U_L Coeficiente global de perdas de calor [W/m².K]

Subscritos

a	água, acumulada
c	condensado
col	coletor
cond	condução
conv	convecção
d	dessalinização
e	entrada
ep	entrada da panela
est	estágio
evap	evaporação
g	gerada
i	estágio
0	óleo
р	panela
rad	radiação
ref	referência
S	saída, sensível
sp	saída da panela

gregos

α	absortividade [adimensional]
η	eficiência [adimensional]
μ	viscosidade dinâmica [N.s/m ²]
τ	transmissividade [adimensional]
ρ	densidade [Kg/m ³]
Δ	diferença

Acrônimo

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAGECE	Companhia de água e esgoto do Ceará
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
LESGN	Laboratório de Energia Solar e Gás Natural
UFC	Universidade Federal do Ceará

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	25
4.1. Principais tipos de dessalinização	25
4.2. Propriedades do óleo térmico usado no coletor	25
4.3. Protótipos do dessalinizador	26
5. MATERIAIS E MÉTODOS	31
5.1. Metodologia utilizada no desenvolvimento e fabricação do dessalinizador	31
5.2. Recuperação do fogão solar e colocação dos refletores	38
5.3. Equações do balanço de massa e energia	41
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
6.1. Estudo comparativo da produção do dessalinizador com e sem isolamento la	teral
(Tipo A)	43
6.2. Produções de água dessalinizada para alguns volumes de água na panela	44
6.3. Análise da condutividade elétrica e salinidade para os 2 protótipos de dessalinizador	57
6.4 Desempenho dos protótipos de dessalinizador	.59
6.5 Cálculos do COP e do GOR	59
7 CONCLUSÕES	61
8 REFERÊNCIASBIBLIOGRÁFICAS	62
ANEXO A- Conceitos de transferência de calor e massa	66
ANEXO B- Termossifão e coletores de placa plana	70
ANEXO C- Medição numérica da vazão mássica do óleo térmico no coletor plano	74

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o aumento da demanda de energia tem levado empresas, universidades e os líderes políticos a discutir e propor soluções e novas estratégias para lidar com esse problema de forma econômica, racional e que prejudique o mínimo possível o meio ambiente.

A energia solar tem sido uma alternativa bastante procurada por vários países, pelo fato de ser uma energia renovável abundante e inesgotável no horizonte da vida humana. Inúmeros estudos estão sendo feitos para se utilizar a energia solar, que se subdivide em duas grandes áreas: solar fotovoltaica e solar térmica.

A energia solar térmica tem como principal finalidade aquecer um fluido para utilização em diferentes processos. Uma dessas aplicações é a dessalinização térmica, que é o processo de retirar os sais contidos na água para torná-la adequada ao consumo humano. Alguns avanços já foram alcançados nessa área, com a obtenção de bons resultados.

Outra aplicação da energia solar é a sua utilização para o cozimento de alimentos, através de fogões solares, que são classificados em dois tipos: fogão solar com aquecimento direto e fogão solar com aquecimento indireto (Schwarzer e Vieira, 2008).

O fogão solar com aquecimento direto é constituído de um sistema de aquecimento com uma panela e a energia solar é direcionada para esta através de concentradores e/ou refletores solares, sendo os concentradores, em sua maioria, parabólicos ou em forma disco. A Figura 1.1 mostra um fogão solar com aquecimento direto.





Fonte: Schwarzer e Vieira (2008).

O fogão solar com aquecimento indireto utiliza coletores solares para captar energia e transferi-la ao fogão através de um fluido, normalmente um óleo térmico. Entre os resultados mais significativos da literatura estão os de Schwarzer e Vieira (2008), que usam coletores de placa plana. Nesse trabalho, maior ênfase tem sido dada à eficiência da transferência de calor e à captação da energia solar. Para evitar as perdas para o ambiente, esses fogões possuem isolamento térmico. A Figura 1.2 mostra um fogão solar com aquecimento indireto.





Fonte: Schwarzer e Vieira (2008).

A utilização da energia solar para a produção de água dessalinizada, a partir de água salobra, é uma ideia que vem sendo utilizada desde a época dos antigos egípcios, que utilizavam a energia solar para obtenção de água potável. Além dos egípcios, outras civilizações como a grega e a inca idolatravam o sol e buscavam o conhecimento do seu melhor aproveitamento (Delyannis, 2003).

Com o aumento da população mundial e da poluição há também uma maior demanda por água apropriada para o consumo humano. O consumo de água potável vem crescendo em um ritmo superior ao crescimento da população mundial. Nas comunidades das regiões áridas a escassez de água potável é o principal problema para a fixação dessas comunidades no meio rural (Rodrigues, 2011).

A utilização da energia solar é uma alternativa para os processos de dessalinização por ser vantajosa do ponto de vista tanto ecológico quanto econômico. O Brasil é privilegiado em fontes naturais de energias renováveis, porém os investimentos nessa área são poucos em relação ao potencial existente. As regiões áridas possuem uma intensidade elevada de radiação solar, sendo então apropriadas para a utilização da energia solar. Nestes locais, a necessidade da utilização do potencial energético somado com a necessidade da obtenção de água potável faz da dessalinização solar uma alternativa viável para aumentar a oferta de água potável em regiões carentes.

As principais justificativas para os investimentos em pesquisas sobre dessalinização são os altos níveis de radiação solar em grande parte do território brasileiro e a necessidade da melhoria da qualidade de vida da população.

Neste trabalho foi desenvolvido um dessalinizador térmico para uso no fogão solar apresentado por Schwarzer e Vieira (2008). O dessalinizador tem como características: ser de pequeno porte para a instalação em uma panela de fogão; ser de fácil manuseio, pelo fato de ser leve e simples em sua estrutura; ser robusto, de forma que possa ser usado no interior ou exterior de residências, exposto ao sol.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é fazer o desenvolvimento de dois novos protótipos de dessalinizador circular para operação em um fogão solar de aquecimento indireto, avaliando as variáveis e parâmetros que influenciam na produção de água dessalinizada. O dessalinizador foi fabricado para operação em uma panela de fogão solar com aquecimento indireto. As variáveis estudadas foram a temperatura da água na panela e no primeiro estágio, e o volume de água na panela. Os parâmetros analisados foram o número de estágios e a geometria das bandejas. Com as medições experimentais e a produção de água dessalinizada, foram calculados: o coeficiente global de transferência de calor na base no dessalinizador, o coeficiente global de perdas de calor, o COP (coeficiente de desempenho), o GOR (razão de ganho) e as eficiências da panela e do sistema.

Os objetivos específicos foram:

a) Projetar a nova torre de dessalinização e bandejas;

b) Fabricar e montar o dessalinizador;

c) Recuperar e operar o sistema de fogão solar existente no laboratório;

d) Instalar um sistema de aquisição de dados- termopares e coletor de dados;

e) Realizar medições experimentais e ajustes no sistema;

f) Analisar os dados obtidos para avaliar as influências das variáveis e parâmetros na produção de água dessalinizada.

O projeto, montagem do dessalinizador, a implantação do sistema de aquisição de dados e a realização dos experimentos foram feitos no Laboratório de Energia Solar e Gás Natural (LESGN) da Universidade Federal do Ceará (UFC), na cidade de Fortaleza.

Foram fabricados dois protótipos do dessalinizador térmico. No primeiro protótipo (tipo A), a água colocada na panela para receber o fluxo de calor proveniente do óleo térmico evaporava, condensava e era coletada (água dessalinizada) fora da unidade. Esse protótipo apresentava a vantagem de receber diretamente o calor do óleo térmico, diminuindo assim o número de processos de transferência de calor. A desvantagem estava na impossibilidade do seu funcionamento continuado por mais de um dia, pois tornava necessária a reposição dessa água. Nesse protótipo fez-se o estudo da produção de água dessalinizada para diferentes volumes de água na panela até concluir qual seria o volume que teria a melhor eficiência, com esse volume foram repetidos os experimentos com dois e três estágios.

No segundo protótipo (tipo B), a água colocada na panela para receber o calor proveniente do óleo térmico era utilizada apenas como um meio de transferência de calor, pois este protótipo possui a forma de uma panela convencional (o fundo fechado), ou seja, a água da panela não era coletada, o seu processo de evaporação-condensação era apenas para transferir calor para o estágio. Esse protótipo apresenta uma transferência de calor a mais que o protótipo tipo A (entre água da panela e 1° estágio), o que se apresenta como uma desvantagem, mas ele possui a vantagem de possibilitar o funcionamento continuado por vários dias, devido o volume de água na panela permanecer sempre o mesmo. Nesse protótipo também foi feito o estudo da produção de água dessalinizada para diferentes volumes de água na panela até concluir qual seria o volume que teria a melhor eficiência e para o melhor volume foram repetidos experimentos com dois e três estágios.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os primeiros registros históricos da utilização da radiação solar para a produção de água dessalinizada estão ligados aos antigos Egípcios. Porém, o primeiro dessalinizador com resultados experimentais publicados foi projetado pelo Sr. Charles Wilson e construído em *Las Salinas* no Chile em 1872. A partir daí muitos trabalhos foram desenvolvidos na área.

Löf *et al.* (1961) formularam as relações de transferência de calor e de massa para determinar o desempenho de um dessalinizador solar de tanque em regime permanente. Sua produtividade era função da temperatura ambiente, da velocidade do vento, da inclinação da cobertura transparente de vidro e da quantidade de radiação solar incidente. Eles concluíram que a taxa de produção de água destilada era tão maior quanto menor fosse a diferença entre as temperaturas do vidro e da água salobra no tanque.

Cooper (1973) construiu alguns dessalinizadores solares a fim de determinar suas eficiências levando em conta fatores como: inclinação da cobertura de vidro, espessura da lâmina de água e tipo de isolamento das paredes do tanque. Nos seus resultados, ele observou que a eficiência de dessalinizador solar ideal não ultrapassava 60% e dessalinizadores solares de tanque raramente excediam 50%.

Proctor (1973) desenvolveu um sistema experimental de dessalinização solar que possuía 18,5 m² de área e era composto por um tanque de concreto isolado com placa de isopor. A água era reciclada no equipamento por uma bomba centrífuga com capacidade de 20 g/min. Este experimento teve bons resultados, pois sua produção foi de 3 a 18 vezes maior que a dos dessalinizadores convencionais, tendo uma produção máxima de 821 L de água dessalinizada. Esse volume é alto devido a área dos coletores solares ser de 18,5 m², dividindo o volume de água dessalinizada pela área total a produção tem uma média em torno de 44 L/m².dia.

Deronzier *et al.* (1981) desenvolveram um destilador solar especial de múltiplo efeito. Este destilador era composto por um conjunto de coletores solares que possuíam uma área de superfície seletiva total de 270 m² e uma torre de evaporação com 12 estágios. O calor absorvido pelo coletor solar era transmitido para a água a ser dessalinizada através de um trocador de calor. A água evaporada era condensada em outro trocador de calor para no fim ser coletada. O primeiro estágio era mantido a temperaturas entre 80-85 °C e este protótipo alcançou uma produção de 35 L/m².dia.

Mota e Andrade (1985) construíram um dessalinizador tipo tanque para verificar o efeito da dessalinização sobre microorganismos patogênicos presentes na água, concluindo que eles eram exterminados, além de haver alteração em vários parâmetros físico-químicos da água como: redução sensível na condutividade elétrica, turbidez, dureza, teor de cloretos e alcalinidade.

Chendo e Egariewe (1991) fizeram um estudo comparativo entre dessalinizadores de tanque usando vários tipos de enchimento como: pedra, carvão mineral e tecido. Eles observaram que a taxa de destilação no tanque aumentava na ordem: carvão mineral, tecido e pedras. O que tinha pedras apresentou produtividade máxima e continuou produzindo água destilada 4 horas após o pôr do sol, produção que se explica pela alta capacidade calorífica de armazenamento de energia das pedras e à baixa temperatura ambiente, ou seja, essa diferença nas temperaturas favoreceu o processo de evaporação-condensação.

Adhikari *et al.* (1995) apresentaram um modelo de simulação computacional e desenvolveram um sistema experimental de um dessalinizador com três estágios. Neste trabalho, os autores analisaram o aumento da produção de água dessalinizada com o aumento do número de estágios. Um programa computacional foi desenvolvido para prever o valor da temperatura da água no regime permanente em cada estágio e suas produções de água dessalinizada. Os resultados obtidos com a modelagem numérica mostraram uma boa concordância com os resultados experimentais, que tiveram uma média de 15 kg/m².hora.

Lima (2000) apresentou uma análise térmica e os resultados experimentais de um sistema de dessalinização solar com recuperação de calor. Foi feita uma análise química e bacteriológica da água antes e após a dessalinização. O sistema era composto por coletores solares e uma torre de dessalinização com seis estágios. Em funcionamento, a energia proveniente do sol era absorvida pelos coletores que aqueciam o fluido de trabalho (óleo vegetal), que fluía através de uma tubulação de cobre. Ao entrar na torre de dessalinização, o fluido de trabalho transferia calor para a água salobra através de um trocador de calor. Os resultados mostraram que o processo de dessalinização reduziu a alcalinidade, pH, cor, teor de cloretos e a condutividade elétrica da água dessalinizada. A análise bacteriológica revelou a eliminação de todas as bactérias do grupo Coliformes Totais e do grupo Coliformes de origem fecal. O dessalinizador alcançou uma temperatura de 80°C no primeiro estágio e obteve uma eficiência experimental de 25%.

Schwarzer *et al.* (2001) apresentaram um estudo teórico e experimental de uma torre de dessalinização térmica com recuperação de calor que funcionava pelo aquecimento de um óleo que entrava em um trocador de calor para aquecer a água a ser dessalinizada. Nesse

trabalho, foram feitos os balanços de massa e energia no processo de dessalinização térmica, uma simulação numérica dos resultados para produção de água dessalinizada e o estudo experimental de um dessalinizador térmico instalado na costa nordeste do Brasil.

Schwarzer e Vieira (2003) aperfeiçoaram o dessalinizador térmico com recuperação de calor, composto por uma torre de dessalinização com múltiplos estágios com bandejas de 16° de inclinação e um ou mais coletores. Os coletores solares foram utilizados para captar energia solar e transferir para a água a ser dessalinizada. Foram testados quatro sistemas na Alemanha, Espanha, Índia e Brasil. A produção de água dessalinizada foi cerca de 15 a 18 L/m².dia, o que representa 5 a 6 vezes a produção de um dessalinizador solar tipo tanque. O estudo também mostrou que o número ideal de estágios varia de 5 a 7.

Schwarzer *et al.* (2009) fizeram um estudo com dessalinizadores do tipo gaveta de múltiplos estágios e com dessalinizadores de tubo evacuado para analisar a eficiência de produção diurna e noturna. Os resultados mostraram uma produção total média diária de 37,6 L, sendo 20,35 L a produção diária e 17,25 L a produção noturna. A produção noturna foi alta pelo fato de os estágios armazenarem calor ao longo do dia e esse calor ser usado na produção noturna. Eles fizeram experimentos com 5, 6 e 7 estágios e também utilizaram água do mar. Nos experimentos com água do mar houve uma redução da condutividade elétrica de 51.000 μ S para 72 μ S, o que caracteriza uma redução de 99,8 % no número de sólidos totais dissolvidos. Também se observou uma redução de 20% no volume de água dessalinizada, o que se explica pela quantidade de sólidos totais dissolvidos, quanto maior esse número mais calor é necessário para se produzir a água dessalinizada.

Tanaka e Nikatake (2009) fizeram uma análise teórica de uma dessalinização térmica com um refletor plano externo e concluíram que esse acessório aumentou a produção de água dessalinizada. Apresentaram como resultado o aumento da produção de 4L/m².dia para uma unidade sem refletor e uma produção de 5L/m².dia para uma unidade com um refletor inclinado de 15°.

Com relação aos fogões solares, um dos mais importantes trabalhos em sistemas com sifão térmico foi realizado por Schwarzer & Krings (1996), tendo sido construído e testado um fogão solar com aquecimento indireto e alimentado por óleo de amendoim nos coletores. Ele atingiu uma eficiência sensível variando entre 0,30 e 0,34.

Schwarzer e Vieira (2003) construíram um fogão com armazenamento de calor caracterizado por um tanque cheio de pedras, a fim de reter o máximo de calor possível. Esse fogão foi projetado e construído para uso por famílias e testado em alguns países, como Alemanha, Índia, Brasil, África do Sul e Nicarágua. A eficiência média desses fogões foi considerada boa se comparada aos fogões construídos anteriormente, ficando em torno de 0,38.

Continuando as pesquisas desse grupo de trabalhos com fogões solares, pode-se destacar Cunha (2005). Ele construiu um fogão semelhante aos anteriores, porém, um pouco mais sofisticado, com um tanque de armazenamento, 4m² de área de coletor, três panelas de 16L e um forno de 16L. A eficiência sensível obtida com esse fogão foi de 0,38; a mesma eficiência obtida com os fogões de Schwarzer & Vieira (2003). Ele também fez testes com óleos de algodão, de soja e mineral (LUBRAX), os três atingiram praticamente a mesma eficiência, menor que de um óleo sintético.

Franco *et al.* (2003) utilizaram fogões solares com concentradores em forma de disco na área sub-andina da Argentina, que possui uma elevada incidência solar e áreas com desertificação, o que favorece a instalação destes fogões. O principal objetivo desse trabalho foi dar a alternativa de cozimento de alimentos para comunidades carentes em regiões remotas. Os fogões foram levados para escolas e hospitais, onde se fazia comida para 30 a 100 pessoas. O que foi possível fazer com esse sistema foi: aquecimento de 6 L de água até a temperatura de ebulição em 35 minutos, cozimento de até 18 Kg de comida no período de 3,5 horas, no intervalo entre 9:00 e 12:30 horas, ou aquecimento de até 8 kg de comida no período da tarde, que se tem menor incidência solar. Vários alimentos foram feitos utilizando esse fogão, como: sopas, vegetais, pães, bolos e outras massas. Este fogão se mostrou efetivo para estas comunidades carentes e foram deixados dois protótipos com dois concentradores cada. A grande desvantagem dos fogões com concentradores em forma de disco é que a pessoa que o utiliza para cozinhar alimentos fica muito exposta à radiação solar na pele, pois a energia solar que incide no coletor é focada na panela e reflete fortemente na pele do usuário do fogão.

Öztürk (2004) desenvolveu uma pesquisa com um fogão solar parabólico de baixo custo na Turquia. Este fogão foi construído com uma chapa espelhada de Ni-Cr (níquelcromo) e no foco da parábola ficava a panela, que foi utilizada nos experimentos para aquecer água. Os experimentos foram realizados por uma semana, no período entre 10 e 14 hs. O volume de água era de 7 L/m² de área de intercepção do fogão. A temperatura da água variou entre 40 e 73°C, a temperatura ambiente entre 24 e 35°C e a radiação solar entre 550 e 1020 W/m². A eficiência deste fogão foi relativamente baixa, variou entre 0,028 e 0,157.

Mirdha e Dhariwal (2008) fizeram um projeto de otimização de um fogão solar do tipo caixa a partir da reflexão solar nos seus espelhos refletores. Esse estudo levou em conta diversos parâmetros, como: latitude, inclinação norte-sul, inclinação leste-oeste, ângulo solar,

inclinação dos coletores, dos refletores, ângulo horário, declinação solar, etc. Eles fizeram um estudo comparativo entre um fogão, sem levar em consideração esses espelhos, e outro de mesmas dimensões, mas utilizando essas otimizações. Os resultados mostraram que com a nova configuração o sistema atingia temperaturas bem maiores durante todo o ano, mesmo em períodos de menor incidência solar, fazendo com que fosse possível cozinhar nos períodos de maior insolação e aquecer os alimentos no período do fim da tarde e à noite. Com o fogão antigo só era possível cozinhar no período de alta insolação, ou seja, com a nova configuração foi possível preparar duas refeições por dia. Todos os experimentos foram realizados na cidade de Jodhpur, na Índia. Os fogões solares do tipo caixa têm algumas desvantagens como, só cozinham bem os alimentos se a incidência solar for intensa, ou seja, se houver poucas nuvens no céu, possuem grandes perdas de calor para o ambiente e precisam de um tempo relativamente grande para cozinhar completamente os alimentos.

4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1. Principais tipos de dessalinização

A dessalinização é o processo de retirar sal da água salobra, com o intuito de torná-la potável. Os principais processos de dessalinização são: dessalinização térmica e por osmose reversa.

O dessalinizador de osmose reversa utiliza uma membrana como agente separador. Esta membrana permite a passagem de moléculas de água e retém as moléculas de sais. Esse dessalinizador é formado por um conjunto de bombas de alta pressão, uma fonte elétrica para o acionamento dessas bombas, um conjunto de membranas semipermeáveis e filtros de cartucho que podem ser de carvão ativado, celulose, antracito e material desferrizante, de acordo com a necessidade de remoção de elementos indesejáveis contidos na água a ser dessalinizada. As vantagens desse processo são as altas taxas de água produzida e sua boa qualidade, e as desvantagens são os altos custos de fabricação e manutenção (Garcia-Rodrigues, 2003).

Na dessalinização térmica, o agente de separação é o calor proveniente da radiação solar, captada por coletores. O princípio básico é a evaporação da molécula da água a partir da água salgada ou salobra por meio de aquecimento, podendo ou não chegar ao ponto de ebulição. Essa é uma grande vantagem desse processo, pois, com a ebulição, não são arrastados íons indesejáveis dos sais para o vapor a ser condensado.

No aquecimento direto, a radiação solar (refletida ou não) é usada diretamente no aquecimento da água salobra. No aquecimento indireto, um meio de transporte, geralmente um fluido térmico, é usado para transportar o calor da unidade de absorção da radiação solar (coletores) para a água salobra.

4.2. Propriedades do óleo térmico usado no coletor

No coletor do fogão solar do sistema de dessalinização desenvolvido e testado neste trabalho foi usado um óleo térmico sintético (*Dowtherm A*). O tipo de óleo utilizado é um dos parâmetros importantes da determinação da eficiência do sistema fogão-dessalinizador. As propriedades que influenciaram na seleção do óleo foram: condutividade

térmica, densidade, calor específico e viscosidade. Essas propriedades são apresentadas no apêndice C.

4.3. Protótipos do dessalinizador

Foram fabricados dois protótipos do dessalinizador, que foram denominados de Tipo A (com produção de água dessalinizada da panela) e Tipo B (com água da panela apenas como um meio trocador de calor). Esta seção explica os processos de transferência de calor envolvidos nos dois protótipos e apresenta os balanços de energia para cada tipo.

A Figura 4.1 apresenta o desenho esquemático dos processos do protótipo de dessalinizador Tipo A. Os processos térmicos envolvidos são: evaporação (evap), condensação (cond), convecção (conv), radiação térmica (rad) e condução (c).

Figura 4.1- Transferências de calor no dessalinizador Tipo A



Fonte: Próprio autor

A equação da conservação da energia para um sistema qualquer é dada por:

$$\dot{E_e} - \dot{E_s} + \dot{E_g} = \dot{E_a} \tag{1}$$

na qual $\vec{E_e}$ é a taxa de energia que entra no sistema, $\vec{E_s}$ é a taxa de energia que sai do sistema, $\vec{E_g}$ é a taxa de energia gerada e $\vec{E_a}$ é a taxa de energia acumulada.

Considerando o volume de controle como sendo a panela do fogão não há energia gerada, dessa forma a equação da conservação da energia se reduz a:

$$\dot{E_e} - \dot{E_s} = \dot{E_a} \tag{2}$$

Os termos da Equação (2) representam a energia cedida à panela do fogão pelo aquecimento da tubulação de cobre, a energia que sai da panela pelos processos de transferência de calor e massa e a energia sensível acumulada na água da panela. Os termos podem ser expressos separadamente por:

$$\dot{E}_e = \dot{m}.c_p.\left(T_e - T_{ref}\right) \tag{3}$$

$$\dot{E}_s = \dot{m}.c_p.\left(T_s - T_{ref}\right) + \dot{m}.h_{fg} + \dot{Q}_{perdas}$$
(4)

$$\dot{E}_{a} = \left[M.c_{p}.\frac{dT}{dt}\right]_{\substack{partes\\metálicas}} + \left[M_{a}.c_{p}.\frac{dT_{a}}{dt}\right]_{\substack{agua\\panela}}$$
(5)

na qual \dot{m} é a vazão mássica do óleo térmico da tubulação do fogão, c_p é o calor específico (que pode ser do óleo, da água ou das partes metálicas, de acordo com a especificação representada pelos colchetes), T_e é a temperatura do óleo na entrada da panela e T_{ref} é uma temperatura de referência, \dot{m} . h_{fg} é a taxa de calor que sai por evaporação, \dot{Q}_{perdas} representa todas as perdas de energia para o ambiente, M é a massa da panela do fogão, $\frac{dT}{dt}$ é a variação temporal da temperatura das partes metálicas (que neste caso foi considerada somente a panela), M_a é a massa de água da panela e $\frac{dT_a}{dt}$ é o gradiente de temperatura da água da panela.

O balanço de energia é feito considerando-se o sistema em regime permanente, ou seja, com a energia acumulada igual a zero, dessa forma, a Equação (2) se reduz a

$$\dot{E_e} = \dot{E_s} \tag{6}$$

Assim, utilizando-se as Equações (3) e (4) e reorganizando os termos,

$$\left[\dot{m}.c_{p}.\left(T_{e}-T_{s}\right)\right]_{o}.\Delta t = \left[M.h_{fg}\right]_{evap} + \dot{Q}_{perdas}.\Delta t$$
(7)

na qual o primeiro termo do lado direito da equação representa o calor de evaporação, sendo M a massa de água evaporada pelo sistema e h_{fg} é a entalpia de vaporização. A Equação (7) apresenta a conservação de energia no sistema.

O termo \dot{Q}_{perdas} representa as perdas de calor sensível da panela para o ambiente através do isolamento térmico, que tem a função de diminuir a transferência de calor da parede da panela para o ambiente.

Reescrevendo a equação (7) tem-se:

$$\left[\dot{m}.\,c_p.\,(T_e - T_s)\right]_o.\,\Delta t = \left[M.\,h_{fg}\right]_{evap} + \left[\frac{k}{\Delta x}.\,A.\,(T - T_\infty)\right]_p.\,\Delta t \tag{8}$$

na qual o termo $\left[\frac{k}{\Delta x} \cdot A \cdot (T - T_{\infty})\right]_p$ representa as perdas de calor por condução pela panela, k é a condutividade térmica do isolante (lã de vidro), Δx é a espessura do isolamento, A é a área da panela (que é igual a área do isolamento), T é a temperatura da superfície da panela e T_{∞} é a temperatura ambiente.

Reorganizando-se os termos da equação (8) pode-se ter a expressão que calcula numericamente a massa de água que foi evaporada na panela, ou seja, a massa de água dessalinizada produzida.

$$m_{evap} = \frac{\left[\dot{m}.c_p(T_s - T_e)\right]_o - \left[\frac{k}{\Delta x}.A.(T - T_\infty)\right]_p}{h_{fg}} \cdot \Delta t$$
(9)

Com esses dados é possível estimar a eficiência da panela e também fazer uma comparação com a eficiência global do sistema, pois a massa evaporada (condensado) é utilizada na expressão do cálculo das eficiências da panela e global.

A Figura 4.2 apresenta o desenho esquemático do protótipo de dessalinizador Tipo B, indicando os processos de transferência de calor entre a panela do fogão solar e a torre de dessalinização. Figura 4.2- Transferências de calor no dessalinizador Tipo B



Neste protótipo a água da panela é praticamente uma constante, porque ela não é condensada e coletada como produção. Seu processo de evaporação-condensação é apenas para transferir calor para a torre. Assim tem-se:

$$m_p \approx constante$$
 (10)

O protótipo do Tipo B apresenta uma tentativa de operação continuada do dessalinizador circular. No Tipo A, a quantidade de água na panela vai diminuindo ao longo do dia, tendo sido necessário a determinação de uma massa de água ideal, como mostrado na seção 6.2.

A motivação para o desenvolvimento do protótipo Tipo B foi a operação com a quantidade de água na panela que produzisse a melhor transferência de calor, com essa massa de forma constante. Contudo, esse processo introduzia uma resistência térmica adicional na operação da torre. Em outras palavras, a massa de água na panela é um meio de transferência de calor do óleo aquecido no coletor para a água do primeiro estágio, possibilitando ao dessalinizador uma operação constante, sem interrupção nem diminuição da massa de água na panela.

A introdução de uma resistência térmica a mais ao sistema reduziu o desempenho da torre, como mostrado nos resultados (Seção 6.4).

O balanço de energia na panela do protótipo Tipo A pode ser expresso por

$$\left[\dot{m}.c_{p}.\left(T_{e}-T_{s}\right)\right]_{o}.\Delta t = \left[m.h_{fg}\right]_{n} + \left[\dot{Q}_{perdas}\right]_{n}.\Delta t$$
(11)

O calor perdido para o ambiente é estimado pela Equação (11), pois todos os termos presentes podem ser determinados com as medições experimentais.

O balanço de energia no primeiro estágio pode ser escrito por:

$$\left[m.h_{fg}\right]_{p} = \left[m.h_{fg}\right]_{1^{\circ}est} + \left[\dot{Q}_{perdas}\right]_{1^{\circ}est} \Delta t$$
(12)

no qual o primeiro termo do lado direito da equação é uma estimativa do calor transferido do primeiro estágio pela evaporação-condensação (água dessalinizada produzida).

Com as equações apresentadas, pode-se determinar as eficiências térmicas dos processos na torre de dessalinização, tanto para o protótipo do Tipo A quanto do Tipo B. As eficiências da panela, entre os estágios e da torre de dessalinização são dadas respectivamente por:

$$\eta_{panela} = \frac{m_{p}.h_{fg}}{\left[m.c_{p}.\Delta T\right]_{\acute{o}leo}} \tag{13}$$

$$\eta_{i} = \frac{\left[m_{c} \cdot h_{fg}\right]_{i}}{\left[m_{c} \cdot h_{fg}\right]_{i-1}} \tag{14}$$

$$\eta_{torre} = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i h_{fg}}{\left[m.c_p.\Delta T\right]_{\delta leo}}$$
(15)

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada no desenvolvimento e na fabricação do dessalinizador circular, as etapas de recuperação do fogão solar e as equações necessárias para a determinação do desempenho teórico e experimental do fogão-dessalinizador circular. Essas equações estão baseadas nos balanços de energia e massa, nas massas de água na panela e bandejas.

O capítulo também apresenta o método de medição experimental da vazão de fluxo de óleo no circuito de sifão térmico. Foi usado um medidor de fluxo por ultrassom da marca *Dynameters*. Esse instrumento foi selecionado por ele não introduzir perda de carga adicional na tubulação do circuito de sifão térmico, no qual a vazão mássica de circulação é função, entre outras variáveis, da diferença de densidade no sistema. O medidor foi testado em um circuito de sifão térmico similar ao do fogão, com diâmetro externo de 50,8 mm, para possibilitar o contato dos sensores. Diferentemente das especificações do fabricante do medidor, foi necessária a instalação de um tubo com diâmetro superior aos tubos do circuito.

5.1 Metodologia utilizada no desenvolvimento e fabricação do dessalinizador

A metodologia utilizada na fabricação do dessalinizador circular para operação no fogão solar pode ser apresentada pelas etapas de trabalho de fabricação do protótipo, desenvolvimento do sistema de medição de dados e realização de experimentos, como apresentado a seguir:

a) Desenhos esquemáticos do dessalinizador circular e seus componentes

Os desenhos esquemáticos do dessalinizador circular foram feitos utilizando o software *Autodesk inventor*. As Figuras 5.1 e 5.2 mostram os dois protótipos de dessalinizador, o Tipo A (com produção de água dessalinizada pela panela do fogão) e o Tipo B (com a água da panela apenas como meio trocador de calor).

Os dessalinizadores foram construídos de chapas de aço inoxidável de espessura 1,2 mm. Essas chapas foram cortadas por uma guilhotina e as que foram utilizadas na construção das bandejas foram cortadas a laser em uma oficina especializada. Ele se constitui de uma bandeja inclinada para baixo, uma chapa lateral e um cachimbo no vértice da bandeja, para coletar a água dessalinizada e levar para fora do estágio.



Figura 5.1- Desenho esquemático do dessalinizador Tipo A

Fonte: Próprio autor

Figura 5.2- Desenho esquemático do dessalinizador Tipo B



Fonte: Próprio autor

b) Fabricação dos protótipos do dessalinizador circular

As etapas de fabricação dos protótipos do dessalinizador circular foram:

a) Cortes retangulares das chapas de aço inoxidável utilizando uma guilhotina mecânica;

b) Calandragem das chapas em uma oficina mecânica especializada;

c) Corte a laser das chapas para as bandejas em formato circular, seguido de recorte tipo "fatia de pizza" para calandragem e soldagem. Este procedimento foi utilizado para a construção das bandejas inclinadas;

d) Corte a laser de flanges (coroas circulares) para soldagem na base dos estágios, com o objetivo de melhorar o encaixe na panela do fogão. Os flanges foram soldados em forma de tronco de cone;

e) Corte a laser de flanges pequenos para soldagem na base lateral, com o objetivo de criar uma calha para coleta de água dessalinizada pela chapa lateral do dessalinizador;

 f) Corte em forma de círculo de pequenas chapas para formar o "cachimbo" de coleta de água dessalinizada. O procedimento para construir os cachimbos foi o mesmo utilizado para construir as bandejas;

g) Soldagem dos tubos de aço inoxidável nos cachimbos, com o intuito de escoar a água dessalinizada para fora do estágio. Para que a água escoasse para fora do dessalinizador foi feito um chanfro nos tubos de aço inox com uma inclinação para baixo de aproximadamente 5° ;

h) Soldagem de todas as partes: bandejas nas chapas laterais, flanges na base dos estágios e tubos com cachimbo também nas chapas laterais, além da guia, que tem o objetivo de favorecer o encaixe de um estágio em outro;

i) Foram construídos três estágios do Tipo A, sendo dois com calha lateral e um sem calha lateral, e um do tipo B sem calha lateral. Só foi construído um protótipo do tipo B porque ele é encaixado na panela para que ela troque calor com o dessalinizador sem que evapore com o passar do tempo, não sendo possível nem viável se proceder desta forma com os estágios superiores.

As Figuras 5.3 e 5.4 mostram os dois protótipos de dessalinizador que foram construídos (Tipo A e Tipo B).

Figura 5.3- Protótipo do dessalinizador Tipo A



Fonte: Próprio autor

Figura 5.4- Protótipo do dessalinizador Tipo B



Fonte: Próprio autor

b.1) Isolamento lateral do dessalinizador

Os primeiros experimentos foram feitos sem isolamento nas chapas laterais do dessalinizador circular, o que levou a perdas de calor para o ambiente. Estas perdas acontecem devido à condução de calor pelas chapas de aço inox. Colocando-se o isolamento há uma maior retenção do calor, de forma que se reduz as perdas para o ambiente.

Nos experimentos feitos sem isolamento lateral foi observada a produção de água dessalinizada pela calha lateral, que operava como uma superfície de condensação, ao ser resfriada pela perda de calor para o ambiente. Nos experimentos feitos com o isolamento lateral verificou-se uma redução significativa na produção de água dessalinizada pela chapa lateral, que se explica pelo fato de a temperatura da chapa lateral se aproximar da temperatura
da água na panela, ou seja, havia uma variação muito pequena na diferença de temperatura, reduzindo o volume de água condensada. Na seção de resultados está mostrado um estudo comparativo da produção e rendimento do dessalinizador com e sem isolamento lateral.

O isolamento lateral foi feito utilizando manta de lã de vidro introduzida em um tecido de cor preta e em forma de bolsa, aberta em uma extremidade, por onde se introduziu a lã.

Figura 5.5- Isolamento lateral

Fonte: Próprio autor

Montagem do sistema para fazer os experimentos c)

No início dos experimentos foram observadas perdas de vapor através do encaixe entre a panela do fogão e o dessalinizador. O tronco de cone foi soldado justamente para facilitar esse encaixe na panela, porém, foi observado que estava sendo perdido muito vapor para o ambiente.

Algumas tentativas foram feitas para contornar esse problema. A primeira foi a adição de uma camada de silicone sobre a panela do fogão, objetivando o seu completo nivelamento. O resultado esperado não foi alcançado porque a camada do tipo de silicone usado era permeável ao vapor de água, ficando encharcada. A segunda foi a colocação de uma fita asfáltica tanto na panela do fogão quanto no estágio. Isto também não funcionou porque o vapor de água fez a fita descolar e transmitir vapor para o ambiente, embora as especificações do fabricante da fita asfáltica garantisse a possibilidade de utilizá-la em superfícies metálicas com contato direto com água quente. Na terceira tentativa obteve-se sucesso. Foi colocada na junção entre o estágio e a panela uma junta de vedação de borracha de panela de pressão. Para fixá-la no estágio foi colocado silicone vermelho de alta temperatura. Com esse procedimento



foi observado que não se perdia água da panela. A desvantagem dessa solução foi que para cada mudança no volume de água da panela era preciso repetir o procedimento de colocação de junta e silicone.

d) Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados consta dos termopares e de um coletor de dados. Os termopares utilizados são do tipo K, com precisão de aproximadamente 41 μ V/°C e o coletor de dados é o modelo OM-DAQPRO 5300 da OMEGA, que disponibiliza até 8 canais para medições de temperatura. Os experimentos foram feitos usando até 5 pontos de medição de temperaturas. Os dados eram lidos a cada 2 segundos e suas médias armazenadas a cada 1 minuto para posterior transferência. A Figura 5.6 mostra o *datalogger* utilizado no trabalho.

Figura 5.6- Coletor de dados OMEGA OM-DAQPRO 5300



Fonte: Próprio autor

e) Medições experimentais

A maior parte dos experimentos foi realizada no período entre setembro de 2012 e fevereiro de 2013. Os primeiros experimentos foram com o dessalinizador Tipo A.

O horário de enchimento do sistema com água a ser dessalinizada variava entre 6:30 h e 7:00 h e o horário de coleta entre 17:00 h e 18:00 h. Parte dos experimentos foi realizada coletando a água dessalinizada somente no fim da tarde e a outra parte coletando água em dois horários do dia: 12:00 h e no fim da tarde. Os experimentos com duas medições no dia foram realizados com o objetivo de se calcular com mais precisão as eficiências globais e da panela, além de separar as produções da manhã e da tarde. Enquanto os com medição diária tinham o objetivo de analisar a produção diária de água. Em todos os experimentos, a água utilizada foi a da CAGECE (Companhia de água e esgoto do Ceará) e era retirada no próprio laboratório.

Para coleta da água dessalinizada foram utilizadas garrafas de 5,0 L com mangueiras de ligação. O volume de água foi medido por uma proveta de 2,0 L de capacidade, graduada a cada 20 mL. A água de cada estágio era depositada em pequenas garrafas para medição da condutividade elétrica.

e.1) Medições de salinidade

A condutividade elétrica é uma medição da capacidade que a água tem de conduzir corrente elétrica. Este parâmetro tem relação com a quantidade de íons dissolvidos na água, que são partículas carregadas eletricamente. Quanto maior a condutividade elétrica da água, maior é a quantidade de íons dissolvidos.

Para fazer a medição de condutividade elétrica, utilizou-se um condutivímetro de bancada CDB-70 da OMEGA. Este condutivímetro possui cinco escalas de medição: 20 μ S/cm², 200 μ S/cm², 2000 μ S/cm², 20 mS/cm² e 200 mS/cm². A condutividade elétrica sofre alterações com a temperatura. As amostras de água dessalinizada eram realizadas após entrarem em equilíbrio térmico com o ambiente. Os valores das medições eram anotados e transcritos para o computador.

e.2) Medição experimental da vazão mássica de um circuito de sifão térmico

Para ocorrer a transferência de calor absorvido no coletor para a panela é usado um circuito fechado de cobre, no qual escoa, por convecção natural, um óleo térmico. Esse circuito, chamado de termossifão, está apresentado no Anexo B. É necessária a medição da vazão mássica de óleo no circuito de termossifão para a determinação dos desempenhos (eficiências) do fogão e do dessalinizador circular. Foram feitos dois estudos, sendo um numérico (que está apresentado no Anexo C) e o outro experimental, para a determinação da vazão mássica.

Para medir a vazão mássica de óleo que passa através da tubulação foi utilizado um aparelho do tipo ultrassônico chamado *DMTFH Handheld Transit Time Ultrasonic Flow Meter* da marca *Dynameters*. O equipamento foi adquirido para operar em tubulação de cobre de 22 mm. Contudo, os sensores enviados necessitavam de um diâmetro externo de pelo menos 50 mm. Por isso, o equipamento foi instalado em uma tubulação de aço inoxidável de 50,8 mm em um circuito similar ao do fogão. Esse aparelho foi colocado na parte externa da tubulação e lido em um coletor de dados.

O medidor de fluxo utilizado tem como princípio de funcionamento a equação (16):

$$V = k. D. \Delta t \tag{16}$$

na qual V é a velocidade de fluxo do fluido, k é uma constante, D é a distância entre os transdutores e Δt é o tempo de voo, ou seja, o tempo que o ultrassom passa pelos dois transdutores. A Fig. (5.7) mostra um desenho do ultrassom no interior do tubo.

Figura 5.7- Ultrassom no interior do tubo (modo V)



Fonte: http://www.dynameters.com/product.aspx?t=214

5.2 Recuperação do fogão solar e colocação dos refletores

Etapas da recuperação do fogão

- a) Verificação dos vazamentos da tubulação de cobre, retirada de todo o óleo térmico que estava dentro dela, identificação e soldagem das aberturas;
- b) Fixação dos termopares em partes específicas da tubulação de cobre: entrada do coletor, saída do coletor, entrada da panela e saída da panela. Os termopares tinham suas medições registradas em um coletor de dados (*datalogger*) e eram do tipo K, com precisão de aproximadamente 41 μV/°C;
- c) Isolamento das paredes laterais da tubulação de cobre e panelas, com o objetivo de diminuir as perdas de calor para o ambiente. No isolamento das paredes laterais foram utilizadas chapas galvanizadas 26, de espessura 0,48 mm. Para isolar a tubulação e as panelas do fogão foi utilizada manta de lã de vidro. Na realização dos experimentos com o

dessalinizador circular, uma das panelas do fogão foi usada e a outra teve seu fluxo de óleo térmico bloqueado. Essa operação foi realizada com o fechamento de uma válvula globo instalada na entrada da panela;

- d) Colocação de refletores. Foram instalados dois refletores: um na direção N-S (fixo), e um na direção L-O (móvel), que era ajustado para as posições de manhã e tarde. Sua posição era alterada ao meio dia (12 h);
- e) Colocação de um novo óleo térmico no circuito de sifão térmico (coletor solar, tubulação de cobre e panelas). As propriedades do óleo (*Dowtherm A*) estão no Anexo C.

5.3 Equações do balanço de massa e energia

a) Eficiência térmica da unidade de cozimento solar

Para determinar a eficiência térmica da unidade de cozimento, duas características importantes são utilizadas, as eficiências sensível e latente (Schwarzer e Vieira, 2008). O poder de aquecimento apresenta a taxa de energia sensível usada para aquecer certa massa de água, e a energia latente de cozimento é a taxa de energia necessária para a ebulição de certa massa de água contida nas panelas. A energia sensível de cozimento é expressa por:

$$Q_s = m_a. c_p. \Delta T_{95-\infty} \tag{17}$$

na qual Q_s é o calor sensível, m_a é a massa de água em kg, c_p é o calor específico da água em J/Kg.K, ΔT é a diferença de temperatura em K. Para evitar incertezas na determinação do início da ebulição, o poder de aquecimento é usualmente estimado aquecendo-se a massa de água da temperatura ambiente a 95°C. A eficiência sensível média é determinada dividindo-se a energia sensível usada no aquecimento pelo fluxo de radiação incidente no coletor plano, G_t , multiplicado pela área do coletor, A_c , integrada no respectivo tempo. A expressão é:

$$\bar{\eta}_{95} = \frac{m_a \cdot c_p \cdot \Delta T_{95-\infty}}{A_c \cdot \int_0^t \dot{G}_t dt}$$
(18)

A eficiência latente, que inclui os processos de evaporação e ebulição, quando ocorre, pode ser expressa por:

$$\eta_L = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot h_{fg}}{A_c \cdot \int_0^t \dot{G}_t dt} = \frac{\dot{Q}_{solar} - \dot{Q}_{perdas}}{\dot{Q}_{solar}}$$
(19)

na qual η_L é a eficiência latente, *i* representa os estágios do dessalinizador e *n* o número de estágios.

Essa eficiência latente é aproximadamente igual à eficiência global do sistema fogãodessalinizador:

$$\eta_L \approx \eta_G \; \frac{\dot{Q}_{solar} - \dot{Q}_{perdas}}{\dot{Q}_{solar}} \tag{20}$$

visto que a maior diferença entre as duas expressões é devida às perdas de condensado que, como gotas, após serem produzidas, caem na panela ou são perdidas no escoamento pelo canal de coleta de condensado.

b) Eficiência da unidade de dessalinização

A eficiência da unidade de dessalinização pode ser expressa pela razão entre a energia latente da água dessalinizada e a energia cedida pela panela do fogão, para o caso de se ter apenas um estágio. A taxa de energia cedida para a panela do fogão pode ser aproximada por:

$$\dot{Q}_p = \left[m.c_p.\frac{dT}{dt}\right]_o \approx \left[\dot{m}.c_p.\left(T_s - T_e\right)\right]_o$$
(21)

na qual *m* é a massa de óleo que circula no circuito de termossifão, c_p é o calor específico do óleo, $\frac{dT}{dt}$ é o gradiente de temperatura do óleo, T_s é a temperatura da saída da panela, T_e é a temperatura do entrada da panela e *o* é o índice para representar o óleo.

A taxa de energia usada na produção do condensado (água dessalinizada) é considerada igual à taxa de energia de evaporação e é expressa por:

$$\dot{Q}_e = \left[m_c \cdot h_{fg}\right]_i \tag{22}$$

na qual m_c é a massa de condensado, h_{fg} é o calor latente de vaporização e *i* é o índice para representar o estágio.

Assim a expressão para a eficiência da unidade de dessalinização é:

$$\eta_{d} = \frac{\left[m_{c} \cdot h_{fg}\right]_{i}}{\left[\dot{m} \cdot c_{p} \cdot (T_{s} - T_{e})\right]_{o}}$$
(23)

c) Eficiência global do sistema fogão-dessalinizador

A eficiência global é definida como sendo a razão entre a calor útil retirado do sistema pelo calor cedido ao sistema. Para o sistema fogão-dessalinizador o calor útil é o somatório de todas as energias latentes e o calor cedido é o calor sensível proveniente da radiação solar, transportado pelo óleo para a panela. A expressão para a eficiência global do dessalinizador com todos os seus estágios é:

$$\eta = \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_{cedido}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \dot{m} \cdot h_{fg}}{Q_{solar}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \dot{m} \cdot h_{fg}}{G_t \cdot A_{col}}$$
(24)

no qual *i* representa cada estágio, *n* o número de estágios e Q_{solar} é a radiação solar dada em W/m², que é dada pela radiação solar incidente G_t multiplicado pela área do coletor A_{col} .

Para se calcular a eficiência de cada estágio, pode-se usar:

$$\eta_{i} = \frac{\left[m_{c} \cdot h_{fg}\right]_{i}}{\left[m_{c} \cdot h_{fg}\right]_{i-1}}$$
(25)

na qual m_c é a massa de condensado do estágio especificado, h_{fg} é o calor latente de vaporização e *i* representa o estágio.

d) Coeficiente de desempenho (COP) e razão de ganho de saída (GOR).

No estudo de caracterização da unidade de dessalinização, dois parâmetros característicos são definidos, o coeficiente de desempenho (*Coefficient of Performance- COP*) e razão de ganho de saída (*Gain Output Radio- GOR*).

O coeficiente de desempenho é definido como a razão entre toda a massa de água dessalinizada produzida pela torre e a massa de condensado produzida no primeiro estágio. A equação é dada por:

$$COP = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i}{m_1} \tag{26}$$

na qual m_i é a massa produzida pela torre no estágio *i* e m_1 é a massa produzida pelo primeiro estágio e *n* é o número de estágios.

A razão de ganho de saída é definida como a razão entre a energia latente da água necessária para que ocorra a evaporação e a energia transferida para o dessalinizador devido ao óleo térmico do fogão. A equação é dada por:

$$GOR = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i h_{fg}}{\left[\dot{m}.c_p.\Delta T.\Delta t\right]_o}$$
(27)

na qual h_{fg} é o calor latente de evaporação da água na temperatura da água nos estágios e m_i representa a massa de água dessalinizada produzida em cada estágio *i*.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos experimentos realizados com o dessalinizador circular. Na primeira seção é feita uma comparação entre o volume de água dessalinizada com e sem isolamento térmico nas paredes laterais. Nas seções seguintes são apresentados os gráficos da produção de água dessalinizada para diferentes volumes de água na panela, com medições de temperatura na entrada da panela, saída da panela, água da panela e do 1º estágio, para o dessalinizador Tipo A. Para o dessalinizador Tipo B houve o acréscimo da medição da temperatura no 2º estágio. Estão apresentados em tabelas os resultados das análises de condutividade elétrica e de salinidade da água bruta, tanto da panela quanto dos estágios. Estão também apresentados os valores da eficiência do dessalinizador e um estudo comparativo entre os dois protótipos (Tipo A e Tipo B).

6.1 Estudo comparativo da produção do dessalinizador com e sem isolamento lateral (Tipo A)

Os primeiros experimentos foram feitos com o dessalinizador tipo A e sem isolamento lateral. Foi observado (Tabela 6.1) que a produção de água dessalinizada pelas paredes laterais (calhas) era maior para menores volumes de água na panela (3 e 4 L), contudo a produção total do dessalinizador era maior com o isolamento para volumes de água de 5 a 7 L.

As Tabelas 6.1 e 6.2 mostram os resultados dos primeiros experimentos feitos sem e com isolamento lateral.

Volume água panela (L)	Produção de água no cachimbo (L)	Produção de água na calha (L)	Produção Total (L)
7	0,60	0,70	1,30
5	0,68	0,70	1,38
4	0,76	0,70	1,46
3	0,85	0,70	1,55

Tabela 6.1- Produção de água dessalinizada do dessalinizador Tipo A, sem isolamento lateral e 1 estágio.

Fonte: Próprio autor

Volume água panela (L)	Produção de água cachimbo (L)	Produção de água calha (L)	Produção Total (L)
6	1,22	0,40	1,62
5	1,10	0,36	1,46
4	1,00	0,33	1,33
3	1,00	0,30	1,30

Tabela 6.2- Produção de água dessalinizada do dessalinizador Tipo A, com isolamento lateral e 1 estágio.

Fonte: Próprio autor

Com menores volumes de água na panela, o aquecimento é mais rápido e a produção aumenta. As paredes laterais ajudam na condensação, pois não alcançam temperaturas mais elevadas devido ao curto intervalo de tempo.

Para maiores volumes de água na panela, o tempo de aquecimento é maior e temperaturas mais elevadas são alcançadas, pois há menor perda de calor para o ambiente, devido à existência do isolamento térmico. Esse resultado está apoiado também pela crescente produção da calha com o aumento da massa de água na panela, como mostra a terceira coluna da Tabela 6.2. Assim, o protótipo com isolamento lateral apresenta maiores produções para maiores volumes de água na panela (5 e 6 L).

6.2 Produções de água dessalinizada para alguns volumes de água na panela

Nas Figuras 6.1 a 6.13 são apresentados os resultados dos experimentos com os dois protótipos de dessalinizador. Estão mostrados os gráficos de temperatura e radiação solar para os experimentos de cada massa de água na panela. A radiação solar média diária e a razão de condensação de água estão apresentadas nas Tabelas 6.3 e 6.4. Ao final da seção estão as Tabelas com as produções e os resultados com 2 e 3 estágios de dessalinização. Primeiramente são apresentados os resultados do dessalinizador Tipo A e em seguida do dessalinizador Tipo B.

Em todos os experimentos foram realizados em média de dois a três dias de medições, sendo colocados nos gráficos e tabelas os melhores resultados referentes a cada volume.

6.2.1 Resultados com o dessalinizador Tipo A para 1 estágio

Os experimentos com o dessalinizador Tipo A foram feitos com os volumes de água na panela de 3,0 L; 4,0 L; 5,0 L; 6,0 L e 7,0 L. As Figuras 6.1 a 6.5 mostram os gráficos e a Tabela 6.3 as produções para esses volumes.

A legenda de todos os gráficos é: T_{∞} , temperatura ambiente; G é a radiação solar incidente; 1° est, primeiro estágio; 2° est, segundo estágio, e os subscritos são: T_{ep} , temperatura da entrada da panela; T_{sp} , temperatura da saída da panela; T_a , temperatura da água da panela.



Figura 6.1- Gráfico de temperatura e radiação solar do dessalinizador Tipo A com 3,0 L de água na panela

Fonte: Próprio autor

Com 3,0 L de água na panela, a temperatura na tubulação de cobre por onde o óleo térmico entra na panela alcançou valores próximos a 118 °C para a radiação diária de 39,5 MJ/dia. A temperatura da água na panela manteve-se em torno de 82 °C no período de 10 às 14 h. A produção diária foi de 2,64 L.



Figura 6.2- Gráfico de temperatura e radiação solar do dessalinizador Tipo A com 4,0 L de água na panela.

Fonte: Próprio autor

Com 4,0 L de água na panela, a temperatura da tubulação da entrada da panela alcançou valores próximos a 114 °C para uma radiação diária de 39,2 MJ/dia. A temperatura da água na panela manteve-se em torno de 80 °C no período de 10 às 14 h. A produção diária foi de 2,71 L.

Figura 6.3- Gráfico de temperatura e radiação solar do dessalinizador Tipo A com 5,0 L de água na panela



Fonte: Próprio autor

Com 5,0 L de água na panela, a temperatura da tubulação da entrada da panela alcançou valores próximos a 117 °C para uma radiação diária de 39,4 MJ/dia. A temperatura

da água na panela manteve-se em torno de 83 °C no período de 10 às 14:30 h. A produção diária foi de 2,48 L.



Figura 6.4- Gráfico de temperatura e radiação solar do dessalinizador Tipo A com 6,0 L de água na panela

Fonte: Próprio autor

Com 6,0 L de água na panela, a temperatura na tubulação de cobre por onde o óleo térmico entra na panela alcançou valores máximos próximos a 117 °C para a radiação diária de 39,5 MJ/dia. A temperatura da água na panela manteve-se em torno de 83 °C no período de 10 às 14 h. A produção diária foi de 3,06 L. Neste dia observou-se que a radiação média no período de 10 às 15 h foi elevada e a produção foi superior devido a ausência quase total de nuvens no céu. Não somente a somatória da radiação total em um dia, mas também seus valores instantâneos são importantes na produção do dessalinizador. A ausência de nuvens influenciou a energia absorvida pelo coletor solar e, consequentemente, a produção do dessalinizador.



Figura 6.5- Gráfico de temperatura e radiação solar do dessalinizador Tipo A com 7,0 L de água na panela

Fonte: Próprio autor

Com 7,0 L de água na panela, a temperatura na tubulação de cobre por onde o óleo térmico entra na panela alcançou valores máximos próximos a 110 °C para a radiação diária de 43,7 MJ/dia. A temperatura da água na panela manteve-se em torno de 81 °C no período de 10 às 14 h. A produção diária foi de 2,66 L. Esta foi a menor produção diária com o dessalinizador Tipo A e acredita-se que tenha ocorrido devido ao maior volume de água na panela (7 L).

A Tabela 6.3 apresenta um resumo das produções diárias do dessalinizador Tipo A para os diferentes volumes na panela.

Volume água panela (L)	Produção no cachimbo (L)	Produção na calha (L)	Produção Total (L)	Radiação Média Diária (MJ/dia)	Razão de condensação (mL/MJ)
3,0	2,22	0,42	2,64	39,5	66,8
4,0	2,36	0,35	2,71	39,2	69,1
5,0	2,00	0,48	2,48	39,4	62,9
6,0	2,56	0,50	3,06	40,7	75,2
7,0	2,29	0,37	2,66	43,7	60,9

Tabela 6.3- Produção de água dessalinizada no dessalinizador Tipo A com 1 estágio

Fonte: Próprio autor

Pelos resultados da Tabela 6.3, pode-se observar que quanto maior for a radiação solar incidente, maior a produção de água dessalinizada. A maior produção de água alcançada

nos experimentos com o dessalinizador Tipo A foi com 6,0 L de água na panela. Concluiu-se que, se a radiação diária não for tão alta, é preferível fazer experimentos com um menor volume de água na panela (3 a 4 L), já quando a radiação for mais alta é preferível fazer experimentos com 6,0 L de água na panela.

6.2.2 Resultados com o dessalinizador Tipo B para 1 estágio

Os experimentos com o dessalinizador Tipo B foram feitos com os volumes de água na panela de: 0,5 L; 1,0 L; 2,0 L; 3,0 L; 4,0 L; 5,0 L; 6,0 L e 7,0 L. As Figuras 6.6 a 6.13 mostram os gráficos referentes aos volumes testados, e a Tabela 6.4 mostra as produções referentes a esses volumes.

Neste protótipo, os experimentos foram feitos colocando 4,0 L de água dentro do 1º estágio, visto que a sua capacidade não é superior a 4,0 L e porque um volume menor que esse poderia comprometer a superfície molhada nas paredes, prejudicando os processos de transferência de calor.



Figura 6.6- Gráfico de temperatura e radiação solar do dessalinizador Tipo B com 0,5 L de água na panela

Fonte: Próprio autor

Com 0,5 L de água na panela, a temperatura na tubulação de cobre por onde o óleo térmico entra na panela alcançou valores máximos próximos a 120 °C, a temperatura variou bastante devido a presença de muitas nuvens no céu. A temperatura da água na panela variou entre 80 e 90 °C no período de 10 às 14 h. A produção diária foi de 1,66 L e a radiação diária foi de 37,2 MJ/dia.



Figura 6.7- Gráfico de temperatura e radiação solar do dessalinizador Tipo B com 1,0 L de água na panela

Fonte: Próprio autor

Com 1,0 L de água na panela, a temperatura na tubulação de cobre por onde o óleo térmico entra na panela alcançou valores máximos próximos a 119 °C. Neste dia houve muitas nuvens no período da manhã. A temperatura da água na panela manteve-se em torno de 90 °C no período de 10 às 14 h. A produção diária foi de 1,93 L e a radiação diária foi de 38,3 MJ/dia.



Figura 6.8- Gráfico de temperatura e radiação solar do dessalinizador Tipo B com 2,0 L de água na panela

Com 2,0 L de água na panela, a temperatura da tubulação da entrada da panela alcançou valores máximos próximos a 123 °C para uma radiação diária de 38,7 MJ/dia. A

Fonte: Próprio autor

temperatura da água na panela variou entre 90 e 96 °C no período de 10 às 14 h. A produção diária foi de 2,18 L. Essa foi a melhor produção com o dessalinizador Tipo B. Nesse dia observou-se que a radiação média foi similar a de outros dias, porém a produção foi superior devido a ausência quase total de nuvens no céu, principalmente no período da tarde, e as temperaturas atingidas pela tubulação que leva o óleo para entrada e saída da panela foram mais elevadas que nos outros experimentos. A temperatura na panela superou os 120 °C, como mostra a Figura 6.8.



Figura 6.9- Gráfico de temperatura e radiação solar do dessalinizador Tipo B com 3,0 L de água na panela.

Fonte: Próprio autor

Com 3,0 L de água na panela, a temperatura da tubulação da entrada da panela alcançou valores máximos próximos a 119 °C para uma radiação diária de 38,1 MJ/dia. A temperatura da água na panela variou entre 88 °C e 96 °C no período de 10 às 14 h. A produção diária foi de 2,00 L. Essa produção se aproximou da produção máxima, pois foi um dia de grande incidência solar e poucas nuvens no período da tarde, conforme mostra a curva de radiação da Figura 6.9.



Figura 6.10- Gráfico de temperatura e radiação solar do dessalinizador Tipo B com 4,0 L de água na panela.

Fonte: Próprio autor

Com 4,0 L de água na panela, a temperatura da tubulação da entrada da panela alcançou valores máximos próximos a 118 °C para uma radiação diária de 36,8 MJ/dia. A temperatura da água na panela variou bastante, devido à presença de muitas nuvens no céu. A temperatura máxima da água da panela foi de aproximadamente 90°C e a produção diária de 1,50 L.



Figura 6.11- Gráfico de temperatura e radiação solar do dessalinizador Tipo B com 5,0 L de água na panela.

Com 5,0 L de água na panela, a temperatura da tubulação da entrada da panela alcançou valores máximos próximos a 117 °C para uma radiação diária de 35,8 MJ/dia. A

Fonte: Próprio autor

temperatura da água na panela variou bastante, atingindo temperatura máxima de aproximadamente 86 °C. Observou-se que, devido às muitas nuvens no céu, a temperatura da água na panela caiu rapidamente no período da tarde, comprometendo a transferência de calor e consequentemente a produção de água dessalinizada. A produção diária foi de 1,30 L.



Figura 6.12- Gráfico de temperatura e radiação solar do dessalinizador Tipo B com 6,0 L de água na panela.

Com 6,0 L de água na panela, a temperatura da tubulação da entrada da panela alcançou valores máximos próximos a 108 °C para uma radiação diária de 39,1 MJ/dia. A temperatura da água na panela variou entre 86 °C e 92 °C no período de 10 às 14 h. Este foi um dia com muitas nuvens, porém não houve grandes variações de temperatura na tubulação e na água da panela. A produção diária foi de 1,26 L.

Fonte: Próprio autor



Figura 6.13- Gráfico de temperatura e radiação solar do dessalinizador Tipo B com 7,0 L de água na panela.

Fonte: Próprio autor

Com 7,0 L de água na panela, a temperatura da tubulação da entrada da panela alcançou valores máximos próximos a 113 °C para uma radiação diária de 32,4 MJ/dia. A temperatura da água na panela variou entre 80 °C e 86 °C no período de 10 às 14 h. Este foi um dia com muitas nuvens e baixa radiação diária, o que comprometeu a transferência de calor e a produção de água dessalinizada. A produção diária foi de 1,36 L.

A Tabela 6.4 apresenta as produções para os volumes de água testados na panela, as médias diárias de radiação solar e as razões de condensação de água.

Volume água panela (L)	Produção de água dessalinizada- (L)	Radiação Média Diária (MJ/dia)	Razão de condensação (mL/MJ)
0,5	1,66	37,2	44,6
1,0	1,93	38,3	50,4
2,0	2,18	38,7	56,3
3,0	2,00	38,1	52,5
4,0	1,50	36,8	40,8
5,0	1,30	35,8	36,3
6,0	1,26	39,1	32,2
7,0	1,36	32,4	42,0

Tabela 6.4- Produção de água dessalinizada no dessalinizador Tipo B para 1 estágio.

Fonte: Próprio autor

Da mesma forma que no dessalinizador Tipo A, pode-se concluir que a produção de água dessalinizada tem uma relação direta com a radiação solar incidente. A maior produção foi obtida nos experimentos com 2,0 L de água na panela e 38,7 MJ/dia para o protótipo Tipo B. Portanto, foram repetidos os experimentos com dois e três estágios com esse volume. Esses resultados são mostrados na seção seguinte.

6.2.3 Resultados com os dessalinizadores Tipo A e Tipo B para 2 e 3 estágios

Nos experimentos com 2 e 3 estágios não foram feitas medições das temperaturas, mas da produção de água dessalinizada e foram calculadas as eficiências dos estágios.

A Tabela 6.5 mostra os resultados de produção de água dessalinizada com o dessalinizador Tipo A para 2 estágios, no qual o volume de água na panela foi de 6,0 L (Tabela 6.3). Nos experimentos com o dessalinizador Tipo A há produção de água da panela quando se tem apenas 1 estágio, quando se tem 2 estágios há produção na panela e no primeiro estágio. Com 3 estágios, tem-se produção na panela, no primeiro e no segundo estágios.

Estágios	Produção de água dessalinizada- cachimbo (L)	Produção de água dessalinizada- calha (L)	Produção Total (L)
Panela	2,27	0,37	2,64
1º estágio	1,42	0,08	1,50
			4,14

Tabela 6.5- Produção de água dessalinizada no dessalinizador Tipo A para 2 estágios

Fonte: Próprio autor

A produção total com 2 estágios foi de 4,14 L para uma radiação de 40,3 MJ/dia.

A Tabela 6.6 mostra os resultados da produção com o dessalinizador Tipo A para 3 estágios e com o volume de água na panela de 6,0 L.

Estágios	Produção de água dessalinizada- cachimbo (L)	Produção de água dessalinizada- calha (L)	Produção Total (L)
panela	2,26	0,42	2,68
1º estágio	1,16	0,11	1,27
2º estágio	0,77	0,00	0,77
			4,72

Tabela 6.6- Produção de água dessalinizada no dessalinizador Tipo A para 3 estágios

Fonte: Próprio autor

A produção total com 3 estágios foi de 4,72 L para uma radiação diária de 41,3 MJ/dia. Comparando-se os resultados com 2 e com 3 estágios observa-se um pequeno acréscimo de produção de água dessalinizada foi pequeno, de 0,58 L. Assim, não era adequado o uso do 4º estágio.

Como esperado, o aumento do número de estágios no protótipo (torre de dessalinização) diminui a produção individual de cada estágio, mas aumenta a produção total do dessalinizador. Esse fato pode ser observado no acréscimo do 3º estágio, quando a produção do 2º estágio diminui em relação ao experimento com 2 estágios, mas a produção total do dessalinizador aumenta.

A Tabela 6.7 mostra os resultados da produção de água dessalinizada com o dessalinizador Tipo B para 2 estágios e com o volume de água na panela de 2,0 L.

Estágios	Produção de água dessalinizada- (L)
1º estágio	1,90
2º estágio	1,22
	3 12

Tabela 6.7- Produção de água dessalinizada no dessalinizador Tipo B para 2 estágios

Fonte: Próprio autor

A produção total com 2 estágios foi de 3,12 L. Verificou-se que sua produção foi inferior a do dessalinizador Tipo A (4,14 L), visto que no dessalinizador Tipo B há uma resistência térmica maior à transferência de calor.

A Tabela 6.8 mostra os resultados da produção de água dessalinizada com o dessalinizador Tipo B para 3 estágios e com o volume de água na panela de 2,0 L.

Estágios	Produção de água dessalinizada- (L)
1º estágio	1,86
2º estágio	1,12
3º estágio	0,52
	3,50

Tabela 6.8- Produção de água dessalinizada no dessalinizador Tipo B para 3 estágios

Fonte: Próprio autor

A produção total com 3 estágios foi de 3,50 L. Novamente verificou-se que sua produção foi inferior a do dessalinizador Tipo A (4,82 L).

Verificou-se que a produção com 3 estágios foi superior à de 2 estágios, com uma diferença de 0,38 L. Esta diferença é menor do que a verificada com o dessalinizador Tipo A (0,58 L). Com esses resultados concluiu-se que, com o dessalinizador Tipo B é viável a utilização de até 2 estágios.

6.3 Análise da condutividade elétrica e salinidade para os 2 protótipos de dessalinizador

Os resultados da condutividade elétrica da água bruta utilizada nos experimentos são apresentados a seguir.

A Tabela 6.9 apresenta as medições com o protótipo A e 1 estágio, a Tabela 6.10 as medições com o protótipo A e 3 estágios, a Tabela 6.11 as medições com o protótipo B e 1 estágio e a Tabela 6.12 as medições com o protótipo B e 3 estágios.

Volume água panela	Condutividade elétrica	
(L)	(µS/cm)	
3,0	3,76	
4,0	5,75	
5,0	2,27	
6,0	1,76	
7,0	1,79	

Tabela 6.9- Condutividade elétrica das águas do dessalinizador Tipo A para 1 estágio.

Fonte: Próprio autor

Tabela 6.10- Condutividade elétrica das águas do dessalinizador Tipo A para 3 estágios e com 6,0 L de água na panela.

Estágios	Condutividade elétrica (µS/cm)
panela	1,39
1º estágio	1,75
2º estágio	1,98

Fonte: Próprio autor

Tabela 6.11- Condutividade elétrica das águas do dessalinizador Tipo B para 1 estágio

Volume água panela	Condutividade elétrica
(L)	(μS/cm)
0,5	1,90
1,0	4,72
2,0	5,13
3,0	5,50
4,0	6,28
5,0	3,72
6,0	12,90
7,0	9,64

Fonte: Próprio autor

Tabela 6.12- Condutividade elétrica das águas do dessalinizador Tipo B para 3 estágios e com 2,0 L de água na panela

Estágios	Condutividade elétrica
1º estágio	7,35
2º estágio	7,07
3° estágio	22,3

Fonte: Próprio autor

Pelos resultados obtidos com as condutividades elétricas, pode-se concluir que o processo de dessalinização foi efetivo, pois reduziu o valor da condutividade elétrica da água bruta de uma média de 800 a 850 μ S/cm² para os valores apresentados nas Tabelas 6.9 a 6.12, com valor máximo de 22,3 μ S/cm². 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 μ S/cm². Os valores encontrados nos experimentos foram, em sua maioria, abaixo de 10 μ S/cm², portanto, para ser ingerida, talvez seja necessária a adição de sais à água dessalinizada.

Não foram realizados testes bacteriológicos nem na água bruta nem dessalinizada, porém, espera-se uma redução significativa nos teores de coliformes, tendo-se como base os

resultados apresentados por Lima (2000). No protótipo de dessalinizador desta pesquisadora foi verificada ausência total de coliformes após a dessalinização e sua torre de dessalinização era similar à usada nos protótipos A e B.

6.4 Desempenho dos protótipos de dessalinizador

As melhores produções de água dessalinizada alcançadas nos experimentos realizados foram: 3,06 L com o dessalinizador Tipo A e 1 estágio; 4,14 L com 2 estágios; e 4,72 com 3 estágios. Para o dessalinizador Tipo B foram alcançados: 2,18 L com 1 estágio; 3,12 L com 2 estágios; e 3,50 L com 3 estágios.

Estágios	Produção (L)	η _{global} (%)	η _{panela} (%)
Tipo A/1 estágio	3,06	14,21	69,14
Tipo A/2 estágios	4,14	10,22	69,89
Tipo A/ 3 estágios	4,72	16,00	69,22
Tipo B/1 estágio	2,18	10,14	60,32
Tipo B/ 2 estágios	3,12	12,22	54,87
Tipo B/ 3 estágios	3,50	11,26	47,49

Tabela 6.13- Eficiências globais e da panela nos experimentos dos dessalinizadores.

Fonte: Próprio autor

Pelos resultados apresentados observam-se valores mais elevados das eficiências da panela e global para o dessalinizador Tipo A, que possui menores resistências térmicas à transferência de calor, mas que não possibilita seu uso de forma continuada, ou seja, o dessalinizador Tipo B possui sempre a água da panela como meio de transferência de calor e não há necessidade de reposição, pois esta permanece praticamente constante.

6.5 Cálculos do COP e do GOR

As Tabelas 6.14 e 6.15 apresentam os valores do COP, equação (26) e do GOR, equação (27), para os dois protótipos do dessalinizador.

Estágios	Тіро А	Tipo B
1 estágio	1,00	1,00
2 estágios	1,56	1,67
3 estágios	1,79	1,88

Tabela 6.14- COP para os protótipos Tipo A e Tipo B.

Fonte: Próprio autor

O COP é uma relação da produção total do dessalinizador com a produção do 1º estágio. No protótipo tipo A, o primeiro estágio (panela) possui alta produção devido à melhor transferência de calor, visto que a água a ser dessalinizada é aquecida diretamente pelo óleo térmico. Essa maior produção do 1º estágio influencia diretamente na análise do desempenho da torre. Os valores do COP são úteis no estudo do número de estágios para cada protótipo separadamente.

Estágios	Тіро А	Tipo B
1 estágio	3,12	2,94
2 estágios	5,33	4,41
3 estágios	5,99	3,54

Tabela 6.15- GOR para os protótipos Tipo A e Tipo B

Fonte: Próprio autor

Pelos resultados da Tabela 6.15, observa-se que o dessalinizador Tipo A teve melhor desempenho com 3 estágios, tanto nos valores do COP quanto do GOR. Para o protótipo tipo B, o número ideal de estágios é 2, pois é observado uma redução no GOR quando o número de estágios é aumentado para 3.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivos fabricar e testar dois novos protótipos de dessalinizador circular para operação em fogão solar de aquecimento indireto, que foram denominados de Tipo A (com produção de água dessalinizada da panela) e Tipo B (com água da panela apenas como um meio trocador de calor). Foram avaliadas as variáveis e parâmetros que influenciam na produção de água dessalinizada e foi feito um estudo comparativo entre as eficiências dos dois protótipos.

O objetivo foi alcançado, e os resultados experimentais constataram a eficiência dos protótipos na produção de água dessalinizada. Houve uma redução acentuada nos níveis de condutividade elétrica, da água bruta para a dessalinizada, confirmando o processo de dessalinização. Vale ressaltar que estes protótipos são modelos totalmente originais e ainda não há na literatura dessalinizadores com estas configurações.

Com os resultados dos experimentos conclui-se que a eficiência do dessalinizador Tipo A é superior a do dessalinizador Tipo B. Isso acontece porque o dessalinizador Tipo B possui uma transferência de calor a mais que o Tipo A, aumentando a resistência à transferência de calor para a água do 1º estágio. Conclui-se também que pode ser utilizado até 3 estágios com o dessalinizador Tipo A e até 2 estágios para o dessalinizador Tipo B.

Nos experimentos realizados verificou-se que a produção de água dessalinizada aumentava diretamente com o aumento da radiação solar incidente, para a faixa de valores dos experimentos.

Com relação ao volume de água na panela, concluiu-se que para o dessalinizador Tipo A, se a radiação diária não for tão elevada, os volumes ideais de água na panela variam entre 3 e 4 L. Com uma radiação mais elevada, o volume ideal é 6 L. Para o dessalinizador Tipo B, o volume ideal de água na panela é de 2 L.

Estes protótipos foram fabricados para serem utilizados em fogões solares como uma alternativa de obter água dessalinizada sem interferir no funcionamento do fogão para cozimento de alimentos, ou seja, o fogão solar fica com as duas utilidades, cozer alimentos e dessalinizar água.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADHIKARI, R. S.; KUMAR, A.; SOOTHA, G. D. Simulation studies on a multistagestacked tray solar still. Solar Energ, vol. 54, p. 317-325, 1995.

ARAÚJO, M. E., "Validação experimental de um refrigerador de água operando em ciclo de adsorção com aquecimento solar indireto". Dissertação de Mestrado, UFC, Brasil, 2009.

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

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

COUTINHO, L. D. E (2003). Protótipo experimental de um dessalinizador solar com recuperação de calor. Dissertação de Mestrado, PPEQ, UFC, Brasil.

CUNHA, T. R. B. **Fogão Solar Com ou sem armazenamento temporário de calor**. Trabalho de graduação apresentado pelo LESGN/UFC Prêmio Petrobrás de Tecnologia, 2005.

DELYANNIS, E. **Historic background of desalination and renewable energies**. Solar Energy, Vol. 75, p. 357-366, 2003.

DERONZIER, J. C.; LAURO, F.; PLOYART, R. Solar desalination: **Prototype "pithon" a special solar multiple-effect distiller**. Dessalination, vol. 39, p. 117-123, 1981.

DYER J. R., **The Development of Laminar Natural Convection Flow in Vertical Uniform Heat Flux Duct**, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 18, pp. 1455-1465, 1975.

FRANCO, J.; CADENA, C.; SARAVIA. L. Multiple use communal solar cookers. Solar energy, vol 77, p. 217-223, 2004.

GARCIA- RODRIGUES, L. Renewable energy applications in desalination: state of the art. Solar Energy, vol. 75, p. 381-393, 2003.

HOTTEL, H. C & WHILLIER, A. Evaluation of Flat Plate Collector Performance. Transf. of the Conference on the Use of Solar Energy, v.2, pI, 74, University of Wisconsin Press, 1958.

INCROPERA, F. P. e DEWITT, D. P. Fundamentos da Transferência de Calor e Massa. 5^a edição. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos, 2003.

KLEIN, S. A. Calculation of Flat-Plate loss coefficients, Solar Energy, 17, 79. 1975.

LIMA, C. A. Dessalinizador térmico com recuperação de calor- Análise térmica e resultados experimentais, Dissertação de mestrado, Engenharia Civil, Saneamento Ambiental, UFC, Brasil, 2000.

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

MIRDHA, U.S.; DHARIWAL, S.R. Design optimization of solar cooker. Renewable energy, vol 33, p. 530-544, 2008.

MITCHELL, J.W., Heat Transfer from Spheres and Animals Forms, Biophysical Journal, 16, 561, 1976.

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.

ÖZTÜRK, H. H.; Experimental determination of energy and exergy efficiency of the solar parabolic-cooker. Solar Energy, Vol.77, p. 67-71, 2004.

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

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

RODRIGUES, F. P. Desempenho de uma Torre de Recuperação de Calor com Canais Sintéticos de Poliuretano para um Dessalinizador Solar Térmico. 2010. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – UFC, Fortaleza.

SCHWARZER, K., KRINGS, T., Solar Cookers with and without Temporary Storage for use in Countries of intense sunshine. Solar Energy, 1996.

SCHWARZER, K. VIEIRA, M. E., TEIXEIRA R. N. P. (1997). Eficiência Térmica de um Sistema de Fogão Solar com Armazenamento de Calor, COBEM 1997.

SCHWARZER, K., VIEIRA, M. E., MÜLLER. C. Solar Thermal desalination system with heat recovery, Desalination, vol.137, pp.23-29, 2001.

SCHWARZER, K., VIEIRA, M. E. Solar cooking system with or without heat storage for families and institutions. Solar Energy, Vol 75, p.35-41, 2003.

SCHWARZER, K., VIEIRA, M. E. Characterisation and design methods of solar cookers. Solar Energy, Vol 82, p. 157-163, 2008.

SCHWARZER, K., VIEIRA, M. E., HOFFSCHMIDT, B., SCHWARZER. T., A new solar desalination system with heat recovery for decentralised drinking water production, Desalination, Vol 204, p.204-211, 2009.

TANAKA, H.; NIKATAKE, Y. Increase in distillate productivity by inclining the flat plate external reflector of a tilted-wick solar still in winter. Solar Energy, vol. 83, p. 785-789, 2009.

VIEIRA, M. E., SCHWARZER, K., MÜLLER, C., FABER, C. Mass tranfer correlation coefficients for an evaporation-condensation unit. Congresso Latino Americano de Transferência de Calor e Matéria. Anais do LATCYM 2001, México, 2001.

WEBSITES

DOWTHERM

Disponível em http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_08a5/0901b803808a5b98.pdf? filepath=heattrans/pdfs/noreg/176-&fromPage=GetDoc Acessado em março de 2012.

DYNAMETERS

Disponível em <u>http://www.dynameters.com/product.aspx?t=214</u> Acessado em dezembro de 2011.

MINISTÉRIO DA SAÚDE

Disponível em

http://portal.saude.gov.br/portal/arquivos/pdf/vigilancia_controle_qualidade_agua.pdf

Acessado em julho de 2013

ANEXOS

ANEXO A- Conceitos de transferência de calor e massa

Esta seção apresenta os conceitos relativos à transferência de calor por condução, convecção, radiação e massa por evaporação/condensação. Estes conceitos foram retirados de Incropera (2003).

A1. Transferência de calor por condução

A condução é o processo no qual o calor flui de uma região de temperatura mais alta para outra de temperatura mais baixa, dentro de um meio, que pode ser sólido, líquido ou gasoso, ou entre meios diferentes em contato físico direto. A transferência de energia ocorre devido a impactos ou choques elásticos, ou por difusão de elétrons de movimento rápido das regiões de alta para as de baixa temperatura.

A condução de calor sempre acontece para que haja o equilíbrio térmico entre os meios. Se diferenças de temperatura forem estabelecidas e mantidas através de adição ou remoção de calor em pontos diferentes, haverá uma transferência contínua de calor da região mais quente para a região mais fria, a esse processo dá-se o nome de regime permanente.

A relação básica da condução é a conhecida Lei de Fourier, que é expressa por:

$$\dot{Q}_x = -K.A.\frac{dT}{dx} \tag{A.1}$$

na qual \dot{Q}_x é a taxa de transferência de calor por condução, K é o coeficiente de transferência de calor por condução, A é a área de seção através da qual o calor flui por condução, medida perpendicularmente à direção do fluxo, x é a coordenada espacial e dT/dx é o gradiente de temperatura, ou seja, a razão de variação de temperatura T com a distância, na direção do fluxo de x.

A2. Transferência de calor por convecção

A convecção é o processo de transporte de calor pela ação combinada de condução de calor (difusão) e pelo movimento macroscópico de mistura (advecção). Na maioria das aplicações práticas, a convecção é o mecanismo de transferência de calor dominante entre a superfície sólida e um líquido ou gás.

Considerando a convecção em uma superfície cuja temperatura está acima daquela do fluido envolvente, o calor flui por condução da superfície para as partículas de fluido adjacentes à superfície. O calor transferido aumenta a energia interna das partículas fluidas, ou seja, aumenta sua temperatura. Com isso, essas partículas se movem sob a ação da gravidade para uma região de menor temperatura do fluido, onde se misturam e transferem energia para outras partículas fluidas. A taxa de calor transferido entre a superfície e o fluido é dada por:

$$\dot{Q}_{conv} = h_{conv}.A.\Delta T \tag{A.2}$$

na qual h_{conv} é o coeficiente de transferência de calor por convecção, A é a área de transferência de calor e ΔT é a diferença entre a temperatura da superfície e a temperatura do fluido.

A3. Radiação térmica

A radiação térmica é a energia liberada por corpo com temperatura acima de zero Kelvin, ou zero absoluto. A energia da radiação térmica é transportada por ondas eletromagnéticas denominadas fótons. Essa radiação ocorre tanto em superfícies sólidas, como em líquidos e gases. Enquanto a condução e convecção precisam de um meio material para se propagar, a radiação se propaga também no vácuo.

Define-se corpo negro como um corpo que absorve ou emite o máximo de radiação em todos os comprimentos de onda e em todas as direções. A taxa de radiação emitida por um corpo é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta desse corpo. A expressão para a taxa de emissão de radiação térmica é dada pala *lei de Stefan-Boltzmann*,

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma. A. T^4 \tag{A.3}$$

na qual \dot{Q}_{rad} é a taxa de transferência de calor por radiação, σ é a constante de *Stefan-Boltzmann* ($\sigma = 5,67. 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{.K}^4$), *A* é a área da superfície e *T* é a temperatura do corpo em escala absoluta.

Para um corpo real, a taxa de radiação térmica é inferior à de um corpo negro e é expressa por,

$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon. \sigma. A. T^4 \tag{A.4}$$

na qual ϵ é a emissividade da superfície real.

A4. Condensação e evaporação

Os processos de evaporação e condensação são analisados de forma semelhante. A evaporação de um fluido da fase líquida para a gasosa acontece devido à diferença de pressão do fluido na corrente livre. As moléculas do líquido, vizinhas à superfície, sofrem colisões que aumentam sua energia interna acima da necessária para superar a energia de ligação na superfície. A energia necessária para manter a evaporação provém da energia interna do fluido que não evapora, assim as moléculas sofrem redução em sua temperatura. Nas condições de regime permanente, a energia latente perdida pelo líquido na evaporação é compensada pela energia transferida para o líquido pela vizinhança. A taxa de transferência de calor por evaporação é dada por:

$$Q_{evap} = h_{evap}.A.\Delta T \tag{A.5}$$

na qual h_{evap} é o coeficiente de transferência de calor por evaporação, A é a área de transferência de calor e ΔT é a diferença de temperatura entre a superfície e a corrente livre. Essa diferença de temperatura está relacionada à diferença entre a pressão de saturação do fluido na superfície e pressão parcial do fluido na corrente livre.

A condensação é o processo de transferência de calor que ocorre quando um vapor saturado ou superaquecido entra em contato com uma superfície que se encontra em uma temperatura inferior a sua temperatura de saturação para a pressão correspondente. A energia latente do vapor é liberada e o calor é transferido para a superfície, formando assim o condensado. A taxa de transferência de calor por condensação é dada por:

$$\dot{Q}_{cond} = h_{cond}.A.\Delta T$$
 (A.6)

na qual h_{cond} é o coeficiente de transferência de calor por condensação, A é a área de transferência de calor e ΔT a diferença entre a temperatura do vapor saturado ou superaquecido e a temperatura da parede.

A vazão mássica transferida no processo de evaporação-condensação entre duas superfícies é dada por ,

$$\dot{m} = \frac{h_{evap}.A.\Delta T}{h_{fg}} \tag{A.7}$$

na qual h_{fg} é o calor latente de vaporização.

ANEXO B- Termossifão e coletores de placa plana

O circuito de termossifão solar é encontrado em sistema de refrigeração por adsorção, de fogão solar com armazenamento temporário de calor, em sistemas de dessalinização com recuperação de calor, entre outros (Schwarzer, 1997; Araújo, 2009). O sistema completo é composto por uma fonte de absorção de energia solar, ou fonte quente, que nos casos estudados está representada por um ou mais coletores planos, e uma fonte fria, onde o calor absorvido pelos coletores é transferido para um processo, seja de refrigeração, cozimento ou dessalinização. As fontes quentes e frias estão ligadas pelo circuito de termossifão, que é essencialmente formado por tubulações e acessórios de cobre, válvulas de controle e de retenção e isolamento térmico com proteção mecânica para utilização em ambientes externos. Na tubulação do circuito escoa um fluido de trabalho, um óleo térmico, que tem por função levar o calor absorvido nos coletores aos equipamentos, componentes da fonte fria.

O coletor solar de placa plana é um tipo especial de trocador de calor que converte radiação solar em energia térmica. Ele possui cinco componentes básicos:

- Uma superfície metálica pintada de preto que, ao absorver a radiação solar incidente se aquece. Devido a sua elevada temperatura, o calor flui por condução através das superfícies metálicas até as paredes internas dos tubos dessa placa absorvedora, onde transfere calor por convecção para o fluido de trabalho;

-Uma cobertura de vidro que permite a transmissão de radiação solar (de pequeno comprimento de onda) e a reflexão da radiação térmica (de maior comprimento de onda), reduzindo as perdas de energia;

-Um isolamento lateral e inferior para reduzir as perdas de calor por condução através das paredes que não são expostas à radiação solar;

-Os canais de escoamento nos quais o fluido de trabalho aquece suas paredes por convecção;
-Uma estrutura de suporte dos componentes.

A expressão para o cálculo da eficiência térmica de coletores de placa plana, η , operando em convecção forçada foi apresentada por Hottel e Whillier (1958), Eq. (B1),

$$\eta = F_r \cdot \left[(\tau, \alpha)_{\theta} - \frac{U_L \cdot (T_i - T_{\infty})}{I_{\theta}} \right]$$
(B1)
Onde Fr é o fator de remoção de calor, τ a transmissividade do vidro, α a absortividade da placa absorvedora, U_L o coeficiente global de perdas de calor no coletor solar, T_i a temperatura interna, T_{∞} a temperatura ambiente e $I\theta$ a radiação solar.

Se houver um escoamento forçado, a razão de massa que escoa é a mesma através da bomba de sucção.

$$F_R = \frac{\dot{m}.C_p}{A_C.U_L} \cdot \left[1 - exp\left(\frac{-A_C.U_L.F}{\dot{m}.C_p}\right) \right]$$
(B2)

na qual \dot{m} [Kg/s] é a vazão mássica, A_c [m²] a área do coletor, C_p [J/Kg.K] o calor específico e F é o fator de eficiência.

Em circulação natural, a razão de massa que escoa precisa ser determinada. Este valor foi calculado considerando o fato de que num circuito fechado, a pressão total para uma volta completa é zero. 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:

$$(\Delta P)_{Empuxo} = (\Delta P)_{Fric,\tilde{a}o} \tag{B3}$$

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

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

$$(\Delta P)_{G} = (\rho_2 - \rho_1) g \Delta X_g \tag{B4}$$

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 ΔX_g [m] é a diferença de altura entre a entrada e saída do coletor.

E a queda de pressão por atrito para escoamento laminar é dada por:

$$(\Delta P)_{F} = \frac{128.\text{m}.\mu.\Delta X_{F}}{\pi.\rho.D^{4}}$$
(B5)

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

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

$$\dot{m} = \frac{(\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot \Delta X_E \cdot \pi \cdot \bar{\rho} \cdot D^4}{128 \cdot \mu \cdot \Delta X_F} \tag{B6}$$

na qual ρ é a densidade do fluido, g é a aceleração da gravidade, ΔX_E é o comprimento do desnível entre a entrada e a saída do coletor, D é o diâmetro da tubulação de cobre, μ é a viscosidade média dinâmica do fluido e ΔX_F é o comprimento do percurso do fluido no trocador de calor.

Utilizando a Eq. (B6), o coeficiente de transferência de calor na circulação natural, *h*, foi estimado utilizando o modelo apresentado por Dyer (1975) para um cilindro vertical sob as condições de fluxo de calor uniforme. Na Eq. (B7), utilizada para encontrar o número de Nusselt, Ra^* é o número de Rayleigh e "m" vale -1,7.

$$N_u = \left\{ \left(\sqrt{\frac{Ra^*}{8}} \right)^m + \left[0,67. \left(Ra^* \right)^{\frac{1}{5}} \right]^m \right\}^{\frac{1}{m}} \qquad 0,1 < Ra < 10^5$$
(B7)

Para estimar o coeficiente de transferência de calor por convecção devido à velocidade do vento, usou-se o modelo de Mitchell (1976) na Eq. (B8). O coeficiente de perdas de calor no topo do coletor, Ut, foi calculado usando a expressão de Klein (1975).

$$h_w = 8,6.\frac{V^{0,6}}{L^{0,4}} \tag{B8}$$

na qual h_w representa o coeficiente de transferência de calor, V é a velocidade do vento e L é o comprimento do coletor.

As perdas laterais e traseiras do coletor, $U_e \in U_b$, respectivamente, foram estimadas considerando perdas por condução devido ao isolamento. O coeficiente total de perdas U_L é:

$$U_L = U_e + U_b + U_t \tag{B9}$$

Utilizando a equação acima, o fator de remoção de calor F_R e a curva de eficiência, a Eq. (B1) pode ser calculada.

ANEXO C- Medição numérica da vazão mássica do óleo térmico no coletor plano

A medição numérica da vazão mássica do óleo térmico no coletor plano, ou seja, a relação do volume de óleo por unidade de tempo que circula na tubulação de cobre, foi feita utilizando o programa de computador FORTRAN 77.

A equação que se tomou por base para estruturar o programa foi a equação do Anexo B, (Eq. B3). Esta equação depende dos parâmetros: ρ (densidade do óleo), g(aceleração da gravidade), ΔX_E (comprimento do desnível entre a entrada e a saída do coletor), D (diâmetro da tubulação de cobre), μ (viscosidade média dinâmica do óleo) e ΔX_F (comprimento do percurso do fluido na tubulação de cobre).

Os dados de densidade, viscosidade e calor específico do óleo *Dowtherm A* foram adquiridos pela internet, em um site que disponibiliza estes dados em tabelas para diferentes temperaturas. Através destes dados foi utilizado o programa Excel para gerar funções com dependência da temperatura. Tendo as equações, estas foram adicionadas no programa para que fosse executado para o óleo *Dowtherm A*. A seguir são apresentados os gráficos de *densidade x temperatura*, *viscosidade x temperatura* e *calor específico x temperatura*.





Fonte: Próprio autor

Figura C.2- viscosidade x temperatura



Fonte: Próprio autor

Figura C.3- calor específico x temperatura



Fonte: Próprio autor

Todas estas equações foram colocadas como sub-rotina dentro do programa em FORTRAN. Para a execução e determinação da vazão mássica era necessário dar três valores que são variáveis: temperatura na entrada do coletor, temperatura na saída do coletor e a radiação global no instante de tempo em que as temperaturas de entrada e saída do coletor são as digitadas no programa. Com esses dados o programa exibia o resultado da vazão mássica de circulação do óleo na tubulação. Estes dados foram necessários para fazer o balanço de energia teórico do sistema de dessalinização, e estes resultados foram utilizados para calcular as eficiências globais e dos estágios.