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

RÉGIO DAVIS BARROS ALVES

SISTEMA DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA SOLAR PARA UMA TORRE DE DESSALINIZAÇÃO TÉRMICA COM RECUPERAÇÃO DE CALOR.

FORTALEZA 2009

RÉGIO DAVIS BARROS ALVES

SISTEMA DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA SOLAR PARA UMA TORRE DE DESSALINIZAÇÃO TÉRMICA COM RECUPERAÇÃO DE CALOR.

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: Profa. Dra. Maria Eugênia Vieira da Silva

RÉGIO DAVIS BARROS ALVES

SISTEMA DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA SOLAR PARA UMA TORRE DE DESSALINIZAÇÃO TÉRMICA COM RECUPERAÇÃO DE CALOR.

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 em Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Aprovada em ___/__/___.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Maria Eugenia Vieira da Silva (Orientadora) Universidade Federal do Ceará

> Prof. Dr. Antônio Sérgio Bezerra Sombra Universidade Federal do Ceará

> Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha Universidade Federal do Ceará

O anjo do Senhor acampa-se ao redor dos que o temem, e os livra. (Sl 34.7)

AGRADECIMENTOS

A Deus pelas bênçãos concedidas na vida.

À minha esposa, pelo amor, compreensão e paciência ao longo desse tempo.

Aos meus pais, pela maior riqueza que puderam me dar: A Educação.

Ao meu irmão pelo apoio e incentivo na jornada acadêmica.

À minha orientadora Maria Eugenia Vieira da Silva, por sua seriedade, competência e ao amor a pesquisa acadêmica.

Aos colegas Marcelo Ricardo Queiroz Medeiros, Lecimara Duque Estrada Coutinho, Elieneide Araújo, Frederico Pinheiro Rodrigues e Philipp Stukenbrock pela ajuda indispensável.

A funcionária Francisca Vieira pelas conversas diárias e conselhos.

Aos bolsistas, Paulo Eduardo Praciano, Ticiano Ribeiro, Kaio Hemerson Dutra, Francisco Elmo Uchoa Filho, David Oliveira Almeida e aos demais bolsistas do Laboratório de Energia Solar e Gás Natural, LESGN, que muito contribuíram no desenvolvimento do projeto experimental e de pesquisa.

Ao colega Carlito Teixeira pelo apoio na fabricação do suporte da caixa d`água de 1000L.

Ao técnico Bonfim, por sua disponibilidade para a fabricação de acessórios para o coletor solar na oficina mecânica do Laboratório de Energia Solar e Gás Natural.

À CAPES e à Petrobras, pela concessão de bolsa e de apoio financeiro.

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

RESUMO

Apresenta os resultados experimentais obtidos com um sistema de captação de energia solar fabricado para o aquecimento de uma torre térmica de dessalinização com recuperação de calor e com a modificação realizada na distribuição de água quente no tanque de armazenamento de calor da torre. O sistema de captação de energia solar é formado por coletores solares térmicos de placa plana para altas temperaturas e é responsável pela captação de radiação solar e pela conversão em energia térmica para o aquecimento da água a ser dessalinizada. A modificação realizada consiste na instalação de um tubo de aço inoxidável, no qual foram feitos furos passantes igualmente espaçados ao longo do seu comprimento, de forma a permitir uma melhor distribuição de água quente no tanque de armazenamento de calor. O dessalinizador é formado por duas unidades: Dois coletores solares de alto de desempenho e uma torre de dessalinização com sete estágios. Em seu funcionamento, a água é aquecida nos coletores solares e se movimenta para a base da torre (armazenamento). Na base da torre, a água transfere calor para a água salobra do primeiro estágio da torre. A água aquecida transfere calor por evaporação, convecção e radiação com o segundo estágio e parte de sua energia é perdida para o ambiente. O vapor d'água condensado nas paredes dos estágios é coletado em um reservatório, localizado abaixo da torre de dessalinização. O calor recebido pelo segundo estágio é utilizado para aquecer a água salobra e o processo de recuperação de calor se repete para os demais estágios. O dessalinizador apresentou desempenho térmico satisfatório. A temperatura no tanque de armazenamento alcançou valores próximos de 85°C e as temperaturas da água na saída dos coletores ficaram próximas a 100°C. A produção diária foi de 31 litros e o valor do GOR (razão de ganho na saída) foi de 1.54.

Palavras-Chaves: Coletor Solar, Dessalinização Solar, Recuperação de Calor.

ABSTRACT

This dissertation presents the experimental result of a system to absorb solar energy to heat up a desalination tower with heat recovery mechanism and a change made in the heated water distribution at the heat storage tank. The system to absorb solar energy consists of solar thermal flat plate collectors for high temperatures and it responsible for the conversion of solar radiation in thermal energy to heat up the water to be desalinated. The change made in the storage tank consists of the installation of a stainless steel pipe with holes equally spaced and arrangement to allow a better distribution of the hot water from the solar collectors in the heat storage tank. The desalination unit has two components: two high temperatures solar collectors and a desalination tower with six stages. In its operation, water is heated in the solar collectors and moves by natural convection to the storage tank, to the bottom of the tower. In the tank, the water transfers heat to the salty water in the first stage of the tower. This heated water transfer heat by evaporation, convection and radiation to the second stage and part of its energy is lost to the ambient. The condensed vapor on the walls of the stages flows down by gravity to be collected in a reservoir installed under the desalination tower. The heat received by the second stage is used to heat up the water in this stage and the process is repeated in all stages. The performance of the desalination unit was satisfactory. The temperature in the storage tank reached values near 85°C and the water temperatures at the outlet of the solar collector were near 100°C. The daily production was 31 liters of desalinated water and the GOR-value (gain output ratio) was 1,54.

Keywords: Solar thermal desalinization, heat recovery tower, desalinated water production.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Participação das Fontes Renováveis na Oferta Interna de Energia - BEN (2009). 13
Figura 2 – Desenho Esquemático do Dessalinizador Solar com Recuperação de Calor	14
Figura 3 – Desenho de um Coletor Solar Térmico de Placa Plana	30
Figura 4 – Aleta/Tubo do Coletor Solar	31
Figura 5 – Fotografia do Dessalinizador Solar com Recuperação de Calor	34
Figura 6 – Desenho Esquemático do Funcionamento do Dessalinizador Solar com	
Recuperação de Calor (Adaptado de Schwarzer et al., 2009)	36
Figura 7 – Coletor Solar Térmico em Fase de Fabricação	37
Figura 8 – Aleta Fabricada com Supefície Seletiva	38
Figura 9 – Fotografia do Refletor Plano para o eixo Leste-Oeste	39
Figura 10 – Fotografia do Tubo de Distribuição de Calor	40
Figura 11 – Fotografia do Coletor de Dados	41
Figura 12 – Gráfico das Temperaturas do dia 18 de setembro de 2008, das 08:30h às	
17:30h	45
Figura 13 – Gráfico das Temperaturas da ägua no período Noturno do dia 18 de setembro	e a
madrugada do dia seguinte	47

LISTA DE SÍMBOLOS

D	Distância / diâmetro [m]	
F′	Fator de eficiência da aleta	
F''	Fator de eficiência do coletor	
F_R	Fator de remoção de calor	
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m ² K]	
$\mathbf{h}_{\mathrm{evap}}$	Coeficiente de transferência de calor por evaporação [W/m ² K]	
$h_{\rm fi}$	Coeficiente de transferência de calor convectivo entre o fluido e o tubo [W/m2K]	
Κ	Condutividade térmica [W/m.K]	
$\dot{Q}_{\tt u}$	Taxa de energia útil produzida por um coletor [W]	
$\dot{\boldsymbol{Q}}_n$	Taxa de transferência de calor por condução [W]	
\dot{Q}_{conv}	Taxa de transferência de calor por convecção [W]	
\dot{Q}_{rad}	Taxa de transferência de calor por radiação [W]	
\dot{Q}_{cond}	Taxa de transferência de calor por condensação [W]	
\dot{Q}_{evap}	Taxa de transferência de calor por evaporação [W]	
$\boldsymbol{M}_{\text{cond}}$	Massa de condensado [kg]	
ṁ	Taxa de transferência de massa [kg/s]	
Ż	Taxa de transferência de calor [W]	
S	Radiação solar absorvida pelo coletor [W/m ²]	
T_p	Temperatura da placa absorvedora [°C]	
T _a	Temperatura ambiente [°C]	
T _e	Temperatura de entrada do coletor [°C]	
G_{T}	Radiação incidente no coletor [W/m ²]	
U	Coeficiente de perda de calor [W/m ² K]	
W	Espaçamento entre tubos [m]	

Área [m²]

Condutância da junção [W/m²K]

А

 C_{b}

Gregos

- *α* Absortividade
- ε Emissividade
- η Eficiência
- σ Constante de Stefan Boltzmann [5,67x10⁻⁸ W/m²K⁴]
- *τ* Transmitância
- Δ Diferença

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	FUNDAMENTOS DA DESSALINIZAÇÃO	16
2.1	Dessalinização Solar	16
2.1.1	Tanque	17
2.1.2	Torre	18
2.1.3	Osmose Reversa	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
4	FUNDAMENTOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA	24
4.1	Processos de Transferência de Calor e Massa	24
4.1.1	Condução	24
4.1.2	Convecção	25
4.1.3	Radiação	26
4.1.4	Evaporação	26
4.1.5	Condensação	27
4.1.6	Transferência Simultânea de Calor e de Massa	
4.2	Coletor Solar de Placa Plana	29
4.2.1	Balanço de Energia no Coletor Solar	
4.3	Eficiência da Torre de Dessalinização	
5	PROTÓTIPO EXPERIMENTAL	34
5.1	Dessalinizador Solar com Recuperação de Calor	34
5.2	Princípio de Funcionamento do Dessalinizador Solar	
6	MATERIAIS E FABRICAÇÃO	
6.1	Materiais e Fabricação de Coletores	
6.2	Tubo de Distribuição de Calor	40
6.3	Medições Experimentais	40
7	RESULTADOS	43
7.1	Resultados de Medições de Temperatura e Insolação	43

7.2	Produção de Água	.48
8	CONCLUSÃO	.49
REF	ERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	.50
ANE	XO A – Especificações Técnicas do Datalogger	.54
ANE	XO B – Composição Média do Aço AISI 304	.56

1. INTRODUÇÃO

O consumo de água potável no mundo cresce em ritmo superior ao crescimento da população. Uma possibilidade para suprir essa diferença no consumo é a dessalinização de água salobra ou salgada para torná-la apropriada ao consumo. Algumas cidades do interior do Estado do Ceará realizaram projetos de dessalinização usando a tecnologia de osmose reversa, com água oriunda de rios e lagoas. Infelizmente, na presente data, nenhuma dessas unidades móveis do Núcleo Tecnológico da Ceará (NUTEC) está em operação.

A utilização de fontes alternativas de energia, como a energia solar térmica, apresenta-se como vantajosa para o meio ambiente e uma opção econômica para viabilizar a dessalinização em regiões semi-áridas, visando principalmente o consumo humano, oferecendo melhores condições para a fixação do homem no meio rural.

O Brasil é bastante favorecido por concentrar fontes naturais de energias renováveis, porém o investimento ainda é muito pouco em relação ao potencial solar de sua geografia. A Figura 1 mostra a participação das fontes renováveis na oferta brasileira interna de energia.



Figura 1. Participação das fontes renováveis na oferta interna de energia - BEN (2009).

O dessalinizador solar com recuperação de calor possui dois componentes: Uma unidade de captação de energia solar e uma unidade de dessalinização. A unidade de captação de energia solar é responsável pelo aquecimento térmico do fluido de trabalho (água dessalinizada), que se desloca em circuito de sifão térmico para a unidade de dessalinização.

Essa unidade é formada por uma torre de dessalinização e por sistemas de alimentação e coleta de água dessalinizada.

A Figura 2 mostra um desenho esquemático do dessalinizador solar com recuperação de calor. Na parte superior da figura está a unidade de dessalinização, com a torre e seus estágios, com seis bandejas cada. Na parte inferior, está a unidade de captação de energia solar, formada por coletores planos de alta eficiência e refletores laterais (não mostrados na figura). As especificações das unidades do dessalinizador estão apresentadas no Capítulo de Materiais e Fabricação.



Figura 2. Desenho esquemático do dessalinizador solar com recuperação de calor.

Este trabalho teve como objetivos:

 a) A fabricação e a montagem de uma unidade de captação de energia solar para operar com uma torre de dessalinização com recuperação de calor, cuja capacidade de produção diária é de 30 litros de água dessalinizada. Essa unidade é composta de coletores planos de alta eficiência e de refletores laterais planos.

- b) O aperfeiçoamento do mecanismo de distribuição de calor no armazenamento (base da torre).
- c) A realização de medições experimentais e análise dosresultados.

2. FUNDAMENTOS DA DESSALINIZAÇÃO

Este Capítulo apresenta informações sobre os dois processos de dessalinização solar comumente encontrados: Dessalinização térmica e de osmose reversa.

A dessalinização é um processo de separação física que pode ser definido como forma integrante do tratamento da água salina ou salobra, através do qual ocorre a separação das moléculas de água das moléculas do sal. De acordo com o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) (Resolução nº 20 de 18 de junho de 1986) as águas se classificam em:

- Doces (Salinidade ≤ 0.5 ppt);
- Salobras (0,5 ppt < Salinidade < 30 ppt);
- Salinas (Salinidade \geq 30 ppt)

na qual ppt significa parte por trilhão.

Existem várias formas de dessalinização, mas o resultado final é sempre a produção de água potável, quando destinada ao consumo humano ou a produção de água desmineralizada, quando destinada para utilidades industriais, a partir da água salobra (geralmente proveniente de poços) ou da água salina (proveniente do mar).

A dessalinização ocorre por processos térmicos, onde o agente de separação é o calor (dessalinizador térmico), e por processos mecânicos, onde ocorre uma filtração a alta pressão (dessalinizador de osmose reversa).

2.1 Dessalinização Solar

A dessalinização solar é comumente realizada por dois processos: Térmico e mecânico. Na dessalinização térmica, o agente de separação é o calor, proveniente da radiação solar. A dessalinização por osmose reversa é caracterizada pela conversão da energia solar em corrente elétrica, que aciona bombas de alta pressão e pela utilização de membranas de filtração.

Na dessalinização solar térmica, o calor ou agente de separação é proveniente da radiação solar captada por coletores e/ou concentradores. A obtenção de água purificada é

baseada na evaporação do líquido por meio de aquecimento, sem necessariamente provocar sua ebulição. A vantagem desse processo está na não formação de bolhas, característica da ebulição, que durante a sua ruptura poderiam arrastar íons indesejáveis dos sais para o vapor a ser condensado.

De acordo com a sua forma de aquecimento, um dessalinizador solar pode ter acionamento direto, quando a radiação solar é usada diretamente para aquecer a água salgada, ou de aquecimento indireto, quando um fluido térmico transporta o calor absorvido em um coletor solar para a unidade de dessalinização.

Alguns tipos de equipamentos de dessalinização estão descritos a seguir:

2.1.1 <u>Tanque</u>:

Esse dessalinizador é conhecido por Dessalinizador Solar Convencional (DSC). De maneira geral, é composto por um tanque de alvenaria e uma coberta transparente. O tanque de alvenaria possui isolamento térmico nas paredes laterais e inferior. A face superior da parede horizontal é pintada de preto para uma melhor absorção da radiação solar transmitida através da coberta transparente. Existem também canaletas laterais, que conduzem a água dessalinizada para fora do tanque. Para aumentar a absorção e o armazenamento de calor, diferentes tipos de material de enchimento podem ser usados no tanque. Esses enchimentos podem ser: Tubos capilares, carvão, seixos (calha) e pavios. Os dessalinizadores de tanque podem ter um ou mais estágios, que possuem uma base estrutural de vidro ou plástico transparente para permitir a passagem da radiação solar.

A vantagem desse modelo está no seu baixo custo de instalação e manutenção. A maior desvantagem é a baixa eficiência e, portanto, a baixa taxa de destilado por m² de área de superfície de captação de energia solar. Outro fator importante é a dificuldade de coleta de destilado, que pode ser facilmente contaminado durante seu manuseio.

2.1.2 <u>Torre</u>:

Os dessalinizadores com acionamento indireto apresentam dois componentes: Uma torre de dessalinização e uma unidade de aquecimento. Nesse caso, um fluido térmico absorve calor na unidade de aquecimento ou coletor solar, e o transporta até a torre de dessalinização, onde transfere esse calor no processo de aquecimento da água salgada. Os dessalinizadores de torre são divididos conforme o posicionamento dos estágios em verticais paralelos e empilhados. Nos dessalinizadores de placas verticais paralelas, a torre de destilação é constituída de placas verticais posicionadas lado a lado. Nos dessalinizadores de bandejas empilhadas, o funcionamento se baseia nos princípios da troca indireta de calor através de um circuito formado pela unidade de aquecimento (coletor solar) e o trocador de calor (contido no primeiro estágio), e o sistema de recuperação de calor (empilhamento de bandejas), de forma a aumentar a produção de destilado por m² de coletor solar.

2.1.3 Osmose Reversa:

Dentre os equipamentos de dessalinização mecânica, encontra-se o dessalinizador de osmose reversa (OR), que utiliza uma membrana como agente separador. Esse equipamento é formado por um conjunto de bombas de alta pressão, uma fonte elétrica para o acionamento dessas bombas, filtros de cartucho que podem ser de carvão ativado, celulose, antracito e material desferrizante, conforme a necessidade de remover os elementos indesejáveis contidos na água salgada, e um conjunto de membranas semipermeáveis. Nesse dessalinizador, uma solução com grande concentração de sais e a uma elevada pressão é forçada contra a membrana semipermeável. Ao atravessar a membrana, a água perde a maior parte dos sais. As vantagens desse tipo de processo são as elevadas taxas de produção de água dessalinizada por hora e a boa qualidade da água produzida. As desvantagens são o alto custo de instalação e manutenção, e o pré-tratamento necessário quando a água bruta apresentar cloro, sílica, argila, ferro solúvel, manganês, odores, sabores desagradáveis, colóides, microorganismos (algas, bactérias e vírus). Esse pré-tratamento é feito com agentes desincrustantes, desinfetante e filtros de cartuchos, respectivamente, para evitar obstruções das membranas e eliminar as bactérias e o cloro. Quando a energia proveniente para o acionamento das bombas é oriunda de um arranjo de módulos fotovoltaicos, os custos de instalação são aumentados. Os módulos fotovoltaicos convertem a radiação solar diretamente em corrente elétrica, porém os mesmos apresentam baixo rendimento, que varia de 8 a 10%, e alto custo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A dessalinização é um tema que vem sendo estudado por muitos pesquisadores. Vários trabalhos apresentam revisões bibliográficas interessantes como Dunkle (1961) e Malik *et al.* (1982). Recentemente, dois trabalhos de revisão bibliográfica sobre o estado da arte em dessalinização foram apresentados por Rodrigues (2003) e Tsilingiris (2009). Esse segundo trabalho faz um estudo sobre o processo de transferência de massa e calor em dessalinizadores solares térmicos e, na busca de realizar ajustes nos coeficientes da equação para a determinação da taxa de produção diária de água dessalinizada, fez uma revisão bibliográfica dos dados experimentais dos vários artigos publicados na literatura. Como os trabalhos de Rodrigues (2003) e Tsilingiris (2009) são recentes, esta revisão apresenta os trabalhos mais relacionados ao dessalinizador térmico com recuperação de calor.

Embora seja conhecido que a radiação solar foi utilizada pelos antigos Egípcios para a produção de água dessalinizada, o primeiro dessalinizador solar mais significativo foi projetado pelo Sr. Charles Wilson, construído em *Las Salinas* no Chile em 1872 (dessalinizador de tanque).

Dunkle (1961) desenvolveu um destilador solar de múltiplo efeito para operação em baixas temperaturas, de 54°C a 71°C (no lado mais quente), o que tornava o processo mais viável, uma vez que a corrosão era mais lenta a baixas temperaturas. Os absorvedores solares eram mais eficientes quando operados nessas temperaturas, pois as perdas de calor do sistema eram reduzidas. Dunkle utilizou um gás diluente de baixo peso molecular (H_2) para acentuar a taxa de transferência de massa e reduzir também a corrosão do equipamento. O sistema foi montado de forma que o fluxo escoasse por gravidade ou por termo-sifão. Uma unidade de armazenamento de calor garantia o funcionamento contínuo do tanque. Com este sistema foi obtida uma melhor produção de água.

Cooper (1973) construiu alguns destiladores solares para estudar os fatores que determinam a eficiência do destilador solar de simples efeitos. Ele constatou a influência dos seguintes fatores: Inclinação da coberta de vidro, espessura da lâmina de água e tipo de isolamento das paredes do tanque. Em seus resultados, Cooper observou que a eficiência de um destilador solar ideal não ultrapassava 60% e a eficiência máxima de um destilador solar de tanque raramente excedia 50%.

Proctor (1973) desenvolveu um sistema experimental de destilação solar em Vitória (Austrália). O dessalinizador desenvolvido tinha área de 18,5 m² e era composto de um tanque de concreto isolado com placa de isopor. A água era reciclada no equipamento por bomba centrífuga com uma vazão de 20 g/min. O experimento apresentou resultados satisfatórios, uma vez que sua produção foi de 3 a 18 vezes maior do que os dessalinizadores convencionais.

Mota e Andrade (1985) projetaram um destilador solar para constatar o efeito da destilação solar sobre microrganismos patogênicos presentes na água, e as mudanças das características físico-químicas da água. Eles observaram que a destilação solar resultou no extermínio de microrganismos e na alteração dos parâmetros físico-químicos da água, tais como: Redução sensível na condutividade elétrica, diminuição da turbidez, redução da dureza, do teor de cloretos e da alcalinidade.

Fernández *et al.* (1990) construíram um destilador solar baseado no princípio do sistema de bandejas empilhadas para destilação e recuperação de calor. O calor era fornecido primeiramente para a bandeja mais baixa que continha água do mar e depois se difundia para as demais bandejas. A água evaporada no primeiro estágio aquecia os outros estágios e condensava no topo do destilador. Tanto o destilador solar convencional de tanque quanto o destilador solar de múltiplo efeito aquecido indiretamente dependiam da diferença de pressão parcial do vapor d'água. A produção total do destilado era maior do que o padrão usual de $4L/m^2$ dia de um destilador do tipo tanque.

Chendo *et al.* (1991) realizaram um estudo comparativo entre dessalinizadores de tanque usando vários tipos de enchimentos como: Pedra, carvão vegetal e tecido. A taxa de destilação no tanque aumentava na seguinte ordem: Carvão vegetal, tecido e pedras. O destilador solar com pedras apresentou produtividade máxima e, aproximadamente 4 horas após o pôr do sol, continuava produzindo água destilada. Esta produção noturna ocorria devido à alta capacidade calorífica de armazenamento de energia das pedras e à baixa temperatura ambiente, que contribuía para o aumento da taxa de condensação.

Porta *et al.* (1997) mostraram que a inércia térmica dos sistemas de dessalinização solar de tanque raso reside no tipo da coberta de vidro, na composição dos materiais utilizados no isolamento e na qualidade e quantidade de sais. A combinação destes fatores com as variáveis ambientais e com a radiação solar manteve a eficiência global do tanque. Esses autores observaram também que as condições climáticas influenciavam na variação da taxa de

produção em função das diferenças de temperatura, do coeficiente de transferência de calor, e da quantidade inicial de água salgada contida no tanque.

Jaguaribe e Barros (1998) mostraram através de um estudo teórico que o uso de meios porosos formados por blocos de tubos capilares de vidro, aflorando à superfície da água do tanque, poderia aumentar a produtividade do destilador de tanque. Apresentaram que ao se cobrir 33% de água do tanque com tubos capilares, a taxa média do incremento de produção ficaria em torno de 7,6% maior do que a produção do mesmo destilador sem tubos capilares (4 L/m².dia).

Hannich (2000) apresentou os resultados experimentais obtidos com o primeiro protótipo de um dessalinizador solar térmico com recuperação de calor. O sistema era composto por coletores solares e uma torre de dessalinização constituída de seis estágios. Foi apresentado um projeto de construção e fabricação da torre de dessalinização com bandejas empilhadas para a produção de água potável.

Lima (2000) deu seqüência ao trabalho experimental iniciado por Hannich, realizando também análises físico-químicas e bacteriológicas da água bruta e dessalinizada. Os resultados apresentados por Lima mostraram a eficiência do sistema no que se refere à eliminação por completa de microrganismos e a redução acentuada de sais. A eficiência experimental, encontrada com as medições realizadas, foi de 25%. Observou-se que a temperatura da água no primeiro estágio alcançou valores próximos de 80 °C.

Schwarzer *et al.* (2000) apresentaram as equações de balanço de energia e massa, os resultados de uma simulação numérica para a taxa de produção de água destilada, e testes experimentais do dessalinizador solar térmico com sistema de recuperação de calor. Os componentes do sistema eram um coletor solar e uma torre de dessalinização, com a possibilidade do sistema ser operado por outras fontes de energia. A torre tinha seis estágios e um sistema de circulação de água pelos estágios para evitar o acúmulo de sais. Na simulação numérica foram utilizados dados de radiação solar e temperatura ambiente e os resultados mostraram que a taxa teórica de produção poderia chegar a 25L/m².dia, o que representa uma produtividade cinco vezes maior do que aquela obtida com os dessalinizadores solares térmicos de tanque.

Vieira *et al.* (2001) desenvolveram um modelo numérico, baseado nos resultados experimentais obtidos com uma unidade de dessalinização térmica de simples estágio com controle de temperatura, para encontrar as correlações experimentais dos processos de evaporação e condensação. Através das equações de balanço de energia e massa, foram

determinadas correlações para o número de Colburn. As medições realizadas incluíam os valores das temperaturas de evaporação e condensação e a taxa de massa de água produzida pela unidade experimental.

Zhang *et al.* (2003) desenvolveram um sistema de dessalinização solar formado por um conjunto de 18 coletores solares de tubo evacuado (2 m² de área) e uma unidade de evaporação em película cadente. Nesse sistema uma considerável fração de calor latente e sensível era reaproveitada e utilizada no pré-aquecimento da água salgada da alimentação e na circulação do ar pela superfície de condensação e trocadores de calor. Verificaram que a circulação de ar no interior da unidade favorecia variações significantes na temperatura e na produção de vapor d'água. Os resultados obtidos mostraram uma produção três vezes maior do que aqueles conseguidos por um destilador solar de tanque, sob condições ambientais semelhantes.

Coutinho (2003) continuou os trabalhos de Lima (2000) testando um dessalinizador com uma torre de dessalinização de menor tamanho, com bandejas de 50 cm de largura e 100 cm de comprimento. O coletor plano utilizado era de média eficiência, com superfície seletiva na placa absorvedora e uma coberta transparente de vidro. Os resultados encontrados mostraram a eficiência da dessalinização na remoção acentuada de sais e na completa desinfecção das amostras de água contaminadas.

Schwarzer *et al.* (2009) aperfeiçoaram o sistema de dessalinização solar com recuperação de calor, com múltiplos estágios e uma bandeja por estágio, canais de material sintético para o escoamento de condensado e utilizaram coletores de tubo evacuado para a absorção de radiação solar. Os resultados obtidos mostraram uma produção de 15 a 18 L/m² por dia, que representa de 5 a 6 vezes maior que o dessalinizador tipo tanque.

4. FUNDAMENTOS DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA

Este Capítulo apresenta a fundamentação teórica dos processos de transferência de calor e massa, e a equação usada no estudo do desempenho de coletores de placa plana.

4.1 Processos de Transferência de Calor e Massa

Os três mecanismos de transferência de calor sem mudança de fase (Condução, Convecção e Radiação) e dois processos com mudança de fase (Evaporação e Condensação) têm sido estudados e amplamente divulgados em livros (Bird *et al.* (2002), Incropera (1998), Kreith (1977)) e artigos científicos. No dessalinizador solar, os processos sem mudança de fase ocorrem paralelamente, além da transferência simultânea de calor e massa nos processos de evaporação e condensação, que são mecanismos da convecção.

4.1.1 Condução

A transferência de calor por condução é caracterizada pela existência de um gradiente de temperatura em um determinado meio, que pode estar na fase sólida, líquida ou gasosa. A condução é um processo difusivo, no qual o calor flui da região de maior temperatura para a de menor temperatura. A relação para quantificar a taxa de transferência de calor por condução foi proposta em 1822 por *J. B. J. Fourier*, cientista francês. Essa relação estabelece que a taxa de calor transferido por condução é proporcional ao gradiente de temperatura entre dois pontos, à área da seção perpendicular à transferência de calor e à condutividade térmica, representada pela letra K como mostra a Equação (1).

$$\dot{Q}_{n} = -K.A.\frac{\partial T}{\partial n}$$
 (1)

na qual \dot{Q}_n é a taxa de transferência de calor por condução, A é a área da seção através da qual o calor flui por condução, n é a coordenada espacial e $\frac{\partial T}{\partial n}$ é o gradiente de temperatura na direção normal à área de transferência de calor.

4.1.2 Convecção

O mecanismo da transferência de calor por convecção é caracterizado pelo transporte de calor resultante de um processo difusivo, ou a condução de calor, e de um processo advectivo, ou o deslocamento macroscópico de uma corrente de fluido. Na maioria das aplicações práticas, a convecção é o mecanismo de transferência de energia dominante entre uma superfície sólida e um líquido ou um gás, em temperatura não muito elevada.

O deslocamento macroscópico da corrente de fluido pode ser devido à ação de uma bomba ou ventilador, chamado convecção forçada, ou devido à existência de uma diferença de temperatura em um campo gravitacional, chamado convecção natural. A convecção pode também ser classificada como unifásica, quando só ocorre aquecimento sensível da corrente de fluido, ou com mudança de fase, como ocorre nos processos de evaporação e condensação.

A taxa de calor transmitido entre uma superfície e um fluido, \dot{Q}_{conv} , pode ser expressa pela Equação (2)

$$Q_{conv} = h_{conv} . A. \Delta T$$
⁽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 de uma superfície e a temperatura da corrente de fluido.

4.1.3 Radiação

A transferência de calor por radiação ocorre através de ondas eletromagnéticas e se refere à energia radiante emitida pela matéria em virtude de sua temperatura ser maior do que zero Kelvin, ou zero absoluto. O mecanismo da emissão está relacionado à energia liberada em conseqüência das oscilações ou transições de muitos elétrons que constituem a matéria. Essas oscilações são sustentadas pela energia interna e, por isso, dependem da temperatura da matéria.

Um corpo negro é um corpo que emite e absorve a máxima quantidade possível de radiação em todos os comprimentos de onda e em todas as direções. A taxa de radiação térmica emitida por um corpo é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta desse corpo. A expressão para a taxa de transferência de calor por radiação (Lei de *Stefan-Boltzmann*) é expressa por

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

na qual \dot{Q}_{rad} é a taxa líquida de transferência de calor por radiação, σ a constante de *Stefan-Boltzmann* [σ =5,67 10⁻⁸ W/m²K⁴], A a área da superfície e T a temperatura do corpo.

Para um corpo real, a taxa líquida de radiação térmica emitida é expressa pela Equação (4).

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon.\sigma. A.T^4$$
 (4)

na qual ε é a emissividade da superfície.

4.1.4 Evaporação

O processo de evaporação de um fluido da fase líquida para a gasosa acontece devido à diferença de pressão entre a camada superficial do fluido (camada de saturação) e a

pressão do fluido na corrente livre. As moléculas do líquido, vizinhas à superficie, sofrem colisões que aumentam sua energia interna acima da necessária para superar a energia de ligação na superficie. A energia necessária para manter a evaporação provém da energia interna do líquido que não evapora e sofre, portanto, uma 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 pelas vizinhanças. A expressão para a taxa de transferência de calor por evaporação \dot{Q}_{evap} pode ser expressa por,

$$\dot{Q}_{evap} = h_{evap} A \Delta T$$
 (5)

na qual h_{evap} é o coeficiente de transferência de calor por evaporação, A a área de transferência de calor e ΔT 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.

4.1.5 Condensação

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 libertada e o calor é transferido para a superfície, formando-se o condensado. A relação para a taxa de transferência de calor por condensação é expressa por,

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

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

A transferência de massa ocorre simultaneamente à transferência de calor na evaporação, que representa o calor transferido na mudança da fase líquida para a gasosa. A taxa de transferência de massa, m, é calculada por,

$$\dot{m} = \frac{h_{evap} \ A \ \Delta T}{h_{fg}}$$
(7)

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

4.1.6 Transferência simultânea de calor e massa

Nos dessalinizadores térmicos de tanque, de simples ou múltiplos estágios com bandejas, com ou sem recuperação de calor, as equações que representam os processos de transferência de calor e massa são de difícil solução analítica tanto pelas diferentes variáveis termodinâmicas e termo-físicas, quanto pelas equações diferenciais não lineares e acopladas.

A transferência de massa é o processo de transferência de matéria de uma região de maior concentração para uma de menor concentração e representa o transporte molecular de átomos e moléculas em um sistema físico. A transferência de massa inclui o escoamento de fluido e a operação de separação unitária. A força motriz da transferência de massa é a diferença de concentração, o movimento randômico de moléculas causa uma transferência líquida de massa de uma zona de alta concentração para uma zona de baixa concentração. A quantidade de massa transferida pode ser quantificada através do coeficiente de transferência de massa. Há muitas similaridades entre os transportes moleculares de calor e massa. As equações de transporte de momento (Navier-Stokes), de calor de Fourier, e de massa de Fick são similares. Existem analogias entre os três fenômmenos de transportes. Assim, a taxa de transferência de pode ser quantificada como o produto entre o coeficiente de transferência de massa, a área de transferência e a diferença de concentração, de forma similar à Equação (6).

4.2 Coletor Solar de Placa Plana

Coletores de energia solar são trocadores de calor que absorvem a radiação solar e a transferem para um fluido na forma de calor. Para aumentar a incidência de radiação solar sobre o coletor, refletores de radiação são usados.

O coletor solar de placa plana é um equipamento que absorve a radiação solar incidente e a transfere, na forma de calor, para uma corrente de fluido em escoamento forçado ou natural. Os principais componentes de um coletor solar são:

- Placa Absorvedora. Uma placa plana de metal, pintada de preto na superfície exposta à radiação solar. Na face não exposta à radiação solar, estão fixados tubos nos quais escoa um fluido de trabalho. Adicionalmente, sobre a camada de tinta preta, uma superfície especial que diminui a emissão de radiação térmica pode ser usada (superfície seletiva). O calor absorvido na placa absorvedora é transferido por condução até as paredes internas dos tubos, sendo então transferido por convecção para o fluido. No caso do dessalinizador solar, o fluido de trabalho é um óleo sintético.
- Cobertas Transparentes. Duas cobertas transparentes, sendo uma de vidro e outra de plástico, que permite a transmissão da radiação solar de pequeno comprimento de onda e a reflexão da radiação térmica de maior comprimento de onda.
- **Isolamento.** Material isolante térmico a ser utilizado nas paredes laterais e inferior, reduzindo as perdas de calor por condução para o ambiente.
- **Suporte do Coletor.** Uma estrutura resistente, feita de madeira, para suporte dos componentes, servindo também como isolante térmico.



Figura 3. Desenho de um coletor solar térmico de placa plana (Adaptado de Klein, 1975).

4.2.1 Balanço de energia no coletor solar

O calculo básico para determinar a taxa de energia útil produzida \dot{Q}_u por um coletor de área A_c , por unidade de tempo, é dado pela diferença entre a radiação solar absorvida S e as perdas térmicas, conforme é representado pela Equação (8)

$$\dot{Q}_{u} = A_{c} \left[S - U_{L} (T_{P} - T_{a}) \right]$$
(8)

A radiação solar absorvida é calculada pela multiplicação da radiação solar incidente no plano do coletor pelo produto transmitância-absortância ($\tau \alpha$), U_L é o coeficiente global de perdas térmicas do coletor, T_P é a temperatura da placa absorvedora e T_a é a temperatura ambiente.

Fator de eficiência do coletor solar

Para obterem-se os ganhos de energia útil transferidos ao fluido são consideradas as resistências do fluxo deste, suas junções por solda e o contato da parede do tubo com ele. Neste sentido, calculam-se os fatores F['], na Equação (9), conhecido como o fator de

eficiência do coletor e definido como sendo a razão entre a taxa de calor útil real e a taxa de calor útil se o absorvedor estivesse na mesma temperatura do fluido, e F, na Equação (10), definido como a eficiência de uma aleta.

$$F' = \frac{1}{\frac{W.U_{L}}{\pi.D.h_{fi}} + \frac{W}{D + (W - D)F} + \frac{W.U_{L}}{C_{b}}}$$
(9)

na qual W, D, U_L , D_i , C_b e h_{fi} são, respectivamente, o espaçamento entre os centros dos tubos, o diâmetro externo da tubulação, o coeficiente global de perdas de calor, diâmetro interno do tubo, a condutância da solda (que é estimada pela condutividade de seu material, espessura e largura) e o coeficiente de transferência de calor convectivo entre o fluido e a parede do tubo.

Fator de eficiência para as aletas

O fator de eficiência das aletas é definido pela Equação (10)

$$F = \frac{\text{Tanh} \quad \frac{m(W - D)}{2}}{\frac{m(W - D)}{2}}$$
(10)

na qual W e D são, respectivamente, o espaçamento entre os centros dos tubos e o diâmetro externo da tubulação, como apresentado na Figura (4)



Figura 4. Aleta/tubo do Coletor Solar.

Com os fatores geométricos determinados, é conveniente expressar o ganho real de energia útil do coletor como sendo o ganho útil de energia se toda a superfície do coletor estivesse na temperatura do fluido. Essa relação é representada pelo fator de remoção de calor, $F_{\rm R}$.

Fator de remoção de calor

O fator de remoção de calor é calculado por,

$$F_{\rm R} = \frac{m C_{\rm P}}{A_{\rm C} U_{\rm L}} \left[1 - \exp\left(\frac{A_{\rm C} U_{\rm L} F'}{m C_{\rm P}}\right) \right]$$
(11)

Segundo Tiwari (2006), os valores numéricos de F_R são sempre inferiores aos de F[']. Entretanto, seus valores para coletores de boa qualidade estão geralmente entre 0,8 e 0,9.

A equação de Hottel-Whiller-Bliss (DUFFIE e BECKMAN, 1980) caracteriza o desempenho de um coletor plano e é utilizada tanto na literatura técnica quanto pelos fabricantes desses equipamentos. Ela é utilizada no cálculo da eficiência térmica e nas normas técnicas da Comunidade Européia e da ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers*), nos Estados Unidos.

$$\eta_{c} = \frac{Q_{U}}{A_{C}G_{T}} = F_{R}(\tau\alpha) - F_{R}U_{L}\left(\frac{T_{e} - T_{a}}{G_{T}}\right)$$
(12)

Nesta equação, T_e é a temperatura de entrada no coletor, T_a é a temperatura ambiente, G_T é a radiação incidente no plano inclinado do coletor, τ a transmissividade da coberta transparente, α a absortividade da placa absorvedora. O termo $F_R(\tau \alpha)$ representa a fração do ganho de energia do coletor e o termo $F_R U_L$ representa a fração de perdas para o meio ambiente.

4.3 Eficiência da torre de dessalinização

A eficiência global da torre de dessalinização é expressa com a razão entre a energia útil utilizada no processo de evaporação do condensado e a energia solar absorvida no coletor. Essa energia solar absorvida no coletor é determinada como o produto entre a eficiência térmica do coletor e a integral a taxa de radiação solar global incidente, integrada no período de incidência. A eficiência da torre é também expressa pelo valor do GOR (*gain output ratio*) para torres com recuperação de calor, visto que para torres mais eficientes, esse valor deve ser superior a um. O GOR é expresso por,

$$GOR = \frac{M_{con} h_{fg}}{\eta_c \int_{dia} \dot{Q}_c.dt}$$
(13)

na qual GOR é a razão de ganho de saída da torre, M_{con} é massa de condensado (água dessalinizada) produzida na torre de dessalinização, h_{fg} é o calor latente de vaporização e \dot{Q}_{c} é a energia útil do coletor solar.

5. PROTÓTIPO EXPERIMENTAL

Este Capítulo apresenta o dessalinizador solar com recuperação de calor, seu princípio de funcionamento e seus componentes.

5.1 Dessalinizador Solar com Recuperação de Calor

A Figura 5 mostra uma fotografia do dessalinizador solar com recuperação de calor instalado no Laboratório de Energia Solar e Gás Natural (LESGN) da Universidade Federal do Ceará (UFC). Nesta fotografia estão apresentadas as duas unidades principais do dessalinizador: A unidade de aquecimento (desenvolvida e fabricada no presente trabalho) e a unidade de dessalinização.



Figura 5. Fotografia do dessalinizador solar com recuperação de calor.

Essa unidade de aquecimento é formada por dois coletores solar de placa plana, com um refletor (de radiação direta) móvel na lateral do coletor, orientado para Leste ou para Oeste de acordo com o período do dia. A unidade de aquecimento é formada por dois coletores solares de placa plana com 2,3 m^2 de área cada, com um refletor plano móvel. O detalhamento dessa unidade está apresentado no Capítulo de Materiais e Fabricação.

A unidade de dessalinização é formada por uma torre de dessalinização e por um sistema manual de alimentação de água bruta e de coleta de condensado. A torre de dessalinização é constituída de sete estágios, e um armazenamento, localizado na base da mesma. A torre possui um isolamento lateral e inferior de lã de vidro, que tem por finalidade diminuir as perdas térmicas para o ambiente, tanto pelas paredes laterais quanto pela parte inferior da torre. Na parte superior da torre estão localizadas as mangueiras de alimentação da água nas bandejas. A ligação entre a unidade de aquecimento e a unidade de dessalinização é feita por uma tubulação na qual escoa um fluido térmico em convecção natural, que transporta o calor absorvido no coletor para a torre de dessalinização.

5.2 Princípio de Funcionamento do Dessalinizador Solar

A dessalinização da água é um processo de separação que consiste na evaporação das moléculas de H₂O da água bruta, seguida por um processo de condensação. A energia térmica para o processo de evaporação é o calor absorvido no coletor solar, que é transferido para a água da torre de dessalinização pelo escoamento do fluido em circuito de termossifão.

Em seu funcionamento (Figura 6), a água é aquecida nos coletores solares e se movimenta para a base da torre (armazenamento). Na base da torre, a água transfere calor para a água salobra do primeiro estágio da torre. A água aquecida transfere calor por evaporação, convecção e radiação com o segundo estágio e parte de sua energia é perdida para o ambiente. O vapor d'água condensado nas paredes dos estágios é coletado em um reservatório, localizado abaixo da torre de dessalinização.

O calor recebido pelo segundo estágio é utilizado para aquecer a água salobra e o processo de recuperação de calor se repete para os demais estágios.



Figura 6. Desenho esquemático do funcionamento do dessalinizador solar com recuperação de calor (Adaptado de Schwarzer *et al.*, 2009).

6. MATERIAIS E FABRICAÇÃO

Este Capítulo apresenta os materiais utilizados na fabricação da unidade de captação de energia solar (unidade de aquecimento), as melhorias realizadas visando a uma melhor distribuição de calor no tanque de armazenamento da torre (diretamente conectado aos coletores) e os trabalhos experimentais realizados.

6.1 Materiais e Fabricação dos Coletores

Os componentes do dessalinizador, exceto a torre de dessalinização, foram fabricados e montados no Laboratório de Energia Solar e Gás Natural e na oficina mecânica do próprio laboratório. Esses componentes são: Coletores solares, refletor plano e suportes,

tubo de distribuição de calor, suporte para o sistema de armazenamento de água salgada. Desses componentes, os coletores e o tubo de distribuição de calor estão apresentados a seguir. Os demais componentes são simples e foram fabricados por um serralheiro.

Fabricação dos Coletores Solares Planos

O coletor solar foi fabricado utilizando-se materiais de boa resistência mecânica e à exposição ao meio externo, observando também as propriedades térmicas desses materiais visando à diminuição das perdas de calor. A Figura 7 mostra um coletor em fase de fabricação: com as aletas e isolamentos já instalados; restando a instalação das cobertas transparentes e o suporte de alumínio.



Figura 7. Coletor solar térmico em fase de fabricação.

As atividades seguintes estão relacionadas por ordem de fabricação de cada coletor:

1. Corte da madeira (muiracatiara) – a estrutura de madeira tem por finalidade o suporte de todo o coletor. A madeira, adquirida em linhas de 2,50 m de

comprimento, 12 cm de largura e 2,5 cm de espessura é cortada nas dimensões finais externas do coletor, que são 2,40 m de comprimento, 12 cm de largura e 2,5 cm de espessura.

2. Fabricação das aletas – nesse processo, chapas finas de cobre, impregnadas com superfície seletiva, são soldadas por ultrassom aos tubos de cobre de $\frac{1}{2}$ " de diâmetro (canais de escoamento do coletor). A Figura 8 mostra uma fotografia das aletas já soldadas à tubulação de distribuição (entrada e saída do coletor). A superfície seletiva possui alta absorção solar e baixa emissão térmica, formada pela deposição física de óxido metálico em camadas, sobre faixas de cobre (características a 100°C : $\alpha = 0.95 \pm 0.02$ e $\varepsilon = 0.05 \pm 0.02$).



Figura 8. Aleta fabricada com superfície seletiva.

- União (brasagem) dos tubos aletados à tubulação de distribuição do coletor (entrada e saída de fluido no coletor).
- 4. Fixação de chapa de aço galvanizado na parte inferior do coletor para evitar infiltrações e a perda de calor.
- 5. Instalação do isolamento (lã de vidro, com 2,5 cm de espessura) flexível e rígido (de placa), que tem por finalidade diminuir as perdas térmicas para o ambiente. A lã de vidro possui condutividade térmica de 0,034 W/K.m

- 6. Instalação das aletas com os tubos de escoamento depois de unidas as aletas nos tubos de escoamento, eles são colocados dentro da caixa de madeira, a qual possui furos laterais passantes, onde os tubos de escoamento ficam apoiados.
- Fixação da primeira coberta transparente do coletor solar. Essa coberta é de plástico resistente à radiação solar e tem por finalidade diminuir as perdas por emissão de radiação térmica da placa absorvedora.
- 8. Soldagem do suporte de alumínio dos vidros para a fabricação deste suporte o processo de soldagem mais adequado foi a soldagem TIG. O suporte de alumínio tem por finalidade fixar a coberta de vidro (selagem por silicone). Este suporte é aparafusado na estrutura de madeira.
- 9. Instalação da segunda coberta do coletor solar, composta por dois vidros temperados com 1,20 m de comprimento, 1m de largura e 4 mm de espessura. Estes vidros possuem um recobrimento interno com película, com alto grau de transparência, fabricado de fluorpolímero, resistente às intempéries, aos raios ultravioleta (UV) e a temperaturas altas (150°C a 200°C). A transmissividade do vidro é de 0,90.

Na fabricação do refletor, foi utilizada uma chapa de aço inox espelhado de 2m de comprimento, 1m de largura e 1,2 mm de espessura, a qual foi fixada por rebites em uma estrutura de alumínio. Para os suportes do refletor foram realizadas dobras em chapas de aço inox, esses suportes foram aparafusados nas laterais do coletor solar. A Figura 9 mostra o refletor plano solar fabricado na oficina mecânica do Laboratório de Energia Solar e Gás Natural (LESGN).



Figura 9. Fotografia do refletor plano para o eixo Leste-Oeste

6.2 Tubo de Distribuição de Calor

Na fabricação do distribuidor de calor, foi utilizado um tubo de aço inoxidável (AISI 304), com 7/8" (22 cm) de diâmetro e 1,90m de comprimento. Foram feitos furos passantes ao longo desse tubo de aço inox, com 3/8" (9,5 mm) de diâmetro e espaçamento entre os furos de 10 cm. O distribuidor de calor no tanque de armazenamento da torre de dessalinização está apresentado na Figura 10.



Figura 10. Fotografia do tubo de distribuição de água no tanque de armazenamento (calor)

Na fabricação do suporte do sistema de armazenamento de água salgada (caixa d'água de 1000L), foi necessária uma estrutura bastante resistente, na qual foi utilizado *metalon* (aço carbono), com soldagem por eletrodo revestido. A coleta de condensado foi realizada com um vaso de plástico, limpo, com uma única abertura para evitar contaminação.

6.3 Medições Experimentais

O sistema de aquisição de dados é formado por instrumentos de medição de temperatura, radiação solar global, por um coletor de dados "Datalogger" e por um

microcomputador. A especificação técnica dos instrumentos (sensores) e do coletor de dados está apresentada no Anexo A. A Figura 11 mostra uma fotografia do coletor de dados e dos termopares (fios amarelos) provenientes do coletor e da torre de dessalinização.



Figura 11. Fotografia do Coletor de Dados

Esse coletor de dados possui 32 canais programáveis individualmente conforme o tipo de sensor e a faixa de operação desejada. Os canais foram programados com intervalo de tempo de leitura (varredura dos sensores) a cada 1 segundo e o intervalo de armazenamento de 1 minuto. A recepção dos dados experimentais (variáveis) foi feita por um microcomputador ligado ao coletor de dados por meio de uma porta serial RS – 232, a qual permite a transmissão dos dados através de um programa de controle.

Os termopares foram calibrados antes do início das medições. Os termopares usados foram do tipo K, com precisão de $\pm 0,4\%$. A calibração foi feita utilizando-se um meio termicamente estável (banho de gelo) e paralelamente a programação no coletor de dados. Após a calibração dos canais dos termopares, foi feita a programação do canal do sensor de radiação, o piranômetro. O piranômetro é um instrumento de precisão (< $\pm 0,5\%$) utilizado para medir a radiação solar global (valores medidos integrados para todos os comprimentos de onda) incidente numa superfície. Este instrumento foi instalado ao lado do coletor solar, com a mesma inclinação do coletor solar (12°) na direção Norte.

A massa de água produzida durante o dia foi medida em uma balança digital, com uma casa decimal.

Realização de Medições Experimentais

Na realização das medições experimentais, as seguintes etapas foram observadas:

- a) Alimentação da torre de dessalinização com água salgada;
- b) Verificação do nível da água salgada inserida na torre (dreno de sangria localizado abaixo da torre);
- c) Colocação do refletor móvel, posicionado no lado Oeste (pela manhã);
- d) Ativação do sistema de aquisição de dados;
- e) Ao meio-dia mudança da posição do refletor móvel (lado Leste);
- f) Verificação da quantidade de água dessalinizada produzida durante o período do dia.
- g) Verificação da quantidade de água dessalinizada produzida durante o período da noite.

A verificação da quantidade de água dessalinizada produzida durante o dia foi feita no período de 08:30h às 17:30h. A produção noturna é quantidade de água coletada na manhã do dia seguinte (08:30h).

7. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados das medições experimentais. Os gráficos resultantes das medições experimentais ao longo do dia mostram os valores das temperaturas da água nos estágios, do tanque de armazenamento e da radiação solar incidente no sistema de captação de energia.

7.1 Resultados de Medições de Temperatura e Insolação

Foram coletados dados experimentais de temperaturas, de radiação solar e de produção de água dessalinizada nos meses de setembro e outubro de 2008.

Os dados experimentais estão apresentados no gráfico da Figura 12. Nessa figura estão traçados os valores das temperaturas da água nos sete estágios da torre de dessalinização, do armazenamento (saída do trocador de calor), da temperatura ambiente e da radiação solar global incidente. Os dados foram lidos em intervalos de 1 segundo e armazenados em médias de 1 minuto. Os valores apresentados são para as horas diurnas (de insolação) e noturnas. No eixo vertical esquerdo, estão os valores para as temperaturas e no eixo vertical direito, encontram-se os valores para a radiação solar global no plano inclinado do coletor (12°), na direção Norte.

Como apresentada na Figura 12, a temperatura no primeiro estágio se manteve superior à temperatura do segundo estágio, caracterizando o fluxo ascendente de calor no período de insolação. Valores próximos a 85°C foram medidos no tanque de armazenamento e pequenas variações na intensidade de radiação solar (como às 10:15 horas) não influenciaram significativamente nos valores das temperaturas nos estágios devido ao armazenamento no material da torre (inércia térmica). Com o pôr do sol, a temperatura da água no primeiro estágio diminui mais rapidamente do que a da água no segundo estágio devido às perdas de calor para o ambiente externo, através do trocador de calor e do sistema de captação de energia.

Os valores máximo e mínimo de temperatura da água do armazenamento alcançados nesse dia foram, 83,2°C e 72,3 °C, respectivamente. Os valores de insolação

mantiveram-se em torno de 900 W/m² no período de 9:30 às 14:00 horas e a média diária foi de 927 W/m².



Figura 12. Gráfico das temperaturas nos estágios da torre (eixo vertical esquerdo) e da radiação solar (eixo vertical direito) durante o período de insolação do dia 18 de setembro de 2008.

A Figura 13 mostra o gráfico das mesmas variáveis para o período noturno do dia 18 de setembro e do dia seguinte. A influência das perdas de calor durante o período da noite pode ser observada através das variações de temperatura com o tempo. A temperatura do segundo estágio atinge um valor inferior à do terceiro estágio, caracterizando o fluxo de calor descendente. Os valores máximo e mínimo de temperatura do armazenamento durante esse período foram, 72,3 °C e 50 °C, respectivamente.



Figura 13. Gráfico da temperatura da água no período noturno do dia 18 de setembro e a madrugada do dia seguinte.

7.2 Produção de Água

A quantidade de água dessalinizada total coletada foi de 31 kg no dia 18 de setembro (Figuras 12 e 13). Sendo a produção diurna de 22,5 kg e a noturna de 8,5 kg.

Com a produção diária da torre, soma das produções diurna e noturna, e o valor da energia transferida para torre de dessalinização, o valor do GOR (*gain output ratio*) da torre de dessalinização ou a razão entre a energia térmica usada no processo de condensação da massa de água produzida e a energia transferida dos coletores solares para a torre foi de 1,54. Nesse cálculo, foi estimado o valor para a eficiência térmica do coletor de 0,40 (sem o uso de refletores).

A eficiência global do sistema foi calculada como a energia térmica usada no processo de condensação da massa de água produzida dividida pela radiação solar global instantânea incidente sobre os coletores solares, integrada para o período de insolação durante o experimento. O valor encontrado para o dia 18 de setembro de 2008 foi aproximadamente 0,62.

Devido à geometria das bandejas utilizadas, a quantidade de água produzida representa uma parte do condensado produzido nos estágios, ou seja, a água que é coletada na saída da torre. Parte do vapor de água evaporado nos estágios condensa nas paredes laterais e cai no tanque de armazenamento, onde será coletada, traduzindo-se em diminuição das perdas por reevaporação. Outra parte do vapor de água é perdida para o ambiente.

Nos processos de evaporação e condensação, responsáveis pela produção de água dessalinizada dentro da torre, são necessárias temperaturas elevadas na evaporação e baixas na condensação.

8. CONCLUSÃO

Observou-se que a temperatura da água salgada no primeiro estágio alcançou valores próximos a 85°C.

O valor da eficiência experimental global do dessalinizador foi de 0,62, e o valor do GOR da torre de dessalinização foi de 1,54, mostrando o satisfatório desempenho do equipamento.

A produção do sistema foi 31 litros, suficientes para o sustento de um grupo de 2 ou 3 famílias, de até 15 pessoas no total. Essa produtividade de 15 litros é superior à de um dessalinizador de tanque com a mesma área de coletor solar (4 l/m².dia), isto é, aproximadamente oito vezes a quantidade de água dessalinizada.

Por ser um equipamento robusto, de fácil e simples manutenção, de confiabilidade para os dias com médios e altos índices de radiação solar, de baixo custo operacional, o dessalinizador solar apresenta-se como uma opção na solução do problema da falta de água para consumo humano. Contudo, por ser um equipamento de boa qualidade, seu custo é elevado para as populações carentes, que necessitariam de apoio governamental para sua implantação através de projetos sociais.

O Nordeste brasileiro é dotado de condições climáticas favoráveis, especificamente, caracterizadas pelo alto índice de radiação solar e longos períodos de estiagem, e observando-se os resultados obtidos, o dessalinizador solar com recuperação de calor pode ser otimizado para utilização por populações mais carentes, diminuindo o problema social das comunidades que não têm água potável disponível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEN – **Balanço Energético Nacional 2009.** Ano base 2008: Resultados Preliminares. Rio de Janeiro: EPE 2009. 48p. Empresa de Pesquisa Energética. Brasil.

BIRD, R. B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOT, E.N. **Transport Phenomena.** 2 ed. USA: John Wiley & Sons, 2002.

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 Absorption of Solar radiation in solar stills.** Solar Energy, v. 12, n.3, Pergamon Press Ltd., 1969.

COUTINHO, L.D.E. **Protótipo experimental de um dessalinizador solar com recuperação de calor. Dissertação de Mestrado**, 2003.90p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – UFC, Fortaleza.

DUFFIE, J. A. & BECKMAN, W. A. Solar engineering of thermal process. John Wiley & Sons, 1980.

DUNKLE, R. V. Solar water distillation: The roof type still and a multiple effect diffusion still. Int. Devel. Heat Transfer, A.S.M.E., Part 5, p. 895-902, 1961.

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

GOMES, C. A. S. Estudo Comparativo de superfícies seletivas para coletores solares,
2001. 64p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – UFC, Fortaleza.

HANNICH, K.. Bau Vermessung und thermodynamiche Charakterisierung einer solarbetriebenen Mehrstufendistille mit Waermerueckgewinnung zur Trinkwasserversorgung, Diplomarbeit, FH Aachen, Deutschland, 2000.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 4 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.,1998.

JAGUARIBE, E. F.; BARROS, S. F. Aumento da produtividade de um dessalinizador solar convencional através do uso de tubos capilares. Anais do V Congresso de Engenharia Mecânica Norte e Nordeste, v.3, p. 25-32, Fortaleza, 1998.

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

LIMA, C. A. **Dessalinizador solar térmico com recuperação de calor – análise térmica e resultados experimentais**, 2000. 61p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Saneamento Ambiental) - UFC, Fortaleza

MALIK, M. A. S.; TIWARI, G. N.; KUMAR, A.; SODHA, M. S; Solar distillation - a practical study of a wide range of stills and their optimum desing, construction and performance. Pergamon Press, Great Britain, 1982..

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.

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

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

SCHWARZER, K; E. VIEIRA; B. HOFFSCHMIDT; T. SCHWARZER. A New solar desalination system with heat recovery for decentralised drinking water production. Edinburg. 2009.

SCHWARZER, K.; VIEIRA, M. E.; FARBER, C; Solar thermal desalination system with heat recovery. Euromed 2000, Jerbas, Tunisia, 2000.

TIWARI, G. N. Solar Energy Technology Advances, Nova Science Publishers, Inc., New York. 2006.

TSILINGIRIS, P. T. Analysis of the heat and mass transfer processes in solar stills – the validation of model. Solar Energy, v. 83, p. 320-431, 2009.

VIEIRA, M. E., SCHWARZER, K; ALVES, R. D. B.; CAMPOS, I. A.; VIEIRA, A.; Desempenho de um dessalinizador solar térmico com recuperação de calor e aquecimento direto. II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Regional Latino-Americana da ISES, Florianópolis. 2008.

VIEIRA, M. E., SCHWARZER, K., MUELLER, C.; FABER, C. Mass transfer correlation coefficients for an evaporation-condesation unit. Congresso Latino Americano de Transferência de Calor y Matéria. Anais do LATCYM2001, México, 2001.

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

ANEXOS

ANEXO A – Especificação Técnica do Equipamento e dos Sensores Utilizados

A1. Coletor de Dados

O Coletor de dados ("Datalogger") tem por finalidade possibilitar a leitura dos sensores e o armazenamento dos valores medidos para serem posteriormente transferidos a um computador, por meio de um cabo serial RS-232. Esse equipamento possui 32 canais programáveis individualmente conforme o tipo de sensor e a faixa de operação desejada. O coletor de dados possui as seguintes características:

- Fabricante: OMEGA
- Modelo: OM 472
- Numero de Canais Programados: 32

A2. Termopar – Sensor de Temperatura

Um termopar é um sensor específico para medir temperatura. Esse sensor é constituído por dois fios de metais distintos unidos, formando uma junção numa das extremidades, que fica em contato com a fonte de calor. O seu funcionamento baseia-se no princípio descoberto por Thomas Seebeck (1821), onde pequenas diferenças de temperatura entre dois metais gera uma micro-voltagem, linearmente proporcional a essa diferença. Essa micro-voltagem é determinada pela expressão,

$$\Delta e_{AB} = \beta \cdot \Delta T \tag{14}$$

na qual a constante de proporcionalidade β representa o coeficiente Seebeck e os subscritos A e B representam os metais distintos constituintes do fio. O termopar utilizado neste trabalho possui as seguintes características:

• Fabricante: LEBOC

• Tipo: Termopar tipo K (par metálico: Níquel-Cromo), bitola 2 x 24 AWG, isolamento do fio de silicone (faixa de operação -15°C - 250 °C)

- Precisão: $\pm 0,4\%$
- Quantidade: 9

A3. Piranômetro - Sensor de Radiação

O piranômetro é um instrumento utilizado para medir a radiação solar global (valores medidos integrados para todos os comprimentos de onda) incidente numa superfície. O piranômetro consiste de um sensor termopar, um encapsulamento (proteção mecânica), sílica gel, uma cúpula e um cabo. O termopar é coberto por uma camada especial preta. Essa camada absorve o fluxo radioativo solar, e converte em calor. A energia resultante que flui é convertida em corrente que circula no termopar que, estando em paralelo com uma resistência, gera uma microvoltagem. A função da sílica gel é absorver o vapor d'água contido no ar (proteção contra umidade). As características do piranômetro utilizado são:

- Fabricante: KIPP & ZONEN
- Modelo: CM 11
- Precisão: < ±0,5%

ANEXO B - Composição Média do Aço AISI 304

A composição média do tubo de aço inoxidável, usado na fabricação do distribuidor de calor no armazenamento da torre de dessalinização, está representada na Tabela B.

	cia D - uc Composição media do Aço mox A151 50		
	Composição	(%)	
-	С	0,08	
-	Mn	2,00	
-	Si	1,00	
-	Cr	18,0 - 20,0	
-	Ni	8,0-10,5	
-	Р	0,045	
-	S	0,03	

Tabela B - de Composição média do Aco inox AISI 304