UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E DE PRODUÇÃO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FREDERICO PINHEIRO RODRIGUES

DESEMPENHO DE UMA TORRE DE RECUPERAÇÃO DE CALOR COM CANAIS SINTÉTICOS DE POLIURETANO PARA UM DESSALINIZADOR SOLAR TÉRMICO

FORTALEZA
2010

FREDERICO PINHEIRO RODRIGUES

DESEMPENHO DE UMA TORRE DE RECUPERAÇÃO DE CALOR COM CANAIS SINTÉTICOS DE POLIURETANO PARA UM DESSALINIZADOR SOLAR TÉRMICO

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

FORTALEZA

2010

FREDERICO PINHEIRO RODRIGUES

DESEMPENHO DE UMA TORRE DE RECUPERAÇÃO DE CALOR COM CANAIS SINTÉTICOS DE POLIURETANO PARA UM DESSALINIZADOR SOLAR TÉRMICO

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.

Aprovada em ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

_____

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

_____

Prof. Dr. Antonio Sérgio Bezerra Sombra
Universidade Federal do Ceará

_____

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

À minha família, meu pai, minha mãe e meu irmão que sempre me apoiaram, moldaram meu caráter e me fizeram a pessoa que sou hoje.

AGRADECIMENTOS

A Deus e toda minha família, pelo apoio e ensinamentos.

À professora Maria Eugenia Vieira da Silva, por sua dedicação, preocupação e competência a frente do LESGN.

À Lecimara Duque Estrada Coutinho, Marcelo Ricardo Queiroz Medeiros, Régio Davis Barros Alves, Maria Elieneide, Erilson Barbosa e Dona Francisca, pessoas que trabalharam ou trabalham no LESGN.

Aos alunos da gradução Kaio Hemerson, Talita Xavier, Paulo Praciano, Francisco Elmo, Júlio Cezar, Saulo Teles, Akio e todos os demais que já passaram um período junto à equipe do LESGN, e que muito contribuíram no desenvolvimento deste trabalho.

Ao técnico Bonfim, e toda a equipe da oficina mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção.

Ao Laboratório de química da UFC, pela contribuição e apoio.

Aos alunos da Alemanha que compartilharam experiências e conhecimento.

À CAPES, FUNCAP, CNPq e PETROBRAS, pela concessão de bolsa e apoio financeiro.

Aos professores do programa de pós graduação Nivaldo, Paulo e todos os demais que de várias formas contribuíram com o trabalho.

A todos os demais, que porventura não estejam citados aqui e que contribuíram de forma direta ou indireta para a concretização deste trabalho.

RESUMO

Diante da crescente escassez de água potável em várias regiões semi-áridas, e a necessidade de avanço na utilização de fontes de energias renováveis, o presente trabalho apresenta o estudo do desempenho de uma torre de recuperação de calor para operar com um dessalinizador solar que possa ser utilizado para a produção descentralizada de água potável. O dessalinizador solar estudado possui duas unidades básicas: a unidade de aquecimento e a unidade de dessalinização. O trabalho apresenta os resultados alcançados com uma torre de recuperação de calor com canais sintéticos de poliuretano. A operação da torre consiste no aquecimento e evaporação de água salobra armazenada em um estágio inferior, que condensa na parte inferior da bandeja do estágio acima. O condensado escoa para uma calha lateral de onde é coletado, enquanto a água armazenada na bandeja é aquecida devido aos processos de transferência de calor, pricipalmente ao processo de condensação. O processo de evaporação, condensação e aquecimento de água se repete entre as bandejas contidas nos estágios da torre de recuperação de calor, em um total de cinco estágios. Os resultados apresentam ainda os coeficientes de uma correlação para o número de Sherwood, desenvolvida a partir de uma unidade de dessalinização de laboratório, operando em temperaturas controladas, para ser usada como modelo de referência na determinação do desempenho de torres de recuperação de calor. O dessalinizador está em funcionamento e a torre de recuperação de calor apresentou bons resultados alcançando uma produção de 35 litros de água dessalinizada por dia. Os resultados da produção por estágio e dos perfis de temperatura do dessalinizador estão apresentados na forma de gráficos. Os parâmetros de desempenho foram calculados e alcançados os valores de 1,26, para o GOR do dessalinizador e 4,78 para o COP. A correlação para o número de Sherwood foi desenvolvida e foram comparados os valores experimentais com os valores obtidos pela correlação.

Palavras-Chaves: Dessalinização, Energias Renóvaveis, Solar.

ABSTRACT

Because of the lack of drinkable water in various semi-arid regions and the necessary use of renewable energies, the present work presents a performance study of a heat recovery tower to operate in a solar desalination unit for decentralized water production. The solar desalination unit has two parts: a heating unit and a desalination unit.This work presents the field results with a desalination tower with synthetic (polyurethane) flow channels. The tower operation consists of the heating of salty water, the evaporation of desalinated water vapor in the lower stage, and the vapor condensation on the above stage. The condensate flows to a lateral channel to be collected, while the salty water in the trays is heated by the heat transfer processes, particularly the condensation from the tray below. The heating, evaporation, and condensation processes are repeated among the trays in a heat recovery mechanism. The results also show the correlation parameters for the Sherwood number, developed using the experimental data gathered in a temperature controlled laboratory desalination unit. This correlation was used as a reference in the study of heat recovery towers. The solar dealination system is working properly and showed a daily production of 35 liters. The results present the production per stage and the temperature profiles, in graphical form. For the performance parameters, a GOR value of 1,26 and a COP value of 4,78 were measured. The Sherwood correlation was used to compare experimental and simulated values.

Keywords: Dessalination, Renewable Energies, Solar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cubos de energia representando, em seu tamanho proporcional, quatidades de energias disponíveis, Adaptado de (QUASCHNING, 2005) 14
Figura 2 – Disponibilidade e distribuição de água no planeta, (CAENF, 2009) 15
Figura 3 – Princípio de Funcionamento MSF, adaptado de (SIDEM, 2009) 23
Figura 4 – Princípio de Funcionamento MED, adaptado de (UNEP, 2009) 24
Figura 5 – Princípio de Funcionamento HD, Adaptado (GAO *et al*, 2008) 25
Figura 6 – Princípio de Funcionamento de dessalinização por congelamento, adaptado de (UNEP, 2009) 26
Figura 7 – Princípio de Funcionamento de dessalinização por osmose reversa RO, adaptado de (PUREPRO, 2009) 27
Figura 8 – Princípio de Funcionamento ED, adaptado de (UNEP, 2009) 28
Figura 9 – Princípio de Funcionamento DS, disponível em (UNEP, 2009) 29
Figura 10 – Fotografia do dessalinizador solar com recuperação de calor, terceiro protótipo, (ALVES, 2009) 30
Figura 11 – Piranômetro de radiação global 31
Figura 12 – Piroheliômetro 31
Figura.13 – Corte lateral em uma aleta, adaptado de (ANDERSON, 1983) 34
Figura 14 – Corte lateral em um tubo, adaptado de (ANDERSON, 1983) 35
Figura 15 – Pressão de vapor da água e concentração de massa de água no ar saturado à pressão P=1,013 bar, adaptado de (KAYS, 1980) 40
Figura 16 – Unidade de Aquecimento formada por 25 coletores de tubo evacuado 43
Figura 17 – Unidade de Dessalinização com cinco estágios 43
Figura 18 – Perfil de Poliuretano 45
Figura 19 – Bandeja de aço inox utilizada nos estágios 45
Figura 20 – Foto do dessalinizador solar com recuperação de calor 46
Figura 21 – Fotografia do coletor de dados e termopares 48
Figura 22 – Fotografia da coleta de condensado por estágio 49
Figura 23 – Instrumento para medição do volume 49
Figura 24 – Bancada de medição de salinidade 50
Figura 25 – Sistema de dessalinização de único estágio 52
Figura 26 – Produção de 35 litros no periodo de 24 horas do dia 01/09/2009. 54

Figura 27 – Perfis de temperatura e radiação do sistema no dia 01/09/2009. As variáveis T0, T1, T2, T3, T4 e T5 indicam respectivamente as temperaturas no armazenamento, 1º estágio, 2º estágio, 3º estágio, 4º estágio e 5º estágio, Amb a temperatura ambiente e Rad a radiação global no plano do coletor 57
Figura 28 – Gráfico comparativo entre os valores experimentais e teóricos para o número de Sherwood 60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coletores cujo fluido de trabalho é líquido, tal como a água, mistura de água anti-congelante ou alguns tipos de óleos, adaptado de (ANDERSON, 1983) 33
Tabela 2 – Coletores planos cujo fluido de trabalho é necessariamente o ar, adaptado de (ANDERSON, 1983) 33
Tabela 3 – Custos para fabricação de uma torre de dessalinização com 7 estágios. 47
Tabela 4 – Produção total dos estágios no dia 01/09/2009. 54
Tabela 5 – Histórico de Produção do Dessalinizador. 55
Tabela 6 – Testes de condutividade, valores em μS/cm² 58

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área [m^2]
C_a	Capacidade Térmica [W/m^2K]
COP	Coeficiente de desempenho
c_p	Calor específico [J/kgºC]
D	Distância/Diâmetro [m]
$\mathcal{D}_{AB}$	Coeficiente de difusão binária [m²/s]
F'	Fator de eficiência da aleta
F_R	Fator de remoção de calor
g	Gravidade [m²/s]
GOR	Razão de ganho de saída
G_T	Irradiação total [W]
$\bar{h}$	Coeficiente de transferência de calor [W/m^2K]
$\bar{h}_m$	Coeficiente de transferência de massa [m/s]
h_{fg}	Calor Latente de vaporização [kJ/kg]
I	Taxa de radiação [W]
$\dot{J}$	Fluxo de massa [$kg/s \cdot m^2$]
k	Condutividade Térmica [W/m^2K]
L	Comprimento característico [m]
m_A	Fração mássica da espécie
m	Massa [kg]
Q	Calor [kJ]
$\dot{Q}$	Taxa de transferência de calor [W]
T	Temperatura [ºC]
u_∞	Velocidade de correte livre
U	Coeficiente de perda de calor [W/m^2K]
W	Espaçamento entre tubos [m]
X	Comprimento Linear [m]

Gregos

α	Absortividade / difusividade térmica
β	Coeficiente de expanção térmica
ε	Emissividade
μ	Viscosidade dinâmica
ν	Viscosidade cinemática
η	Eficiência
ρ	Massa específica [kg/m³]
σ	Constante de Stefan Boltzmann [W/m^2K^4]
τ	Transmissividade

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....
LISTA DE TABELAS .....
LISTA DE SÍMBOLOS .....
1. INTRODUÇÃO 14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 18
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 22
3.1. Principais Tipos de Tecnologias de Dessalinização.....22
3.1.1 Destilação Flash de Múltiplos Estágios (*Multistage flash* - MSF). 23
3.1.2 Destilação de Múltiplos Efeitos (*Multieffect distillation*- MED).....23
3.1.3 Destilação por Umidificação e Desumidificação (*Humidification-dehumidification* - HD).....24
3.1.5 Congelamento (*Freezing)*.....25
3.1.6 Osmose Reversa (*Reverse Osmosis* - RO) 26
3.1.7 Eletrodiálise (*Electrodialysis* – ED) 27
3.1.4 Destilação Solar Térmica 28
3.2. Radiação Solar 30
3.3. Coletores Solares Térmicos.....32
3.3.1 Coletor de Placa Plana 32
3.3.2 Coletor de Tubo Evacuado.....35
3.4. Transferência de Calor e Massa 36
3.4.1 Condução de Calor.....36
3.4.2 Difusão de Massa 36
3.4.3 Convecção de Calor 37
3.4.4 Convecção de Massa 38
3.4.5 Evaporação.....39
3.4.6 Condensação 40
3.4.7 Radiação Térmica.....41
4 MATERIAIS E MÉTODOS 42
4.1 Componentes do Dessalinizador.....42
4.1.1 Unidade de Aquecimento.....42
4.1.2 Unidade de Dessalinização 43

4.2 Mediçoes Experimentais 47
4.3 Medições de Salinidade 50
4.4 Desempenho do Dessalinizador 51
4.5 Modelo de Referência do Desempenho 51
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 53
5.1 Desempenho da Unidade de Aquecimento 53
5.2 Desempenho da Unidade de Dessalinização 53
5.3 Operação da Torre – Temperatura nos Estágios 55
5.4 Testes de Salinidade da Água 58
5.5 Modelo de Referência Para o Desempenho 59
6 CONCLUSÕES 61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 62
ANEXO A – Código fonte do programa utilizado para gerar os valores das constantes A, B e C do modelo de correlação para o número de Sherwood. 67
ANEXO B – Resultados apresentados pelo programa estatístico SAS para a obtenção dos valores das constantes A, B, e C do modelo de correlação para o número de Sherwood. 68
ANEXO C – Exemplo do diagrama de blocos utilizado no programa do coletor de dados, para as medições na torre de dessalinização com recuperação de calor.. 69

1 INTRODUÇÃO

A Energia Solar é responsável pela origem de praticamente todas as fontes de energias, contudo a sua utilização de forma mais direta é ainda um grande desafio a ser vencido pela humanidade. Atualmente, o homem tem procurado fontes energéticas renováveis, pois com o esgotamento das reservas de combustíveis fosseis e devido às mudanças climáticas ocasionadas pela poluição atmosférica, crescem, a cada dia, a preocupação e a conscientização da população para o estudo de uma melhor utilização da energia solar.

No Brasil, grande parte da energia elétrica é gerada por usinas hidrelétricas, que causam impacto ambiental, devido ao alagamento de vastas áreas para a construção de represas. No mundo, grande parte da energia elétrica é gerada pela queima de combustíveis fósseis, o que causa chuva ácida, efeito estufa e outras formas de poluição que são uma grande preocupação mundial.

A Terra recebe anualmente $1{,}08 \times 10^{18}$ kWh de energia solar, o que corresponde a milhares de vezes o consumo mundial neste período. Essa energia pode ser aproveitada na forma de energia fotovoltaica e energia solar térmica que são meios de aproveitamento de energia não poluentes, diferentemente da grande maioria das fontes de energia que poluem e prejudicam o planeta. A Figura 1 ilustra os valores de reservas de energia no planeta, (QUASCHNING, 2005).

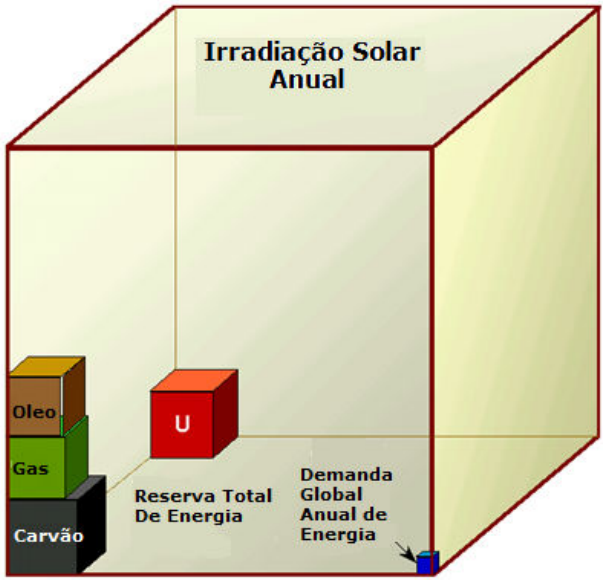


Figura 1 - Cubos de energia representando, em seu tamanho proporcional, quatidades de energias disponíveis, Adaptado de (QUASCHNING, 2005).

No caso da energia solar térmica a radiação solar é absorvida por coletores ou refletida por superfícies espelhadas para ser absorvida e transformada em calor que é transmitido a um fluido (líquido ou gasoso). Os coletores são classificados em coletores planos e coletores concentradores. Os coletores planos vêm sendo largamente utilizados para aquecimento de água em residências, hotéis, hospitais entre outros.

O processo de dessalinização é bem antigo e mesmo os gregos e romanos já dispunham de técnicas primitivas para dessalinizar a água. No século XVI a dessalinização de água já possuía certa importância em embarcações e a partir do século XVIII, final dos anos 1940 e início de 1950, a dessalinização desempenhou papel importante no abastecimento de estabelecimentos militares durante a segunda guerra mundial. Os processos de membranas começaram a surgir nos anos 70 e nos anos 80 os processos de dessalinização tornaram-se totalmente comerciais. (DELYANNIS, 2003).

Conforme mostra a Figura 2, o planeta terra possui 2,5% de água doce e 97,5% de água salgada. Dos 2,5% de água doce; 79,16% estão nas geleiras, ou seja, indisponíveis; 20,56% nos aquíferos; 0,04% na atmosfera e 0,24% nos rios e lagos, que são as fontes mais utilizadas. (CAENF, 2009).

Figura 2 - Disponibilidade e distribuição de água no planeta, (CAENF, 2009).

Torna-se cada vez maior a preocupação de diversos países e pesquisadores com o desenvolvimento sustentável, com a diminuição das emissões de carbono para a atmosfera, ocasionada pela queima de combustíveis fósseis, com a utilização de novas fontes de energias e com a escassez de água potável, o que possa vir a ser a causa de diversos conflitos futuros.

No nordeste brasileiro ainda é bastante elevado o número de pessoas sem acesso a água potável. Entre as possíveis soluções para este problema estão: a barragem de rios para a construção de açudes e a perfuração de poços para exploração de águas existentes no subsolo. Contudo estas duas soluções apresentam um problema quando se trata da salinidade da água. Muitos poços depois de perfurados são impróprios para o consumo devido ao alto grau de salinidade da água e mesmo os açudes, com o passar dos anos, vão aumentando a sua salinidade devido ao processo de evaporação da água e consequentemente ao acúmulo de sais no interior do açude. Esse processo pode elevar o nível de salinidade dos açudes além do adequado para o consumo humano, fato este já verificado em diversas localidades do interior do nordeste brasileiro.

Tendo em vista que a demanda de água potável vem aumentando com o crescimento da população, urbanização e industrialização, se faz necessário tratar a água salgada para torná-la potável. O Sistema de Dessalinização Solar Térmica com recuperação de calor é uma forma prática de se atingir esse objetivo e faz uso de uma fonte de energia renovável e ecologicamente correta, a energia solar. Estes dois fatores, o avanço no estudo e aplicação das energias renováveis e a solução do problema de água potável que atinge diversas regiões do globo, são as motivações para a realização desta pesquisa. Esse sistema vem sendo estudado e aprimorado no laboratório de energia solar e gás natural, LESGN, na Universidade Federal do Ceará desde 2000, com os trabalhos realizados por (ALVES, 2009; COUTINHO, 2003; LIMA, 2000).

A motivação deste trabalho é a utilização da energia solar térmica como fonte energética para a produção de água potável, a partir de água salina ou salobra que seria coletada de poços, açudes e do mar. O alto nível de radiação solar no Brasil e o uso de uma fonte renovável de energia servem como justificativas para investimentos em pesquisa e desenvolvimento tecnológico em dessalinização a partir de energia solar térmica, principalmente porque o evento da escassez de água, em geral, corresponde com um período de grande incidência de radiação solar.

O presente trabalho tem como objetivos principais: Utilizar um sistema de captação de energia com coletores de tubo evacuado para operar com uma torre de dessalinização que possui canais de escoamento de poliuretano, aperfeiçoar, testar e estudar o desempenho teórico e experimental dessa torre de dessalinização solar com recuperação de calor.

As metas específicas para a realização do trabalho são:

- Aumentar a produção de água tratada do dessalinizador.
- Realizar medições experimentais de temperatura, radiação e massa de condensado.
- Analisar os gráficos de radiação, temperaturas e produção de massa.
- Desenvolver uma correlação para o número de Sherwood, em um sistema de um único estágio com temperaturas de evaporação e condensação controladas, com o auxílio de um software de análises estatísticas (SAS).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A busca pelo conhecimento da melhor forma de utilização da energia solar tem sido alvo de pesquisa de diversas civilizações tais com Egipcios, Gregos, Incas e pela atual comunidade científica. A necessidade de tratamento da água também é um problema que convive com a humanidade a bastante tempo, existem citações bíblicas e de filósofos gregos que relatam eventos de necessidade e de tratamento de água.

A quantidade de trabalhos disponíveis na literatura é vasta e somente alguns dos trabalhos mais relacionados ao nosso tema seram apresentados a seguir.

Löf *et al.* (1961) formularam as relações de transferência de massa e energia para determinar a performace de um destilador solar de tanque em regime permanente. A produtividade do destilador era função da temperatura ambiente, da velocidade do vento, da inclinação da coberta transparente de vidro e da quantidade de radiação solar incidente. Os resultados de cálculo mostraram que a taxa de destilado era tão maior quanto maior fosse a diferença entre as temperaturas do vidro e da água salobra no tanque. A taxa de destilação era maior com o aumento da radiação solar e da temperatura ambiente. A produtividade e a temperatura ambiente da água salobra aumentavam com a diminuição da velocidade do vento, da reflexibilidade do sistema e da taxa de re-evaporação.

Dunkle (1961) desenvolveu um destilador solar de múltiplo efeito para operação em baixas temperaturas, de 54ºC a 71ºC (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 considerados mais eficientes quando operados nessas temperaturas, pois as perdas de calor do sistema eram reduzidas. Dunkle utilizou um gás inerte 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 termossifão. Uma unidade de armazenamento de calor garantia o funcionamento contínuo do tanque. Com este sistema foi obtida uma produção de água superior ao padrão de produção de 4L/m²·dia.

Cooper (1973) construiu alguns destiladores solares para estudar os fatores que determinam a eficiência do destilador solar de simples efeito. 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 concluiu 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 m^2 e era composto de um tanque de concreto isolado com placas de isopor. A água era reciclada no equipamento por bomba centrífuga com capacidade de 20 g/min. O experimento apresentou resultados satisfatórios, uma vez que sua produção foi em média 10 vezes maior do que os dessalinizadores convencionais.

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/m² dia de um destilador do tipo tanque.

Adhikari *et al.* (1995) apresentaram um estudo teórico e desenvolveram um sistema de três estágios para analisar o aumento da produção de água dessalinizada com o aumento do número de estágios num dessalinizador com recuperação de calor. Ele concluiu que para sistemas com números de estágios superiores a oito não ocorre um ganho significativo na produção do destilado bem como no valor da razão de ganho de saída da torre de recuperação de calor.

Lima (2000) relata a primeira experiência do LESGN-UFC (Laboratório de Energia Solar e Gás Natural) com o processo de dessalinização com recuperação de calor na cidade de Fortaleza-Ceará. Além de apresentar detalhadamente uma análise em um protótipo de dessalinizador, ela apresentou resultados de análises físico-quimicas da água antes e após o processo de dessalinização e verificou que não houve registro de bactérias dos grupos de coliformes totais e fecais na água produzida.

Cappelletti (2002) trabalhou com um dessalinizador tipo tanque de plástico e tentou aumentar a produção do destilado reaproveitando o calor latente do processo de condensação, contudo o mesmo conseguiu resultados abaixo do esperado, com produção diária de 1,7-1,8 L/m²·dia, e concluiu que mesmo com um projeto mais elaborado pode não ocorrer um aumento da produção de destilado.

Delyannis (2003) apresenta uma completa revisão histórica do uso da dessalinização utilizando energias renováveis e dando atenção especial ao uso da energia solar. Foi apresentado um histórico iniciando com passagens bíblicas, relatos das civilizações antigas, da era medieval, dos árabes, dos primeiros registros de experimentos de dessalinização solar e dos primeiros livros tratando do assunto, escritos por Giovani Batista Della Porta. O trabalho descreve a primeira grande planta de dessalinização dessenvolvida no Chile e o avanço que esta área teve durante a segunda guerra mundial. O artigo cita ainda a evolução da utilização da energia solar direta e indireta, na forma de energia eólica.

García-Rodríguez (2003) apresentou um trabalho sobre estado da arte em aplicações de energias renováveis em dessalinização apresentando uma descrição das tecnologias industriais de dessalinização, uma revisão das fontes de energias renováveis aplicadas a dessalinização e as perspectivas futuras para as aplicações destas energias renováveis, dando principal atenção aos processos de membrana que funcionam utilizando células fotovoltaicas e energia eólica.

Mathioulakis *et al.* (2007) apresentaram uma revisão e o estado da arte em dessalinização com ênfase em energia solar. Eles descreveram e apresentaram alguns valores das diversas tecnologias de dessalinização, cita ainda plantas de dessalinização com altas capacidades de produção de 130 e ate 200.000 L/dia.

Tanaka e Nakatake (2009) apresentaram uma análise teórica de uma unidade de dessalinização com um refletor plano externo e concluiram que é possível aumentar a produção de água dessalinizada a partir da instalação de um refletor com uma determinada inclinação. Apresenta como resultado o aumento de produção de 4 L/m²·dia para uma unidade sem refletor e uma produção de 5 L/m²·dia para uma unidade com um refletor inclinado de 15º.

Khalifa e Hamood (2009) apresentaram um estudo que relaciona a altura da lâmina de salmoura a ser dessalinizada com a produção da unidade de dessalinização. Utilizando resultados experimentais e teóricos de vários autores com uma produção variando entre 1,5 e 3,5 L/m²·dia. Foi concluído que o aumento na altura da lâmina de salmoura pode ocasionar uma redução de produção de até 48%.

Tsilingiris (2009) validou um modelo semelhante ao modelo proposto por Dunkle, com pequenas diferenças nos valores das constantes numéricas, após um desenvolvimento matemático utilizando um número de Grashof modificado, levando em conta os efeitos da diferença de densidade da mistura binária ar seco e vapor d'agua. Comparou ainda diversas medições disponíveis na literatura, utilizando os modelos desenvolvidos e o modelo de

Dunkle, e verificou o bom comportamento destes modelos para baixas temperaturas, abaixo de 80ºC, contudo tais modelos não apresentaram bons resultados para temperaturas elevadas, acima de 80ºC.

Schwarzer *et al.* (2009) apresentaram um novo sistema de dessalinização solar com recuperação de calor. Modelos distintos deste sistema foram testados na Alemanha, Espanha, India e Brasil, onde verificou um produção de 15-18L/m²/dia o que representa 5 a 6 vezes a produção de um dessalinizador solar tipo Tanque. O sistema permite ainda a instalação de dessalinizadores maiores, 1000-2000 L/dia, visto que ele possui característica modular onde cada módulo produz aproximadamente 35 L/dia. O sistema foi desenvolvido para produção de água descentralizada em áreas rurais, onde a falta de água ainda é um grave problema. Análises químicas e microbiológicas comprovaram a qualidade da água produzida.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma breve revisão sobre os principais temas necessários à compreensão do funcionamento do Dessalinizado Solar. O capítulo está dividido em quatro seções. Na primeira seção estão apresentados os fundamentos da dessalinização, com a apresentação de diversas tecnologias utilizadas. Na segunda seção estão apresentados os conceitos de radiação solar, na terceira as características dos coletores solares e na quarta os fundamentos da transferência de calor e massa.

3.1 Principais Tipos de Tecnologias de Dessalinização.

Existem diversas formas de dessalinização de água. Normalmente esses processos são classificados de acordo com o tipo de fonte de energia utilizada e pela utilização ou não de membranas especiais. Como exemplo de algumas tecnologias de dessalinização pode-se citar:

- Processos Térmicos: Destilação Flash de Múltiplos Estágios [MSF]; Destilação de Múltiplo Efeito [MED]; Destilação por Umidificação e Desumidificação [HD]; Destilação Solar Térmica [DS]; Congelamento.
- Processos por Membrana: Eletrodiálise [ED]; Osmose Reversa [RO].

Os processos mais utilizados são MSF e RO que respectivamente representam 44% e 42% da capacidade mundial de dessalinização de água. O processo MSF representa mais de 93% da produção dos processos térmicos e já o RO representa mais de 88% da produção dos processos de membrana. (EL-DESSOUKY AND ETTOUNEY, 2000).

A seguir está apresentada uma descrição de algumas das tecnologias mais aplicadas em dessalinização.

3.3.1 Destilação Flash de Múltiplos Estágios (*Multistage flash* - MSF).

O processo MSF baseia-se na geração de vapor a partir da água salobra devido à diminuição brusca de pressão quando a água salobra entra em uma câmara evacuada. O processo é repetido em sucessivos estágios com sucessivas quedas de pressão. Este processo exige uma fonte externa de vapor em uma temperaturta, geralmente, em torno de 100 ºC. A temperatura máxima do processo é limitada pela concentração de sal bem como pelo limite máximo de desempenho do processo. Como exemplo de algumas plantas que operam utilizando esta tecnologia pode-se citar: Berken na Alemanha, com capacidade de 10m³/dia; Kuwait, com capacidade de 100m³/dia, operando com coletores parabólicos; La paz no México, com capacidade de 10m³/dia, operando com 10 estágios, coletores planos e parabólicos. (GARCÍA-RODRÍGUEZ, 2003).

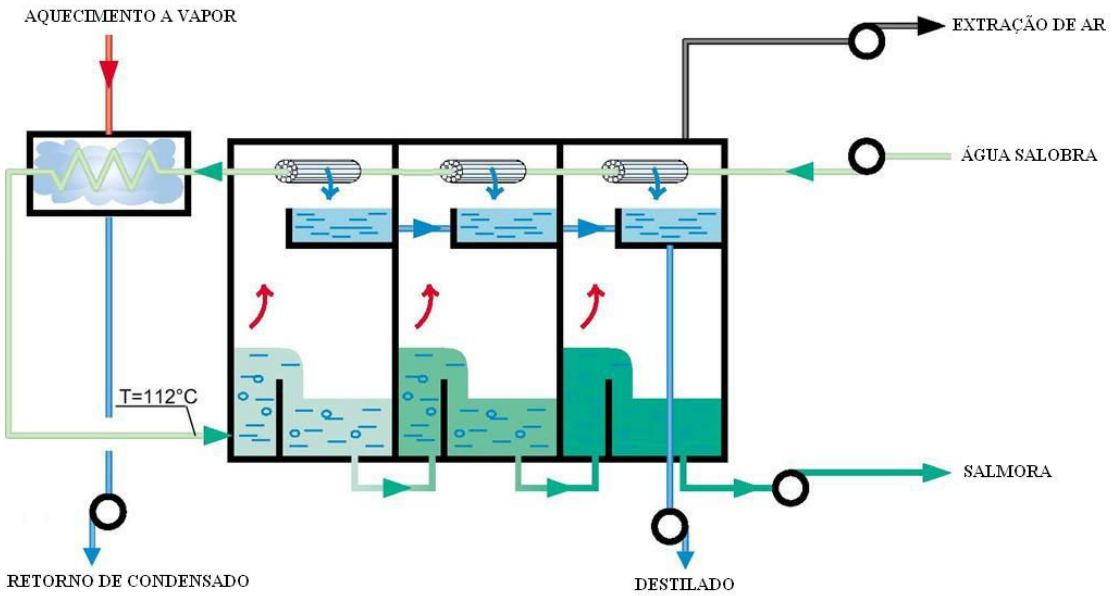


Figura 3 – Princípio de Funcionamento MSF, adaptado de (SIDEM, 2009).

3.3.2 Destilação de Múltiplos Efeitos (*Multieffect distillation*- MED).

O processo MED baseia-se na geração de vapor a partir da absorção de energia térmica pela água salobra. O vapor produzido em um estágio gera vapor no estágio seguinte,

estando este estágio seguinte a uma pressão e temperatura mais baixas. O desempenho do processo é proporcional ao número de estágios. As plantas deste processo normalmente utilizam uma fonte externa de vapor em uma temperatura, geralmente, em torno de 70 ºC. Como exemplo de algumas plantas que operam utilizando esta tecnologia pode-se citar: Abu Dhabi nos Emirados Árabes Unidos, com capacidade 120m³/dia e operando com 18 estágios e coletores de tubo evacuado; Golfo Árabe, com capacidade de 6000m³/dia e operando com coletores parabólicos; Ilha de Takami no Japão, com capacidade de 16m³/dia e operando com 16 efeitos ou estágios e coletores planos. (GARCÍA-RODRÍGUEZ, 2003).

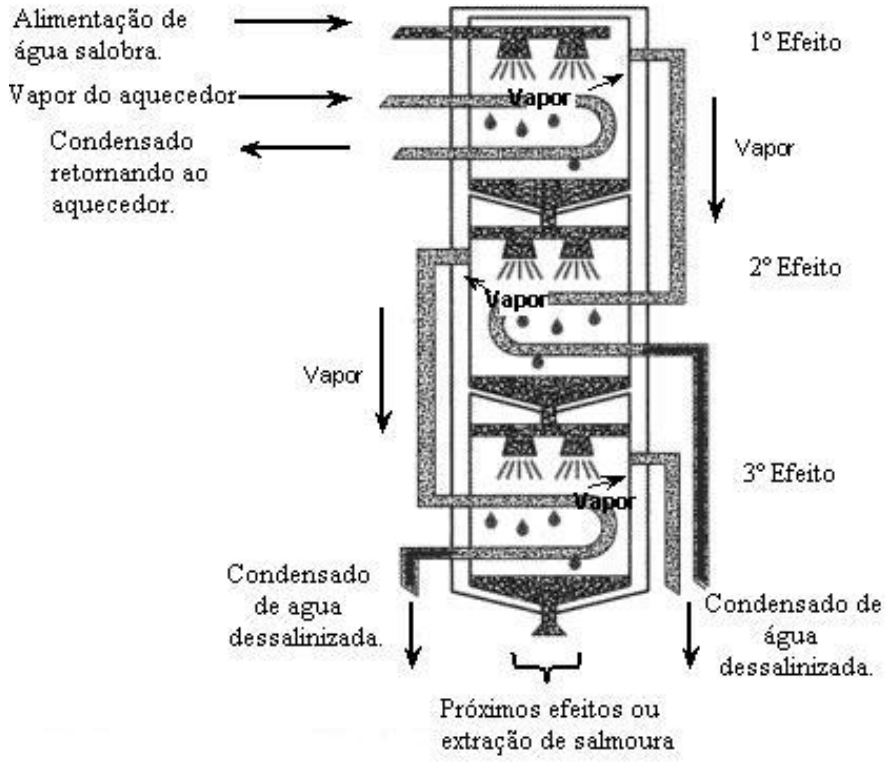


Figura 4 – Princípio de Funcionamento MED, adaptado de (UNEP, 2009)

3.3.3 Destilação por Umidificação e Desumidificação (*Humidification-dehumidification* - HD).

No processo HD geralmente o ar é utilizado como fuido de trabalho o que elimina, ou reduz bastante, a corrosão, um dos grandes problemas dos sistemas de dessalinização, devido ao contato do coletor solar com a água salobra. O processo opera

baseando-se na transferência de massa e utiliza o ar seco para evaporar a água “pura” da água salobra. O ar circula no sistema sendo umidificado no evaporador, desumidificado no condensador. Sua temperatura é elevada no coletor solar para que o mesmo aumente sua capacidade de reter vapor (QIBLAWEY E BANAT, 2007).

Como exemplo de um sistema que opera utilizando essa tecnologia, pode-se citar uma planta instalada nas Ilhas Canárias que produziu uma média de 11,8 L/m²/dia.

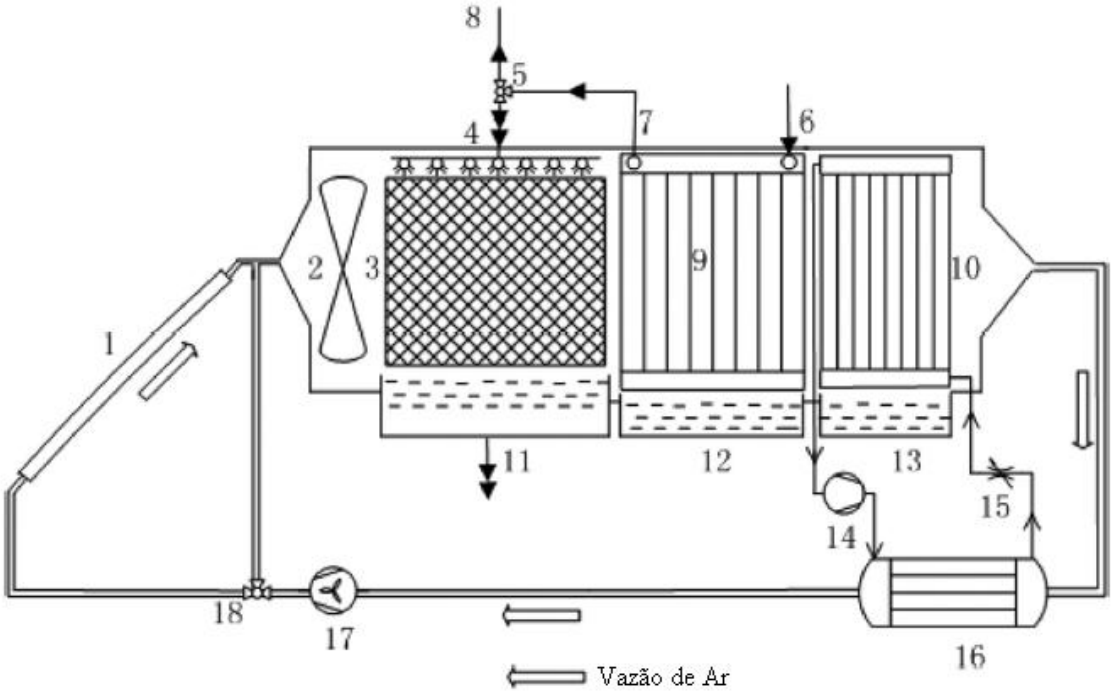


Figura 5 – Princípio de Funcionamento HD, adaptado (GAO *et al.,* 2008).

3.3.4 Congelamento (*Freezing)*.

O método de dessalinização por congelamento tem sido proposto a varias décadas, contudo poucas intalações foram desenvolvidas utilizando tal princípio, no qual a água, após ser submetida a uma baixa pressão, evapora retirando calor da vizinhança, dando inicio à formação de cristais de gelo e a um rejeito salino concentrado. Tal tecnologia baseia-se no princípio de que a energia termodinâmica mínima requerida para se congelar a água é menor do que para evaporá-la. (O calor latente de fusão da água é de 6,01 kJ/mol enquanto que o calor latente de vaporização a 100ºC é de 40,66 kJ/mol). Existe ainda outra vantagem nesse

tipo de tecnologia que é o baixo potencial de corrosão devido às baixas temperaturas envolvidas no processo. A desvantagem desse sistema está na dificuldade de se processar o gelo. Existem diversas tecnologias para se obter o frio e provavelmente o mais conhecido seja o de compressão de vapor. Como exemplo de tal tecnologia pode-se citar uma planta desenvolvida no Centro Solar da Flórida que tinha capacidade de produção entre 48 e 178 m³/dia mais foi fechada em 1989 por não ser economicamente viável. (QIBLAWEY E BANAT, 2007).

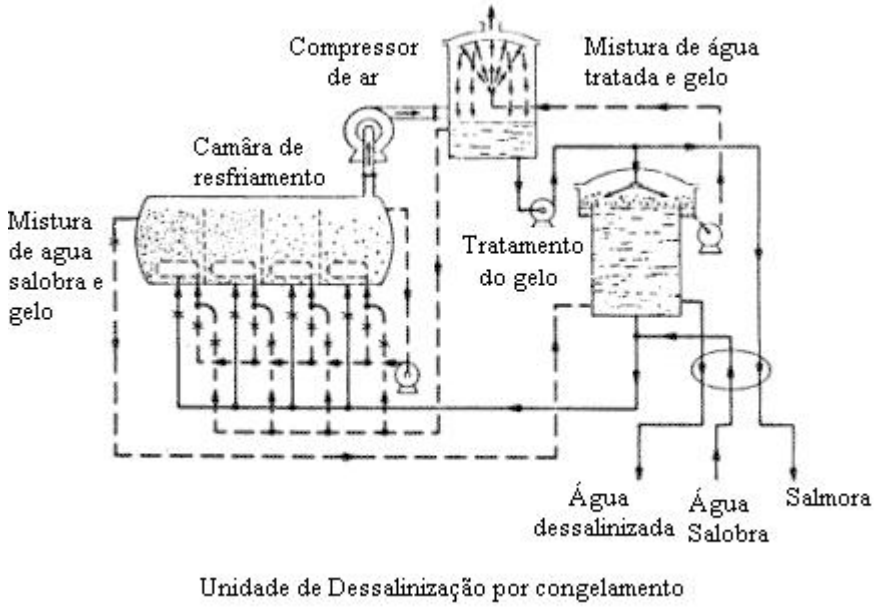


Figura 6 – Princípio de Funcionamento de dessalinização por congelamento, adaptado de (UNEP, 2009).

3.3.5 Osmose Reversa (*Reverse Osmosis* - RO).

No processo de osmose reversa não ocorre mudança de fase da água, nem há necessidade de grandes trocas térmicas. O processo baseia-se no principio de separação dos sais da água a partir de uma membrana semipermeável suportando um fluxo de água salgada a uma pressão elevada. Tal membrana possui a característica de permitir a passagem das moléculas de água e de reter as moléculas de sais, o que resulta em um fluxo concentrado de sais e outro com pequenas quantidades de sais que não foram retidos na membrana. Para se conseguir pressões elevadas, acima da pressão osmótica, é utilizado um conjunto de bombas

de alta pressão. As bombas consomem energia elétrica que pode ser proveniente de diferentes fontes tais como: Painéis fotovoltaicos, aerogeradores, hidroelétricas ou qualquer outra fonte capaz de gerar corrente elétrica.

As vantagens desse tipo de tecnologia são as altas taxas de produção de água dessalinizada e a boa qualidade da água produzida. As desvantagens são os altos custos de instalação e manutenção, a necessidade de pós e pré-tratamento mais rigoroso. Esses tratamentos são variáveis com o tipo de água a ser dessalinizada, devido às características e fragilidades das bombas e membranas. Como exemplo de plantas operando com esta tecnologia e utilizando células fotovoltaicas pode-se citar: Vancouver no Canadá com capacidade de 0.5-1m³/dia; Mar vermelho no Egito com capacidade de 50m³/dia e Norte de Java na Indonésia com capacidade de 12m³/dia, (GARCÍA-RODRÍGUEZ, 2003).

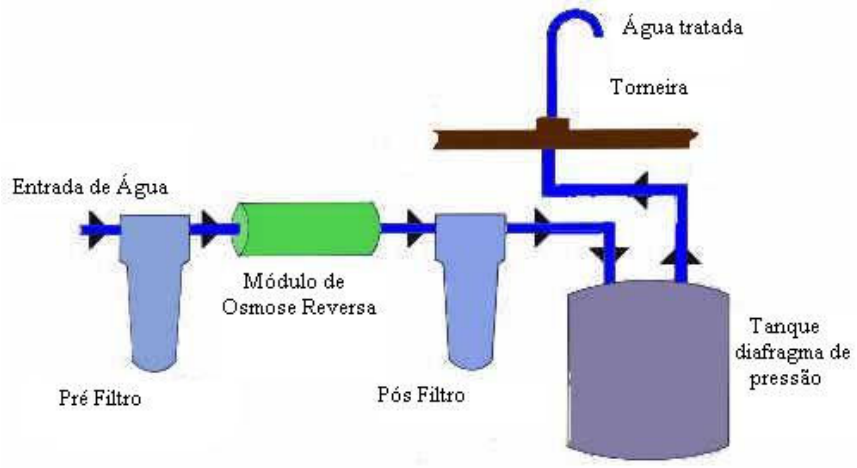


Figura 7 – Princípio de Funcionamento de dessalinização por osmose reversa RO, adaptado de (PUREPRO, 2009).

3.3.6 Eletrodiálise (*Electrodialysis* – ED).

No processo de eletrodiálise, uma solução iônica é bombeada através de um recipiente contendo eletrodos e membranas seletivas dispostas alternadamente que retêm cátions ou ânions. Quando os eletrodos são ligados a uma fonte de corrente contínua, a corrente é transportada pela solução e os íons tendem a migrar para o eletrodo de carga oposta, anodo ou catodo. Para que o fenômeno de dessalinização ocorra, é necessário que as

membranas seletivas sejam posicionadas alternadamente entre os eletrodos para concentrar os íons em um determinado fluxo, tornando assim o outro fluxo com a concentração bem mais baixa de sais ou íons. Em um lado os cátions são atraídos pelo catodo, passam pela membrana seletiva de cátions e são posteriormente retidos na membrana seletiva de ânions. Do lado oposto, os íons são atraídos pelo anodo, passam pela membrana seletiva de ânions e são posteriormente retidos na membrana seletiva de cátions. Os espaços entre membranas são chamados de células, os pares de células possuem uma célula na qual os íons migram tornando o fluxo diluído e outra na qual os íons se concentram. Uma unidade básica de eletrodiálise é composta por centenas de células.

Como exemplo de plantas operando com essa tecnologia pode-se citar: Ilha de Ohsima em Nagasaki com capacidade de 10m³/dia e o Vale Spencer no novo México com capacidade de 2,8m³/dia, (GARCIA-RODRIGUEZ, 2003).

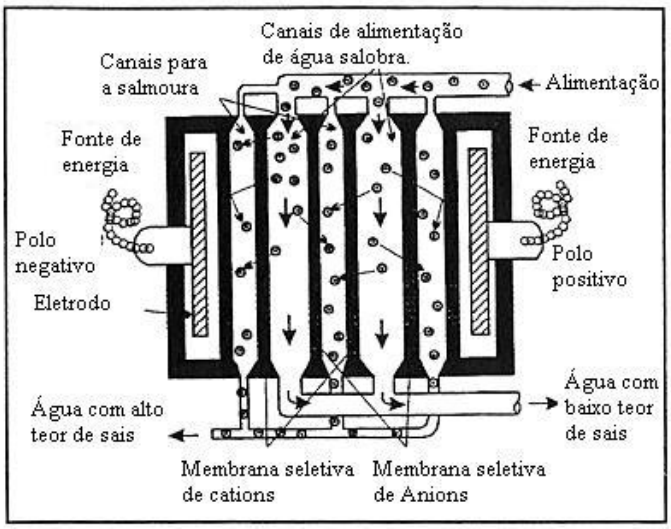


Figura 8 – Princípio de Funcionamento ED, adaptado de (UNEP, 2009).

3.3.7 Destilação Solar Térmica.

Apesar das tecnologias citadas poderem operar utilizando energia solar térmica, este termo, destilação solar térmica, é usado para sistemas caracterizados por sua simplicidade de fabricação e funcionamento e relativamente baixa produção. Tais sistemas são de grande necessidade em áreas remotas e onde se deseja uma produção descentralizada. O modelo mais antigo e simples desse dessalinizador é o tipo tanque, ou DSC (Desalinizador Solar

Convencional), composto por uma coberta de vidro e um tanque de alvenaria. Existem algumas variações deste sistema tais como: Única ou dupla inclinação da coberta e tipos de materiais de enchimento do tanque. Uma variação do dessalinizador térmico é o tipo Torre com recuperação de calor, onde são utilizados vários estágios e coletores solares para se aumentar a quantidade de destilado produzido.

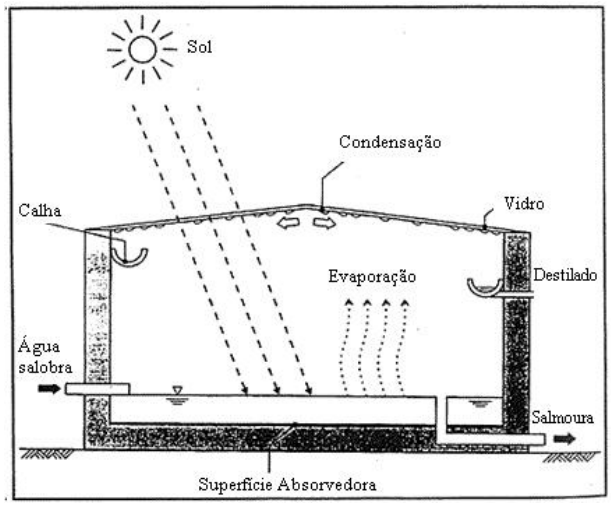


Figura 9 – Princípio de Funcionamento DS, disponível em (UNEP, 2009).

Como exemplos de sistemas operando com o princípio de dessalinização solar com recuperação de calor podem-se citar protótipos do LESGN, Laboratório de energia solar e gás natural, onde foi alcançada uma produção de 5,1 L/dia e eficiência global do dessalinizador (GOR) de 0,22 no primeiro protótipo (LIMA, 2000). No segundo protótipo (COUTINHO, 2003) foi alcançado o mesmo valor para a eficiência (GOR) e uma produção um pouco menor de 4,5L/dia. O terceiro protótipo, Figura 9, (ALVES, 2009) produziu uma quantidade de destilado de 31L/dia e alcançou um valor de eficiência global (GOR) de 0,62 e uma eficiência da Torre (GOR) de 1,54.

Figura 10 – Fotografia do dessalinizador solar com recuperação de calor, terceiro protótipo, (ALVES, 2009).

Este terceiro protótipo possuía uma unidade de aquecimento, composta por um refletor plano e dois coletores solares de placa plana com dimensões de 2,4 m de comprimento por 1 m de largura, e uma unidade de dessalinização, composta por uma torre de aço inoxidável retangular de aproximadamente 50 cm de altura, 1 m de largura e 2 m de comprimento. A torre era composta por um tanque de armazenamento e sete estágios, onde cada estágio possuía seis bandejas métalicas paralelas.

3.2 Radiação Solar

A constante solar é a quantidade de energia que incide numa superfície unitária, normal aos raios solares, por unidade de tempo, numa região situada no topo da atmosfera. Apesar da maior parte dos sistemas de conversão de energia solar encontrar-se situada na superfície da terra, estses dados constituem as referências para a análise da radiação na superfície terrestre.

A constante solar determinada pela NASA em 1971 assume o valor: 1.353 W/m^2, contudo a variação da distância Terra-Sol na órbita elíptica descrita pela terra resulta numa variação da constante solar de 3,33% , para mais ou para menos, ao longo do ano.

A energia coletada ao longo de um dia pode ser calculada a partir da resolução de uma integral do produto entre o cosseno do ângulo zenital pelo fluxo de radiação direta no

plano normal à direção dos raios solares, onde o ângulo zenital é o ângulo que fazem os raios solares com a vertical.

Para o cálculo da radiação incidente no plano de dispositivos solares, é preciso o cálculo da posição relativa do sol em relação ao plano do coletor a cada instante. Este cálculo é determinado a partir do conhecimento dos ângulos azimute da superfície, que é o ângulo formado entre a projeção da normal à superfície no plano horizontal e a direção norte-sul, bem como do ângulo de inclinação da superfície em relação ao plano horizontal.

A quantidade de radiação incidente é um fator importante na análise do desempenho de sistemas solares. Os valores de radiação podem ser medidos, estimados ou calculados de diversas formas. Os instrumentos mais utilizados para a medição da radiação solar são: O Piranômetro, para medição da radiação global e o Piroheliômetro para a medição da radiação direta, Figura 10 e Figura 11, respectivamente.

Figura 11 – Piranômetro de radiação global

Figura 12 – Piroheliômetro

A radiação solar pode também ser determinada por modelos numéricos. Entre os modelos encontrados pode-se citar o Modelo de Céu Claro, modelo mais simplificado, Modelo Hay-Davis, modelo que acrescenta componentes para a radiação difusa e o Modelo de Perez, modelo um pouco mais complexo e apurado. Outra opção que vem sendo testada e desenvolvida é a estimação dos níveis de radiação a partir de imagens de satélites. Nessas estimações são relacionados os pixels das imagens com os valores de radiação. Os dados de radiação estimados por imagens de satélite são baseados em uma área de $100km^2$, área essa bem maior que a área utilizada para medições de piranômetros e piroheliômetros, o que gera uma diferença entre os valores medidos pelos aparelhos e os valores estimados nas imagens de satélites, (VIGNOLA, 2007).

3.3 Coletores Solares Térmicos.

A seguir serão descritas algumas características dos coletores solares térmicos de placa plana e de tubo evacuado.

3.3.1 Coletor de Placa Plana

O coletor plano consiste de quatro elementos principais:

- Sistema absorvedor – responsável pela absorção do fluxo solar incidente e transmissão desse calor para o fluido de trabalho.
- Coberta – responsável pela redução do calor perdido pelo sistema absorvedor, permitindo a passagem da radiação de curto comprimento de onda através do mesmo e retendo outras formas de comprimento de onda maiores.
- Isolamento – responsável pela redução da perda de calor por outras partes do sistema absorvedor que não estão expostas ao fluxo solar.
- Estrutura – necessária para sustentação dos demais sistemas.

Os coletores planos podem ser agrupados de acordo com o fluido de trabalho que eles utilizam como coletores para líquidos e para gases. As Tabelas 1 e 2 apresentam as características de cada tipo.

Tabela 1 – Coletores cujos fluidos de trabalho são líquidos como água, mistura de água anti-congelante ou alguns tipos de óleos, adaptado de (ANDERSON, 1983).

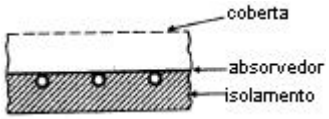
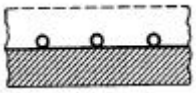
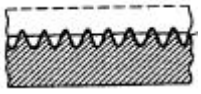
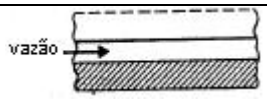
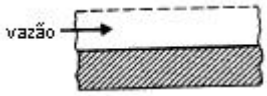
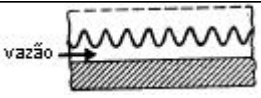
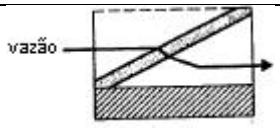
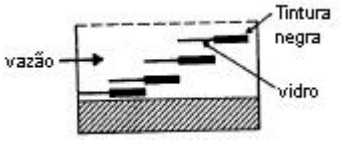
Tubos abaixo do absorvedor	
Tubos Acima do absorvedor	
Tubos no absorvedor	
Corrugado	

Tabela 2 – Coletor plano cujo fluido de trabalho é necessariamente o ar, adaptado de (ANDERSON, 1983)

Vazão abaixo do absorvedor	
Vazão Acima do absorvedor	
Vazão abaixo do absorvedor com turbulência	
Corrugado	
Poroso	
Passante entre placas de vidro	

O tipo de coletor a ser escolhido é de grande importância, pois a eficiência do mesmo é função de sua geometria. A taxa de energia perdida $\dot{Q}$ pelo coletor para o ambiente é expressa pela Equação 1,

$$\dot{Q} = U_T A_C (T - T_\infty) \tag{1}$$

na qual, A_C é a área do absorvedor, $(T - T_\infty)$ representa a diferença de temperatura entre o absorvedor e o ambiente na qual, U_T, é o coeficiente global de transferência de calor. Este é definido como sendo o somatório dos três coeficientes de perda de calor pela face superior (U_S), pela face inferior (U_I) e pelas faces laterais (U_L).

A eficiência térmica do coletor é calculada pela Equação 2 conhecida como a expressão de Holltel-Whillier.

$$\eta = F_R \cdot \tau\alpha - F_R \cdot U_T \frac{T_i - T_\infty}{G_T} \tag{2}$$

Essa expressão representa a razão entre a energia útil, transferida para água, e a radiação incidente. Nesta T_i representa a temperatura inicial do fluido, T_∞ representa a temperatura ambiente, G_T a irradiação total incidente sobre o coletor, o produto $\tau\alpha$ representa a fração de radiação absorvida pelo sistema, e F_R é o fator de calor removido pelo fluido ao passar no coletor, expresso pela Equação 3,

$$F_R = \frac{C_a}{U_T}\left[1 - \exp\left(\frac{U_T \cdot F'}{C_a}\right)\right] \tag{3}$$

na qual F' é o fator de eficiência da aleta e C_a é a capacidade térmica por unidade de área do coletor, como mostra a Equação 4.

$$C_a = \dot{m} c_p / A_c \tag{4}$$

As Figuras 13 e 14 apresentam as variáveis geométricas da placa absorvedora. Essas variáveis são necessárias na determinação do fator de remoção de calor (F_R) e do fator de eficiência da aleta (F').

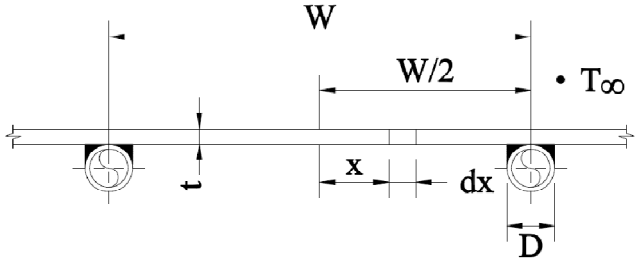


Figura 13 - Corte lateral em uma aleta, adaptado de (ANDERSON, 1983).

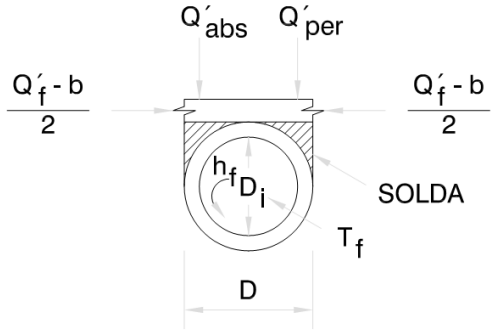


Figura 14 - Corte lateral em um tubo, adaptado de (ANDERSON, 1983).

3.3.2 Coletor de Tubo Evacuado

Os coletores de tubo evacuado são compostos por dois tubos de vidro. O tubo externo possui alta transmissividade e mínima refletividade, para o comprimento de onda da radiação solar, de forma a permitir que a radiação incidente sobre ele alcance o tubo interno. O tubo interno é recoberto por uma superfície seletiva com propriedades de alta absortividade e mínima refletividade. Durante o processo de fabricação os dois tubos são fundidos em suas extremidades e durante esta fusão são retirados os gases entre os dois tubos para a formação de vácuo. Este vácuo é responsável pelo isolamento da superfície seletiva, quanto aos processos de condução e convecção, e consequentemente pelo bom desempenho do coletor. Tal isolamento é tão eficiente que mesmo com temperaturas bastante elevadas na superfície seletiva a parte externa do tubo pode ser tocada sem perigo de queimaduras. Existe ainda uma camada de bário utilizada para auxiliar na manutenção e verificação do nível de vácuo, pois esta camada absorve certos gases como CO, CO_2, N_2, O_2, e quando o vácuo está sendo perdido, ela gera uma coloração esbranquiçada ao coletor.

Em comparação aos coletores solares de placa plana, estes coletores de tubo evacuado possuem a vantagem de um melhor isolamento e consequentemente uma maior eficiência, principalmente em lugares frios, onde a perda de calor em coletores de placa plana é bastante elevada.

Os coletores de tubo evacuado são associados em paralelo e inclinados de forma a melhor captar a energia solar. Esta inclinação e orientação variam de acordo com a latitude do local. A eficiência dos coletores depende de vários fatores, contudo o principal fator é a quantidade média diária de radiação incidente (insolação).

3.4 Transferência de Calor e Massa.

A seguir estão descritos os processos de transferência presentes no sistema de dessalinização solar com recuperação de calor. Existem diversos livros para consulta e apronfundamento no assunto, para este trabalho podem-se citar (INCROPERA,1996; BAEHR, 2006; KAYS, 1980) como as fontes mais utilizadas.

3.4.1 Condução de Calor

O processo de condução é caracterizado por uma transferência de energia a nível molecular ou atômico. Em um sólido a condução pode ser associada às ondas na estrutura dos retículos e ao movimento de translação dos elétrons livres. A condução pode ser entendida como uma transferência de energia de moléculas mais enérgeticas para moléculas menos energéticas e desse modo, a transferência de calor também é conhecida pelo termo "difusão de energia". Para se quantificar a taxa de transferência de calor por condução, $\dot{Q}_{cond}$, utiliza-se a Equação 5, conhecida como lei de Fourier, simplificada para o caso de parede plana e condução unidimensional,

$$\dot{Q}_{cond} = -k \cdot A_{cond} \frac{\partial T}{\partial x} \tag{5}$$

na qual A_{cond} representa a área perpendicular ao fluxo de calor, $\frac{\partial T}{\partial x}$ representa o perfil de variação de temperatura com o comprimento x e k é uma propriedade que caracteriza a capacidade do material de conduzir calor. Essa propriedade é denominada condutividade térmica.

3.4.2 Difusão de Massa

O termo transferência de massa é utilizado para descrever o movimento relativo de espécies devido à presença de uma força motriz, que pode ser representado pelo diferencial de concentração de determinada espécie em uma mistura.

O processo de difusão de massa é análogo à condução de calor. Como consequência deste fato, a equação que determina a taxa para a difusão de massa é similar à equação de difusão de calor, equação de Fourier, e é conhecida como Lei de Fick. A equação 6 representa a taxa de transferência da espécie A em uma mistura binária de A e B,

$$\dot{J}_A = -\rho \cdot \mathcal{D}_{AB} \cdot A \frac{\partial m_A}{\partial x} \tag{6}$$

na qual $\mathcal{D}_{AB}$ é a difusividade mássica ou coeficiente de difusão binária, e os termos $\dot{J}_A$, ρ, $\frac{\partial m_A}{\partial x}$ e A são respectivamente o fluxo de massa da espécie A em kg/s, massa específica da mistura, e o perfil de variação do gradiente de fração mássica da espécie em relação a distância unidimensional x e A representa a área onde se dá essa transferência de massa.

3.4.3 Convecção de Calor

O processo de convecção de calor é caracterizado por apresentar um movimento macroscópico do fluido, advecção, combinado com a difusão. Para se quantificarem as taxas de transferências, utiliza-se a equação 7,

$$\dot{Q}_{conv} = \bar{h} A_s (T_s - T_\infty) \tag{7}$$

na qual A_s representa a área superficial e o termo $\bar{h}$ é conhecido como coeficiente de convecção médio e é determinado de forma empírica através de correlações para características de geometria e escoamento distintas.

As correlações para determinação do $\bar{h}$ são do tipo ou modelo da Equação 8,

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h} \cdot L}{k_f} = f(Re_L, Pr) \tag{8}$$

na qual $\bar{h}$ representa o coeficiente convectivo médio, k_f a condutividade térmica do fluido e L o comprimento característico. O número de Nusselt é determinado a partir de correlações que relacionam adimensionais que caracterizam o escoamento, como por exemplo, os números de Reynolds, Re_L e Prandtl Pr. O número de Reynolds quantifica o quão próximo ou distante está o escoamento do regime laminar, já o número de Prandtl relaciona as camadas limite térmica e hidrodinâmica.

Para o caso de convecção livre ou natural, onde o escoamento é dependente das temperaturas envolvidas no fenômeno, normalmente o número de Reynolds é substituído pelo

número de Rayleigh, Ra, ou pelo número de Grashof, Gr. A Equação 9 apresenta a fórmula do número de Reynolds, Re_L,

$$Re_L = \frac{\rho \cdot u_\infty \cdot L}{\mu} \tag{9}$$

na qual ρ, u_∞, L, μ são respectivamente a massa específica, a velocidade de corrente livre, o comprimento característico e a viscosidade dinâmica. A Equação 10 apresenta a fórmula do número de Rayleigh,

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) L^3}{\nu \cdot \alpha} \tag{10}$$

na qual g, ν , α e β representam respectivamente a gravidade local, a viscosidade cinemática, difusividade térmica e o coeficiente de expansão térmica. A Equação 11 apresenta a fórmula do número de Grashof.

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) L^3}{\nu^2} \tag{11}$$

3.4.4 Convecção de Massa

O processo de convecção de massa é caracterizado pela transferência de uma espécie a partir de uma superfície líquida ou sólida para um fluido que escoa sobre essa superfície e por um grandiente de concentração entre o fluido escoante e a superfície. Para se determinar a taxa na qual a transferência de massa ocorre, pode-se utilizar a equação 12,

$$\dot{m} = \bar{h}_m A_s (\rho_s - \rho_\infty) \tag{12}$$

na qual $\dot{m}$ representa a massa transferida da espécie em kg/s, h_m o coeficiente de transferência de massa e ρ representa a massa específica da espécie em kg/m^3.

O processo de convecção de massa é similar ao de convecção de calor e a determinação do $\bar{h}_m$ ocorre de maneira empírica a partir de experimentos em laboratórios com condições controladas para a determinação do número de Sherwood para uma dada geometria. O número de Sherwood, Sh, é análogo ao número de Nusselt e sua determinação é função dos adimensionais Reynolds e Schmidt Re_L, Sc, Equação 13.

$$\overline{Sh} = \frac{\bar{h}_m L}{D_{AB}} = f(Re_L, Sc) \tag{13}$$

Para o caso de convecção livre ou natural o número de Reynolds é substituído pelo número de Rayleigh, Ra, ou pelo número de Grashof, Gr.

Um modelo de correlação utilizada para determinação do número de Sherwood médio é apresentada na equação 14.

$$\overline{\mathrm{Sh}} = \mathrm{A} \cdot \mathrm{Re}_{\mathrm{L}}^{\mathrm{B}} \cdot \mathrm{Sc}^{\mathrm{C}} \tag{14}$$

Onde as constantes A, B e C assumem diferentes valores em função da natureza do escoamento, da geometria das paredes rígidas, e das propriedades do fluido.

3.4.5 Evaporação

O processo de evaporação é caracterizado por uma transferência de massa devido ao aumento de energia das moléculas do líquido próximas à superfície, interface gás-líquido, proveniente das colisões sofridas por essas moléculas. Quando o nível de energia supera a energia de ligação na superfície ocorre o processo de evaporação. A energia necessária para manter o processo de evaporação é retirada da energia interna do líquido, que sofre uma redução de temperatura. Esse fenômeno é conhecido como Resfriamento Evaporativo e a taxa de transferência de calor $\dot{Q}_{evap}$ é expressa pela Equação 15.

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{fe}\mathrm{h}_{\mathrm{fg}} \tag{15}$$

A taxa de evaporação é função da temperatura de saturação, ou seja, quanto maior a temperatura do líquido maior é a quantidade de massa evaporada. A Figura 15 ilustra como ocorre esse aumento na taxa de evaporação com o aumento de temperatura. Nota-se que para temperaturas acima de 60º ocorre um aumento considerável na massa de água evaporada.

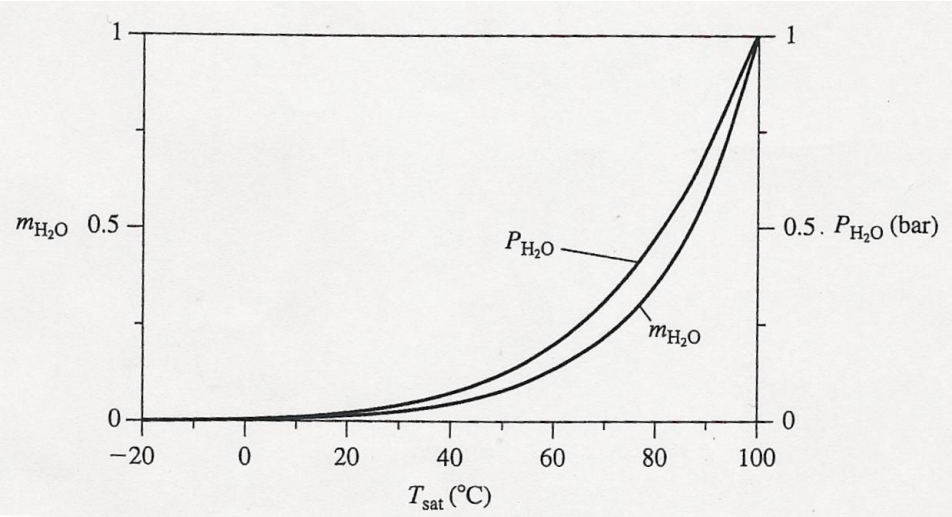


Figura 15 – Pressão de vapor da água e concentração de massa de água no ar saturado à pressão P=1,013 bar, adaptado de (KAYS, 1980)

3.4.6 Condensação

O processo de condensação ocorre quando a temperatura de um vapor é resfriada abaixo de sua temperatura de orvalho. A condensação geralmente ocorre quando um vapor entra em contato com uma superfície fria. Ao ocorrer o contato, o calor é transferido do vapor para a superfície e o condensado é formado. (Existem duas formas para ocorrer a condensação: Condensação em película e condensação em gotas.) Indepedente da forma com que ocorre a condensação, este fenômeno fornece uma resistência à transferência de calor entre o vapor e a superfície. Na condensação em gotas podem-se alcançar taxas de transferência de calor superiores a uma ordem de grandeza se comparada à forma de condensação em película. A taxa total de condensação ṁ pode ser determinada pela Equação 16,

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{h_{fg}} = \frac{\bar{h} A_s (T_{sat} - T_s)}{h_{fg}} \tag{16}$$

na qual $\dot{Q}$ representa a taxa de calor transferido e $(T_{sat} - T_s)$ representa a diferença de temperatura entre a superfície e a temperatura de saturação do fluido.

3.4.7 Radiação Térmica

O processo de transferência de calor por radiação é caracterizado por ser o único modo de transferência que pode ser transferido na ausência de matéria. Radiação térmica é a energia emitida por toda matéria que se encontra a uma temperatura acima de zero Kelvin. A taxa líquida de transferência de calor por radiação $\dot{Q}_{rad}$ para o caso de uma pequena superfície na temperatura T_s envolvida por uma vizinhança isotérmica na temperatura T_{viz} é expressa pela Equação 17,

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \cdot A \cdot \sigma(T_s^4 - T_{viz}^4) \tag{17}$$

na qual ε representa a propriedade radiante da superfície denominada emissividade e σ representa a constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$. Para o caso onde é conveniente linearizar a equação da taxa de transferência por radiação, Equação 17, utiliza-se a Equação 18,

$$\dot{Q}_{rad} = \bar{h}_r \cdot A_s(T_s - T_{viz}) \tag{18}$$

na qual as não linearidades da Equação 17 estão todas incluídas no termo $\bar{h}_r$, que representa o coeficiente de transferência de calor por radiação.

4 MATERIAIS E MÉTODOS.

Este capítulo apresenta uma descrição do dessalinizador solar com recuperação de calor, da sua operação para produção de água dessalinizada e dos procedimentos e infraestrutura para a realização de experimentos.

4.1 Componentes do Dessalinizador

O dessalinizador pode ser dividido em duas unidades, uma de Aquecimento e outra de Dessalinização.

4.1.1 Unidade de Aquecimento

A unidade de aquecimento do protótipo é composta por uma associação em paralelo de 25 coletores de tubo evacuado, com 1,8 metros de comprimento e 5,5 centímetros de diâmetro, conectados direto com o tanque de armazenamento. Os coletores estão orientados para o norte e inclinados de aproximadamente 15º em relação ao plano horizontal. Os coletores foram importados da China e, para se conseguir uma temperatura mais elevada na água do tanque de armazenamento, foi colocado um novo tubo de vidro no interior do tubo evacuado, diminuindo assim o volume de água a ser aquecido. Essa unidade tem como principal função fornercer a energia necessária para acelerar o processo de evaporação, a partir do aumento da temperatura da água.

Figura 16 – Unidade de Aquecimento formada por 25 coletores de tubo evacuado.

4.1.2 Unidade de Dessalinização

A unidade de dessalinização é composta pelo tanque de armazenamento e cinco estágios de recuperação de calor. Cada estágio é formado por canais de escoamento de poliuretano e uma bandeja metálica.

O projeto inicial previa a utilização de sete estágios produtivos. Contudo, devido a problemas no manuseio durante a operação, dois estágios foram danificados.

Figura 17 – Unidade de Dessalinização com cinco estágios.

É na unidade de dessalinização que ocorre o processo de dessalinização da água. A água aquecida nos coletores circula no tanque de armazenamento em um circuito de termossifão gerado pela diferença de densidade provocada por uma diferença de temperatura.

O tanque de armazenamento possui dimensões de 2,16 m de comprimento por 61 cm de largura, furos laterais para definir o nível de água no interior do tanque e para facilitar limpeza e secagem do tanque, e ainda as aberturas para as conexões com os coletores de tubo evacuado.

O tanque de armazenamento é de aço inoxidável para diminuir o processo de corrosão devido ao contato do aço com a água de alta concentração salina e ele possui isolamento em suas paredes para diminuir as perdas de energia para o ambiente.

O processo de dessalinização funciona com o aquecimento e evaporação da água no tanque de armazenamento e sua condensação na bandeja metálica do estágio acima. A condensação ocorre devido ao contato do vapor d'água com a superfície fria, temperatura abaixo do ponto de orvalho do vapor d'água, da bandeja metálica do estágio acima. Após a condensação a água escoa na bandeja e é coletada nos perfis de poliuretano para ser coletada fora do sistema de dessalinização.

A alimentação do sistema com água bruta é feita de forma descendente, ou seja, primeiro é alimentado o estágio mais elevado, e este após estar completamente cheio, transborda para o estágio imediatamente abaixo, sendo repetido esse processo até o tanque de armazenamento que, após estar cheio, transborda para fora do sistema, indicando que o dessalinizador encontra-se totalmente cheio. O processo de alimentação se dá de forma contra corrente em relação aos fluxos vapor d'água e de calor, favorecendo o pré-aquecimento da água bruta e a troca de calor com menores diferenciais de temperatura, e aumentando a eficiência energética do sistema.

Perfil de Poliuretano

Os perfis de poliuretano possuem as funções estruturais, isolantes e de coleta de condensado. Os perfis são trabalhados para formarem unidades retangulares de 2,15 m de comprimento por 60 cm de largura. Para uma união mais eficiente, os perfis foram cortados em um ângulo de 45º. Para a fixação dos cantos, utilizaram-se parafusos, colas e silicone.

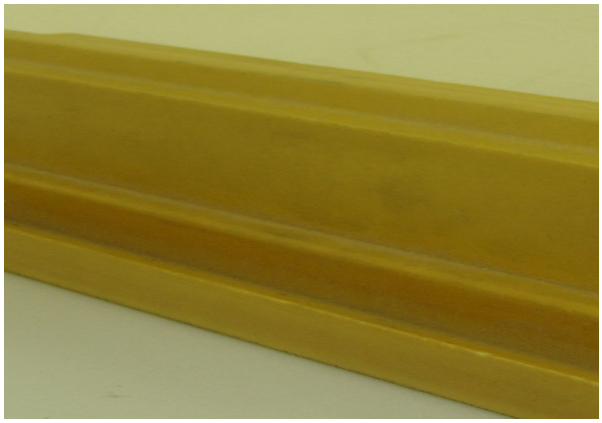


Figura 18 – Perfil de Poliuretano.

As propriedades isolantes do poliuretano ajudam na conservação de energia no interior dos estágios pela redução nas perdas de calor para o ambiente. É também nos perfis de poliuretano que o condensado vindo da bandeja metálica se acumula e escoa para ser coletado fora do dessalinizador. O perfil tem ainda uma configuração para diminuir as perdas por vazamento de vapor d'água.

Bandeja Metálica

Cada estágio possui uma bandeja metálica com as finalidades de armazenar a água a ser dessalinizada e de transmitir esta água bruta para os demais estágios inferiores e para o tanque de armazenamento. É nessa bandeja que se está definido o ângulo da superfície de condensação, bem como o nível de água bruta que fica em cada estágio.

Figura 19 – Bandeja de aço inox utilizada nos estágios.

A bandeja metálica é fabricada a partir de chapas de aço inoxidável AISI 304 de dois metros de comprimento por um metro e vinte de largura. Essa chapa é cortada, dobrada e soldada nas tampas para poder armazenar água. A fabricação das bandejas foi realizada na oficina mecânica do LESGN, com o uso de máquinas de corte, de solda, furadeira e viradeira. Ao final do processo de fabricação, a bandeja possui dimensões finais de dois metros de comprimento por 50 cm de largura e ângulo de condensação aproximadamente 10º. Foi feito ainda um furo de nove milimetros de diâmetro no centro da bandeja, que tem como função permitir o escoamento da água bruta para os estágios inferiores até o tanque de armazenamento. Esse furo é feito em lados opostos entre as bandejas de estágios pares e ímpares, para garantir o total preenchimento da bandeja e melhor escoamento da água bruta.

A Figura 20 apresenta uma fotografia geral do dessalinizador solar com recuperação de calor instalado no láboratorio de energia solar e gás natural LESGN.

Figura 20 – Foto do dessalinizador solar com recuperação de calor.

Custos

Devido ao dessalinizador solar com recuperação de calor estar num nível de pesquisa, seus custos ainda são relativamente elevados. Esses custos poderiam ser consideravelmente reduzidos para o caso de produção em série. Visto que a melhoria na qualidade de vida da comunidade local tem um valor muito mais significativo, esses custos não são os fatores mais relevantes.

Houve uma tentativa de implantação de sistemas de osmose reversa no interior do estado do Ceará. Contudo, devido à necessidade de mão de obra qualificação para a operação e manutenção do sistema, pouco tempo esses sistemas tornaram-se inoperantes. Os custos de manutenção e com a reposição de membranas também foram fatores decisivos para o insucesso do projeto.

No presente trabalho, a fabricação da torre de dessalinização involveu diversos materiais e custos, que estão apresentados na Tabela 3 de forma simplificada.

Considerando o projeto inicial, com sete estágios para a torre de dessalinização e uma bandeja metálica por estágio, o custo por torre de dessalinizador aproximado foi de R$10.000,00 (Dez mil reais).

Tabela 3 – Custos para fabricação de uma torre de dessalinização com 7 estágios.

Descrição de material	Valor em R$
As bandejas teriam um custo de	2.909,80
O tanque de armazenamento custaria	1.488,56
Os insumos para a fabricação custariam	2.966,74
O material importado custaria	882,00
Os serviços de soldagem custariam	1.720,00
Custo total aproximado	**9.967,00**

4.2 Medições Experimentais

O Dessalinizador solar com recuperação de calor é monitorado com o auxílio de oito sensores. Um sensor de radiação global, piranômetro de precisão, e sete termopares do tipo K para a medição da temperatura da água nas bandejas do dessalinizador, no ambiente e no tanque de armazenamento. Os termopares medem as temperaturas no ambiente, no tanque

de armazenamento e na água de cada um dos cinco estágios. A Figura 21 é uma fotografia do coletor de dados com termopares conectados.

Figura 21 – Fotografia do coletor de dados e termopares.

Todos os sensores estão ligados a um coletor de dados com 32 canais programáveis que permite visualizar, armazenar e tratar os dados de diversas formas. Neste trabalho, os dados enviados ao coletor de dados foram lidos a cada segundo e a cada minuto foi armazenada uma média dessas leituras. Com essa configuração, o coletor de dados tinha a capacidade de armazenar dados por mais de quarenta e oito horas antes da sua memória ficar cheia. Contudo, os dados eram geralmente coletados diariamente, para uma análise dos perfis de temperaturas no interior do dessalinizador, e da produção alcançada para essas condições, em um período de vinte e quatro horas.

Coleta de Massa

Para o conhecimento da produção durante o funcionamento do dessalinizador solar com recuperação de calor, foi adotada uma coleta de condensado individualizada por estágio. Assim, foi possível conhecer a produção total do dessalinizador, bem como a produção de cada um dos estágios de recuperação de calor, facilitando a percepção e localização de possíveis problemas no funcionamento dos estágios, tais como desnivelamento,

vazamentos e dificuldades de escoamento no percurso de coleta de condensado. A Figura 22 é uma fotografia dos tubos flexíveis e dos recipientes de coleta de condensado por estágio.

Figura 22 – Fotografia da coleta de condensado por estágio.

Em cada estágio foi feito um furo de meia polegada e instalado um pequeno tubo de cobre, que por sua vez foi conectado a tubos flexíveis para que a água produzida no dessalinizador fosse coletada em garrafas de cinco litros, como mostra a Figura 22. Para impedir vazamentos nesse sistema de coleta utilizou-se silicone entre os tubos de cobre e os perfis de poliuretano, e para impedir a evaporação da água coletada, as tampas das garrafas foram furadas de forma que o tubo flexível ficasse bem justo à tampa das garrafas de coleta.

A coleta de água produzida pelo dessalinizador era feita duas vezes ao dia, no período de meio dia e no fim da tarde. Para se verificar a produção utilizou-se uma proveta de um litro graduada a cada 10 ml, como mostra a Figura 23.

Figura 23 – Instrumento para medição do volume.

4.3 Medições de Salinidade

Para se verificar a qualidade da água produzida no dessalinizador solar com recuperação de calor utilizou-se um condutivímetro de bancada do fabricante Ômega, modelo CDB-70, como mostra a Figura 24, para se medir a condutividade elétrica da água. Foram medidas as condutividades tanto da água coletada quanto da água bruta.

Figura 24 – Bancada de medição de salinidade

O condutivímetro possui um mostrador digital para a leitura dos valores de temperatura e salinidade da amostra. Para as leituras dos valores de salinidade o condutivímetro possui ainda cinco possibilidades de ajuste da faixa de medição que são: até 20 μS/cm², até 200 μS/cm², até 2000 μS/cm², até 20 mS/cm² e até 200 mS/cm². Como o condutivímetro possui ainda um termômetro para medição de temperatura da água das amostras, ele é capaz de conpensar o efeito da variação de condutividade devido à variação de temperatura da amostra.

O procedimento adotado para essas medições de salinidade foi o de retirar amostras de 100 a 150 ml da água produzida em cada estágio e da água bruta contida no tanque de armazenamento. Após uma hora para a diminuição da temperatura, os sensores de temperatura e condutividade eram colocados nas amostras até a estabilização da medição. Entre as medições dos estágios e do tanque de armazenamento o sensor de condutividade era limpo com água. Estas medições de condutividade por estágio auxíliaram na verificação de contaminação da água, caso houvesse leituras com valores diferentes entre as águas produzidas nos estágios distintos.

4.4 Desempenho do Dessalinizador

Para se estudar o desempenho da torre de dessalinização dois parâmetros precisam ser definidos: A razão de ganho de saída (*Gain Output Ratio* – GOR) e o coeficiente de desempenho (*Coefficient Of Performance* – COP).

A razão de ganho de saída é definida como a razão entre a energia da água necessária para que ocorra a evaporação e a energia incidente sobre o coletor solar.

$$\mathrm{GOR} = \frac{\sum m_T \cdot h_{fg}}{\sum I \cdot A_{col}} \tag{17}$$

na qual h_{fg} é o calor latente de evaporação da água a 100ºC,m_T representa a massa de água produzida, I a irradiação sobre a placa absorvedora do coletor solar e A a área de coletor solar.

O coeficiente de desempenho é definido como a razão entre toda a massa de condensado produzida pela torre e a massa de condensado produzida pelo primeiro estágio, ou seja,

$$\mathrm{COP} = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_{Ei}}{m_{E1}} = \frac{m_T}{m_{E1}} \tag{18}$$

na qual m_{Ei} é a massa produzida no estágio i e m_T é a massa total produzida pela torre.

4.5 Modelo de Referência do Desempenho

A fim de que o desempenho do dessalinizador solar térmico, em campo, pudesse ser comparado com um desempenho máximo experimental, foi construído um dessalinizador de um único estágio com temperaturas de evaporação e condensação controladas. Esse dessalinizador de um estágio foi desenvolvido e testado no Instituto Solar de *Juelich* e, através de parceria com o LESGN, os dados coletados para diferentes valores de temperatura foram analisados e procesados pelo LESGN. O objetivo foi o desenvolvimento de uma correlação para o número de Sherwood, Sh, em função dos números de Grashof, Gr, e Schmidt, Sc. Esse modelo de correlação é o mais usado na literatura,

$$\overline{\mathrm{Sh}} = A \cdot \mathrm{Gr}^B \cdot \mathrm{Sc}^C \tag{19}$$

na qual A, B e C são constantes. A necessidade de realização desse trabalho está nas mais altas temperaturas de operação do Dessalinizador solar térmico com recuperação de calor, próximas a 100ºC, do que nos dessalinizadores apresentados na literatura.

O ângulo de condensação desse dessalinizador de único estágio foi variado em valores de 10º, 14º e 16.8º. Ao todo, incluindo todos os ângulos e temperaturas, foram determinados 698 pontos e destes 381 pontos são correspondentes ao ângulo de 10º que corresponde aproximadamente ao ângulo de condensação presente nas bandejas metálicas do dessalinizador utilizado neste trabalho. A Figura 25 apresenta a fotografia do dessalinizador de único estágio.

Figura 25 – Sistema de dessalinização de único estágio.

Com os valores das temperaturas e vazão mássica, foram calculadas as variáveis e parâmetros adimensionais para a determinação das constantes A, B e C do modelo, Equação 19, usando uma regressão não linear e o pacote estatístico SAS.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este Capítulo apresenta os resultados gerais e específicos dos testes em campo, Fortaleza-Ceará, do dessalinizador solar com recuperação de calor e suas unidades principais, bem como uma discussão de pontos importantes.

5.1 Desempenho da Unidade de Aquecimento

Com a utilização de tubos interiores, como já apresentado na Seção 4.1.1, os coletores de tubo evacuado apresentaram bom desempenho visto que se alcançaram temperaturas próximas a 90ºC no tanque de armazenamento. Para o dia 01/09/2009 o valor mais elevado medido pelo termopar instalado no tanque de armazenamento foi de 88,6ºC. Os valores de temperaturas mais elevados registrados pelos termopares nos demais estágios para este mesmo dia foram de 81,1ºC, 76,3ºC, 68,4ºC, 58,2ºC, 41,6ºC, respectivamente nos estágios 1, 2, 3, 4, 5.

5.2 Desempenho da Unidade de Dessalinização

Para o dia 01/09/2009 foi medida uma produção de condensado de 35,04 L para uma irradiação diária de 27,61 MJ. O valor da área de placa absorvedora era de 2,27 m², resultado da multiplicação de 25 coletores por seus respectivos diâmetros e por seus comprimentos expostos a radiação. Com isso alcançou-se um valor de GOR, *Gain Output Ratio*, de 1,26 para todo o sistema. Para a torre de dessalinização considerando uma eficiência dos coletores de 50% o valor do GOR foi de 2,52. Este valor do GOR para a torre de dessalinização está de acordo com o valor entre 2 e 3 obtido por (ADHIKARI, 1995) e um pouco abaixo dos valores relatados por (MATHIOULAKIS, 2007) que apresentou referências de sistemas que alcançaram valores de GOR entre 3 e 4,5.

Para o dia 01/09/2009 verificou-se que $m_{E1} = 7{,}33$ L e $m_T = 35{,}04$ L, logo o valor do COP para este dia foi de 4,78. O parâmetro COP relaciona a massa total produzida

pelo dessalinizador com a produção do primeiro estágio. Normalmente a produção do primeiro estágio é maior do que os outros estágios, contudo para este dia verificou-se a presença de vazamento de condensado entre o tubo de cobre do sistema de coleta e o perfil de poliuretano, o que ocasionou uma diminuição do valor de condensado produzido nesse primeiro estágio. A Tabela 4 apresenta os resultados da medição de condensado nos estágios em um período de 24 horas.

Tabela 4 – Produção total dos estágios no dia 01/09/2009.

	11h30min	17h10min	Total
1º Estágio	2.950 ml	4.380 ml	7.330 ml
2º Estágio	3.250 ml	5.880 ml	9.130 ml
3º Estágio	2.700 ml	4.860 ml	7.560 ml
4º Estágio	2.560 ml	4.170 ml	6.730 ml
5º Estágio	1.840 ml	2.450 ml	4.290 ml
Total	13.300 ml	21.740 ml	35.040 ml

A Figura 26 ilustra a produção total e por estágios do dessalinizador solar com recuperação de calor para o dia 01/09/2009, os índices E1, E2, E3, E4, e E5 representam os estágios do dessalinizador. Pela segunda coluna do gráfico visualiza-se a tendência decrescente da quantidade de condensado produzida, com exceção do primeiro estágio que apresentou vazamento no sistema de coleta de massa, prejudicando assim a sua produção total.

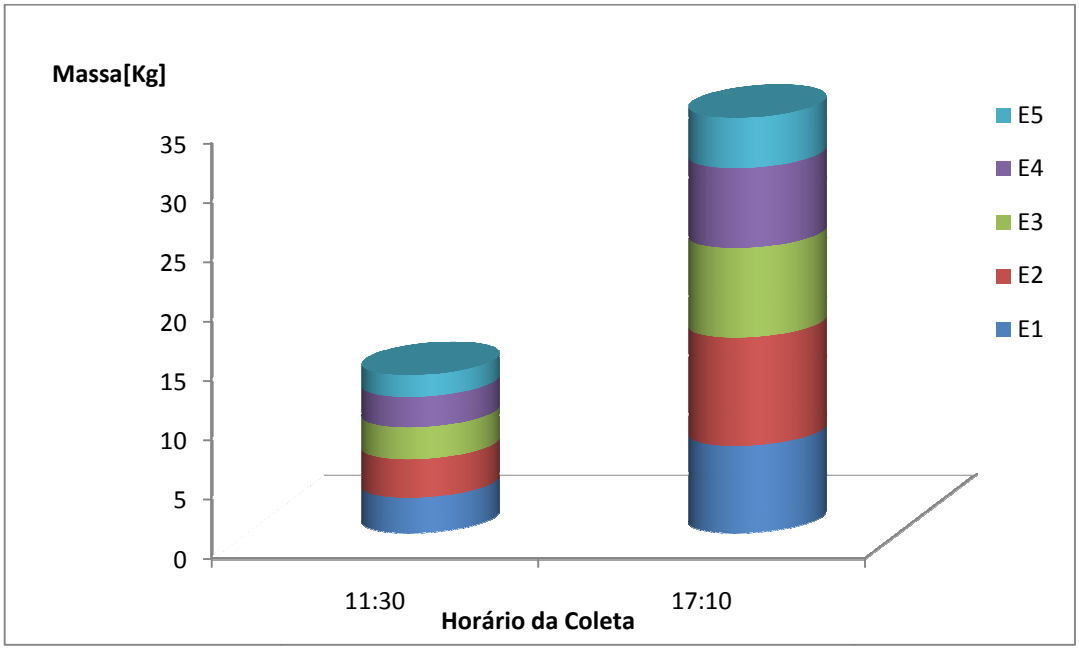


Figura 26 – Produção de 35 litros no período de 24 horas do dia 01/09/2009.

A Tabela 5 apresenta um histórico com alguns dias de operação e produção do Dessalinizador solar com recuperação de calor.

Tabela 5 – Histórico de Produção do Dessalinizador.

Dia	Nº de estágios em funcionamento	Produção (litros)	Média da Radiação (W/m²)
16/07/09	3	12,2	400
21/07/09	3	14,90	508
19/08/09	5	26,68	586
28/08/09	5	28,17	596
01/09/09	5	35,04	634
11/09/09	5	31,67	604
18/09/09	5	30,74	593

5.3 Operação da Torre – Temperaturas nos Estágios.

A Figura 27 apresenta o gráfico com os perfis de temperatura nos estágios da torre de dessalinização e tanque de armazenamento, no ambiente e da radiação solar global no plano dos coletores.

Observa-se pela curva da radiação incidente que o dia teve uma boa insolação com poucas nuvens verificadas apenas no período de onze às doze horas da manhã. A média da radiação global para este dia foi de 634,7 W/m². Esta média de radiação foi calculada durante o período de vinte e quatro horas com o início das medições no horário de 05h30min e término no horário de 17h34min. Durante o período de ausência de radiação, antes das 05h30min e após as 17h34min, foi adotado o valor zero para a radiação, mesmo com o sensor de radiação apresentando pequenos valores.

Nota-se pela Figura 27 que o horário de maior incidência de radiação difere do horário de maior temperatura verificada no tanque de armazenamento e nos demais estágios da torre de dessalinização. Isso se deve à inércia térmica do dessalinizador, ou seja, o tempo necessário para que o calor recebido na unidade de aquecimento, devido à radiação solar, chegue à água bruta presente no tanque de armazenamento e nas bandejas metálicas dos estágios de recuperação de calor.

As quedas nos valores de temperatura dos termopares verificada, principalmente, no horário entre 14h00min e 15h00min são decorrentes da alimentação do sistema. Devido ao

fato da água ir sendo pré-aquecida nos estágios mais elevados, a queda de temperatura é menor nos estágios inferiores e no tanque de armazenamento de calor.

Verifica-se ainda o aumento da temperatura da água presente no tanque de armazenamento de calor que aumentou cerca de 40ºC em um período aproximado de 8,5 horas. O fato de o tanque de armazenamento conseguir conservar uma temperatura de 20ºC superior à temperatura ambiente após o período noturno está associado ao armazenamento térmico na água e nas partes metálicas, como também na qualidade do isolamento nas paredes do tanque de armazenamento.

Embora tivesse ocorrido vazamento no primeiro estágio, observam-se as mais altas temperaturas de operação da torre de dessalinização em comparação aos dessalinizadores solares que operam em temperaturas de ate 70ºC. De aproximadamente 10 horas ate as 16 horas, a temperatura T0, tanque de armazenamento, se manteve superior a 80ºC, tendo estado próxima a 90ºC às 14 horas.

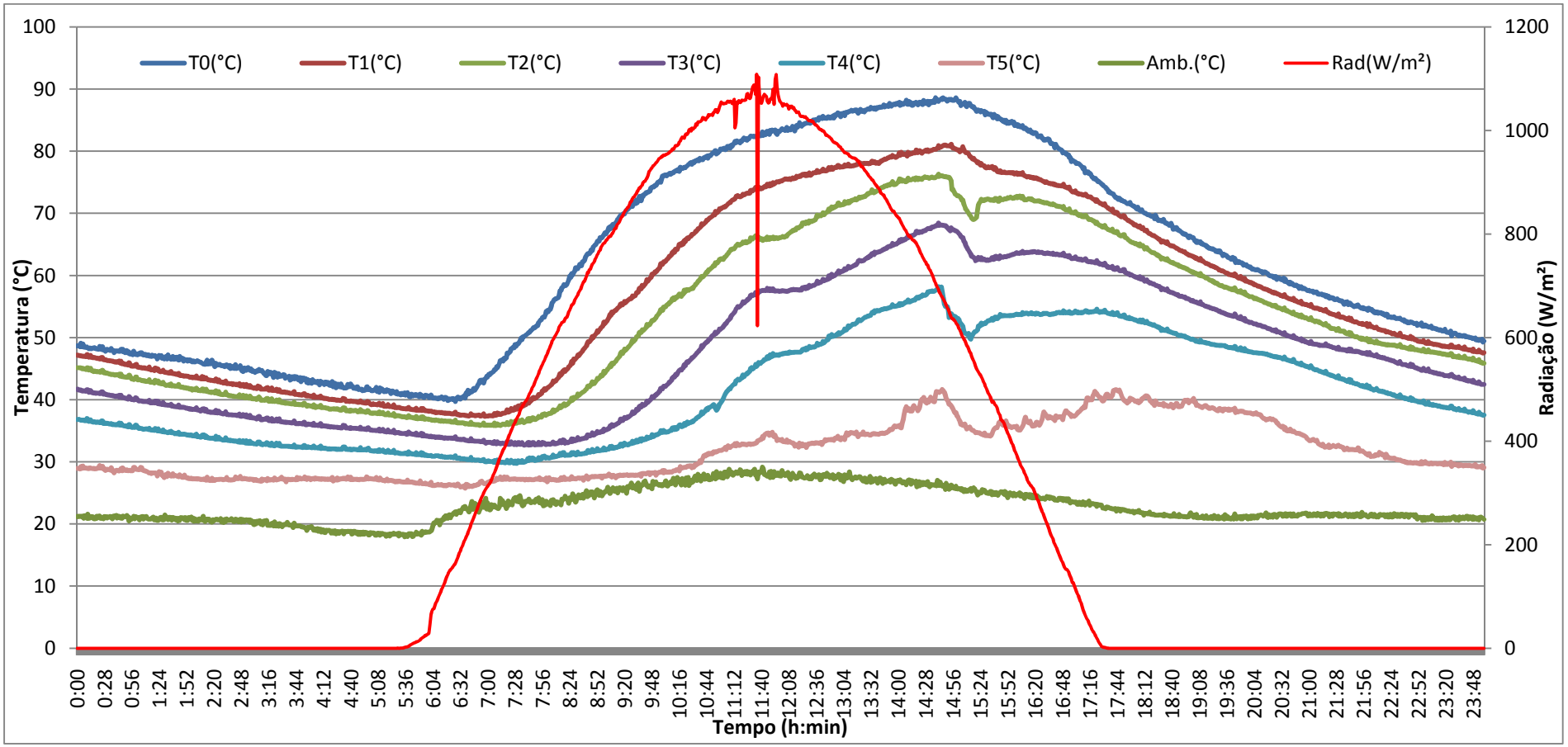


Figura 27 – Perfis de temperatura e radiação do sistema no dia 01/09/2009. As variáveis T0, T1, T2, T3, T4 e T5 indicam respectivamente as temperaturas no armazenamento, 1º estágio, 2º estágio, 3º estágio, 4º estágio e 5º estágio, Amb a temperatura ambiente e Rad a radiação global no plano do coletor.

5.4 Testes de Salinidade da Água

A Tabela 6 apresenta os valores de salinidade medidos pelo condutivímetro de bancada. Verifica-se o alto grau de salinidade do tanque de armazenamento, por se tratar da água bruta a ser dessalinizada, e o baixo nível de sais presentes na água produzida por todos os estágios do dessalinizador solar com recuperação de calor, comprovando-se assim a qualidade da água produzida e sua eficácia na dessalinização.

Foram realizadas medições de condutividade da água disponível na rede de distribuição de água local, e verificou-se que esta água apresentava valores na faixa de 250 a 300 μS/cm².

Tabela 6 – Testes de condutividade, valores em μS/cm².

	Data	Armaz.	E1	E2	E3	E4	E5
Teste 1	20/08/09	906	2,79	1,79	1,44	4,31	3,28
Teste 2	21/08/09	863	2,54	2,06	1,67	2,06	2,77
Teste 3	24/08/09	1254	2,73	1,97	1,88	1,94	9,7

Não foram realizados testes bacteriológicos nas águas brutas e dessalinizadas. Contudo, espera-se uma redução significativa nas taxas de coliformes, tendo-se como base os resultados apresentados por (LIMA, 2003). No primeiro protótipo do dessalinizador, operando em temperaturas inferiores às do presente protótipo, a pesquisadora verificou a ausência (dentro da precisão dos procedimentos usados) de coliformes após a dessalinização.

Alguns valores dos testes de condutividade podem ter sido influenciados por contaminação das amostras durante o processo de medição, o que justificaria estes valores serem superiores aos restantes.

Devido aos baixos níveis de salinidade da água dessalinizada, faz-se necessária a adição de sais minerais para adequá-la ao consumo humano. Uma maneira é a misturar a água dessalinizada com a água consumida pela comunidade local. Essa mistura depende da qualidade e níveis de sais da água consumida pela comunidade local. Com essa mistura, a produção diária do dessalinizador é maior, atendendo a um maior número de pessoas. Em particular, a produção diária para a data de 01/09/2009 seria superior aos 35 litros da torre.

5.5 Modelo de Referência Para o Desempenho

Dos resultados do processamento dos valores experimentais para o dessalinizador de um estágio, os referentes ao ângulo de inclinação da superfície de condensação em 10º com a horizontal são os de interesse neste trabalho.

Para esta inclinação de 10º, foram encontradas as constantes A, B e C para a Equação 19. Esses valores foram: A = 1,1993 ; B= 0,0990 ; C= 1,1219.

A Figura 28 apresenta os valores do número de Sherwood obtidos experimentalmente, linha azul, e a partir da utilização do modelo desenvolvido, linha vermelha, e uma faixa de erro de 15% para o valor experimental, faixa amarela, para todos os pontos, 381, e na faixa de temperatura de 50ºC a 95ºC.

Verifica-se que a curva do modelo seguiu o comportamento experimental dos valores de Sherwood e para temperaturas acima de 80º quase que todos os valores do modelo ficaram dentro da faixa de erro de 15% dos valores experimentais. 315 pontos, aproximadamente 83% do total de pontos, obtiveram erro abaixo de 15% e 371 pontos, aproximadamente 97% do total de pontos, obtiveram erro abaixo de 50%.

Figura 28 – Gráfico comparativo entre os valores experimentais e teóricos para o número de Sherwood.

6 CONCLUSÕES

A Torre de recuperação de calor com canais sintéticos de poliuretano apresentou um bom desempenho comparado ao protótipo anterior, visto que foram conseguidos melhores valores para a produção de água dessalinizada e para os parâmetros de desempenho GOR e COP, mesmo com a área de torre sendo metade da área do protótipo anterior, terceiro protótipo.

Os coletores de tubo evacuado apresentaram um bom desempenho, após ter sido colocado o tubo interior para a diminuição de vazão de água, e consequentemente aumento da temperatura no interior do tanque de armazenamento. Foram alcançadas temperaturas próximas a 90ºC.

Os perfis de poliuretano se mostraram bem eficientes para o escoamento e coleta de condensado, para a sustentação das bandejas e estágios da torre, para o isolamento de calor e mesmo com a quantidade de estágios abaixo da prevista no projeto inicial, de sete estágios, foi alcançada uma produção de 35 L/dia.

Os gráficos de radiação e temperaturas da torre de dessalinização apresentaram bons resultados, onde se evidenciam os picos de temperaturas em seus respectivos horários e a defasagem destes picos com o pico da radiação, bem como a queda de temperatura no momento da alimentação do dessalinizador e como esta queda é menor nos estágios inferiores devido ao pré-aquecimento da água.

O gráfico da produção de massa apresenta a produção individualizada por estágio, onde se verifica a menor produção dos estágios superiores comparados a produção dos estágios inferiores.

O processo de dessalinização da água pôde ser comprovado com a redução dos níveis de condutividade, devido à redução da quantidade de sais dissolvidos, da água produzida na torre de dessalinização.

A correlação desenvolvida para o número de Sherwood apresentou bom resultado visto que aproximadamente 83% dos pontos utilizados apresentaram erro abaixo de 15% e 97% dos pontos obtiveram erro abaixo de 50%. A correlação pode então ser utilizada para altas temperaturas, faixa onde as correlações disponíveis na literatura apresentam divergência de resultados, no intuído de se predizer o total de massa a ser produzida a partir dos dados de temperatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

ANDERSON, E. E. **Fundamentals of solar energy conversion**. [S.l.]: Addison-Wesley Publishing Company, 1983.

BAEHR, H. D.; STEPHAN, K. **Heat and Mass Transfer**. 2nd ed. New York: Springer, 2006.

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

CAPPELLETTI, G. M. **An experiment with a plastic solar still.** Desalination vol. 142, p. 221-227, 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 maximum efficiency of single-effect solar stills.** Solar Energy, v. 15, p. 205-217, 1973.

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

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.** Desalination, vol. 39, p. 117-123, 1981.

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.

EAMES, I. W.; MARR, N. J.; SABIR H. **The Evaporation Coefficient of Water: a review.** Int. J. Heat Mass Transfer. vol. 40, n 12, p. 2963-2973, 1997.

EL-DESSOUKY, H.; ETTOUNEY, H. **MSF development may reduce desalination costs.** Water and Wastewater International, June 2000, pp. 20–21, 2000.

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

GAO, P.; ZHANG, L.; ZHANG, H. **Performance analysis of a new type desalination unit of heat pump with humidification dehumidification.** Desalination, vol. 220, p. 531- 537, 2008.

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

INCROPERA, F. P.; DE WITT, P. D. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. New York: John Wiley & Sons, 1996.

KAYS, W. M.; CRAWFORD, M. E. **Convective Heat and Mass Transfer**. New York: 2nd ed. Mc Graw-Hill Book Company, 1980

KHALIFA, A. J. N.; HAMOOD, A. M. **On the verification of the effect of water depth on the performance of basin type solar stills.** Solar Energy, In Press, Corrected Proof, 2009 Available online 18 may 2009.

KUMAR, A.; ADHIKARI, R. S. **Estimation of mass-transfer rates in solar still.** International Journal of energy research, vol. 14, p. 737-744, 1990.

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.

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

MATHIOULAKIS, E.; BELESSIOTIS, V.; DELYANNIS, E. **Desalination by using alternative energy: Review and state-ofthe-art.** Solar Energy, vol. 203, p. 346-365, 2007.

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

QUASCHNING, Vouker. **Understanding Renewable Energy Systems.** [S.l.] 3rd ed. Earthscan, 2005.

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

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

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

SILVA, M. E. V.; COUTINHO, L. D. E.; SCHWARZER, K.; CAMPOS, M. F. **Simulação do Desempenho e Estudo Econômico de um Dessalinizador Híbrido (Solar e Gás Natural).** In: Rio Oil&Gas 2004 - Expo and Conference, 2004, Rio de Janeiro. Publicação nos anais - Rio Oil&Gas 2004 Technical Papers - CD. Rio de Janeiro : Rio Oil&Gas 2004 - IBP579_04, 2004.

SILVA, M. E. V.; SCHWARZER, K.; ALVES, R. D. B.; COUTINHO, L. D. E. **Medições Experimentais em um Dessalinizador Solar com Recuperação de Calor.** In: V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2008, Salvador, Brazil. V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2008.

TANAKA, H.; NAKATAKE, 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.

TSILINGIRIS, P. T. **Analysis of the heat and mass transfer processes in solar stills – The validation of a model.** Solar Energy, vol. 83, p. 420-431, 2009.

VIGNOLA, F.; HALAN, P.; PEREZ, R.; KMIECIK, M. **Analysis of satellite derived beam and global solar radiation data.** Solar Energy, vol 81, p. 768-772, 2007.

WEBSITES

APRICUS – **Solar Hot Water.**
Disponível em www.apricus.com/html/evacuated_tubes.htm Acessado em Março de 2009.
CAENF – **Companhia de água e esgoto de Nova Friburgo.**
Disponível em www.aguasdenovafriburgo.com.br/ Acessado em Dezembro de 2009.
SIDEM - **Sidem-desalination**
Disponível em www.sidem-desalination.com/en/process/MSF/ Acessado em Dezembro de 2009.
PUREPRO – **Drinking water system**
Disponível em www.order-ro.com/what_is_reverse_osmosis.htm Acessado em Dezembro de 2009.
UNEP – **United Nations Environment Programme**
Disponível em www.unep.or.jp/.../techrub-8d/desalination.asp Acessado em Dezembro de 2009.
Disponível em www.unep.or.jp/.../B/Desalination1-1.asp Acessado em Dezembro de 2009.
Disponível em www.unep.or.jp/.../B/Desalination3-2.asp Acessado em Dezembro de 2009.

ANEXOS

ANEXO A – Código fonte do programa utilizado para gerar os valores das constantes A, B e C do modelo de correlação para o número de Sherwood.

```
proc import datafile="C:\Documents and Settings\lesgn\Meus documentos\My
SAS Files\dessal\data2.xls"

     out=dessal;

     sheet='Stoff';

     getnames=yes;

run;
proc sort data = DESSAL out= byWinkel;
by Winkel;
run;

proc nlin data=byWinkel methot=marquardt;
if Winkel = 10 then
  Do;
   parms A = 0 to 1 by 0.05
         B = 0 to 0.5 by 0.05
       C  = 4 to 5 by 0.05;
   model Sh = A*(Gr**B)*(Sc)**C;

   output out = PREDICTION predicted=SAIDA;

end;
run;
/*goptions reset=global gunit=pct border cback=white
         colors=(black red) ctext=black
         ftitle=swissb ftext=swiss htitle=4 htext=2;

title 'Modelagem';
symbol1 color=black
        interpol=spline
        value=dot
        height=0.005;
symbol2 color=red
        interpol=spline
        value=dot
        height=0.005;

axis1 label=('valor X' justify=center)

       width=3;
axis2 label=('Real' justify=right 'Estimado')

      width=3;
legend1 label=none value=(tick=1 'Funcao Real' tick=2 'Funcao Estimada');

proc gplot;
     where Winkel = 10;
      plot Sh*Tver SAIDA*Tver /frame cframe=ligr legend=legend1
      vaxis=axis2 haxis=axis1 overlay ;
run; */
quit;
```

ANEXO B – Resultados apresentados pelo programa estatístico SAS para a obtenção dos valores das constantes A, B, e C do modelo de correlação para o número de Sherwood.

Estimation Summary

Method	Marquardt
Iterations	12
Subiterations	14
Average Subiterations	1.166667
R	1.902E-6
PPC(A)	5.908E-6
RPC(A)	0.0001
Object	1.122E-7
Objective	649.5586
Observations Read	698
Observations Used	381
Observations Missing	317

NOTE: An intercept was not specified for this model.

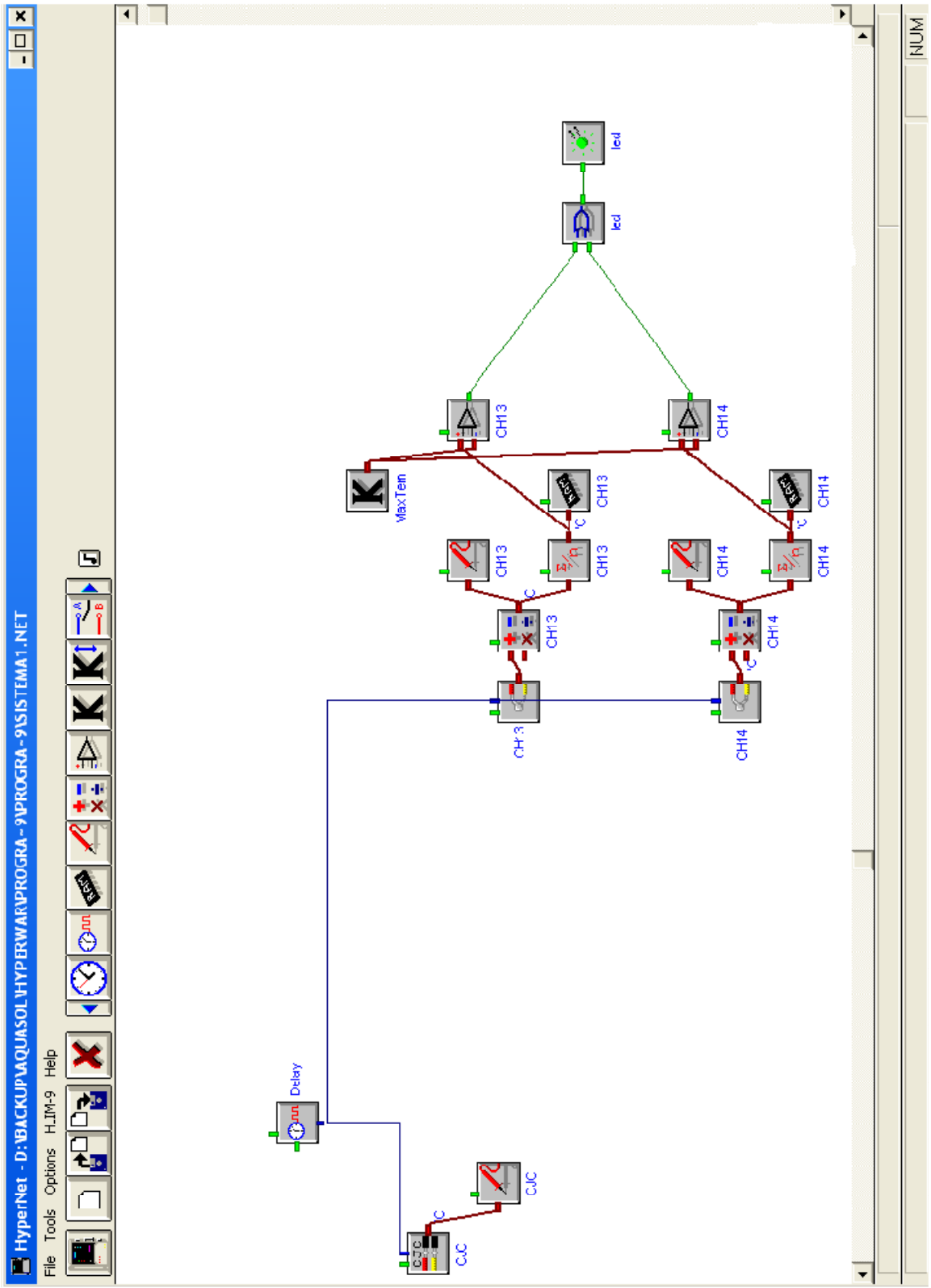
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Approx Pr > F
Model	3	55050.0	18350.0	10678.5	<.0001
Error	378	649.6	1.7184		
Uncorrected Total	381	55699.6			

The SAS System

The NLIN Procedure

Parameter	Estimate	Approx Std Error	Approximate 95% Confidence Limits	
A	1.1993	0.2366	0.7341	1.6644
B	0.0990	0.00985	0.0796	0.1183
C	1.1219	0.0356	1.0520	1.1918

Approximate Correlation Matrix

	A	B	C
A	1.0000000	-0.9979074	-0.6810147
B	-0.9979074	1.0000000	0.6375685
C	-0.6810147	0.6375685	1.0000000

ANEXO C – Exemplo do diagrama de blocos utilizado no programa do coletor de dados, para as medições na torre de dessalinização com recuperação de calor.