

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**  
**MECÂNICA**  
**DEPARTAMENTO DE MECÂNICA**

**Dimensionamento e Análise Térmica de um**  
**Dessalinizador Solar Híbrido**

Autor: Joaquim Teixeira Lopes

Orientador: Prof. Dr. Waldemir Silva de Lima

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE MECÂNICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL**

**Dimensionamento e Análise Térmica de um  
Dessalinizador  
Solar Híbrido**

Autor: **Joaquim Teixeira Lopes**

Orientador: **Prof. Dr. Waldemir Silva de Lima**

---

**Prof. Dr. Kamal A.R. Ismail, Presidente**

**FEM / UNICAMP, (Presidente)**

---

**Prof. Dr. Dr. Waldemir Silva de Lima -UEMA**

**2º Membro**

---

**Prof. Dr. Valdemar S. Leal - UEMA**

**3º Membro**

Campinas, 03 de fevereiro de 2004

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE MECÂNICA**

**Dimensionamento e Análise Térmica de um  
Dessalinizador Solar Híbrido**

Autor: Joaquim Teixeira Lopes

Orientador: Prof. Dr. Waldemir Silva de Lima

Curso: Engenharia Mecânica – Mestrado Profissional

Área de Concentração: Refrigeração e Condicionamento Ambiental

Trabalho Final de Mestrado Profissional apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre Profissional em Engenharia Mecânica / Refrigeração e Condicionamento Ambiental.

Campinas, 2004

SP – Brasil

*Bem aventurados os pobres de espírito, porque dele é o Reino dos Céus.*

*Bem aventurados os que choram, porque eles serão consolados.*

*Bem aventurados os mansos, porque eles herdarão a terra.*

*Bem aventurados os que tem fome e sede de justiça, porque eles serão fartos.*

*Bem aventurados os limpos de coração, porque eles verão a Deus.*

*Bem aventurados sois vós, quando vos injuriarem e perseguirem, e, mentindo, disserem todo o mal contra vós por minha causa.*

*Exultai e alegrai-vos porque é grande o vosso galardão nos céus; porque assim perseguiram os profetas que foram antes de vós.*

*MATEUS (5:2-12)Resumo*

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho a todas as pessoas, que sempre tiveram coragem de lutar por uma Universidade autônoma, pública, gratuita e democrática.

## **Agradecimentos**

Primeiramente ao meu senhor Jesus Cristo por tudo.

A toda minha família, em especial a minha querida mãe Luiza dos Santos Lopes, pelo amor e dedicação aos filhos.

Ao meu pai Cloves Saturnino Lopes, com muita admiração.

Aos servidores administrativos do Departamento de Física da Universidade Estadual do Maranhão: Walber Tomé Ribeiro Gomes, Miguel Benedito Santos, Mariabel de Lourdes B. Abreu, José Antônio Serra Diniz, Deusa de Jesus Serra Silva, José Magno Silva e Carlos Alberto Gama, pelo incentivo e presença constante, durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Marcus Vinicius Martins de Oliveira (*in memoriam*).

Ao meu orientador Prof. Dr. Waldemir Silva de Lima, pelas suas contribuições, além da paciência e honestidade no relacionamento ao longo deste trabalho.

Aos professores e grandes companheiros: Marco Pólo Fonseca Rocha, Paulo Sérgio Feitosa Barroso e Manuel Marin Caro.

Aos companheiros de luta do Sindicato dos Trabalhadores da Universidade Estadual do Maranhão (SITUEMA): Walber Tomé Ribeiro Gomes, Dioniso Roque dos Santos, Vicente Paulo Santos Filho, Miguel Benedito dos Santos, Raimundo Lúcio P. Conceição e Everaldo Célio V. Pereira.

A todos os companheiros do Futebol da Uema, pela amizade, sinceridade e companheirismo.

Ao professor e amigo Francisco de Assis Miranda, pela sua contribuição para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao amigo e companheiro, José Magno Silva pela grande contribuição na construção dos aparelhos do presente trabalho.

Ao professor amigo e companheiro de grandes lutas, Francisco Pinto Lima.

À Secretaria do Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Maria de Lourdes O. de Lima, pela importância do seu trabalho na realização deste Mestrado.

A todos que direta ou indiretamente sempre lutaram, acreditando que uma nova Universidade é possível.

## **Resumo**

LOPES, Joaquim Teixeira: Dimensionamento e Análise de um Dessalinizador Solar Híbrido. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas, 2004. 92 p. Trabalho Final de Mestrado Profissional.

Neste trabalho apresentamos o dimensionamento e análise de um Dessalinizador solar híbrido, constituído de um coletor solar plano para aquecimento de água salobra ou salgada em até 70°C e um trocador de calor (evaporador + condensador) que recebe a água pré-aquecida do coletor solar e eleva a sua temperatura ao ponto de ebulição, devido a quantidade de calor emitido por uma resistência elétrica de 3.0 Ohms e alimentado por 20(vinte) módulos fotovoltaicos ligados em série e paralelo (associação mista), responsáveis por 1200W de potência. A água no estado de vapor é condensada ,produzindo 14 litros de água destilada por dia de 8 horas, os dados iniciais utilizados para determinação da quantidade de energia disponível para a cidade de São Luís (latitude 2,55° Sul)do Maranhão, a quantidade de energia absorvida pelo coletor solar plano, o rendimento do coletor solar plano, o dimensionamento da resistência elétrica de Constantan, e a quantidade de água destilada, foram teoricamente estimados e experimentalmente comprovados. Além de contribuirmos para a solução de um dos maiores problemas da região semi - árida, que é a falta de água potável, mostrarmos a importância da energia solar como fonte de energia alternativa , destacando ainda os processos de utilização desta forma de energia, com aplicação no aquecimento de água e as vantagens ao meio ambiente, por ser uma forma de energia não poluente

**PALAVRAS-CHAVE:** Dessalinizador solar, Energia solar, Radiação solar, Energia fotovoltaica, Destilador solar, Dimensionamento Solar e Análise de Dessalinizador.



## Abstract

LOPES, Joaquin Teixeira: Sizing and Analysis of a Hybrid Solar Dessalinizador. College of Engineering Mechanics. State university of Campinas, 2004. 92 p. Final Work of Professional Mestrado. In this

work we present the sizing and analysis of a hybrid solar Dessalinizador, constituted of a plain solar collector for salty water heating salobra or in until 70°C and an exchanger of heat (evaporator + condensing) that it receives the water preheated from the solar collector and raises its temperature boiling point, had the amount of heat emitted for 3.0 an electric resistance of Ohms and fed by 2 on fotovoltaicos modules in series and parallel (mixing association), responsible for 1200W of power. The water in the vapor state is condensed, producing 14 liters of water distilled per day of 8 hour, the initial data for determination of the amount of available energy for the city of Is Luis (latitude 2 Maranhão, the amount of energy absorbed for the plain solar collector, the income of the plain solar collector, the sizing of the electric resistance of Constantan, and the amount of distilled water, that had been esteem and experimentally proven. Besides contributing for the solution of one of the problems of the half region – barren, that it is the drinking waters lack, to show the importance of energy as alternative power plant, detaching still the processes of use of this form of energy, with application in the heating of water and the advantages to the environment, for being a form of renewable energy

Keywords: Solar Dessalinizador, solar Energy, solar Radiation, fotovoltaica Energy, solar Destiller, Solar Sizing and Analysis of Dessalinizador.

## Índice

DEDICATÓRIA.....	iii
AGRADECIMENTO.....	iv
RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	vii
ÍNDICE.....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xiii
NOMENCLATURA .....	xiv
<b>CAPÍTULO I</b>	
1 INTRODUÇÃO .....	1
<b>CAPÍTULO II</b>	
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
<b>CAPÍTULO III</b>	
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	7
3.1 Energia solar .....	7
3.2 Espectro solar .....	7
3.3 Radiação solar extraterrestre .....	8
3.4 Variação da radiação solar extraterrestre ao longo do ano .....	8
3.5 Radiação solar direta e difusa .....	9
3.6 Radiação solar extraterrestre sobre uma superfície horizontal .....	10
3.7 Radiação solar incidente sobre uma superfície inclinada na superfície da terra .....	11
3.8 Processos de utilização da energia solar .....	12
3.9 Coletores termosolares .....	12
3.10 Aquecimento solar para água .....	13

<b>3.11</b>	<b>Esquema de um coletor solar plano .....</b>	<b>14</b>
<b>3.12</b>	<b>Cobertura do coletor solar plano.....</b>	<b>15</b>
<b>3.13</b>	<b>Determinação da porcentagem refletida e transmitida da luz solar na cobertura do coletor .....</b>	<b>17</b>
<b>3.14</b>	<b>Reflexão e transmissão de ondas eletromagnéticas .....</b>	<b>19</b>
<b>3.15</b>	<b>Espaço de ar .....</b>	<b>23</b>
<b>3.16</b>	<b>Placa absorvedora .....</b>	<b>23</b>
<b>3.17</b>	<b>Isolamento térmico .....</b>	<b>24</b>
<b>3.18</b>	<b>Caixa do coletor solar plano .....</b>	<b>25</b>
<b>3.19</b>	<b>Eficiência térmica dos coletores .....</b>	<b>25</b>
<b>3.20</b>	<b>Coefficiente global de transferência de calor no coletor solar .....</b>	<b>28</b>
<b>3.21</b>	<b>Eletricidade .....</b>	<b>35</b>
3.21.1	<i>Resistência Elétrica .....</i>	36
3.21.2	<i>Lei de JOULE .....</i>	38
<b>3.22</b>	<b>Efeito Fotovoltaico .....</b>	<b>39</b>
<b>3.23</b>	<b>Dessalinização .....</b>	<b>42</b>

## **CAPÍTULO IV**

<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>45</b>
<b>4.1</b>	<b>Metodologia- Coletor solar plano .....</b>	<b>45</b>
4.1.1	<i>Montagem Experimental .....</i>	45
4.1.2	<i>Medidas de Temperaturas .....</i>	46
<b>4.2</b>	<b>Protótipo do Destilador Solar .....</b>	<b>47</b>
4.2.1	<i>Metodologia.....</i>	47
4.2.2	<i>Dispositivo Experimental do Protótipo do Destilador .....</i>	48
4.2.3	<i>Temperaturas .....</i>	49
<b>4.3</b>	<b>Dimensionamento da Resistência Elétrica Fixada e Isolada na Parte Externa de uma Bacia Retangular de Alumínio do Protótipo do Destilador</b>	<b>49</b>
4.3.1	<i>Associação em Série de Painéis Fotovoltaicos .....</i>	50

## **CAPÍTULO V**

<b>5</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCURSÃO .....</b>	<b>51</b>
<b>5.1</b>	<b>Resultado da determinação da eficiência térmica .....</b>	<b>52</b>
5.1.1	<i>Tabela Experimental . .....</i>	52
5.1.2	<i>Curva de Eficiência .....</i>	53

<b>5.2</b>	<b>Resultados do ensaio da placa do evaporador .....</b>	<b>53</b>
<b>5.3</b>	<b>Ensaio do protótipo do destilador .....</b>	<b>57</b>
<b>5.4</b>	<b>Ensaio do protótipo do dessalinizador solar híbrido .....</b>	<b>60</b>
<b>5.5</b>	<b>Análise preliminar do fluido de trabalho .....</b>	<b>66</b>
<b>5.6</b>	<b>Análise da água produzida pelo dessalinizador Solar Híbrido .....</b>	<b>67</b>
<b>5.7</b>	<b>Comparação da água destilada pelo sistema do presente trabalho e os limites estipulados pela Organização Mundial de Saúde (OMS), para consumo humano .....</b>	<b>68</b>
<b>5.8</b>	<b>Análise econômica .....</b>	<b>69</b>
5.8.1	<i>Custo do Capital para Aquisição do Sistema (CP + CV) .....</i>	69
5.8.2	<i>Custo de Operação de Manutenção do Sistema (CP + FV) .....</i>	69
<b>5.9</b>	<b>Custo total da água potável em 25 anos de operação do sistema (DSH).....</b>	<b>70</b>
5.9.1	<i>Dados Comparativos do Custo da Água Potável .....</i>	70
<b>5.10</b>	<b>Comparação de custo do sistema do presente trabalho com um sistema nas mesmas condições, com a resistência elétrica alimentada por energia elétrica (Hidrelétrica) .....</b>	<b>71</b>
<b>5.11</b>	<b>Comparação de custos de dois sistemas (DSH e DE).....</b>	<b>72</b>
<b>5.12</b>	<b>Gráfico da relação de custos entre o DSH e DE .....</b>	<b>73</b>
 <b>CAPÍTULO VI</b>		
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO E SUGESTÃO .....</b>	<b>74</b>
<b>6.1</b>	<b>Conclusão .....</b>	<b>74</b>
<b>6.2</b>	<b>Sugestão de continuidade do trabalho .....</b>	<b>75</b>
	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>76</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>90</b>

## Lista de Figuras

FIGURA 2.1	Esquema de montagem do dessalinizador solar híbrido .....	3
FIGURA 3.1	Variação da Radiação Solar Extraterrestre ao longo do ano .....	8
FIGURA 3.2	Coletor Solar Plano .....	14
FIGURA 3.3	Refração da luz .....	17
FIGURA 3.4	Refletância da placa de vidro .....	21
FIGURA 3.5	Transmitância da placa de vidro .....	22
FIGURA 3.6	Secção de um coletor plano sob ação da radiação solar .....	28
FIGURA 3.7	Uma malha térmica de resistência $R_1$ , $R_2$ , $R_3$ e $R_4$ .....	30
FIGURA 3.8	Malha térmica equivalente a malha da figura 3.7 .....	32
FIGURA 3.9	Circuito elétrico simples .....	35
FIGURA 3.10	Junção <i>pn</i> ilustrando registro onde ocorre o acúmulo de cargas. (b) Campo elétrico resultante da transferência de cargas através da junção <i>pn</i> .....	40
FIGURA 4.1	Medida de vazão mássica do Coletor Solar Plano .....	45
FIGURA 4.2	Medida da Temperatura do Coletor Solar Plano .....	46
FIGURA 4.3	Aparelhos utilizados nos Ensaios da Placa de Alumínio do Evaporador	47
FIGURA 4.4	Ensaio da Placa Elétrica do Evaporador .....	48
FIGURA 4.5	Placa plana de alumínio com resistência elétrica colada e isolada .....	49
FIGURA 4.6	Associação de painéis fotovoltaicos ligados em série .....	49
FIGURA 5.1	Curva de eficiência com base na temperatura de saída do Coletor Solar.	53
FIGURA 5.2	Gráfico do 1º Ensaio da Placa Elétrica do Evaporador .....	54
FIGURA 5.3	Gráfico do 2º Ensaio da Placa Elétrica do Evaporador .....	55
FIGURA 5.4	Gráfico do 3º Ensaio da Placa Elétrica do Evaporador .....	56
FIGURA 5.5	Evolução temporal da temperatura da água, de vapor, da cobertura e do ambiente .....	57
FIGURA 5.6	Volume da água destilado em função do tempo .....	59

FIGURA 5.7	Destilado em função da temperatura .....	59
FIGURA 5.8	Produtividade do destilado em função do tempo .....	60
FIGURA 5.9	Ensaio do dessalinizador solar híbrido .....	60
FIGURA 5.10	Evolução temporal da temperatura da água, da cobertura e do vapor, no 1º Ensaio .....	61
FIGURA 5.11	Volume da água destilada em função do tempo .....	62
FIGURA 5.12	Destilado em função da temperatura da água .....	62
FIGURA 5.13	Gráfico da produtividade em função do tempo do dessalinizador solar híbrido .....	63
FIGURA 5.14	Evolução temporal da temperatura da água, da cobertura e do vapor, no 2º Ensaio do sistema acoplado .....	64
FIGURA 5.15	Destilado em função do tempo .....	65
FIGURA 5.16	Destilado em função da temperatura da água .....	65
FIGURA 5.17	Produtividade em função do tempo, no 2º Ensaio do dessalinizador solar híbrido .....	66
FIGURA 5.18	Comparação de custo entre DSH e DE .....	73
FIGURA A.1	Ângulos básicos Sol/Terra .....	77
FIGURA A.2	Associação mista de módulos fotovoltaicos.....	81

## Lista de Tabelas

TABELA 3.1	Tipos de vidros para cobertura de Coletor Solar Plano .....	15
TABELA 3.2	Determinação do número de cobertura .....	16
TABELA 3.3	Propriedades do alumínio e do cobre .....	23
TABELA 3.4	Isolantes térmicos .....	24
TABELA 3.5	Valores típicos do Coeficiente Global de Perdas Térmicas.....	27
TABELA 5.1	Dados experimentais do Coletor Solar Plano .....	52
TABELA 5.2	Dados do 1º ensaio da placa elétrica do evaporador .....	54
TABELA 5.3	Dados do 2º ensaio da placa elétrica do evaporador .....	55
TABELA 5.4	Dados do 3º ensaio da placa elétrica do evaporador .....	56
TABELA 5.5	Ensaio do destilador para um volume inicial de água salgada de 200ml, resíduo de 70ml, captação 100ml e perdas de 30ml.....	58
TABELA 5.6	Produtividade, destilado e temperatura da água, do dessalinizador solar híbrido no 1º Ensaio .....	61
TABELA 5.7	Produtividade, destilado e temperatura da água, do dessalinizador solar híbrido no 2º Ensaio .....	64
TABELA 5.8	Análise da água utilizada no dessalinizador solar híbrido .....	67
TABELA 5.9	Análise da água produzida pelo dessalinizador solar híbrido .....	68
TABELA 5.10	Limites máximos de diversos parâmetros utilizados na avaliação da qualidade da água para consumo humano e a comparação com os dados da água destilada pelo dessalinizador solar híbrido .....	68
TABELA 5.11	Custo do capital para aquisição do sistema .....	69
TABELA 5.12	Custo de operação e manutenção do sistema (CP + FV) .....	69
TABELA 5.13	Custo total da água potável em 25 anos .....	70
TABELA 5.14	Preço da água potável produzida por vários dessalinizadores .....	71
TABELA 5.15	Comparação de custo do Dessalinizador Solar Híbrido (DSH) com o dessalinizador alimentado por Hidrelétrica (DE) .....	72
TABELA A.1	Dados sobre a instalação em São Luís do Maranhão (Latitude 2.55° Sul.	78

## Nomenclatura

DNOCS- Departamento Nacional de Obras Contra as Secas

STD – Sólidos totais disponíveis

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

DSH – Dessalinizador Solar Híbrido

DE- Dessalinizador Elétrico

ASTM – American Society of Testing and Materials

NASA – National Aeronautics and Space Administration

WRC – World Radiation Center

$G_{SC}$  – Constante Solar

$G_T$  – Radiação Solar Extraterrestre

$H_O$  – Energia da Radiação Solar Extraterrestre

$T_O$  – Temperatura de saída do fluido de trabalho no Coletor Solar

$T_i$  – Temperatura de entrada do fluido de trabalho no Coletor Solar

$\eta$  - Eficiência

OMS – Organização Mundial de Saúde

$T_V$  – Temperatura da cobertura de vidro

$T_P$  – Temperatura Média da Placa Absorvedora do Coletor Solar

$T_a$  – Temperatura do Ambiente

$U_L$  – Coeficiente Global de Perdas Térmicas

$\Gamma$  – Transmitância

$R$  – Refletância

$\delta$  – Coeficiente de correção da função custo

$Y_{DSH}$  – Custo de Destilagem Solar Híbrido



$Y_{DE}$  – Custo do Dessalinizador Elétrico

$C$  – Custo Inicial

$P_V$  – Placa Fotovoltaica

$C_P$  – Calor Específico a Pressão Constante

$m$  – Vazão Mássica

# CAPÍTULO I

## 1 INTRODUÇÃO

A água é cada vez mais escassa no planeta e notadamente em nosso país. Seu volume total não está se reduzindo, porque não há perdas no ciclo de evaporação e precipitação; o que caracteriza a escassez é a poluição. O Brasil é um país privilegiado, pois aqui estão 11,6% de toda água doce do planeta. Aqui também se encontra o maior rio do mundo, o Amazonas, e parte do maior reservatório de água subterrânea do planeta, o Sistema Aquífero Guarani. No entanto essa água está mal distribuída,. 70% das águas doces do Brasil estão na Amazônia, onde vivem apenas 7% da população. Essa distribuição deixa apenas 3% de água para o nordeste, formado pelos Estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Alagoas, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Sergipe e Bahia, que em razão da variedade de clima, vegetação e economia, está dividida em cinco grandes zonas: litoral, zona da mata, agreste, sertão e meio norte. As variações climáticas que essa região enfrenta ao longo de cada ano, é um dos parâmetros responsáveis pela falta de água para o consumo humano, acarretando em um dos problemas sociais e econômico da região.

Em busca de soluções, as águas subterrâneas tem sido mais exploradas pelo homem, todavia, as águas comumente encontradas são impróprias para o consumo devido de seus altos índices de sais dissolvidos. Esta característica em algumas regiões é função dos tipos de rochas encontradas, na região semi-árida, constituída por parte do Piauí, Rio Grande do Norte, Paraíba, Bahia e todo o Estado do Ceará, há grande predominância de rochas cristalinas, as outras apresentam baixos valores de porosidade e de permeabilidade primárias, condicionando uma circulação lenta dos fluidos e conseqüentemente maior tempo de permanência das águas percoladas nos aquíferos, acarretando numa maior salinização das mesmas. A terceira Bacia com importância em termos de água subterrânea é a Bacia do Maranhão que constitui a província Paraíba, cuja capacidade é cerca de  $17,50 \times 10^3 \text{ km}^3$  de

água armazenada, com uma área de 700.000 Km<sup>2</sup>, abrangendo cerca 90% do Estado do Piauí e todo Estado do Maranhão, e uma espessura máxima de 300m. O sistema aquífero Pastos Bons, Motuca é muito fraco e ocorre em área restrita, sendo pouco explorado. Sua produtividade média é fraca, tendo vazões específicas ente 0,13 e 1,0 m<sup>3</sup>/h/m com vazões entre 3,2 e 25 m<sup>3</sup>/h com rebaixamentos de 25m. O aquífero Corda ocorre nas condições livre, semi-confinado e confinado, sendo mais explorado como sei-confinado onde apresenta melhores condições hidro dinâmicas. Sua área de exploração situa-se no centro sul do Estado do Maranhão. Sua produtividade é média, tendo os poços a vazão específica entre 1 e 4 m<sup>3</sup>/h/m e vazão entre 5 e 25 m<sup>3</sup>/h para rebaixamentos de 25m. A água é de boa qualidade com média de RS de 400mg/l. O aquífero Codó apresenta-se em muito locais como aquífero em função da presença de pelitos e carbonatos. Sua produtividade é semelhante ao aquífero corda com RS de 300 mg/l. O aquífero Itapecuru é o que apresenta maior extensão de ocorrência na superfície, em geral sob a forma de livre a semi- confinado. Todo centro - norte do Maranhão é representado por esse aquífero que é intensamente explorado, sobretudo para a pecuária e abastecimento rural. A produtividade do aquífero é média, tendo os poços vazões específicas entre 1 e 0,13m<sup>3</sup>/h/m e a vazão entre 3,2 e 25 m<sup>3</sup>/h para rebaixamento de 25m.

Pelos dados citados o Maranhão pode ser considerado um estado privilegiado em relação a água subterrânea, o mesmo não podemos dizer do Estado do Ceará, cujo o território é formado por cerca de 75% de rochas cristalinas com disponibilidades hídricas subterrâneas limitadas. A vazão média por poço é de 3 m<sup>3</sup>/h e presença de sólidos totais disponíveis (STD) de 300 mg/l Manoel Filho (1997). Além das secas freqüentes, a água não apresenta qualidade desejável. A Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais CPRM (1998), analisou a salinidade de aproximadamente 13000 poços e constatou que em 4800 deles o teor de salinidade foi de 1000 mg/l de sais. Estes são teores impróprios para o consumo humano e a situação se agrava ao longo do ano com a natural redução do estoque hídrico. Ao lado de medidas convencionais para aumentar a oferta de água potável, tais como, construção de cisternas e açudes, o uso de dessalinizadores, tem despertado grande interesse no Ceará. Até 1997 haviam apenas 10 dessalinizadores financiados e em 2000, este número aumentou para 160 unidades, atendendo 21.000 famílias. Fundação Banco do Brasil, Fundação Nacional de Saúde e o DNOCS, implantaram cerca de 250 destes equipamentos no Ceará. Quanto aos dessalinizadores funcionando, o entrave constitui-se na destinação dos rejeitos (60% da água). Dessalinizar a água potável sem agredir o meio ambiente, requer um programa bem

formulado. O semi-árido tem muitos exemplos de programas ineficientes marcados pela improvisação, paternalismo e com o desperdício de dinheiro público. Para enfrentar estes desafios é necessário a capacitação de pessoal, o avanço e as escolhas tecnológicas adequadas.

A utilização da energia solar para aquecimento da água é uma das aplicações mais práticas, e é uma área a ser analisada de uma forma especial, pois no tocante a economia de energia elétrica é uma opção extremamente útil. Através dela é possível diminuir ou até mesmo substituir o uso dos chuveiros elétricos, pois o Brasil possui alta incidência de radiação solar, principalmente na Região Nordeste.

Quando se fala em sistema de aquecimento de água com energia solar, muitos são atraídos pela expectativa de redução dos gastos com energia elétrica, através de uso desse sistema, mas os ânimos diminuem quando são apresentados os custos iniciais para a sua instalação. Embora seja um custo de dimensões consideráveis, há perspectivas de redução destes custos em razão da isenção de impostos conferidos aos coletores solares, a partir do segundo semestre de 1998.

Tendo em vista este novo momento em que se retorna o interesse pelo uso da energia solar para o aquecimento de água, entende-se que também o dimensionamento e a estratégia de utilização devam ser repensados. O objetivo deste trabalho é apresentar estudo sobre um dessalinizador com uso exclusivo de energia solar, com capacidade estimada em 14 litros de água por dia, a custo baixo, quando comparado com outros métodos de dessalinização da água salobra ou do oceano, com aproveitamento da energia solar para aquecimento da água no Coletor solar plano e geração da energia elétrica por um sistema fotovoltaico. No coletor solar plano a energia é absorvida pela placa e transferida para o fluido de trabalho e nos módulos fotovoltaicos a luz solar é convertida diretamente em corrente elétrica, com a vantagem de ser uma das mais viáveis do ponto de vista ambiental. A energia ainda pode ser estocada em bateria e pode ser usada a qualquer tempo para suprir os consumidores de energia com eletricidade.

## CAPÍTULO II

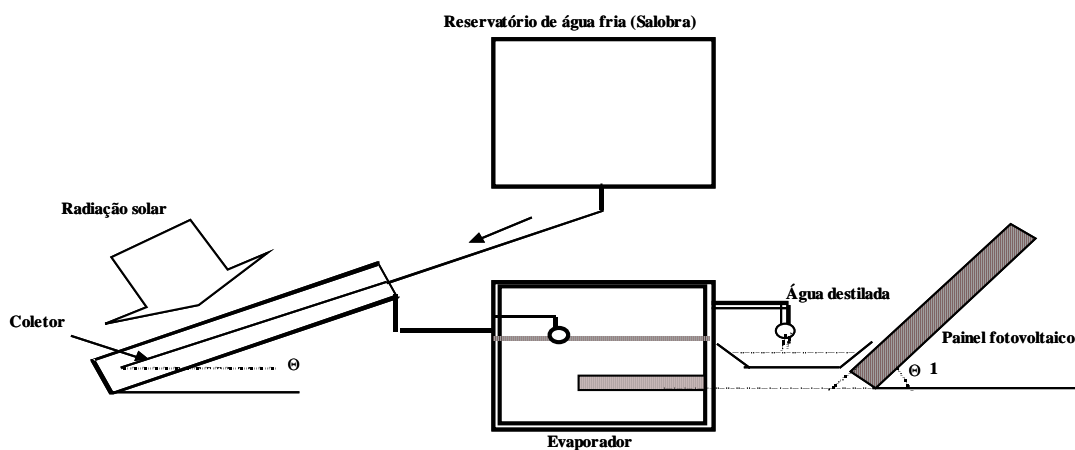
### 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Muitos trabalhos têm sido publicados por diversos pesquisadores sobre métodos de dessalinização, com a finalidade de reduzir os custos dos dessalinizadores e aumentar o acesso a água potável, nas regiões onde a água possui um teor médio de sais acima do permitido para consumo, pela organização mundial de saúde, que é de 500 mg/litros.

Na tentativa de fornecer mais uma alternativa para solucionar o problema, apresenta-se este trabalho visando obter a água potável, utilizando um dessalinizador solar híbrido.

Para estudo e compreensão da pesquisa, consideramos um sistema composto por um reservatório de 30 litros de água, um coletor solar plano, 20(vinte) painéis Fotovoltaicos de 12 volts cada um e um evaporador, alimentado pêlos painéis fotovoltaicos.

A figura 2.1 ilustra o sistema térmico proposto na intenção de explicar de maneira simplificada, as características envolvidas no estudo deste dessalinizador.



**FIGURA 2.1-** Esquema de montagem do dessalinizador solar híbrido

Diversos são os estudos teóricos e experimentais voltados para dessalinização em diversas condições e diferentes métodos:

- O estudo sobre estratégia para formação e implantação de um programa de dessalinização da água salobra no ceará, foi efetuado por Pinheiro & Silva (2001), investigaram que cerca de 75% do território cearense é formado por rochas cristalinas com disponibilidades hídricas limitadas, com vazão média por poço de 3 m<sup>3</sup>/h e presença de sólidos totais disponíveis (STD) de 300 mg/litros, até 1997 haviam apenas 10 dessalinizadores financiados pelo Governo do Estado e em 2000, este número aumentou para 160 unidades, atendendo 21100 famílias. Concluímos que a escolha de comunidade pelo critério de salinidade para instalação de dessalinizador não é uma estratégia adequada para enfrentar o desafio de suprir a população com água potável.

ALENCAR & SAGLETTI (2001), estudaram a viabilidade de uma telha coletora de energia solar de cimento com a idéia de agregar num único ponto uma telha de cobertura persianas que atue simultaneamente como um coletor solar. A eficiência instantânea foi obtida razão entre a energia incidente no coletor e o calor útil transferido para o fluido circulante, apresentando um rendimento de 50%.

PEREIRA, FREITAS, TORRES & COSTA (2000), investigaram a redução no custo e viabilidade de se instalar coletores solares residenciais com materiais de fácil acesso a população de baixa renda e apresentaram os métodos para comparação de dois tipos de coletores o clássico e o alternativo.

FERREIRA (2002), estudou toda a evolução histórica da dessalinização de água salgada ou salobra, do mar, dos açudes e dos poços, verificando que os cientistas pesquisam as soluções há mais de 2300 anos, tendo em Aristóteles o seu precursor.

TIBA, FRAIDENRAICH & BARBOSA (2000), estudaram as instalações de sistemas fotovoltaicos para residências rurais e bombeamento de água, iniciando o trabalho com uma revisão sobre energia solar, conceitos básicos da conversão fotovoltaico, dimensionamento do arranjo fotovoltaico e balanço eletromecânico para um sistema de bombeamento de água no sertão nordestino, além de mapas para radiação solar no Brasil.

SUASSUNA (2000), estudou o problema da água potável no semi-árido brasileiro e, fez um alerta para os governantes sobre a necessidade de mais dessalinizadores, devido o teor salino, tornar imprestável para o consumo humano a água existente no sub solo dessa região

LUIZ M. Adir (1985). *Como aproveitar a energia solar*. Utilizamos no presente trabalho para melhor compreender a posição do Sol em relação à Terra horas de insolação, absorção, reflexão e transmissão de luz solar.

MOURA, Bezerra A. (1979). Estudou o desenvolvimento de um protótipo de função solar, destinado ao esporte. Este trabalho encontra-se nas atas do 2º Congresso Latino Americano de Energia Solar, no volume II, da página 371-395, Universidade Estadual da Paraíba.

ISMAIL, Kamal Abdel Radi (2000). Estudou energia solar nos seus princípios e aplicação, destacando o título completo para o dimensionamento de um coletor solar plano.

ESTOECHER, Wilbert F., e JONES, Jerold W. (1988). Estudaram a intensidade de radiação, geometria solar, fluxo de radiação direta do Sol, característica do envidraçamento, armazenamento de energia, projeto solar passivo e coletor solar.

O estudo teórico sobre eletricidade, abordando Lei de Ohm, Lei de Joule, densidade de corrente, corrente e resistência elétrica foi reforçado com o trabalho efetuado por Quevedo (1977).

O estudo realizado por Goldemberg (1961), contribui para a dedução da equação da refletividade e transmissividade do vidro de cobertura do coletor solar.

## **CAPÍTULO III**

### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **3.1 Energia solar**

A energia solar é gerada no núcleo do sol à temperatura de aproximadamente 15.000.000 °C e a pressão de 340 bilhões de vezes a pressão atmosférica da terra ao nível do mar; são tão intensas que ocorrem reações nucleares. Estas reações (fusão nuclear) transformam 04 (quatro) prótons ou núcleos de átomos de hidrogênio em uma partícula alfa, que é o núcleo do átomo de Hélio. A partícula alfa é aproximadamente massiva do que 04 (quatro) prótons. A diferença em massa é expelida como energia e “carregada” até a superfície do sol, através de um processo conhecido como convecção, e é liberada em forma de luz e calor. A energia gerada no interior do sol leva um milhão de anos para chegar à superfície.<sup>(1)</sup> A quantidade de energia solar recebida na atmosfera externa por ano é chamado SERPY e é igual a 1,5x10MWh. É interessante notar que 1 SERPY=28000 vezes a energia utilizada no mundo por ano. 30% da radiação solar recebida na atmosfera externa da terra é refletida de volta ao espaço na forma de radiação de ondas curtas. Quase 47% é absorvida pela atmosfera, superfície da terra, oceanos e convertida em calor na forma de temperatura ambiental do planeta. O restante 23% provoca evaporação, convecção, precipitação, etc. Uma parte pequena é usada na convecção atmosférica e oceanográfica é da ordem de 370 bilhões Kw. Uma parte menor, ainda é utilizada na produção de biomassa, a qual, é da ordem de 40 bilhões Kw. Esses dois processos usam somente 0,4% da radiação solar atingida a superfície da terra.

#### **3.2 Espectro solar**

Quando deseja-se fazer estudos na área de energia solar, é interessante analisar apenas parte do espectro eletromagnético. A radiação de interesse abrange uma faixa que varia de 0,3 µm a 2,5 µm denominada radiação solar. Segundo Iqbal, (1983), aproximadamente 95% da



radiação emitida pelo sol encontra-se nesta faixa. Este espectro contém uma pequena parcela da radiação ultravioleta, toda a radiação visível e parte da radiação infravermelha.

O espectro da radiação solar fora da atmosfera terrestre é muito parecido com o de um corpo negro à temperatura de 5.800 K (que é a temperatura aproximada da superfície do sol), já o espectro da radiação solar que chega à superfície da terra não o é. Essa diferença no espectro envolve muitos fatores, incluindo a absorção, a dispersão e a reflexão da radiação com os vários tipos de partículas que compõem a atmosfera.

### **3.3 Radiação solar extraterrestre**

A radiação solar recebida acima da atmosfera é denominada radiação solar extraterrestre, e seu estudo tem sido amplamente pesquisado. Nos anos 50, os valores da intensidade da radiação solar extraterrestre eram apenas estimados, pois as medidas eram realizadas na superfície da terra. Já nos anos 70, com a evolução dos balões atmosféricos e aeronaves especiais, foi realmente possível medir a intensidade da radiação solar fora da atmosfera. Muitos experimentos foram realizados com diferentes instrumentos de medida, e deles resultaram o valor de  $1353 \text{ W/m}^2 \pm 1,5\%$ , sendo aceito pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) e pela American Society of Testing and Materials (ASTM).

Nos anos 80, através de novas medidas realizadas, passou-se a recomendar o valor de  $1367 \text{ W/m}^2 \pm 1\%$ , reconhecido pelo The World Radiation Center (WRC).

Este número é denominado Constante Solar ( $G_{sc}$ ) e é a energia recebida do sol, por unidade de tempo, sobre uma área de superfície perpendicular à direção de propagação da radiação solar a uma distância média Terra- Sol de  $1,495 \times 10^{11} \text{ m}$

### **3.4 Variação da radiação solar extraterrestre ao longo do ano**

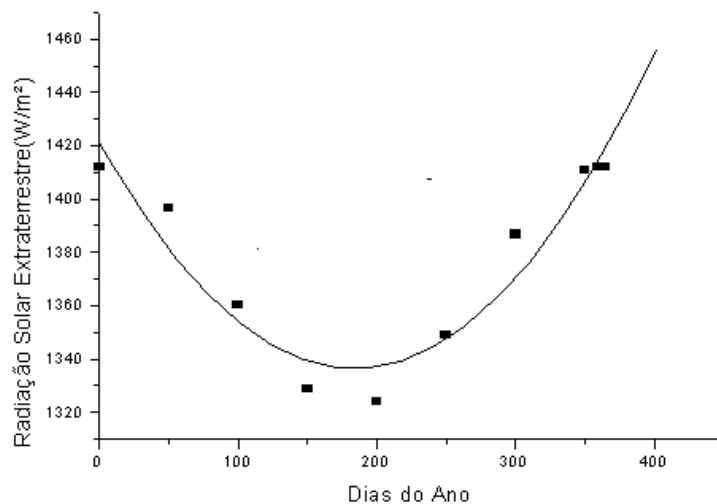
A intensidade da radiação solar extraterrestre tem uma suave variação ao longo do ano devido à variação da distância entre a terra e o sol.

A dependência da radiação solar extraterrestre ao longo do ano, sobre uma superfície perpendicular aos raios do sol, é descrita com boa aproximação pela equação 3.1. Ismail, [2002]

$$G_T = G_{sc} \left[ 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360n}{365} \right) \right] \quad (3.1)$$

Onde  $G_T$  é a radiação solar extraterrestre,  $G_{sc}$  é a constante solar ( $1367 \text{ W/m}^2$ ) e  $n$  o número do dia do ano (1 a 365)

Utilizando a equação 3.1 [Ismail, 2002] para 365 dias do ano, obtém-se a curva apresentada na figura. 3.1



**FIGURA 3.1** Variação da radiação solar extraterrestre ao longo do Ano - Ismail (2002)

### 3.5 Radiação solar direta e difusa

A intensidade e a distribuição espectral da radiação solar que incide na superfície da terra, dependem das condições atmosféricas e da massa atmosférica atravessada pela radiação. Ao atravessar a atmosfera, esta radiação percorre um caminho de constantes interações, sendo parcialmente absorvida e sofrendo inúmeras reflexões e espalhamentos. A partir destes fenômenos, o estudo da radiação solar incidente na superfície da terra divide-se em duas partes distintas: a radiação solar direta, que é definida pela parcela da radiação que continuou

seu caminho sem ser espalhada pela atmosfera, e a radiação solar difusa, parcela da radiação que sofreu modificações em sua trajetória ao atravessar a atmosfera. A soma das parcelas direta e difusa é denominada radiação global.

Com tempo claro, as proporções entre estas duas radiações variam no decorrer do dia dependendo da altura do sol e das quantidades de água, gás carbônico e poeira contidas na atmosfera. Nesta Condição, segundo Palz (1981), a radiação direta é dez vezes superior à radiação difusa quando o sol está próximo do zênite, mas a difusa torna-se quase igual a direta quando o sol está próximo do horizonte. Com tempo nublado, a radiação difusa é sempre superior à direta.

A medida da radiação solar é realizada por instrumentos denominados piranômetros, que registram os valores da radiação em intervalos de tempo determinados e, em geral, são armazenados em valores horários ou diários.

Na medida da radiação global, o piranômetro é colocado sobre uma base horizontal, que recebe a energia solar de todo o hemisfério, ou seja, de todas as direções.

Na medida da radiação difusa, o piranômetro deve ser protegido da luz solar direta por um pequeno disco ou cinta que mantém uma sombra constantemente sobre o sensor.

Na medida da radiação direta, utiliza-se um pireliometro, instrumento que tem o sensor no interior de um tubo comprido, com uma abertura colimada, onde a superfície receptora deve ser mantida normal aos raios solares. O pireliometro só é capaz de receber, portanto, os raios provenientes diretamente do sol.

### **3.6 Radiação solar extraterrestre sobre uma superfície horizontal**

Conhecer a intensidade da radiação solar recebida sobre uma superfície durante determinado tempo é essencial para um bom dimensionamento de sistemas que utilizam energia solar. A energia da radiação solar extraterrestre recebida durante um dia, sobre uma superfície paralela no plano horizontal da superfície da terra, é bem determinada através da equação 3.2. Ismail, (2002)

$$H_o = 3600G_{SC} \left[ 1 + 0.033 \cos \left( \frac{369n}{365} \right) \right] \times \left[ \left( \frac{2w_s}{15} \right) \sin \phi \sin \delta + \left( \frac{24}{\Pi} \right) \cos \phi \cos \delta \sin w_s \right] \quad (3.2)$$

onde,  $H_o$  é a energia da radiação solar extraterrestre,  $\theta$  é a latitude,  $\delta$  é o ângulo de declinação e  $w_s$  é o ângulo horário pôr do sol.

Diferente do que acontece com a radiação solar extraterrestre, há muita dificuldade em antever através de métodos teóricos a intensidade da radiação solar sobre uma superfície horizontal nas proximidades da terra, uma vez que as características atmosféricas estão variando constantemente. Devido a esta impossibilidade de predeterminar com eficácia a intensidade dessa radiação, as medidas desta grandeza são realizadas diretamente pelos piranômetros.

Os dados da radiação solar são geralmente fornecidos pelos serviços meteorológicos. No Brasil, os aparelhos destinados para a medida da intensidade da radiação solar existem em número muito aquém do que seria necessário. Segundo Baschirotto (1998), um país como o Brasil, em comparação com a Argentina, deveria ter pelo menos cem estações de qualidade operando continuamente. Na falta destes dados tem-se recorrido à correlações que relacionam o número de horas de brilho de sol com a radiação solar. O número de horas de brilho do sol é determinado com um instrumento conhecido como heliógrafo e que existe em quase todas as estações agrometeorológicas. Apesar das correlações e das medidas não terem alta precisão, estes dados permitem estimar a radiação solar nas localidades das estações.

Atualmente um programa de análise de dados de observação por satélite pretende melhorar significativamente a oferta de dados solarimétricos no País.

### **3.7 Radiação solar incidente sobre uma superfície inclinada na superfície da terra**

A intensidade da radiação solar recebida sobre uma superfície está fortemente relacionada com sua inclinação e orientação. Como a maioria dos bancos de dados fornecem as medidas sobre a radiação solar incidente na superfície terrestre coletadas sobre superfícies horizontais (valores da radiação solar global), torna-se necessário estimar a intensidade da radiação solar recebida numa superfície inclinada.

A equação 3.3 utiliza o modelo de céu isotrópico, ou seja, a intensidade da radiação difusa é considerada uniforme em todas as direções, e para o intervalo de 1 hora tem-se:

$$I_t = I_b R_b + \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) (I_b + I_d) \rho \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (3.3)$$

onde  $I_t$  é a intensidade da radiação total na superfície inclinada,  $I_b$  é a intensidade da radiação direta numa superfície horizontal,  $R_b$  é a razão entre a intensidade da radiação direta sobre uma superfície inclinada e a intensidade de ou radiação direta sobre uma superfície horizontal,  $I_d$  é a intensidade da radiação difusa,  $\beta$  é a inclinação da superfície e  $\rho$  é o albedo.

### 3.8 Processos de utilização da energia solar

O sol fornece energia que pode ser aproveitada por 3 tipos de processos que seriam: Térmico, Fotovoltaico e Químico. No processo Térmico temos o aproveitamento em baixa, média e alta temperatura. No processo Fotovoltaico parte do princípio que determinados materiais são sensíveis a luz, transformando-a em eletricidade. Finalmente no processo Fotoquímico é o que ocorre na natureza com a maioria dos vegetais, a Fotossíntese. Os dois primeiros processos citados serão detalhados na seqüência. Quanto a Fotossíntese, é importante destacar que é a base da cadeia alimentar dos seres vivos, sendo portanto elemento primário no estudo da energia da Biomassa, que também é uma fonte renovável de energia com grandes perspectivas de aplicação em grande escala.

### 3.9 Coletores termosolares

O aquecimento com energia solar não é tão fácil como pode-se pensar. Receber a luz do sol e dela obter trabalho, tem suas dificuldades pois a energia que aqui chega é de forma espalhada por sobre toda a terra. Além disso, a energia solar que será aproveitada dependerá sempre de muitos fatores climatológicos da área, onde se incluem as horas do dia, a estação do ano, a latitude do local e se o céu está limpo ou nublado. No aproveitamento dessa preciosa energia para transforma-la em outra forma, utilizamos coletores solar e painéis fotovoltaico.

O coletor solar difere do painel fotovoltaico porque utiliza a energia solar para aquecer um fluido (em geral a água) e não para gerar eletricidade.

O coletor solar é a parte mais importante do sistema de aquecimento solar. Ele é o dispositivo responsável pela absorção e transferência da radiação solar para um fluido sob a forma de energia térmica.

São muito utilizados no aquecimento de água de casas ou edifícios, hospitais, piscinas, secagem de grãos, para refrigeração de ambientes e processos industriais de aquecimento.

### **3.10 Aquecimento solar para água**

No Brasil o aquecimento de água é um dos grandes consumidores de energia dentro das diversas finalidades da mesma. Há uma demanda considerável de energia elétrica devido a sua utilização em chuveiros elétricos que faz com que em determinados horários faça uma grande diferença no sistema de geração e distribuição, tendo portanto um grande campo para disseminação do aquecimento solar doméstico desde que haja incentivos.

O aquecimento solar da água se faz da mesma forma que para o aquecimento ativo de interiores. Um coletor solar é montado no telhado ou no chão devidamente orientado e livre.

Existem diversos tipos de coletores solares, estando divididos em dois tipos: planos e com concentração. O coletor solar plano é o sistema mais simples e de fácil construção, consistindo de caixa de alumínio ou madeira com tampa de vidro e fundo negro plano. Esta camada de cobertura negra pode utilizar o que chamamos de superfície seletiva especial de forma a maximizar a absorção da energia na faixa do infravermelho e minimizar sua emissão, aumentando o aproveitamento da energia térmica. São materiais especiais com alta absorvância e baixa emissividade. Conforme se observa, no coletor plano não há processos de intensificação dos raios solares.

Nos sistemas de coletores solares com concentração, teremos uma ampliação da quantidade de raios que alcançarão o absorvedor, que é o elemento receptor de energia. Este absorvedor por sua vez pode também apresentar-se sob diversos formatos como cilíndrico (o

mais comum), em forma de aleta, plano no fundo do coletor, entre outros. Os módulos concentradores apresentam diversos aspectos, normalmente derivado da forma de um parabolóide. Os mais conhecidos são em forma de calha e perfil parabólico simples ou composto. O absorvedor pode ter sua estrutura externa recoberta com uma camada seletiva ou não. Utilizando-se concentradores se conseguirá atingir temperaturas em muito superior a conseguida por coletores planos, sendo portanto de uso recomendável para certas aplicações industriais onde se busque temperaturas mais elevadas.

### **3.11 Esquema de um coletor solar plano**

O Coletor Solar é o coração do sistema de aquecimento solar. Ele é o dispositivo responsável pela absorção e transferência da radiação solar para um fluido sob a forma de energia térmica.

De um modo geral, o coletor solar funciona recebendo radiação solar e a transfere para a placa absorvedora. O calor é então transferido para o fluido que escoar no interior de tubos então em contato com a superfície absorvedora. Os coletores planos são essencialmente constituídos por uma caixa, com uma cobertura transparente à radiação solar (vidro) e pequenos tubos soldados a uma placa metálica (absorvedora). Esta placa é pintada de preto fosco e instalada na caixa com isolamento lateral e inferior conforme mostra a figura (3.2).

Coletores como da figura 3.2 quando bem construído podem aquecer a água da temperatura ambiente até cerca de 100C, dependendo da temperatura ambiente e da radiação solar funcionam muito bem para temperaturas em torno de 60C.

Já o coletor solar sem vidro, oferece baixa temperatura, ocasionada pela perda de calor por radiação infravermelho emitida pela placa absorvedora e principalmente pelas perdas de calor devido a convecção do ar. Sua aplicação torna-se bastante interessante para situações onde deseja-se temperaturas pouco superior a do ambiente. Estes coletores podem ser utilizados para preaquecimento industrial e aquecimento de piscinas. Mveh (1999), analisou a eficiência térmica de coletores solares sem cobertura, obtendo rendimentos superiores a 40%.

Pelo fato destes coletores não possuírem cobertura e de não precisarem de materiais que suportem altas temperaturas, seus custos são bastantes reduzidos.



**FIGURA 3.2 – Coletor Solar Plano**

### **3.12 Cobertura do Coletor Solar Plano**

A cobertura tem como principal função, permitir a passagem da radiação de ondas curta, que é absorvida pelo absorvedor e impedir a radiação de ondas longa emitida pela placa absorvedora de passar e escapar através da cobertura. Este efeito é conhecido como efeito de estufa. A cobertura transparente também reduz consideravelmente as perdas térmicas por convecção entre a placa absorvedora e o ambiente exterior. Dos vários materiais que podem ser utilizados como cobertura o vidro, apesar de ser mais difícil de manusear e ser mais pesado é o que ainda é mais recomendável, por não degradar quimicamente na presença de



ultravioleta (comprimentos de onda entre 290 nm a 400 nm) e não permite perda significativa de energia para o meio exterior. Na tabela 3.1 encontramos vários materiais e suas propriedades, que podem ser utilizados como coberturas de coletor solar.

**TABELA 3.1 - Tipos de vidros para cobertura de coletor solar plano – Ismail, (2002)**

<b>PROPRIEDADE</b>	<b>TIPOS DE VIDRO</b>		
	<i>Vidro Comum</i>	<i>Vidro Lima</i>	<i>Vidro Cristal/branco</i>
<b>Óxido de ferro</b>	0,1 - 0,13	0,05	0,01
Índice de refração	1,52	1,51	1,50
Transmitância normal %	81 – 85	85 – 87	90,50
Espessura (Pol)	0,175 – 0,1875	0,125 – 0,1875	0,1875
Perdas por reflexão %	8,0 – 8,2	8,0 – 8,1	8,00
Perdas por absorção %	6,8 – 11,0	4,9 – 7,0	1,50

A radiação total incidente sobre o coletor solar é percentualmente refletida e absorvida pela cobertura, o restante será transmitido. Na tabela 3.1 encontramos as propriedades de vários tipos de vidros, quando recebem calor normal a superfície emitida pela placa absorvedora. A porcentagem de óxido de ferro ( $Fe_2O_3$ ) presente no vidro é um fator importante, quanto maior a porcentagem de óxido de ferro, maior será as perdas de absorvância e menor a porcentagem de radiação transmitida e assim o vidro é menos transparente. As perdas por refletância com a incidência normal a cobertura é da ordem de 8% independente se o vidro seja comum, lima ou cristal branco. Outro fator que influencia na porcentagem da refletância e conseqüentemente na porcentagem de transmitida, é a variação do ângulo de incidência. A tabela 3.2 facilita a determinação do número de cobertura que devem ser utilizados nos coletores solar.

**TABELA 3.2 - Determinação do número de cobertura - Ismail, (2002)**

<i>Temperatura do coletor</i> (°C)		<i>Temperatura do ambiente</i> (°C)	<i>Número de cobertura</i>
- 23,33	a	- 12,22	0
- 12,33	a	15,55	1
- 12,33	a	37,77	2
37,77	a	65,55	3

### **3.13 Determinação da porcentagem refletida e transmitida da luz solar na cobertura do coletor**

#### PRINCÍPIO DE FERMAT

*O caminho ótico de um raio luminoso ao ir de um ponto a outro através de um sistema ótico é um mínimo (ou máximo) em relação a outros caminhos adjacentes do real. Goldemberg, (1970).*

Caminho ótico é a soma dos produtos das distâncias percorridas, pelo índice de refração do meio no qual o percurso é feito.

$$[d] = n_1d_1 + n_2d_2 + \dots = \sum n_i d_i \quad (3.4)$$

A partir desse princípio deduzem-se com certa facilidade as leis de reflexão e refração utilizando os dados da figura (3.3).

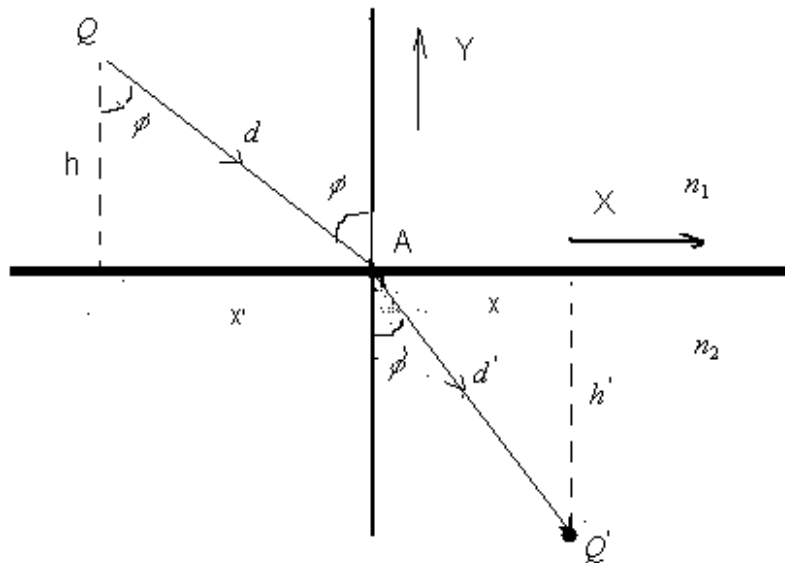


FIGURA 3.3 - Refração da luz – Goldemberg, (1970)

### LEI DA REFRAÇÃO

Calculemos o caminho óptico do raio luminoso QAQ', utilizando as informações na figura (3.3) e, obtemos a equação (3.5).

$$[d] = n_1 d_1 + n_2 d_2 \quad (3.5)$$

$$[d] = n_1 (h^2 + x'^2)^{\frac{1}{2}} + n_2 (h'^2 + x^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

O caminho óptico máximo se obtém igualando a zero a derivada de [d] em relação a x, na equação (3.6), obtendo-se (3.7)

$$n_1 \frac{x'}{d} = n_2 \frac{x}{d'} \quad (3.7)$$

A equação (3.7), equivale a

$$n_1 \operatorname{sen} i = n_2 \operatorname{sen} r \quad (3.8)$$

A equação (3.8) traduz a lei de Snell–Descart.

### 3.14 Reflexão e transmissão de ondas eletromagnética

Uma onda eletromagnética está plano - polarizada quando o campo elétrico da onda vibra sempre contido num mesmo plano. A seguir vamos determinar o coeficiente de reflexão e o coeficiente de transmissão de ondas eletromagnéticas.

Utilizaremos  $R_{\parallel}$  para uma onda eletromagnética polarizada com o campo elétrico paralelo ao plano de incidência e  $R_{\perp}$  para indicar uma onda eletromagnética que possui o campo elétrico ortogonal ao plano de incidência.

$$R_{\perp} = \frac{\text{sen}^2(i - r)}{\text{sen}^2(i + r)} \quad (3.9)$$

Quando o vetor campo elétrico for paralelo ao plano de incidência, o coeficiente de reflexão é dado por:

$$R_{\parallel} = \frac{\text{tg}^2(i - r)}{\text{tg}^2(i + r)} \quad (3.10)$$

As respectivas frações transmitidas são dadas por (3.11) e (3.12)

$$\Gamma_{\perp} = \frac{4 \cos^2 i \text{sen}^2 r}{\text{sen}^2(r + i)} \quad (3.11)$$

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{\text{sen}^2 2i}{\text{sen}^2(i + r) \cos^2(i - r)} \quad (3.12)$$

De acordo com as equações (3.9), (3.10), (3.11) e (3.12), podemos verificar que tanto o coeficiente de reflexão quanto o coeficiente de transmissão dependem do ângulo de incidência. A dependência destas grandezas com o índice de refração de cada meio fica evidenciado se utilizarmos a lei de SNELL-DESCART da refração.

A refletância  $R$ , de uma superfície é dada pela semi - soma da função refletida para um campo elétrico incidente ortogonal à superfície com o coeficiente de reflexão da parcela refletida para o campo elétrico incidente paralelo à superfície.

$$R = \frac{(R_{\perp} + R_{\parallel})}{2} \quad (3.13)$$

Quando  $i = 0$ ,  $n_1 = 1$  e  $n_2 = n$ , usamos as fórmulas (3.8), (3.9), (3.10) e (3.13) resulta (3.16):

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad (3.14)$$

Para calcular a transmissividade  $\Gamma$ , basta usar o princípio da conservação da energia (considerando a absorção desprezível)

$$\Gamma + R = 1 \quad (3.15)$$

Para incidência ortogonal, usando as equações (3.14) e (3.15) resulta (3.16)

$$\Gamma = \frac{4n}{(n+1)^2} \quad (3.16)$$

De acordo com a equação (3.16), como o índice de refração do material depende do comprimento de onda da radiação, podemos ver claramente que a transmissividade depende do comprimento de onda do feixe incidente, ou seja,  $\mathbf{n} = \mathbf{n}(\lambda)$ , as equações (3.14) e (3.16), servem para classificar os materiais quanto a transparência a uma dada radiação monocromática. Se para dada onda eletromagnética o índice de refração  $\mathbf{n}(\lambda)$  for igual a 1, resulta:

$$R = 0, \Gamma = 1$$

Neste caso, dizemos que o material é totalmente transparente à radiação de comprimento de onda. Por outro lado, se, para certa radiação monocromática, tivermos  $n(n) \gg 1$ , pelas equações (3.14) e (3.16) resulta:

$$R = 1, \Gamma = 0$$

Neste caso, o material é totalmente opaco à radiação. Consideremos os dois casos examinados são muito raros e, de um modo geral, os materiais apresentam um certo grau de transparência, para diversos tipos de radiações. Como a transmissividade depende do comprimento de onda  $\lambda$ , podemos observar na natureza alguns materiais que são transparentes a certas radiações monocromática, e ao mesmo tempo, opacos para outras radiações, estes fenômenos dão origem à chamada absorção seletiva.

Para o cálculo das reflexões de  $N$  vidros no coletor plano, utilizamos a seguinte equação (3.17):

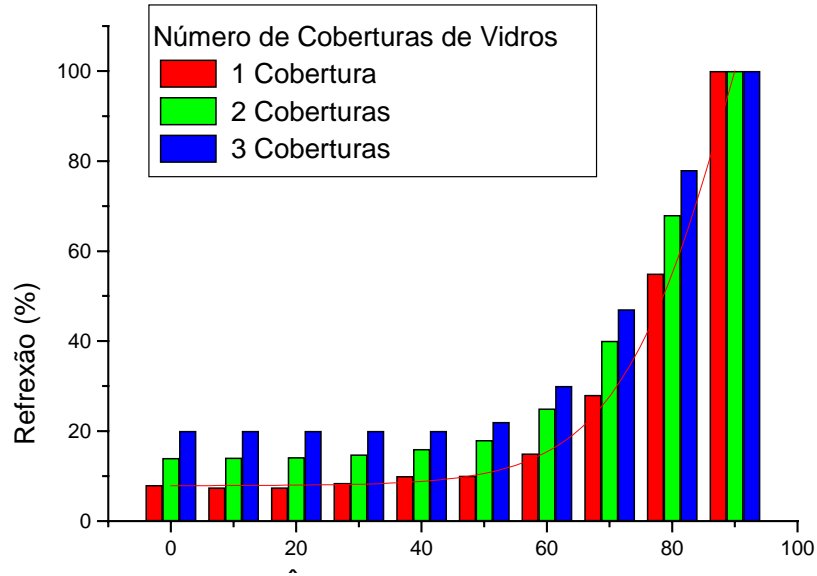
$$R_N = 1 - \frac{\left\{ \left[ \frac{(1 - R_{\perp})}{1 + (2N - 1)R_{\perp}} \right] + \left[ \frac{(1 - R_{\parallel})}{1 + (2N - 1)R_{\parallel}} \right] \right\}}{2} \quad (3.17)$$

Onde  $R_N$  = Reflexões totais de  $N$  vidros da cobertura do coletor solar.

Se  $\mathbf{i} = \mathbf{0}$ , incidência normal, então:

$$R_N = 1 - \left\{ \frac{(1 - R_{\perp})}{1 + (2N - 1)R_{\perp}} \right\} \quad (3.18)$$

A figura (3.4), mostra a propriedade da luz refletida, para vários ângulos de incidência. A medida que o ângulo de incidência aumenta, as perdas por refletância aumentam.



**FIGURA 3.4 Refletância da placa de vidro**

A transmitância  $\Gamma_N$  pode ser calculada, substituindo (3.17) e (3.18) ou (3.15), gerando respectivamente. (3.19) e (3.20).

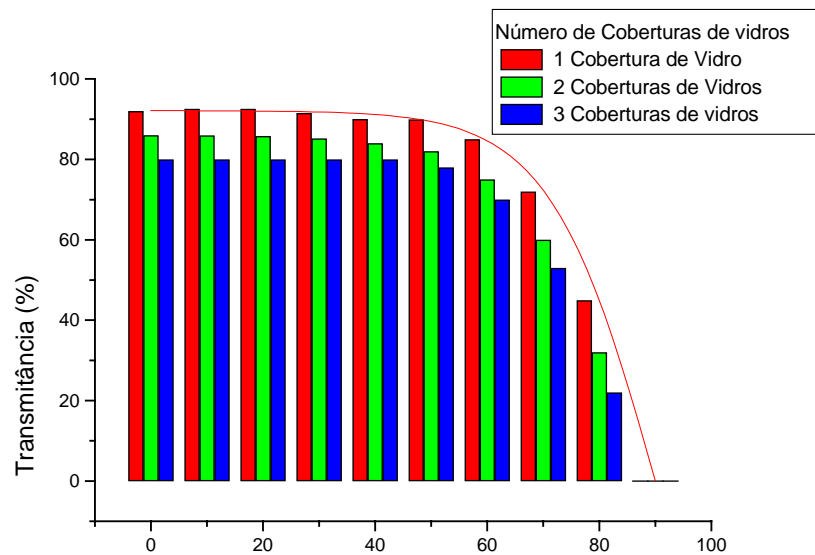
$$\Gamma_N = \frac{\left\{ \left[ \frac{(1-R_{\perp})}{1+(2N-1)R_{\perp}} \right] + \left[ \frac{(1-R_{\parallel})}{1+(2N-1)R_{\parallel}} \right] \right\}}{2} \quad (3.19)$$

Onde  $\Gamma_N$  é a transmitância do vidro para  $N$  placas da cobertura do coletor solar.

Se  $\mathbf{i} = \mathbf{0}$ , temos:

$$\Gamma_N = \left\{ \frac{(1-R_{\perp})}{1+(2N-1)R_{\perp}} \right\} \quad (3.20)$$

A figura (3.5) mostra a porcentagem da luz transmitida (ignorando as perdas por absortância) para vários ângulos de incidência. A medida que o ângulo de incidência aumenta, as perdas por transmitância se reduzem.



**FIGURA 3.5 – Transmitância da placa de vidro**

### 3.15 Espaço de ar

O espaçamento serve para reduzir as perdas conectivas internas. Coberturas são espaçadas entre 12 a 25mm, sendo que o espaçamento mais utilizado é de 18mm. O mesmo espaçamento se aplica ao fundo da placa absorvedora e o isolante, evitando contato direto. Além de reduzir as perdas esse procedimento evita no caso de elevação acidental de temperatura, a formação de fumaça tóxicas ou degradação do isolante.

### 3.16 Placa absorvedora

No conjunto do coletor solar, a placa absorvedora da radiação solar é o item mais importante do coletor. Por isso a sua construção deve obedecer a critérios rígidos quanto a estanqueidade e aderência, já que a placa é constituída do conjunto chapa - tubo, formando uma única peça.

O cobre e o alumínio, são os materiais mais utilizados na construção da placa absorvedora do coletor plano.

Os dados da Tabela 3.3, mostra que o uso do alumínio num painel solar reduz sensivelmente os custos de fabricação do painel em relação ao painel de cobre de mesma área. Além disto, o Brasil possui imensas reservas de Bauxita, ao passo que nossas reservas de cobre são muito pequenas.



A única desvantagem do alumínio, em relação ao cobre, é que sua corrosão normalmente é maior do que a corrosão do cobre. Contudo, o uso de água desmineralizada e desionizada, reduz sensivelmente o problema da corrosão.

**Tabela 3.3 – Propriedades do alumínio e do cobre – Luís (1996)**

PROPRIEDADES	ALUMÍNIO	COBRE
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,7	8,92
Temperatura de fusão sob pressão atmosférica (°C)	660	1083
Condutividade térmica entre 25 e 100° C (caL/s.m.° C)	49	92
Resistividade a 20° C (Ω.m)	2,8 x 10 <sup>-8</sup>	1,7 x 10 <sup>-8</sup>
Coefficiente de temperatura da resistividade (°C)	390	390
Coefficiente de dilatação linear a 25°C (1/°C)	23 x 10 <sup>-6</sup>	17 x 10 <sup>-6</sup>

### 3.17 Isolamento térmico

O isolamento térmico é importante e necessário para reduzir as perdas de condução no coletor solar. É geralmente colocado no fundo e nos lados da caixa do coletor. É importante deixar um espaço de ar entre o isolante e o fundo da placa absorvedora, evitando assim, um contato direto entre a placa absorvedora quente e o material isolante. Além de reduzir as perdas térmicas, esse procedimento evita no caso de elevação acidental de temperatura, a redução de fumaças tóxicas ou degradação do isolante.

Sendo a maioria dos isolamentos térmicos corpos fibrosos ou porosos, eles serão tão mais isolantes quando maior for a quantidade de ar neles aprisionados, pois isso torna a condutividade térmica do isolante  $K$ , próximo da condutibilidade térmica do ar ( $K_{ar}$ ). Apesar disso, a porosidade dos isolantes devem obedecer as dimensões determinadas. O aumento progressivo da porosidade poderá ocasionar movimentos convectivos do ar aprisionado, o que gerará um aumento nas trocas de calor, fazendo com que o material perca as propriedades isolantes desejadas.

No caso dos coletores solares para aquecimento de água ou outra finalidade, o isolante térmico empregado deve suportar temperaturas elevadas. Usa-se com frequência a lã de

vidro, cujo limite máximo de temperatura de trabalho é de 450 °C. A partir desse limite o material entra numa fase de amolecimento.

Para os coletores solares de baixa temperatura, uma camada de lã de vidro de 0,3 centímetro de espessura é o suficiente para produzir um bom isolamento térmico. A tabela 3.4 mostra as propriedades de vários materiais isolantes.

**TABELA 3.4 – Isolantes Térmicos – Ismail, (2002)**

<i>Material isolante</i>	<i>Densidade</i> <i>(kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Condutibilidade</i> <i>térmica</i> <i>Kcal/(mh°C)</i>	<i>Temperatura</i> <i>térmica</i> <i>°C</i>
Cortiça	160	0,037	30°
Lã de vidro	200	0,037	20°
Lã de vidro	200	0,060	200°
Madeira (pinho)	377	0,091	30°
Madeira (carvalho)	610 ~ 800	0,15 ~ 0,18	80°
Mica	1900 ~ 2300	0,43	50°
Lã de rocha	180	0,031	20°
Lã de Rocha	180	0,052	200°
Algodão (tecido)	81	0,048	30°
Algodão (tecido)	80	0,051	20°
Vidro (placa)	2700	0,66	20°
Borracha	920 ~1230	0,12 ~ 0,14	20°

### **3.18 Caixa do coletor solar plano**

A caixa de coletor solar plana tem como finalidade principal apoiar os vários componentes e fixar as coberturas e assim manter os componentes em conjuntos que podem ser transportados. Essas caixas podem ser feitas de material metálico (alumínio), fibra de vidro reforçado em ambiente perto das praias ou de madeira tratada. Selantes são usados para fechamento de buracos no coletor, apoiar o vidro e evitar contato direto entre o vidro e a parte metálica, reduzindo assim, os choques térmicos.

### **3.19 Eficiência térmica dos coletores**

Para que os coletores solares ofereçam vantagens significativas, algumas precauções básicas devem ser consideradas:

- a) A cobertura deve possuir alta transparência para a radiação solar e alta absorvidade para radiação infravermelha;
- b) A placa absorvedora deve ser preta para garantir maior absorção de energia e possuir alta condutividade térmica para transferir esta energia ao fluido;
- c) A caixa do coletor solar plano deve ter um excelente isolamento térmico na parte lateral e na parte inferior, que minimize as perdas de calor para o ambiente, e possuir uma eficiente vedação para impedir a entrada de umidade.

As características acima contribuem para que o rendimento do coletor seja satisfatório, embora o cálculo do rendimento dos coletores solares envolva uma série de outros parâmetros e certa complexidade experimental.

Em suma, o rendimento de um coletor solar é dado pela equação 3.21.

$$\eta = \frac{\int_{t_1}^{t_2} Q_u dt}{A_c \int_{t_1}^{t_2} G_T dt} \quad (3.21)$$

Onde,  $\eta$  é o rendimento,  $Q_u$  é a energia transferida ao fluido de trabalho.  $G_T$  é a radiação solar incidente no plano do coletor e  $A_c$  é a área do coletor.

Em regime permanente, a energia transferida ao fluido de trabalho ( $Q_u$ ), é definida pela diferença entre a energia solar absorvida pelo coletor e as perdas térmicas, ou seja:

$$Q_u = A_c \left[ S - U_L (\overline{T_p} - T_a) \right] \quad (3.22)$$

ou seja:

onde,  $S$  é a radiação solar absorvida,  $U_L$  é o coeficiente global de perdas térmicas do coletor,  $T_p$  é a temperatura média da placa observadora e  $T_a$  é a temperatura ambiente.

A simplicidade da equação 3.21 é apenas visual. Na prática a temperatura média da placa absorvedora ( $T_p$ ) é de difícil obtenção, essa grandeza está relacionada com a radiação solar incidente, com as condições de entrada do fluido (vazão e temperatura) e com as características de construção do coletor, entre eles: o diâmetro, o número e espaçamento entre os tubos elevadores.

Devido a esta dificuldade, a equação 3.21 pode ser reformulada, e é expressa em termos da temperatura de entrada do fluido e de um fator denominado fator de remoção de calor ( $F_R$ ).

$F_R$  é definido como a razão entre a energia útil real retirada do coletor e a energia útil que poderia ser retirada se toda a superfície absorvedora estivesse a temperatura de entrada do fluido. Este fator pode ser representado matematicamente pela equação 3.23.

$$F_R = \frac{mC_p(T_o - T_i)}{A_c [S - U_L(T_i - T_a)]} \quad (3.23)$$

Onde,  $m$  é a vazão mássica do fluido,  $C_p$  é o calor específico do fluido,  $T_o$  é a temperatura de saída do fluido e  $T_i$  é a temperatura de entrada do fluido.

A radiação solar absorvida ( $S$ ), depende dos materiais empregados na construção do coletor e do ângulo de incidência da radiação solar.

Da equação 3.21 e da consideração admitida para a radiação solar absorvida ( $S$ ), pode-se escrever a equação 3.24, que é a equação utilizada para análises dos coletores solares. Como pode ser observado a energia útil é calculada em função da temperatura de entrada do fluido, que é uma grandeza que pode ser facilmente controlada e determinada experimentalmente.

$$Q_U = A_c F_R [G_T(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)] \quad (3.24)$$

De modo geral, na realização dos testes de rendimento, os coletores são expostos à radiação solar para a determinação da energia transferida ao fluido de trabalho ( $Q_U$ ). Para determinação direta dessa energia, é necessário o conhecimento das seguintes grandezas: radiação solar incidente no coletor, vazão mássica do fluido que circula no coletor e as temperaturas do fluido na entrada e saída do coletor.

Para cada temperatura de entrada do fluido no coletor é obtido um valor da eficiência instantânea ( $\eta_i$ ), definido pelas equações 3.25 e 3.26.

$$\eta_i = \frac{Q_U}{A_C G_T} = \frac{m C_p (T_o - T_i)}{A_C G_T} \quad (3.25)$$

$$\eta_i = F_R (\tau \alpha) - \frac{U_L (T_i - T_a)}{A_C G_T} \quad (3.26)$$

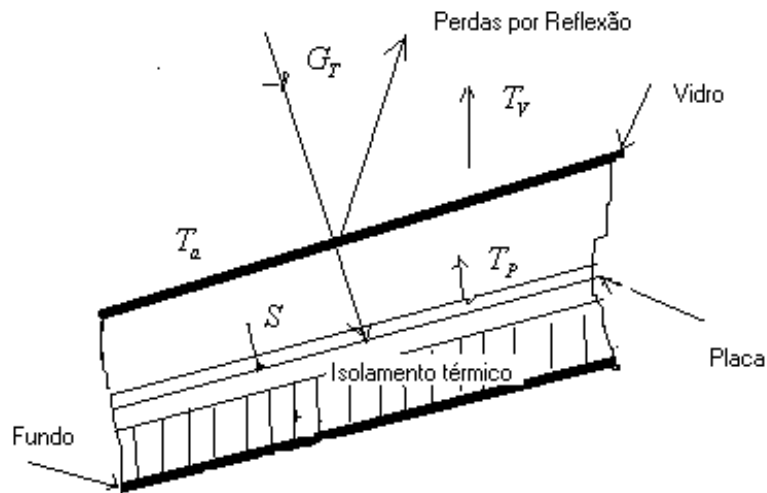
O fator  $F_R$  é da ordem de 0,9 (seu valor varia ente 0 e 1,0) para coletores usando líquido. Os valores de coeficiente  $U$  são também determinados experimentalmente e sua faixa de valores está na tabela (3.5).

**TABELA 3.5 – Valores típicos de  $U$  – Estoecher (1988)**

TIPO DE ENVIDRAÇAMENTO	$U$ ( $W/m^2 \cdot k$ )
Sem cobertura	13 – 15
Simple	6 – 7
Duplo	3 – 4

### 3.20 Coeficiente global de transferência de calor no coletor solar

Consideremos representada na figura ( 3.6 ) a secção de um coletor plano sob a ação da radiação solar representada por  $G_T$ .



**FIGURA 3.6 – Secção de um coletor plano sob ação da radiação solar  
Moura (1976)**

Segundo Moura(1976), ao atingir a cobertura transparente do coletor, parte desta radiação é refletida pela superfície externa do vidro ( $\pm 4\%$ ), de modo que apenas uma certa quantidade  $S$  desta energia chegue a placa absorvedora.

Esta energia  $S$  é em parte absorvida pela placa coletora na forma de calor útil ( $Q_U$ ), sendo o restante absorvido pelas resistências térmicas entre a placa e o vidro de cobertura, fundo e laterais da caixa do coletor. Assim teremos:

$$S = Q_U + \text{perdas} \quad (3.27)$$

Trabalhando o coletor solar com a radiação global, a quantidade de energia  $S$ , residual, na placa do coletor é dada por:

$$S = [G_T(\lambda\alpha)]_{\text{direta}} + [G_T(\lambda\alpha)]_{\text{difusa}} \quad (3.28)$$

Isto significa que a energia  $S$  captada pela placa do coletor é a soma de uma parcela constituída da radiação direta mais uma outra correspondente á radiação difusa.

A diferença  $G_T - S$ , representa as perdas por reflexão no vidro de cobertura do coletor.

A diferença  $S - Q_U$  representa as perdas térmicas no coletor cujas perdas são devido à convecção e radiação, tanto internas como externas ao coletor solar e podem ser representadas pela resistência encontrada pelo fluxo de calor que, segundo um princípio da termodinâmica, procura escapar de um meio de mais quente para um meio mais frio, já que as vizinhanças do coletor se encontra certamente a uma temperatura ambiente ( $T_a$ ) em relação ao interior do coletor, a um a temperatura da placa ( $T_p$ ), maior. Logo, no sistema em estudo observa-se três níveis de temperatura:

- a) temperatura ambiente,  $T_a$
- b) temperatura da placa do coletor,  $T_p$
- c) temperatura da cobertura de vidro,  $T_v$

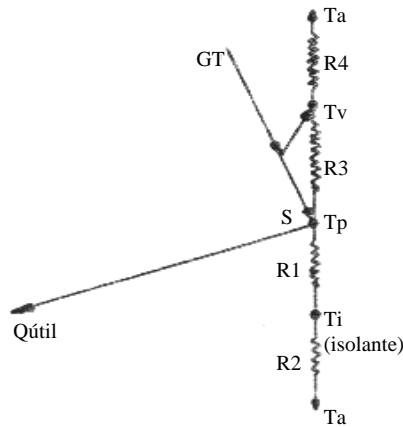
Onde:  $T_a < T_v < T_p$

Logo o fluxo de calor proveniente da placa do coletor tende atingir o exterior do sistema, tanto segundo à direção placa – vidro como placa- isolamento térmico, até transpor o limite do sistema que se encontra a uma temperatura  $T_a$ .

Ocorre que o fluxo de calor oriundo da placa do coletor a temperatura  $T_p$ , ao tentar atingir o exterior do mesmo, encontra uma determinada resistência que pode ser assim definida:

- a) Resistência oferecida pela camada de ar existente entre a placa e o vidro.
- b) Resistência entre a superfície externa do vidro e o ar ambiente, o que dá origem a perda por convecção em virtude das correntes d ar existentes.
- c) Resistência oferecida pelo isolamento térmico na parte inferior do coletor.
- d) Resistência ao atravessar a parte estrutural do fundo do coletor e deste para o ambiente.

Podemos, portanto, para maior facilidade, substituir a figura (3.6) por uma malha térmica, cujas resistências referidas estão representadas por  $R_1, R_2, R_3$  e  $R_4$ , figura 3.7.



**FIGURA 3.7- Uma malha térmica de resistências  $R_1, R_2, R_3$  e  $R_4$**   
**Moura (1976)**

$R_1$  - Resistência encontrada pelo fluxo de calor devido ao isolamento térmico, fundo e laterais do coletor.

$R_2$  - Resistência por convecção e radiação devido ao meio ambiente.

Sendo  $R_1 \gg R_2$ , este último pode ser considerado como zero, de tal modo que a única resistência a ser considerada, é a devida ao isolamento térmico. Chamando de  $C_F$  o coeficiente de perdas térmica através do fundo do coletor, teremos:

$$C_F = \frac{1}{R_1} = \frac{k}{L} \quad (3.29)$$

onde:  $k$  é a condutividade térmica do isolante de espessura  $L$

As resistências  $R_3$  e  $R_4$  são referidos à parte superior do coletor, onde os respectivos coeficientes de perdas são obtidos como resultado da convecção e da radiação entre a cobertura e a placa absorvedora do coletor.



A energia transferida entre a placa absorvedora, à temperatura  $T_p$  e a cobertura transparente à temperatura  $T_v$ , é igual a energia perdida entre o vidro e o ambiente. A perda de energia devido à parte superior do coletor, vem dada por:

$$q_s = \frac{\sigma(T_p^4 - T_v^4)}{\left(\frac{1}{e_p} - \frac{1}{e_v}\right)} + h_{p-v} (T_p - T_v) \quad (3.30)$$

onde:  $h_{p-v}$  é o coeficiente de transferência de calor entre as superfícies inclinadas formadas pela placa coletora e a cobertura de vidro.

Linearizando o termo de radiação, o coeficiente de transferência de calor por radiação pode ser usado, dando para as perdas na parte superior do coletor, o seguinte valor.

$$q_s = (h_{p-v} + h_{rad})(T_p - T_v) \quad (3.31)$$

onde:  $h_{rad}$  é dado pela equação (3.32)

$$h_{rad} = \frac{\sigma(T_p^2 - T_v^2)(T_p^2 + T_v^2)}{(1/e_p - 1/e_v - 1)} \quad (3.32)$$

A resistência  $R_3$  é expressa por: 
$$R_3 = \frac{1}{h_{p-v} + h_{rad}} \quad (3.33)$$

e a resistência 
$$R_4 = \frac{1}{h_v + h_{rad4}} = \frac{1}{2,8 + 3,0v + h_{rad4}} \quad (3.34)$$

sendo  $v$  a velocidade do vento em m/s, para ventos compreendidos entre 0 e 7 m/s.

O coeficiente de radiação vidro - ambiente ( $h_{rad4}$ ), tem valor :

$$h_{rad4} = e_{vidro} \cdot \sigma (T_v + T_{ceu}) (T_v + T_{ceu}) \left( \frac{T_v - T_{ceu}}{T_v - T_a} \right) \quad (3.35)$$

O coeficiente de perda pela parte superior do coletor, em relação ao ambiente, vem dado por (3.36)

$$U_s = \frac{1}{R_3 + R_4} \quad (3.36)$$

A malha térmica representada pela figura (3.7) pode então ser substituída pela malha da figura (3.8)

A temperatura do céu com relação a temperatura do ar local, é dada pela equação,

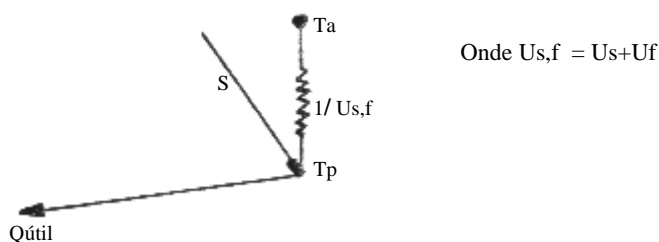
$$T_{\text{ceu}} = 0,552 * T_{\text{ar}}^{1,5} \quad (3.37)$$

onde  $T_{\text{ceu}}$  e  $T_{\text{ar}}$  são ambas dadas em graus Kelvin.

Uma outra expressão (4.38) mais simplificada, permite obter a temperatura do céu, subtraindo 6°C da temperatura do ar.

$$T_{\text{ceu}} = T_{\text{ar}} - 6 \quad (3.38)$$

Estas duas equações, permitem obter o mesmo resultado quando a temperatura do ar é de 308K, que é aproximadamente 25°C. No caso de dúvida é recomendado empregar a equação (3.37)



**FIGURA. 3.8-Malha térmica equivalente a malha da figura 3.7  
Moura (1976)**

$U_L=U_S+U_F$  representa o coeficiente global de perdas,  $U_S$  é o coeficiente de perdas no sentido placa absorvedora da radiação para o ambiente e  $U_F$  é o coeficiente de perdas pelo fundo do coletor.

Para coletores com uma única cobertura transparente,  $U_s$  é determinado pela equação (4.39).

$$U_s = \left( \frac{1}{h_{p-v} + h_{rad,p-v}} + \frac{1}{h_v + h_{rad,v-c}} \right)^{-1} \quad (3.38)$$

Sendo:

$h_{rad,p-v}$ , o coeficiente de radiação placa coletora – vidro

$h_{rad,v-c}$ , o coeficiente de radiação vidro- céu

$h_v$ , é o coeficiente de radiação para o vento

Podemos determinar estes coeficientes, através das seguintes equações

$$h_{rad,p-v} = \frac{(T_p^2 + T_v^2)(T_p + T_v)}{(1/\epsilon_p) + (1/\epsilon_v)} \quad (3.39)$$

$$h_{rad,v-c} = \epsilon_v \sigma (T_v^2 + T_c^2)(T_v + T_c) \quad (3.40)$$

Onde  $\epsilon$  é a emitância ; e o  $\sigma$  é a constante de Stefan – Boltzaman

A temperatura do vidro pode ser calculado da seguinte maneira:

$$T_v = T_p - \frac{U_s(T_p - T_a)}{h_{p-v} + h_{rad,p-v}} \quad (3.41)$$

### 3.21 Eletricidade

Lei vetorial de OHM.

É nos circuitos elétricos onde os elétrons se movimentam dentro de fios e a corrente é definida como carga que atravessa a seção reta na unidade de tempo, isto é, calculando por segundo, unidade chamada de ampère. Porém quando precisamos tratar correntes distribuídas em um volume e não canalizadas em um fio. Torna-se necessário a definição de um novo ente vetorial, a densidade de corrente ( $\vec{J}$ ), que será a razão entre a corrente e a área elementar atravessada normalmente pela corrente. Assim, para definir o estado de corrente em uma região do espaço é necessário conhecer a distribuição  $\vec{J}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$  a cada instante. Se a distribuição não variar com o tempo, temos o estado estacionário de corrente, como mostra a equação (3.42).

$$\frac{\partial \vec{J}}{\partial t} = 0 \quad (3.42)$$

A corrente elétrica passa a ser o fluxo do campo  $\vec{J}$ , então.

$$i = \int \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad (3.43)$$

O vetor densidade de corrente  $\vec{J}$  admite outra interpretação Física.

$$\vec{J} = \frac{dq}{dS} \quad (3.44)$$

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (3.45)$$

Substituindo a equação (3.45) em (3.44), temos:

$$\vec{J} = \rho \vec{v} \quad (3.46)$$

A equação (3.46) mostra o produto da densidade de carga móvel pela sua velocidade. Como a densidade de elétrons livres é muito grande, constatamos que a velocidade dos elétrons nos fios é bem pequena.

Finalmente podemos instituir a lei vetorial de ohm. Foi constatado que quanto maior o campo elétrico  $\vec{E}$  aplicado ao condutor maior será a velocidade atingida pelas cargas móveis, confirmando uma proporcionalidade entre a densidade de corrente  $\vec{J}$  e o campo elétrico  $\vec{E}$  no ponto[Quevedo,1977].

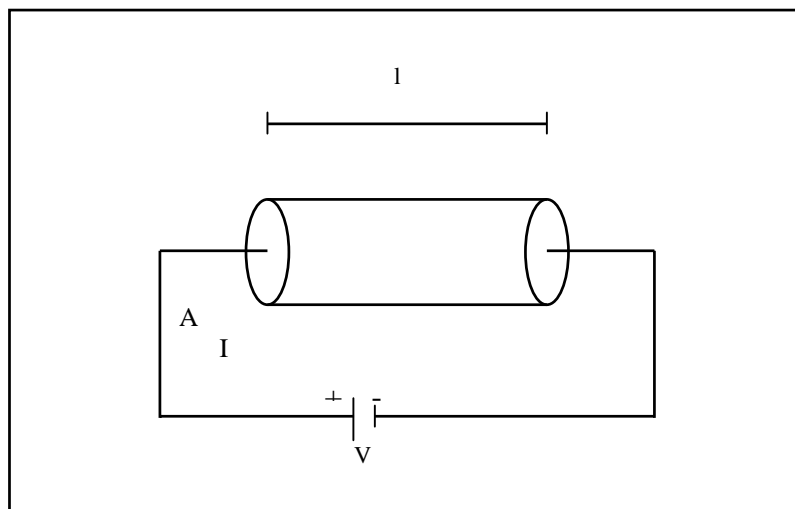
$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.47)$$

$$V = \int \vec{E} \cdot d\vec{l} = El \quad (3.48)$$

onde  $\sigma$  é a condutividade do material. Quanto maior a condutividade maior a densidade de corrente para dado campo, isto é, mais facilmente o material conduz.

### 3.21.1 Resistência Elétrica

Utilizamos a lei vetorial de ohm, deduziremos a lei escalar de ohm, que é a relação entre a tensão e a corrente para o elemento de circuitos chamado de resistor, seja um fio cilindro de condutividade  $\sigma$ , seja  $A$  e comprimento  $l$ , percorrido por corrente estacionária,  $i$  sendo as seções das extremidades equipotenciais com uma diferença de potencial  $V$ , como mostrado na figura (4.7)



**FIGURA 3.9 Circuito elétrico simples**

Ao longo do fio, por conservação de carga, a corrente é a mesma – resultando mesmo campo  $\vec{J}$ , em virtude de a área ser constante, e, conseqüentemente, mesmo campo  $\vec{E}$ . Para mostrar que a corrente se distribui uniformemente na seção do fio, basta comparar dois caminhos de corrente, um axial e o outro excêntrico, e verificar que o campo elétrico  $\vec{E}$  deve ser igual nos dois casos, pois, se assim não fosse sua integral de linha ao longo do fio, resultaria em diferença de potencial, diferente entre os extremos, o que seria absurdo. Assim, o campo elétrico tem distribuição uniforme no interior do fio cilindro [Quevedo, 1977]

$$i = \int \vec{J} \cdot d\vec{S} = \sigma EA \quad (3.49)$$

Se verificarmos experimentalmente, que mantida a temperatura constante, o quociente da diferença de potencial (ddp) aplicados pela respectiva intensidade de corrente é uma constante característica do resistor.

$$\frac{V}{i} = \frac{l}{\sigma A} \quad (3.50)$$

Podemos escrever (3.50), como:

$$V = Ri \quad (3.51)$$

A equação (3.51) traduz a lei de ohm, que relaciona a causa do movimento das cargas elétricas (a ddp) com o efeito (passagem da corrente  $i$ ) ou

$$R = \frac{l}{\sigma A} \quad (3.52)$$

Como a condutividade  $\sigma$  é o inverso da resistividade  $\rho$ (rô),podemos escrever a equação (3.52) da seguinte maneira:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3.53)$$

onde,  $\rho$  é a resistividade do material.

A resistividade de um material varia com a temperatura. Para variações de temperatura excessiva até 400 °C, pode-se admitir como linear a variação da resistividade com a temperatura. Nesta condição, a resistividade  $\rho$  a uma temperatura  $T$  é dada pela equação (3.54).

$$\rho = \rho_o [1 + \alpha(T - T_o)] \quad (3.54)$$

Generalizando, para qualquer forma do condutor, temos:

$$R = \frac{\int \vec{E} \cdot d\vec{l}}{\int \sigma \vec{E} \cdot d\vec{S}} \quad (3.55)$$

### 3.21.2 Lei de JOULE

Um resistor transforma exclusivamente em térmica a energia elétrica recebida de um circuito, é usual dizer que um resistor dissipa a energia elétrica que recebe. Assim, a potência elétrica consumida por um resistor é dissipada.

Substituindo a equação (3.51), a fórmula da potência  $V = UI$ , obtemos a potência dissipada no resistor.

$$P = Ri^2 \quad (3.56)$$

A energia elétrica transformada em energia térmica ao fim do intervalo de tempo  $\Delta t$  é dada pela equação (3.57).

$$E_e = Ri^2(t_f - t_i) \quad (3.57)$$

A equação (3.57) traduz a Lei de Joule.

Como  $1\text{Joule} \approx 0,24\text{cal}$ , devemos incluir este valor em (3.57), obtemos a energia térmica em calorias.

$$E_e = 0.24Ri^2(t_f - t_i) \quad (3.58)$$

A equação (3.59) permite determinar a Quantidade de calor  $Q$  quando absorvida ou perdida pelo corpo de massa  $m$ , constituído por determinada substância de calor específico  $c$  quando sofre uma variação de temperatura  $\Delta T$

$$Q = mc\Delta T \quad (3.59)$$

Quando a substância está mudando de fase, verifica-se que a razão entre a quantidade de calor ( $Q$ ) a massa que mudou de fase dessa substância é constante. Essa constante, denominada calor latente ( $L$ ), é definida pela equação (3.60)

$$L = \frac{Q}{m} \quad (3.60)$$

### 3.22 Efeito Fotovoltaico

Existem na natureza materiais classificados como semicondutores, que se caracterizam por possuírem uma *banda de valência* totalmente preenchida por elétrons e uma *banda de condução* totalmente “vazia” à temperatura muito baixa.

A separação entre duas bandas de energia permitida nos semicondutores (“*gap* de energia”) é da ordem de um  $1\text{ eV}$ , o que os diferencia dos isolantes onde o *gap* é de vários  $\text{eVs}$ . Isto faz com que os semicondutores apresentem várias características interessantes. Uma delas é o aumento de sua condutividade com a temperatura, devido à excitação térmica de portadores da banda de valência para a banda de condução. Uma propriedade fundamental para as células fotovoltaica é a possibilidade de fótons, na faixa do visível, com energia superior ao *gap* do material, excitarem elétrons à banda de condução. Este efeito, que pode ser observado em semicondutores puros, também chamados de intrínsecos, não garante por si só o

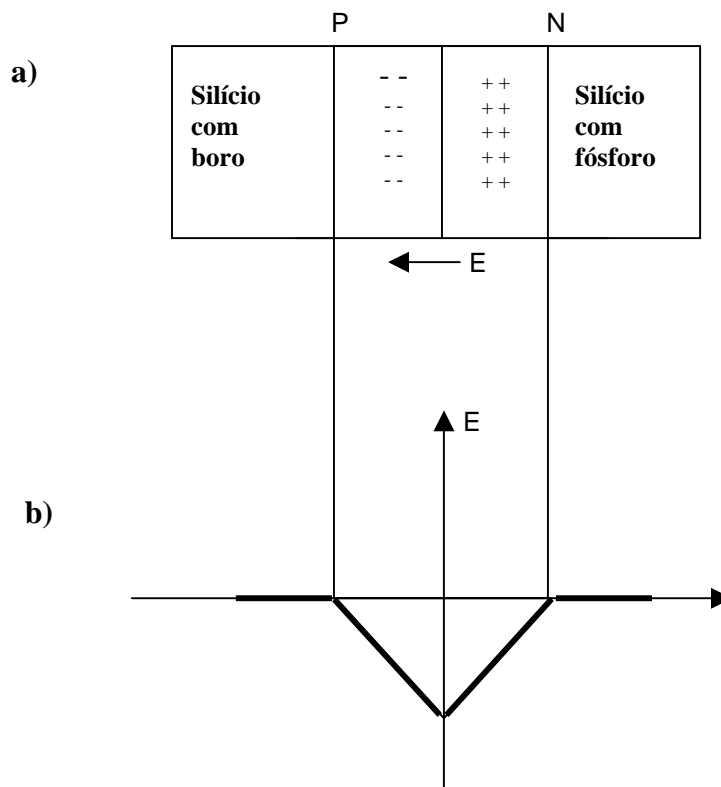


funcionamento de células fotovoltaicas. Para obtê-las é necessário uma estrutura apropriada para que os elétrons excitados possam ser coletados, gerando uma corrente útil.

O semiconductor mais usado é o silício. Seus átomos se caracterizam por possuírem quatro elétrons de ligação que se ligam aos vizinhos, formando uma rede cristalina. Ao adicionarem-se átomos com cinco elétrons de ligação, como o fósforo, por exemplo, haverá um elétron em excesso que não poderá ser emparelhado e que ficará “sobrando”, fracamente ligado a seu átomo de origem. Isto faz com que, com pouca energia térmica, esse elétron se livre, indo para a banda de condução. Diz-se assim, que o fósforo é um dopante doador de elétrons e domina-se *dopante n* ou *impureza n*.

Se, por outro lado, introduzem-se átomos com apenas três elétrons de ligação, como é o caso do boro, haverá uma falta de um elétron para satisfazer as ligações com os átomos de silício da rede. Esta falta de elétron é denominada *buraco* ou *lacuna* e ocorre que, com pouca energia térmica, um elétron de um sítio vizinho pode passar a esta posição fazendo com que o buraco se desloque. Diz-se portanto, que o boro é um *aceitador de elétrons* ou um *dopante p*.

À temperatura ambiente, existe energia térmica suficiente para que praticamente todos os elétrons em excesso dos átomos de fósforo estejam livres, bem como que os buracos criados pelos átomos de boro possam se deslocar. Se, partindo de um silício puro, forem introduzidos átomos de boro em uma metade de um fósforo na outra, será formado o que se chama *junção pn*. O que ocorre nessa junção é que elétrons livres do lado *n* passam ao lado *p* onde encontram os buracos que o captaram; isto faz com que haja um acúmulo de elétrons no lado *p*, tornando-a negativamente carregado e uma redução de elétrons do lado *n*, que o torna eletricamente positivo. Estas cargas aprisionadas dão origem a um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons do lado *n* para o lado *p*; este processo alcança um equilíbrio quando o campo elétrico forma uma barreira capaz de barrar os elétrons livres remanescentes no lado *n*. A figura 3.10 mostra a variação do campo elétrico na direção perpendicular à junção *pn*.



**Figura 3.10 – Junção *pn* ilustrando registro onde ocorre o acúmulo de cargas. (b) Campo elétrico resultante da transferência de cargas através da junção *pn*.**

Se uma junção *pn*, como a da figura (3.10), for exposta a fótons com energia maior que o *gap*, ocorrerá a geração de par elétron-lacuna; se isto acontecer na região onde o campo elétrico é diferente de zero, as cargas serão aceleradas, gerando assim, uma corrente através da junção; este deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial ao qual chamamos de *Efeito Fotovoltaico*. Se as duas extremidades do “pedaço” de silício forem conectadas por um fio, haverá uma circulação de elétrons. Esta é a base do funcionamento das células fotovoltaicas. Resta a questão de quais são os fatores limitantes neste processo de conversão de energia da luz em energia elétrica. O primeiro limitador, ao se tentar transformar a luz do sol em eletricidade, é o espectro de sua radiação. Como foi visto, ele se espalha numa ampla faixa e apenas a parcela com comprimento de onda inferior a 1 ( $\mu\text{m}$ ) é capaz de excitar os elétrons em células de silício. Outro fator é o de cada fóton só consegue excitar um elétron. Portanto, para fótons com energia superior à energia do *gap*, haverá um excesso de energia que será convertida em calor. Por fim, mesmo para os elétrons excitados, existe uma probabilidade de que estes não sejam coletados, e não contribuam para a corrente. A tecnologia de fabricação de células fotovoltaicas tenta reduzir ao máximo este último efeito. Para células de silício, o limite teórico de conversão de radiação solar em eletricidade é de 27%.

### 3.23 Dessalinização

A Dessalinização é usada para designar qualquer processo empregado na desmineralização parcial ou na desmineralização completa da água muito salina, como a água do mar que apresenta uma concentração de 35.000 ppm de sais dissolvidos ou as águas salobras. O objetivo do processo de desmineralização parcial é diminuir o teor de sal a um grau que torne a água conveniente para ser bebida, preferivelmente com 500 ppm de sais ou menos. Quanto ao processo da desmineralização completa, visa a fornecer água apropriada para utilização em caldeiras de alta pressão e em algumas outras aplicações industriais.

Os processos de desmineralização por troca iônica, não são aplicáveis à dessalinização das águas muito salgadas. É indispensável usar outros processos

Existe hoje vários processos de dessalinização para grandes e pequenas quantidades de águas muito salinas ou as águas salobras: (I) Processo de destilação em tubo vertical longo a múltiplo efeito. (II) Processo de evaporação instantânea em etapas múltiplas. (III) Processo de congelamento. (IV) Processo de eletrodialise. (V) Processo de compressão de vapor a circulação forçada. (VI) Processo por osmose reversa. (VII) Processo de dessalinização solar híbrido, que é o tema do presente trabalho.

Nos processos de destilação em tubo vertical longo a múltiplo efeito, de evaporação instantânea em etapas múltiplas e processos de compressão do vapor da circulação forçada, as águas salgadas são purificadas por evaporação, o vapor é condensado de modo a permitir a recuperação e reutilização da maior parte do seu conteúdo térmico, e a salmoura concentrada é descarregada como rejeito. Estes processos são usados há décadas em navios e em outras circunstâncias. O processo de congelamento é efetuado pela cristalização de águas muito salgadas, constituindo-se uma suspensão grossa de cristais de gelo e de salmoura, de onde se separam os cristais de gelo, que são lavados e fundidos. O processo de eletrodialise não envolve modificações de fase, mas membranas de troca iônica num campo elétrico; baseia-se no efeito que se consegue quando uma corrente elétrica contínua passa pela água salgada e numa sucessão de membranas trocadoras de cátions e de ânions alternadamente colocadas. Os cátions passam pelas membranas trocadoras de cátions e os ânions pelas trocadoras de ânions, o que provoca uma diminuição de salinidade num compartimento e um aumento no seguinte, e

assim sucessivamente ao longo de todo o equipamento. A água com aumento de salinidade pode ser rejeitada, e a água com a salinidade diminuída pode ser recirculada ou passar por uma outra unidade. Este processo não leva a uma água completamente dessalinizada, mas reduz a salinidade da água salobra, tornando-a potável e conveniente para usos gerais. O processo de osmose reversa, ocorre quando duas soluções de concentração diferentes encontram-se separadas por uma membrana semi-permeável. Neste caso, existe uma tendência do solvente (água), da solução menos concentrada, migra para o ambiente onde se encontra a solução de maior concentração de sais, a qual sofre uma divisão progressiva até que as duas soluções atinjam as mesmas concentrações se for aplicada uma pressão na região da solução mais concentrada, ou mais salina, será provocada uma inversão no fluxo natural, a água da solução irá passar para a região de menor concentração de sais, retendo-se os íons na membrana que separa as duas soluções, esse é o princípio da osmose reversa. A pressão a ser aplicada deve ser maior que a pressão osmótica. As membranas osmóticas utilizadas em equipamentos para dessalinização da água são do tipo sintética, produzidas especialmente para este fim. Consistem de várias camadas finas ou “folhas de filme” que são unidas e enroladas em espiral ao redor de um tubo plástico, também conhecido como membrana TFC (THIN FILM COMPOSITE). O material da membrana é semi-impermeável, permitindo que atravessem as moléculas e que sejam retidos os sólidos dissolvidos. Quando a água a ser tratada passa através da superfície da membrana, é coletada no centro do tubo (água doce) enquanto os resíduos são levados da superfície da membrana, para fora, através de drenos. Pelo fato da água a ser tratada ter que fluir através de passagens muito pequenas, (poros da membrana) durante o processo, um pré- tratamento se faz necessário para remoção de eventuais sólidos em suspensão e para que não ocorra precipitação de sais ou crescimento de microorganismos sobre as membranas. Atualmente o pré- tratamento consiste de filtração fina e a adição de ácidos ou outros produtos químicos para inibir aquela precipitação, constituindo na remoção de gases e ajuste do PH. Os sistemas de OR, podem em relação as pressões de uso, serem considerados como sistemas de baixa e alta pressão.

Os sistemas de baixa pressão, referem-se principalmente, aqueles sistemas com uma pressão de alimentação da água, menor que 100 psig, e tem uso basicamente residencial. Essas unidades fornecem entre 90 a 130 litros de água por dia, com rejeito de até 95%. Os sistemas de alta pressão, referem-se, principalmente, aqueles que operam com pressões na faixa de 100 a 1000 psig, dependendo das membranas escolhidas e da água que está sendo tratada. São

usualmente utilizados em aplicações comerciais com indústrias onde grandes volumes de água são requeridos, bem como níveis altos de pureza da água. Muitos sistemas dessa natureza membranas múltiplas arranjadas em paralelo para fornecimento da quantidade de água desejada. A água processada em um primeiro estágio do tratamento pode ser dirigida para módulos adicionais de membranas, aumentando os níveis de purificação da água, e o próprio rejeito também pode ser dirigido para sucessivos outros módulos para aumentar a eficiência do sistema. As especificações de dessalinizadores por osmose reversa (OR) devem considerar algumas questões básicas.

- a) Devem ser conhecidas as quantidades de água disponível a ser tratada, as suas características e qualidades (concentração de sais).
- b) Análise físico-química e bacteriológica completa da água.
- c) Pré- tratamento da água que apresenta sedimentos em suspensão, para evitar obstruções das membranas.
- d) Compreender que a recuperação (%) refere-se a quantidade de água doce produzida, por exemplo: se para cada 1000 litros de água retirado de um poço tubular, são produzidos 200 litros de água doce e 800 litros de rejeito (salmoura), a recuperação é 20%.

O processo de um dessalinizador solar híbrido consiste em um sistema constituído de um coletor solar para aquecimento de água a temperatura média de 70°C e um trocador de calor (evaporador + condensador) alimentado por vinte painéis Fotovoltaico, e responsável pelo aquecimento de uma resistência elétrica, que por efeito Joule provoca a variação média da temperatura da água pré- aquecida em 30°C. É um sistema com uso exclusivo de energia solar, implantado em São Luís, na Universidade Estadual do Maranhão, com capacidade de aproximadamente 20 litros / dia com custo não muito elevado em comparação com outros métodos de dessalinização da água do oceano ou salobra, com vantagem de ser uma das mais viáveis do ponto de vista ambiental. É um processo que deve ser estendido por todo Nordeste do Brasil. Isto em virtude de que, por abranger grande parte do semi-árido brasileiro, o Nordeste é a região que mais necessita de métodos dessalinizadores, principalmente no aproveitamento da energia solar.

## **CAPITULO IV**

### **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **4.1 Metodologia - Coletor Solar Plano**

A metodologia empregada para a coleta dos dados referentes às temperaturas de entrada, temperatura de saída e vazão mássica, na realização do teste de rendimento, foram obtidos colocando o coletor solar plano exposto à radiação solar, cujas as medidas foram obtidas por termômetros fixados na entrada e na saída do coletor solar, a vazão mássica foi medida com uma bureta graduada e dois cronômetros e o valor médio da radiação incidente no coletor, foi obtido teoricamente para latitude  $2,55^\circ$ . Os ensaios para determinação dos pontos para montagem das curvas, foram realizados ao longo de 06 dias selecionados entre os mais adequados para esta tarefa, isto é, entre 18 de setembro e 23 de setembro de 2003.

##### *4.1.1 Montagem Experimental*

Fez-se o uso de um coletor solar plano, para pré-aquecimento da água salobra ou salgada. Este coletor solar plano utilizado, possui a seguinte constituição:

Uma cobertura transparente de vidro comum, com  $0,624\text{m}^2$  de área e  $0,003\text{m}$  de espessura.

Uma placa absorvedora de alumínio, com  $0,500\text{m}^2$  de área e  $0,002\text{m}$  de espessura, pintada com tinta preta fosca, sendo o diâmetro interno do tubo do absorvedor  $0,016\text{m}$  e diâmetro externo  $0,018\text{m}$  e, com espaçamento entre os tubos de  $0,20\text{m}$ .

O isolante térmico colocado no fundo e nos lados da caixa de madeira, utilizado foi o poliestireno expandido (isopor), com  $0,950\text{m}^2$  de área e  $0,050\text{m}$  de espessura.

O fluido de trabalho foi a água salgada, coletada na baía de São José de Ribamar, em São Luís do Maranhão, com salinidade em média de  $12,99\text{g/l}$  e PH médio  $6,70$  (Litoral do Maranhão).

A vazão mássica média de  $1,64\text{g/s}$  foi medida, com o auxílio de uma Bureta graduada marca LENA, com capacidade para  $500\text{ml}$  e dois cronômetros digitais, marcas, Medeiros, NF: 8701 da MMECL e HK 2000/ XL 9588, conforme figura (4.1).



**FIGURA 4.1–Medida da vazão mássica do coletor solar plano**

#### *4.1.2 Medidas de Temperaturas*

Para a medição de temperaturas, utilizamos na entrada ( $T_i$ ) do coletor solar, um termômetro da INCODERM-122191, com variação de temperatura de  $-10^\circ\text{C}$  a  $110^\circ\text{C}$ . Na Saída ( $T_o$ ) do coletor, a temperatura foi medida com um termômetro da INCODERM-294326, com variação de temperatura de  $-10^\circ\text{C}$  a  $110^\circ\text{C}$ . Os dois termômetros foram fixados na entrada e na saída do coletor solar, como mostra a figura ( 4.2 )



**FIGURA 4.2 – Medida da temperatura do coletor solar plano**

## **4.2. Protótipo do destilador solar**

### *4.2.1 Metodologia*

O Protótipo do destilador consistiu de um sistema em única etapa utilizando um recipiente de alumínio, tipo bacia, para evaporação da água e, a coleta do fluido que se deseja destilar é feita por uma bureta graduada. A cobertura de vidro é inclinada para facilitar o escorregamento do vapor condensado no vidro, de modo que as gotas condensadas deslizem pelas paredes inclinadas e então transportadas por uma calha até um recipiente coletor. Utilizando a metodologia da transferência de calor e massa, foram feitos ensaios com 200ml de água salgada com a mesma profundidades, a capacidade do destilador foi determinada levando em consideração a quantidade de líquido destilado no tempo e a variação de temperatura entre a superfície da água  $T_{\text{água}}$  e a do vidro de cobertura  $T_{\text{vidro}}$ . Desse modo consegue-se prever o comportamento do processo do presente trabalho em várias condições, uma vez que os modelos foram gerados de forma genérica. Também será possível projetar o equipamento para uma situação específica de acordo com as necessidades e condições particulares de qualquer região.



#### 4.2.2 Dispositivo Experimental do Protótipo do Destilador

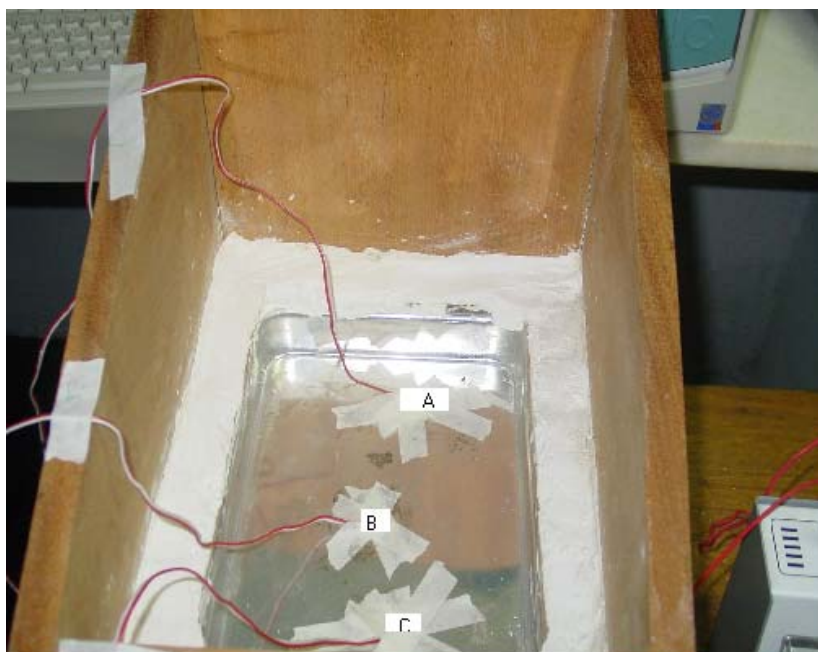
O dispositivo experimental do presente trabalho, conforme mostra a figura 4.3, consistiu em um módulo de destilador de madeira, com 0,40m de comprimento, 0,26m de largura, alturas ( $h_1=0,2400\text{m}$  e  $h_2=0,3900\text{m}$ ) e espessura de 0,0012m, com cobertura de vidro comum, com área de  $0,1014\text{ m}^2$  e espessura de 0,004m, formando um ângulo  $\alpha = 70^\circ$  com a vertical e  $20^\circ$  com a horizontal. As paredes foram isoladas com poliestireno expandido de 0,003m de espessura, no lado de maior altura, fizemos uma abertura que permitiu introduzirmos um sensor para medir a temperatura da água e realizarmos observações direta do vapor de água, esta abertura esteve normalmente vedada com poliestireno. Na base interna do destilador existiu um recipiente de alumínio que continha a água para destilar, com 0,2850m de comprimento, 0,1900m de largura, 0,0350m de altura e espessura de 0,0007m, isolada com lã de vidro, madeira e gesso. O recipiente de alumínio, possuía na parte retangular externa uma resistência elétrica de fio de constantan de 4,8000 Ohms, comprimento de 1,9200m e diâmetro 0,0005m, colada e isolada com mica e alimentada por uma fonte de tensão variável da BENDER, simulando dois painéis fotovoltaicos, ligados em série, com potência de 120Wp (24Vp e 5Ap).



**FIGURA 4.3 – Aparelhos utilizados nos ensaios da placa de alumínio do evaporador**

### 4.2.3 Temperaturas

Para a medição das temperaturas na superfície da placa do aquecedor elétrico, utilizamos 03(três) termopares tipo J, distribuídos na placa retangular plana da bacia de alumínio, que contem a água para destilar, conforme a figura 4.4. Os registros das temperaturas foram feitos com auxilio de uma placa de aquisição de dados (LYNX-Modelo: MCS.1000V2), acoplado a um microcomputador n° 11405-UNICAMP, e as leituras dos dados obtidos foram feitas através do programa Aqd4. Os equipamentos podem serem observados nas figuras 4.3 e 4.4.

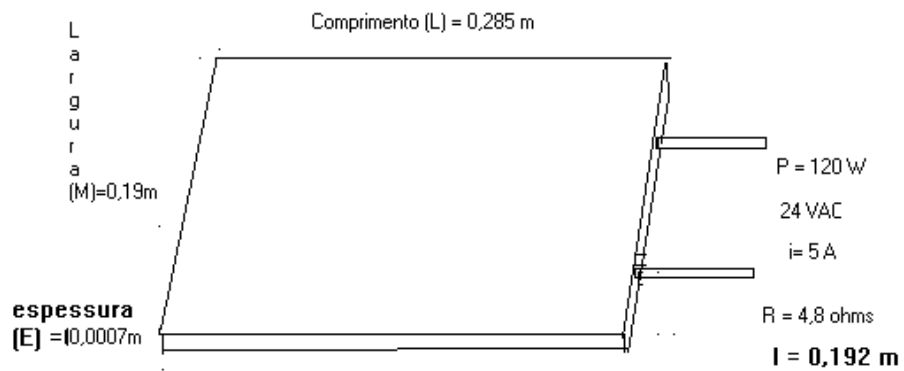


**FIGURA 4.4 – Ensaio da placa elétrica do evaporador**

### **4.3 Dimensionamento da resistência elétrica fixada e isolada na parte externa de uma bacia retangular de alumínio do protótipo do destilador**

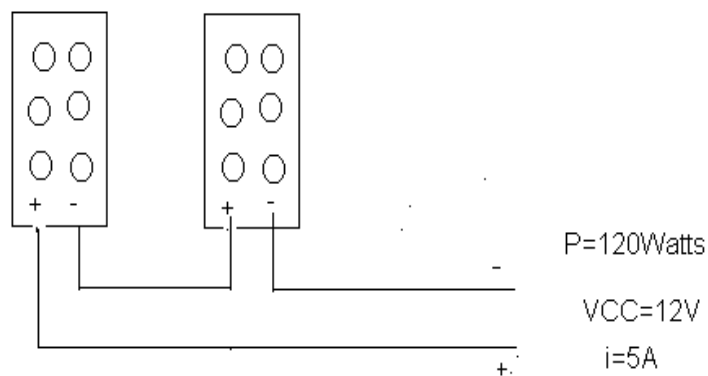
Verificamos através do dimensionamento teórico, a necessidade de associação mista com 20 (vinte) painéis Fotovoltaico, para alimentar a resistência de 3,0000  $\Omega$  de Constantan submerso no evaporador, para transformar 14 litros de água a 70°C em Vapor a 100°C. Porem sem perder a essência do presente Trabalho, substituímos a resistência elétrica submersa, por uma resistência elétrica de 4,8000  $\Omega$  de fio Constantan, colada e isolada na

parte plana externa da bacia de Alumínio, com  $0,0542 \text{ m}^2$  de área e espessura  $0,0007 \text{ m}$  (figura 4.5). A potência utilizada no evaporador para ser transformada em calor é de  $120 \text{ Watts}$ , resultado da associação em série de dois painéis fotovoltaicos, como mostra a figura ( 4.6 )



**FIGURA 4.5 – Placa plana de alumínio com resistência elétrica colada e isolada**

#### 4.3.1 Associação em Série de Painéis Fotovoltaicos



**FIGURA 4.6 – Associação de painéis fotovoltaicos ligados em série**

## CAPÍTULO V

### 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE

Os dados obtidos no ensaio do Coletor Solar Plano, permitiu uma análise da diferença entre as temperaturas de saída e entrada e, o rendimento, ao longo de três dias, no intervalo de tempo das 11:00hs as 16:00hs, conforme a tabela 5.1. A apresentação dos resultados em forma de gráfico é muito útil pois permite extrair com mais facilidade dois parâmetros que descrevem, de forma simplificada, o comportamento do coletor solar do presente trabalho: a variação de temperatura de entrada e a temperatura de saída, e o rendimento. Para melhor visualização gráfica, apresentamos na sua ordenada a eficiência Instantânea  $\eta$ ; e na abscissa, a diferença entre a temperatura de saída e a temperatura de entrada ( $T_o - T_i$ ). Após a realização do Ensaio, os pontos foram plotados conforme a figura 5.1. Através destes pontos discretos, foi feita uma aproximação (métodos dos mínimos quadrados), para uma função contínua, apresentando um coeficiente de determinação  $R=0.99948$ . Utilizando a energia disponível média de  $864.15 \text{ cal/cm}^2.\text{dia}$  e a vazão média experimental de  $1.64 \text{ g/s}$ , podemos verificar graficamente que a evolução máxima do rendimento encontra-se no intervalo de tempo das 12:00hs as 14:00hs. Os dados experimentais informam que a temperatura média na saída do coletor é de aproximadamente  $70,1 \text{ }^\circ\text{C}$  e sua eficiência média de  $60,1\%$ , com intervalos de confiabilidades, respectivamente iguais a  $[66,2;74,0]^\circ\text{C}$  e  $[50,8;70,1]\%$ .

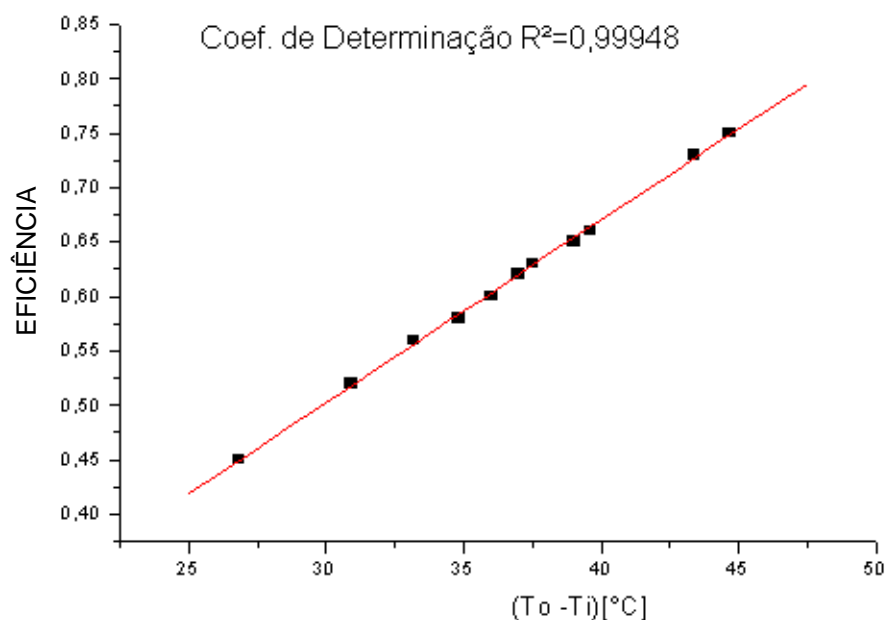
## 5.1 Resultados da determinação da eficiência térmica

### 5.1.1. Tabela Experimental

**TABELA 5.1 - Dados Experimentais do Coletor Solar Plano**

PONTOS	DATA	HORA	SOLAR	Cp	m	Ti	To	Ho	Ls 12,55	Gt	A	To-Ti	$\bar{\eta}$
Nº		Início	Fim	Cal/g°C	g/s	°C	°C	Cal/cm <sup>2</sup> .s	graus	Cal/cm <sup>2</sup> .s	cm <sup>2</sup>	°C	Decimal
1	23/08/03	11:00	11:06	1,0	1,64	31,20	67,20	0,02	0,9761	0,0196	5000	36,00	0,60
2	23/08/03	12:00	12:05	1,0	1,64	32,20	65,40	0,02	0,9761	0,0196	5000	33,20	0,56
3	24/08/03	12:00	12:06	1,0	1,64	31,20	70,70	0,02	0,9761	0,0196	5000	39,00	0,65
4	24/08/03	13:00	13:04	1,0	1,64	34,80	71,75	0,02	0,9761	0,0196	5000	37,00	0,62
5	24/08/03	14:05	14:10	1,0	1,64	35,70	79,10	0,02	0,9761	0,0196	5000	43,40	0,73
6	24/08/03	15:00	15:06	1,0	1,64	35,20	66,08	0,02	0,9761	0,0196	5000	30,91	0,52
7	24/08/03	16:00	16:06	1,0	1,64	34,00	60,83	0,02	0,9761	0,0196	5000	26,83	0,45
8	25/08/03	14:40	14:46	1,0	1,64	31,50	76,20	0,02	0,9761	0,0196	5000	44,67	0,75
9	25/08/03	11:10	11:16	1,0	1,64	33,10	70,60	0,02	0,9761	0,0196	5000	37,50	0,63
10	25/08/03	12:30	12:36	1,0	1,64	34,20	73,75	0,02	0,9761	0,0196	5000	39,60	0,66
11	25/08/03	14:50	14:56	1,0	1,64	34,92	69,75	0,02	0,9761	0,0196	5000	34,83	0,58

### 5.1.2 Curva de eficiência



**FIGURA 5.1 – Variação da Eficiência em Função da Diferença de Temperatura de Saída e Entrada do Coletor Plana**

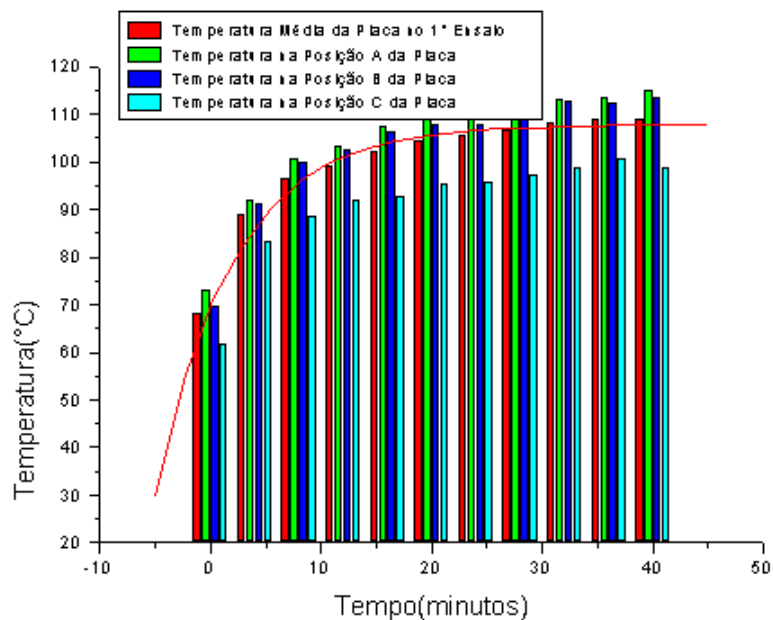
### 5.2. Resultados do ensaio da placa do evaporador

Com base nos resultados encontrados nos experimentos da tabela 5.2, do 1º ensaio da placa do evaporador e apresentado no gráfico 5.2, foi verificado que as temperaturas instantâneas, na posição (A), temperaturas instantâneas na posição (B) e temperaturas instantâneas na posição (C), da superfície interna da bacia do evaporador, são diferentes, apresentando para um intervalo de tempo de 40 minutos, uma variação de temperatura de  $40,8672^{\circ}\text{C}$ , temperatura média de  $90,05^{\circ}\text{C}$ , temperatura máxima de  $114,9526^{\circ}\text{C}$  com ocorrência na posição (A) e temperatura mínima de  $61,9935^{\circ}\text{C}$  com ocorrência na posição (C). Os mesmos procedimentos experimentais, foram utilizados na realização dos ensaios 2 e 3, gerando as tabelas 5.3 e 5.4, representadas, respectivamente pelos gráficos 5.3 e 5.4. No 2º ensaio para um intervalo de tempo de 40 minutos, obtemos uma variação de temperatura de  $54,6563^{\circ}\text{C}$ , temperatura máxima de  $104,0813^{\circ}\text{C}$  com ocorrência na posição (A), temperatura mínima de  $34,09424^{\circ}\text{C}$  com ocorrência na posição (C) e temperatura média na superfície da

bacia de 75,9420°C. O 1º e o 2º ensaio foram realizados em intervalos de tempo de 40 minutos, onde cada ponto foi registrado de 4 em 4 minutos e, proporcionou uma variação média na superfície de 82,996°C.

**Tabela 5.2 – Dados do 1º ensaio da placa elétrica do evaporador**

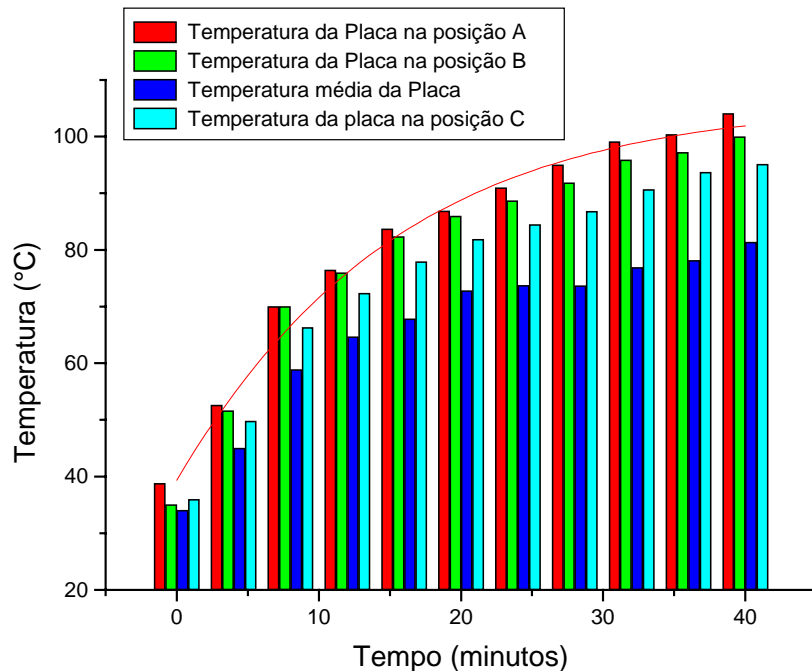
Números	Tempo	Temp/°C	Temp/°C	Temp/°C	Temp/°C
Pontos	minutos	Posição A	Posição B	Posição C	Média
1	0	73,32973	69,70226	61,99387	68,3419
2	4	91,92056	91,46712	83,3053	88,89766
3	8	100,6289	100,1755	88,83962	96,54
4	12	103,2564	102,803	91,9205	99,3266
5	16	107,6976	106,3373	92,7343	102,2564
6	20	109,4183	108,058	95,51523	104,4305
7	24	111,6622	107,8484	95,79195	105,7675
8	28	112,4759	110,2087	97,5125	106,7324
9	32	113,4293	112,9759	98,9194	108,4415
10	36	113,5457	112,6389	100,8496	109,0114
11	40	114,9526	113,5923	99,0823	109,2091



**FIGURA 5.2 – Gráfico do 1º ensaio da placa elétrica do evaporador**

**TABELA 5.3 – Dados do 2º Ensaio da placa elétrica do evaporador**

Númeror	Tempo	Temp/°C	Temp/°C	Temp/°C	Temp/°C
Pontos	minutos	Posição A	Posição B	Posição C	Média
1	0	38,84961	35,04831	34,09424	35,9964
2	4	52,64017	51,6801	45,03158	49,787
3	8	70,0737	70,0737	58,91891	66,3557
4	12	76,46835	76,01491	64,67905	72,3874
5	16	83,7233	82,36299	67,85309	77,9798
6	20	86,89734	85,99047	72,84087	81,9096
7	24	91,00153	88,73435	73,77101	84,5022
8	28	95,03588	91,86184	73,72444	86,8705
9	32	99,11679	95,9427	76,8985	90,6527
10	40	100,384	97,20994	78,16569	93,7567
11	44	104,0813	100	81,40957	95,1637



**FIGURA 5.3 – Gráfico do 2º ensaio da placa elétrica do evaporador**

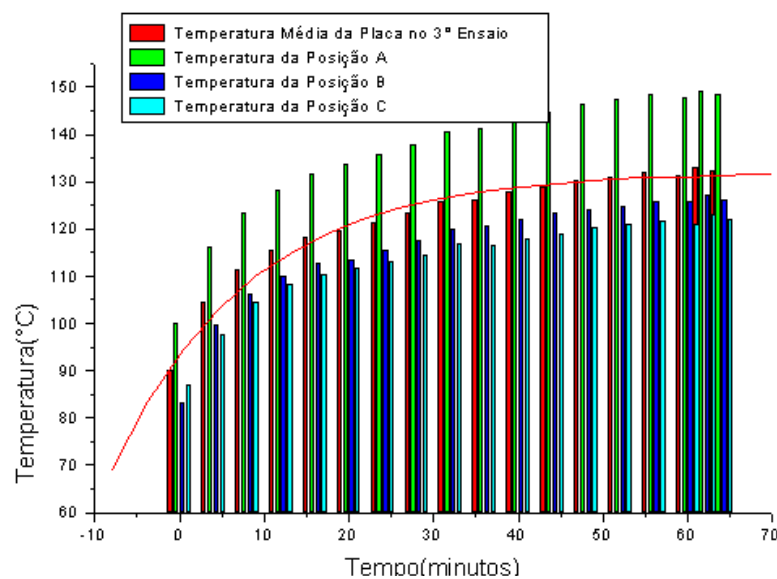
O 3º ensaio foi realizado no intervalo de tempo de 62 minutos, com cada ponto registrado de 4 em 4 minutos. Com base nos resultados encontrados no experimento da tabela 5.4 e representados no gráfico 5.4, verificamos que a temperatura mínima de 83,3164°C tem ocorrência na posição (B), a temperatura máxima de 149,2972°C com ocorrência na posição (A) e a temperatura média na superfície da bacia, no 3º ensaio, foi de



115,1730°C. A temperatura média da superfície interna da bacia, no presente trabalho, considerando os dados apresentados nas tabelas 5.2,5.3 e 5.4, é da ordem de 92,3420°C, com intervalo de confiabilidade da temperatura na faixa de [77,1;107,6]°C. Nos gráficos 5.2, 5.3 e 5.4 a evolução temporal das temperaturas é exponencial e não linear.

**TABELA 5.4 – Dados do 3ª ensaio da placa elétrica do evaporador**

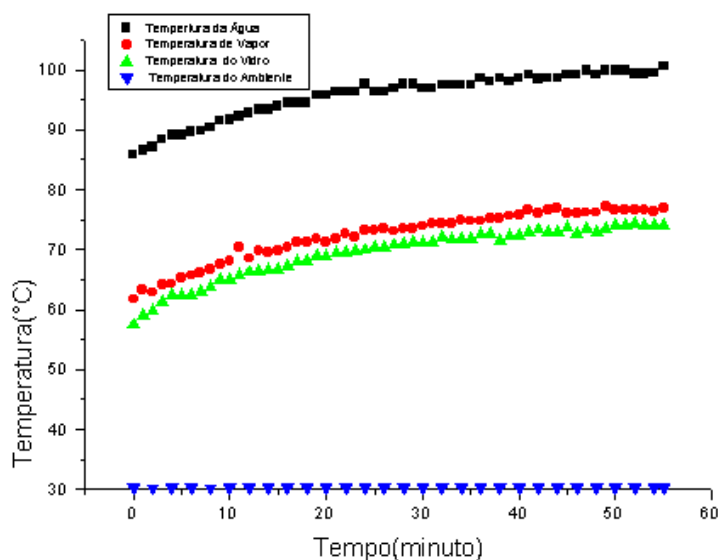
Números Pontos	Tempo minutos	Temp/°C Posição A	Temp/°C Posição B	Temp/°C Posição C	Temp/°C Média
1	0	100,0935	83,31642	86,94389	90,1179
2	4	116,4171	99,64007	97,82632	104,6278
3	8	123,6265	106,395	104,5813	111,5339
4	12	128,1599	110,0225	108,208	115,4635
5	16	131,7874	112,7431	110,4759	118,3355
6	20	133,5778	113,6267	111,813	119,6723
7	24	135,6648	115,7134	113,2198	121,5327
8	28	137,7519	117,5007	114,6267	123,3931
9	32	140,519	120,1145	116,987	125,7068
10	36	141,4492	120,5912	116,5103	126,1836
11	40	143,3095	121,998	117,9171	127,7415
12	44	144,6931	123,3816	118,8473	128,974
13	48	146,5063	124,2885	120,2076	130,3343
14	52	147,4486	125,0036	120,9226	131,1248
15	56	148,3671	125,7186	121,6377	131,9156
16	60	147,9137	125,6924	121,161	131,4863
17	64	148,3671	126,1488	122,0679	132,1946
18	62	149,2972	127,0789	122,998	133,1247



**FIGURA 5.4 – Gráfico do 3º ensaio da placa Elétrica do evaporador**

### 5.3. Ensaio do protótipo do destilador

A temperatura do laboratório de metalografia durante cada uma das experiências variou menos de 1°, que pode ser considerado em regime estacionário. Realizamos um total de 10 ensaios, registrando uma temperatura média mínima no interior do destilador de 68,3704°C e média máxima de 83,8396°C. A figura 5.5 mostra a variação dos valores das temperaturas médias, para a água, para a cobertura e para o vapor, para um volume do fluido de trabalho de 200ml, resíduo de 54ml, perdas de 58,2ml e capitação de 87,8ml, proporcionando uma eficiência percentual de (48,13%). Não podemos realizar ensaio com maior temperatura devido ao limite da corrente elétrica que suporta o sistema.



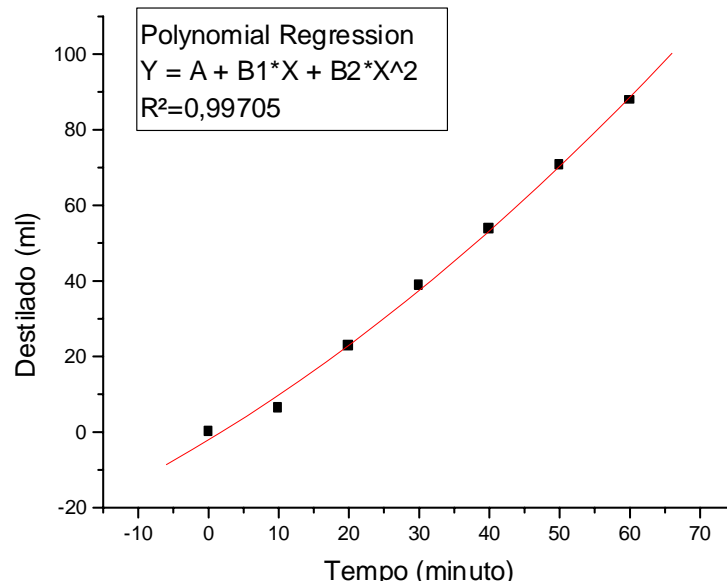
**FIGURA 5.5 – Evolução temporal da temperatura da água, do vapor, da cobertura e do ambiente**

A tabela 5.5 mostra os resultados obtidos no 1° ensaio do destilador, com essas informações, podemos verificar uma variação de temperatura entre a temperatura média da água e a temperatura média da parte interna da cobertura de vidro de 26,3312°C, a variação de temperatura entre a temperatura média da água e a temperatura média de vapor é de 23,36668°C e a variação de temperatura, entre a temperatura média de vapor e a temperatura média da parte interna do vidro de cobertura, é de 2,9645°C.

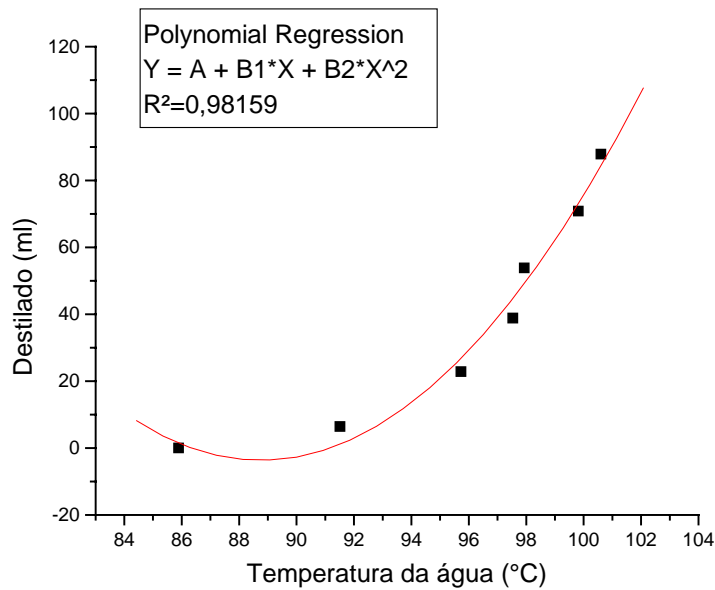
**TABELA 5.5 – Ensaio do destilador para um volume inicial de água salgada de 200ml, resíduo de 54ml, captação 87,8ml e perdas de 58,2ml**

DATA/HORA	TEMPERAT LAB.	ÁGUA S ALGADA	VIDRO COBERTURA	VAPOR
24/10/03 16:40:53	2,944183E+001	8,589382E+001	5,746878E+001	6,174862E+001
24/10/03 16:41:55	2,951508E+001	8,656169E+001	5,896864E+001	6,331874E+001
24/10/03 16:42:59	2,949066E+001	8,713190E+001	5,989529E+001	6,284202E+001
24/10/03 16:44:03	2,953949E+001	8,836997E+001	6,137074E+001	6,424889E+001
24/10/03 16:45:07	2,958832E+001	8,901342E+001	6,237064E+001	6,429545E+001
24/10/03 16:46:12	2,963715E+001	8,906225E+001	6,252827E+001	6,524888E+001
24/10/03 16:47:16	2,963715E+001	8,965687E+001	6,252827E+001	6,570231E+001
24/10/03 16:48:20	2,968597E+001	8,970570E+001	6,302826E+001	6,620230E+001
24/10/03 16:49:24	2,971039E+001	9,032474E+001	6,395841E+001	6,667902E+001
24/10/03 16:50:28	2,971039E+001	9,151398E+001	6,486528E+001	6,758589E+001
24/10/03 16:51:32	2,975922E+001	9,156281E+001	6,491183E+001	6,808588E+001
24/10/03 16:52:36	2,978363E+001	9,218185E+001	6,584199E+001	7,037634E+001
24/10/03 16:53:36	2,973480E+001	9,272785E+001	6,624886E+001	6,851604E+001
24/10/03 16:54:40	2,975922E+001	9,334668E+001	6,627214E+001	6,989962E+001
24/10/03 16:55:44	2,975922E+001	9,334668E+001	6,672558E+001	6,944618E+001
24/10/03 16:56:44	2,973480E+001	9,391689E+001	6,670230E+001	6,987634E+001
24/10/03 16:57:49	2,973480E+001	9,451151E+001	6,715573E+001	7,032977E+001
24/10/03 16:58:53	2,973480E+001	9,451151E+001	6,806260E+001	7,123664E+001
24/10/03 16:59:57	2,973480E+001	9,451151E+001	6,806260E+001	7,123664E+001
24/10/03 17:01:01	2,975922E+001	9,572517E+001	6,899275E+001	7,171336E+001
24/10/03 17:02:01	2,975922E+001	9,572517E+001	6,899275E+001	7,125992E+001
24/10/03 17:03:05	2,978363E+001	9,634421E+001	6,946947E+001	7,173664E+001
24/10/03 17:04:09	2,978363E+001	9,634421E+001	6,946947E+001	7,264351E+001
24/10/03 17:05:09	2,975922E+001	9,631979E+001	6,989962E+001	7,216679E+001
24/10/03 17:06:13	2,980804E+001	9,755787E+001	6,994617E+001	7,312022E+001
24/10/03 17:07:17	2,978363E+001	9,634421E+001	7,037634E+001	7,309695E+001
24/10/03 17:08:21	2,975922E+001	9,631979E+001	7,035305E+001	7,352709E+001
24/10/03 17:09:25	2,973480E+001	9,689000E+001	7,078321E+001	7,305038E+001
24/10/03 17:10:29	2,978363E+001	9,753345E+001	7,082977E+001	7,355038E+001
24/10/03 17:11:33	2,978363E+001	9,753345E+001	7,128320E+001	7,355038E+001
24/10/03 17:12:37	2,973480E+001	9,689000E+001	7,123664E+001	7,395725E+001
24/10/03 17:13:38	2,971039E+001	9,686559E+001	7,121336E+001	7,438741E+001
24/10/03 17:14:42	2,971039E+001	9,746021E+001	7,212023E+001	7,438741E+001
24/10/03 17:15:46	2,971039E+001	9,746021E+001	7,166680E+001	7,438741E+001
24/10/03 17:16:50	2,971039E+001	9,746021E+001	7,166680E+001	7,484084E+001
24/10/03 17:17:54	2,968597E+001	9,743580E+001	7,164352E+001	7,481756E+001
24/10/03 17:18:58	2,966156E+001	9,880063E+001	7,252711E+001	7,479428E+001
24/10/03 17:20:02	2,963715E+001	9,798159E+001	7,250383E+001	7,522443E+001
24/10/03 17:21:06	2,966156E+001	9,880063E+001	7,162024E+001	7,524772E+001
24/10/03 17:22:10	2,958832E+001	9,793276E+001	7,245728E+001	7,563132E+001
24/10/03 17:23:14	2,961273E+001	9,855180E+001	7,248055E+001	7,565459E+001
24/10/03 17:24:19	2,961273E+001	9,914642E+001	7,293398E+001	7,656145E+001
24/10/03 17:25:22	2,956390E+001	9,850298E+001	7,334086E+001	7,606147E+001
24/10/03 17:26:27	2,958832E+001	9,852738E+001	7,291071E+001	7,653819E+001
24/10/03 17:27:30	2,958832E+001	9,852738E+001	7,291071E+001	7,699162E+001
24/10/03 17:28:34	2,961273E+001	9,914642E+001	7,384085E+001	7,610802E+001
24/10/03 17:29:39	2,963715E+001	9,917083E+001	7,250383E+001	7,613131E+001
24/10/03 17:30:42	2,968597E+001	9,981429E+001	7,345725E+001	7,617786E+001
24/10/03 17:31:47	2,968597E+001	9,921967E+001	7,300382E+001	7,617786E+001
24/10/03 17:32:51	2,968597E+001	9,981429E+001	7,345725E+001	7,708473E+001
24/10/03 17:33:55	2,975922E+001	9,988753E+001	7,398053E+001	7,670113E+001
24/10/03 17:34:59	2,971039E+001	9,983870E+001	7,393398E+001	7,665458E+001
24/10/03 17:36:03	2,978363E+001	9,931731E+001	7,445724E+001	7,672442E+001
24/10/03 17:37:07	2,975922E+001	9,929291E+001	7,398053E+001	7,670113E+001
24/10/03 17:38:11	2,983246E+001	9,936615E+001	7,405037E+001	7,631754E+001
24/10/03 17:39:15	2,988129E+001	1,006042E+002	7,409692E+001	7,681754E+001

As figuras 5.6 e 5.7 mostram que as relações entre o volume do destilado com o tempo, e o volume do destilado com a temperatura, cresce não linearmente. Com coeficiente de determinação de 0,997050

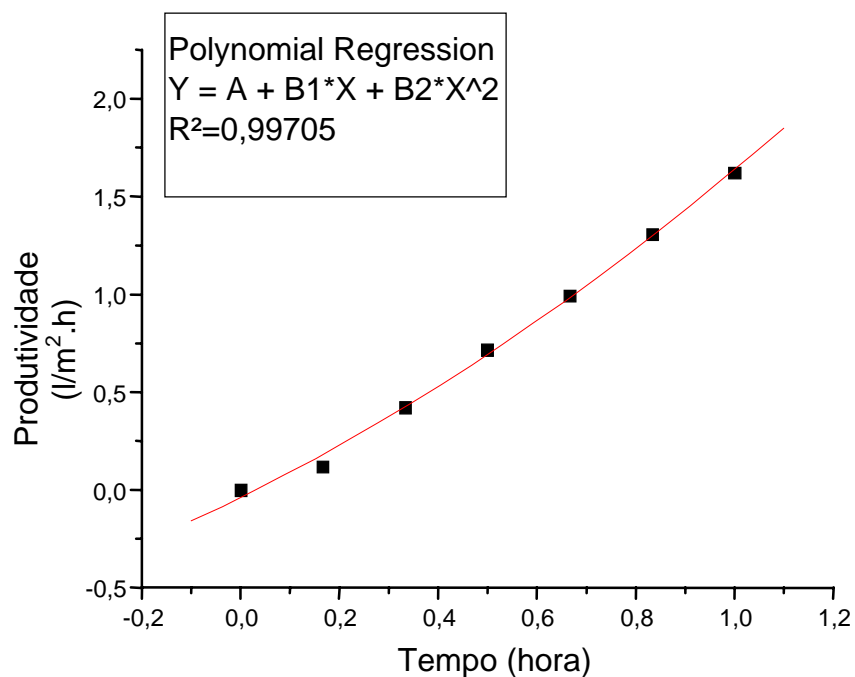


**Figura 5.6 – Volume da água destilada em função do tempo**



**FIGURA 5.7– Destilado em função da temperatura**

A figura 5.8 mostra a relação entre a produtividade do destilado em litro por metros quadrados por horas, no Destilador do presente trabalho, analisado sem está acoplado ao sistema, cresce não-linearmente e, apresenta coeficiente de determinação de 0,99705 e uma produtividade média diária (dia de 8 horas) de 12,90 l/m<sup>2</sup>.h.



**FIGURA 5.8 – Produtividade do destilador em função do tempo**

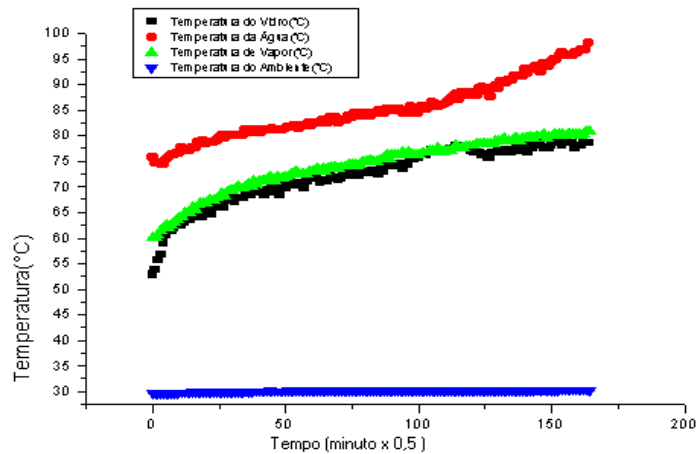
#### 5.4 Ensaios do protótipo do dessalinizador solar híbrido

A temperatura do ambiente durante o 1º e 2º ensaio do protótipo do Dessalinizador Solar Híbrido do presente Trabalho (Figura 5.9), variou menos de 1°C, o que pode ser considerado, que as condições externas não variaram. Os dados obtidos nas duas experiências e, representadas nas tabelas 5.6 , 57 e, nas figuras 5.10,5.11,5.12,5.13,5.14,5.15, e 5.16, serviram de base para o desenvolvimento dos sub itens 5.4.1 e 5.4.2.



**FIGURA 5.9 – Ensaio do dessalinizador solar híbrido**

O 1º Ensaio do Protótipo do Dessalinizador Solar Híbrido, foi realizado com a temperatura mínima da água de 75,6779°C e a temperatura máxima da água de 96,6644°C, proporcionando uma variação de temperatura de 20,9865, produtividade de 1,9110 l/m<sup>2</sup>.h ou 15,2880 l/m<sup>2</sup>.dia e Eficiência de 54,30%

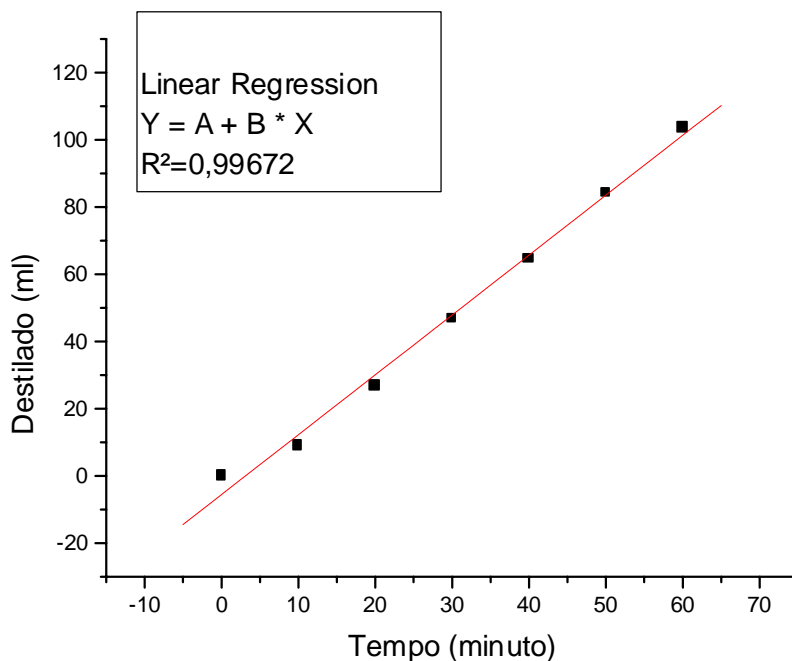


**FIGURA 5.10 – Evolução temporal da temperatura da água, da cobertura e do vapor, no 1º ensaio**

**TABELA 5.6 – Produtividade, destilado e temperatura da água do dessalinizador solar híbrido no 1º Ensaio**

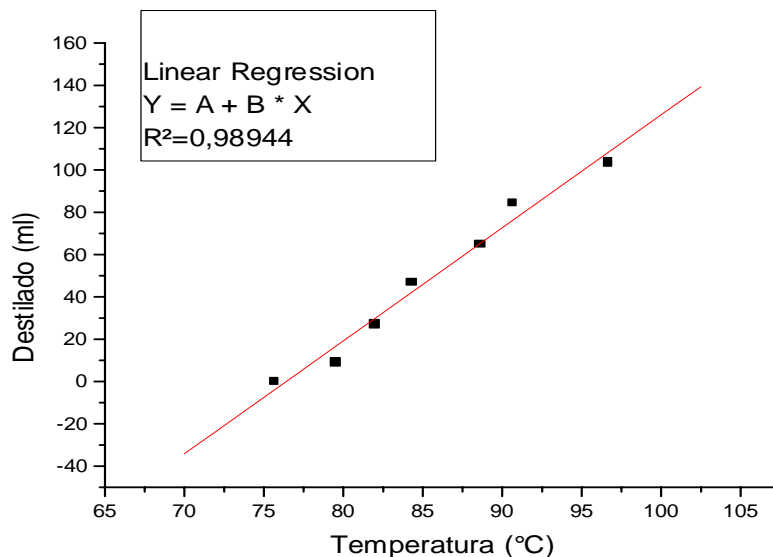
Tabela 5.6 -Produtividade, Destilado e Temperatura da água, no Dessalinizador Solar Híbrido				
Nº pontos	Tempo (min)	Destilado (ml)	Produtividade	Temperatura (°C)
0	0	0	0	75,6779
1	10	9	0,166305	79,53814
2	20	27	0,498615	81,99155
3	30	46,7	0,862419	84,32856
4	40	64,7	1,1948291	88,6423
5	50	84,3	1,5567867	90,69992
6	60	103,5	1,9113573	96,66441

A tabela 5.6 mostram os dados obtidos no 1º Ensaio do Protótipo Dessalinizador Solar Híbrido e, utilizados para plotar os gráficos 5.11, 5.12 e 5.13, estes dados foram escolhidos de 10 em 10 minutos. Pelos resultados podemos afirmar que, 103,5 ml é a quantidade de Destilado obtido no 1º Ensaio do Dessalinizador Solar, Resíduo de 50 ml, Fuga de 46,5ml e Eficiência de 54,30%, superior a Eficiência do Destilador, analisado separado do SISTEMA.



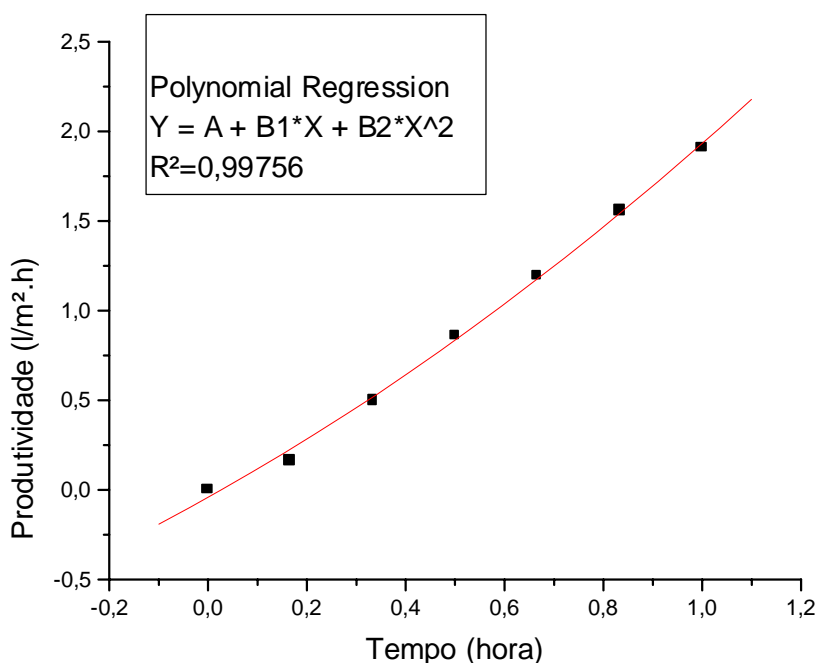
**FIGURA 5.11 – Volume da água destilada em função do tempo**

No gráfico 5.11, podemos afirmar que a evolução do Destilado em função do tempo, ocorre linearmente, com coeficiente de determinação  $R^2=0,996720$



**Figura 5.12 –Destilado em função da temperatura da água**

Pela figura 5.12, podemos afirmar que a evolução do Destilado em função da temperatura da água, é linear e, apresenta coeficiente de determinação  $R^2=0,989440$

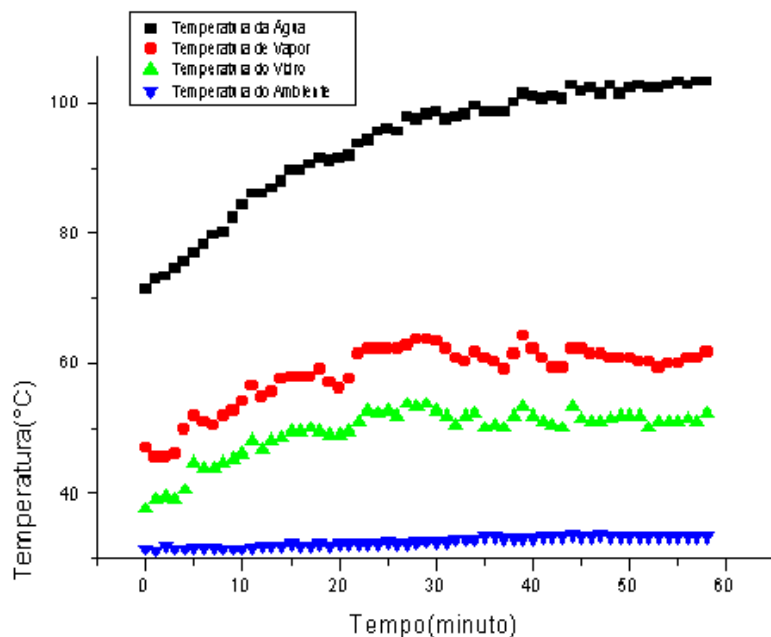


**FIGURA 5.13 – Gráfico da produtividade em função do tempo do Dessalinizador Solar Híbrido**

A figura 5.13 mostra que a Evolução Temporal, da Produtividade do Dessalinizador Solar Híbrido, do presente Trabalho, é não-linear e, apresenta um coeficiente de determinação  $R^2=0,99756$ .

No 2º Ensaio do Protótipo do Dessalinizador Solar Híbrido, do presente Trabalho, com Temperatura mínima da água de  $71,3602^{\circ}\text{C}$  e Temperatura máxima da água  $103,2547^{\circ}\text{C}$ , proporcionando variação na Temperatura de  $31,8945^{\circ}\text{C}$ , Produtividade de  $1,9476 \text{ l/m}^2.\text{h}$  ou  $15,5800 \text{ l/m}^2.\text{dia}$  e Eficiência de  $54,09\%$ .



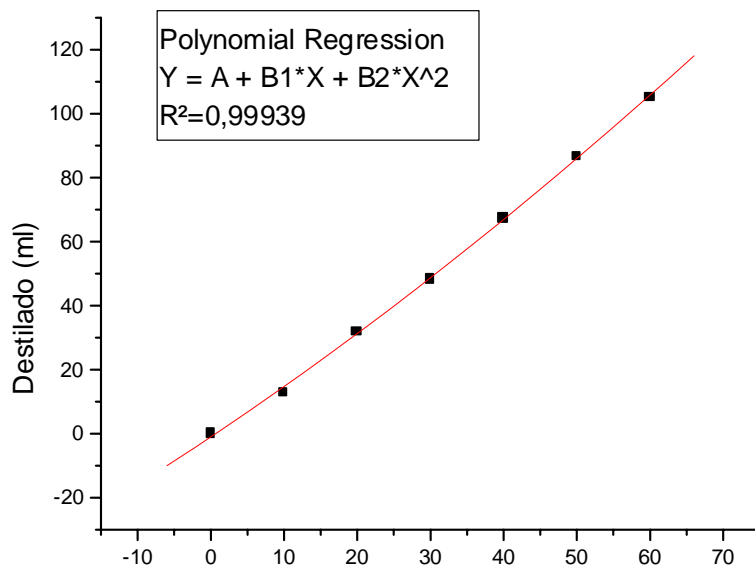


**FIGURA 5.14 – Evolução temporal da temperatura da água, da cobertura e do vapor, no 2º ensaio do sistema acoplado**

**TABELA 5.7 – Produtividade, destilado e temperatura da água do dessalinizador solar híbrido no 2º Ensaio**

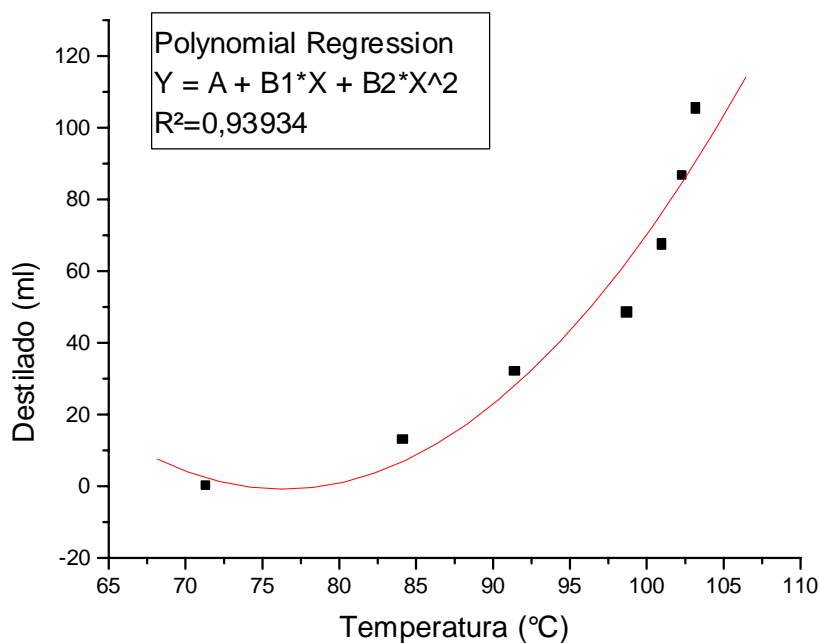
Nº pontos	Tempo (min)	Produtividade (l /m².h)	Destilado (ml)	Temperatura (°C)
1	0	0	0	71,3602
2	10	0,24007	13	84,21044
3	20	0,58776	31,8	91,46539
4	30	0,89381	48,4	98,72034
5	40	1,2447	67,4	100,9875
6	50	1,5993	86,6	102,3478
7	60	1,94275	105,2	103,2547

A Tabela 5.7 mostra os dados, obtidos no 2º Ensaio do Protótipo do Dessalinizador Solar Híbrido, utilizados para plotagem dos gráficos, 5.15, 5.16 e 5.17. Estes dados foram escolhidos de 10 em 10 minutos, da tabela 5.7, podemos afirmar que, 105,2 ml é a quantidade de destilados, produzidos pelo Protótipo do Presente Trabalho em 1 hora, Resíduo de 51 ml, Fuga de 43,8ml de vapor e Eficiência de 54,09%.



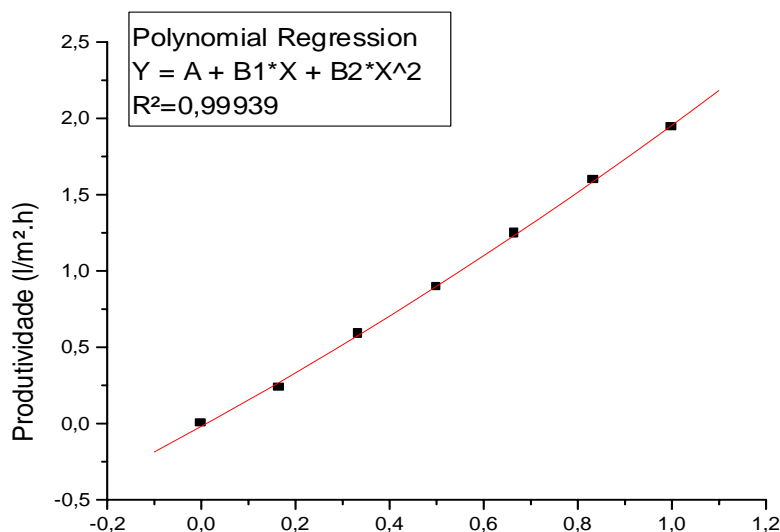
**FIGURA 5.15 – Destilado em função do tempo**

A figura 5.15, mostra que a evolução Temporal do Destilado, no 2º Ensaio do Protótipo do Dessalinizador Solar Híbrido, é não-linear, com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,999390$ .



**FIGURA 5.16 – Destilado em função da temperatura da água**

A figura 5.16. mostra, que a Evolução do Destilado em função da Temperatura da água, é não - linear, com coeficiente de determinação  $R^2=0,939340$



**FIGURA 5.17 – Produtividade em função do tempo, no 2º ensaio do dessalinizador solar híbrido**

A figura 5.17, mostra que a Evolução Temporal da Produtividade, do Dessalinizador Solar Híbrido, é não – linear, com coeficiente de determinação  $R^2=0,99930$ .

Com os dados do 1º e 2º Ensaio do Dessalinizador solar Híbridos, podemos afirmar que, o intervalo de confiabilidade da produtividade do sistema, por metro quadrado, esta na faixa de  $[1,91;1,94]l/m^2.h$ .

## 5.5 Análise preliminar do fluido de trabalho

A Água utilizada para destilação no presente trabalho, foi coletada na Baía de São José de Ribamar no dia 8 de outubro de 2003. Apresentou um elevadíssimo teor de sódio, água de péssima qualidade para irrigação e consumo como água potável. O índice de salinidade da água utilizada é de 12,9921 g/l, segundo análise do Núcleo Tecnológico de Engenharia Rural da Universidade Estadual do Maranhão, como mostra a Tabela 5.8.

**TABELA 5.8 – Análise da água utilizada no dessalinizador solar híbrido**

**ANÁLISE DE ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO  
 INTERESSADO: JOAQUIM TEIXEIRA LOPES  
 NÚCLEO TECNOLÓGICO DE ENGENHARIA RURAL  
 PROCEDÊNCIA: SÃO JOSÉ DE RIBAMAR - MA  
 LABORATÓRIO DE SOLOS  
 Cidade Universitária Paulo VI

Cx Postal 3004  
 DATA EXP.: 24/10/2003

CEP: 65.054-970

Telefax: 257-1412

AMOSTRA Nº	IDENTIFICAÇÃO	CÁTIONS (meq/l)					CE MICROMHOS/cm a 25°C	RAS %	pH	CLASSIFICAÇÃO
		Ca**	Mg**	Na*	K*	SOMA DE CATIONS				
		20,05	103,08	473,22	11,85	608,20	51800	60,3	6,7	C4S4
OBSERVAÇÃO:										
C4S4 – Água de elevadíssimo teor de sódio. Água de péssima qualidade para irrigar. Esta classe de água não poderá ser usada com sucesso por muito tempo para irrigar.										

RESPONSÁVEL: Emanuel Gomes de Moura

**5.6 Análise da água produzida pelo Dessalinizador solar híbrido**

A Água produzida pelo Dessalinizador Solar Híbrido do presente trabalho, foi analisada no Núcleo Tecnológico de Engenharia Rural da Universidade Estadual do Maranhão – Laboratório de Solos. Apresentou salinidade média e baixo teor de sódio. Pode ser usada para maioria das plantas e condições de solos. Lavagens periódicas do excesso e sais dos solos, especialmente para culturas sensíveis, como os citrus, o índice de salinidade da água destilada, pelo Protótipo do Dessalinizador Solar, é de 0,11g/l, representando apenas 22% da quantidade máxima de sais, que pode ser enjerida, que segundo o Conselho Mundial de Saúde, é de 0,5 g/l. Como mostra a Tabela 5.9.

## TABELA 5.9 – Análise da água produzida pelo dessalinizador solar híbrido

### ANÁLISE DE ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO  
NÚCLEO TECNOLÓGICO DE ENGENHARIA RURAL  
LABORATÓRIO DE SOLOS  
Cidade Universitária Paulo VI  
CEP: 65054-970

Cx Postal 3004  
Telefax: 257-1412

INTERESSADO: JOAQUIM TEIXEIRA LOPES  
PROCEDÊNCIA: SÃO JOSÉ DE RIBAMAR - MA

DATA EXP.: 21/12/2003

AMOSTRA N°	IDENTIFICAÇÃO	CÁTIONS (meq/l)					CE MICROMHOS/cm a 25°C	RAS %	pH	CLASSIFICAÇÃO
		Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SOMA DE CÁTIONS				
		2,80	0,15	0,95	0,73	4,63	391	0,8	8,0	C2S1
OBSERVAÇÃO:										
C2S1 – Água de média salinidade e baixo teor de sódio. Pode ser usada para a maioria de plantas e condições de solos. Lavagens periódicas do excesso e sais dos solos, são necessárias, especialmente para culturas sensíveis, como os citus.										

RESPONSÁVEL: Emanuel Gomes de Moura

### 5.7 Comparação da água dessalinizada pelo sistema do presente trabalho e os limites estipulados pela Organização Mundial de Saúde (OMS) para consumo humano

**TABELA 5.10 – Limites máximos de diversos parâmetros utilizados na avaliação da qualidade da água para consumo humano e a comparação com os dados da água destilada pelo dessalinizador solar híbrido**

Parâmetro	Unidade	Limite (OMS)	Present e Trabalho (DSH)	Percentual Em relação Ao Limite
pH		5,0 – 9,0	8	88,88%
Condutividade elétrica	dS m <sup>-1</sup>	0,4 <sup>1</sup>	-	-
<b>Cloretos</b>	mg L <sup>-1</sup>	250	-	-
Sulfatos	mg L <sup>-1</sup>	250	-	-
Cálcio	mg L <sup>-1</sup>	100	56	56,00%
Magnésio	mg L <sup>-1</sup>	50	1,8	3,60%
<b>Sódio</b>	mg L <sup>-1</sup>	150	21,85	14,57%
Potássio	mg L <sup>-1</sup>	12	28,47	237%

Pelos dados apresentados na tabela 5.10, podemos afirmar que o nível da salinidade da água destilada do presente trabalho é baixo quando comparado com o limite de sais estimado pela Organização Mundial de Saúde - OMS (500mg/l), para a água potável. Com restrição para o consumo humano, do potássio com 137% superior ao limite máximo da OMS.

## 5.8 Análise econômica

O custo do capital investido para instalação do sistema de um Dessalinizador Solar Híbrido, alimentado por painéis fotovoltaicos, com pré-aquecimento da água por coletor solar plano, desde a aquisição, transporte, instalação e manutenção, estão mostrados nas tabelas 5.10.e 5.11.

### 5.8.1 Custo do Capital para Aquisição do Sistema (C.P+F.V)

**TABELA 5.11 – Custo do Capital para aquisição do Sistema (C.P+F.V)**

ITEM	CUSTO UNITÁRIO (REAIS)	CUSTO TOTAL (REAIS)
Coletor Solar (incluindo caixa d'água)	600,00	600,00
Destilador (incluindo bacia de alumínio)	700,00	700,00
Painéis fotovoltaicos (incluindo instalação)	981,00/60Wp	19620,00
<b>T o t a l</b>	-	<b>20.920,00</b>

### 5.8.2 Custo de Operação e Manutenção do Sistema (CP + F.V)

**TABELA 5.12 – Custo de Operação e Manutenção do Sistema (CP + FV)**

ITEM	PERÍODO	CUSTO (REAIS)
Operador (a própria comunidade)	25 anos	Zero
Substituição de materiais	25 anos	700,00
<b>T o t a l</b>	-	<b>700,00</b>

Através das tabelas 5.11 e 5.12 percebe-se que o custo total da água potável é realizado com base na versão final da instalação do Dessalinizador Solar Híbrido, considerando que a operação para funcionamento do sistema, será realizada, pela comunidade. Os preços contidos nas tabelas 5.11 e 5.12 são aproximados e foram coletados através da Internet e no Mercado de São Luís no primeiro semestre de 2003.

### 5.9 Custo total da água potável em 25 anos de operação do sistema (DSH)

**TABELA 5.13 – Custo total da água potável em 25 anos**

ITEM	ESPECIFICAÇÃO	VALOR (R\$/l)
I	Valor Presente do Capital de Investimento	2.0920,00
II	Custo com Operação e Manutenção, O&M	R\$ 700,00
III	Produção estimada nos 25 anos da água potável, Pd	140674,65 l
IV	Custo total do Dessalinizador Solar Híbrido, Ct = Pd+ O&M	21.620,00

*O Custo Total da Água é dada por*

$$C_{\text{agua}} = \frac{C_t}{P_d} \quad (5.1)$$

$$C_{\text{agua}} = 0,1537 \text{ Reais / litros} \quad (5.2)$$

#### 5.9.1 Dados Comparativos do Custo de Água Potável

A Tabela 5.14 mostra a discrepância de valores entre a água potável, produzida pela instalação do Dessalinizador Solar Híbrido, e os preços da água potável produzida por outros processos.

**TABELA 5.14 – Preço da água potável produzida por vários dessalinizadores**

Água	Eficiência %	Custo (Real)/l	Fonte (informações)	Produtividade l/m <sup>2</sup> h
Dessalinizador Solar Híbrido	54,20	0,15	Presente trabalho	1,93
Osiose Reversa (OR + PV)	20	0,04	GTB / OIL Campinas São Paulo – Brasil	30
Destilador Solar Tipo Bacia (Cuba)	50%	0,02	<a href="http://eyte.cubasolar.cu/energia/energia16">http://eyte.cubasolar.cu/energia/energia16</a>	0,5
Água Mineral	-	1,18	<a href="http://www.buscape.com.br/precos/p174.asp">www.buscape.com.br/precos/p174.asp</a>	-
Água Destilada	-	4.52	<a href="http://www.buscape.com.br/precos/p174.asp">www.buscape.com.br/precos/p174.asp</a>	-

**5.10 Comparação de custo do sistema do presente trabalho com um sistema nas mesmas condições, mas alimentada por energia elétrica (Hidrelétrica)**

$$Y_{DSH} = C_{DSH,i} - \zeta \sum_{n=0}^{n=25} (1347,8884)(1,1)^n \quad (5.3)$$

$$C_{DSH,t} = R\$ 21.620,00$$

$$Y_{DE} = C_{DE,i} + \zeta \sum_{n=0}^{n=25} (1347,8884)(1,1)^n \quad (5.4)$$

$$C_{DE,i} = R\$ 2.000,00$$



Condições:

$$\{n \in \mathbb{N} / 0 \leq n \leq 25\} \quad (5.5)$$

$$n = 0 \rightarrow \zeta = 0 \quad (5.6)$$

$$n \neq 0 \rightarrow \zeta = 1 \quad (5.7)$$

$$Y_{DSH} = 0 \rightarrow C_{DHS,t} \leq \zeta \sum_{n=0}^{n=25} (1347,8884)(1,1)^n \quad (5.8)$$

K=R\$ 1347,8884 (Custo da energia consumida no 1º ano (2003) de operação do sistema, com a resistência elétrica, alimentada por Energia Elétrica / Hidrelétrica).

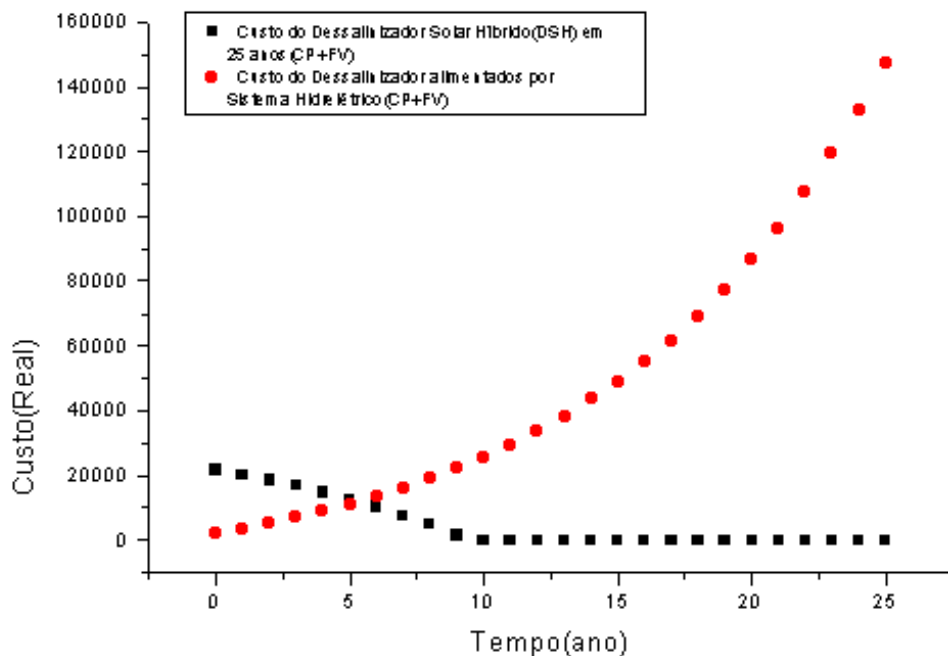
### 5.11 Comparação de custo de dois sistemas (DSH e DE)

**TABELA 5.15 - Comparação de custo do dessalinizador solar híbrido (DSH) com o dessalinizador alimentado por Hidrelétrica (DE)**

ANO(S)	DSH	DE	ANO(S)	DSH	DE
0	21620	2000	13	0	38359,27
1	20137,32	3482,677	14	0	43477,87
2	18506,38	5113,622	15	0	49108,34
3	16712,34	6907,662	16	0	55301,85
4	14738,89	8881,105	17	0	61495,36
5	12568,11	11051,89	18	0	68989,5
6	10180,24	13439,76	19	0	77233,07
7	7553,587	16066,41	20	0	86300,99
8	4664,269	18955,73	21	0	96275,7
9	1486,019	22133,98	22	0	107247,9
10	0	25630,06	23	0	119317,3
11	0	29475,74	24	0	132593,6
12	0	33705,99	25	0	147197,6

Com os dados obtidos na Tabela 5.15 e representada graficamente na figura 5.18, podemos afirmar que, após 10 anos de operação do Sistema do Presente Trabalho, o custo será zero, quando comparado com o sistema Elétrico (Hidrelétrica), considerando no DE, uma correção percentual de 10% ao ano.

**5.12 Gráfico da relação de custo do dessalinizador solar híbrido e o dessalinizador com a resistência elétrica, alimentada com energia elétrica (Hidrelétrica)**



**FIGURA 5.18 – Comparação de custo entre DSH e DE)**

# CAPITULO VI

## CONCLUSÃO E SUGESTÃO

### 6.1 Conclusão

Mostram-se possível a contribuição relativamente simples do dessalinizador solar híbrido, utilizando a energia solar como fonte primária e a energia térmica e elétrica como fonte secundária. Os resultados obtidos teoricamente com os valores estimados, encontram-se em concordância com alguns resultados experimentais, possibilitando dessa maneira a construção e utilização do sistema. Um avanço alcançado por este trabalho é permitir, que a água chegue no evaporador, já pré-aquecida, pelo coletor solar, possibilitando realizar uma avaliação do dessalinizador solar híbrido, com o sistema exclusivamente Fotovoltaico e o sistema elétrico. A avaliação das contribuições do presente trabalho, como uma das formas de obter a água potável, só podem ser feitos no decorrer de sua utilização por parte da comunidade. No presente trabalho, além de atingirmos os objetivos iniciais, chegamos as seguintes conclusões:

- a) O custo do destilado por litro, obtido pelo Dessalinizador Solar Híbrido é menor, quando comparado com outros processos de destilação.
- b) Após 10 anos de operação do Dessalinizador Solar Híbrido, o custo do destilado tende para zero, quando comparado com um sistema exclusivamente elétrico.
- c) Os sistemas exclusivamente fotovoltaicos e os sistemas somente elétrico existem na literatura, mas a tabela de disponibilidade teórica da energia solar em São Luis do Maranhão, as equações exponenciais de evolução temporal do sistema do presente trabalho e do sistema elétrico e, um dessalinizador solar híbrido, constituído de um

coletor solar, para pré-aquecimento de água e painéis fotovoltaicos para alimentar a resistência elétrica do trocador de calor (evaporador e condensador). Não conhecemos, na literatura até 2003, publicações consultada teóricas ou experimentais semelhantes.

## **6.2 Sugestões de continuidade do trabalho**

Evidentemente que este trabalho deixou de abordar vários aspectos relevantes, e abriu novas questões que poderão e deverão ser objetos de estudos posteriores. Algumas destas questões estão citadas abaixo:

- a) Para aumentar eficiência do Sistema do Presente Trabalho, propõe-se melhorar o isolamento, do Coletor Solar Plano e do Destilador.
- b) Estudo da Produtividade do Sistema Real, do Presente Trabalho, para diferentes profundidades do fluido de trabalho;
- c) Estudo para utilização da energia Fotovoltaico não utilizada, na operação do Dessalinizador Solar, como iluminação domiciliar;
- d) Como desenvolvimento de trabalho complementar, propõe-se analisar as distribuições de Radiação Solar na Superfície Terrestre para dias nublados.

## **APÊNDICES**

## APÊNDICE A

### A.1 Estimativa teórica para energia disponível em São Luís do Maranhão

Segundo Ismail (2000) a posição de um ponto P na superfície da terra com respeito aos raios solares é conhecido em qualquer instante se a Latitude ( $\phi$ ), o Ângulo Horário ( $\omega_s$ ) e a Declinação ( $\delta$ ) para este ponto forem conhecidos.

Esses ângulos fundamentais são mostrados na figura (A.01) para pontos no hemisfério Norte.

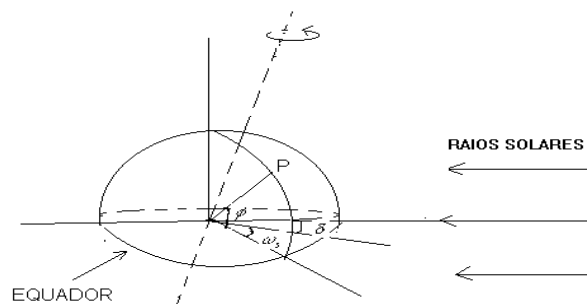


Figura A.01 - Ângulos Básico SOL-Terra

**Fig.(A.1) - Ângulos básicos Sol/Terra – Ismail (2002)**

Latitude ( $\phi$ ) é a distancia angular do ponto P do equador (norte ou sul). É o ângulo entre a linha OP e a sua projeção sobre o plano do equador. O Ângulo Horário ( $\omega_s$ ) é o ângulo medido entre a posição OP no plano do equador e a projeção no plano do equador da linha liga o centro do sol com o centro da terra, ao meio dia o Ângulo Horário é zero. O ângulo horário expressa a hora do dia em relação ao meio dia solar e pode ser determinado pela equação (A.01) [Ismail,2002].

$$\omega_s = \arccos(-tg\delta tg\phi) \quad (A.1)$$

A Declinação ( $\delta$ ) do sol é a distância angular dos raios do sol em relação ao equador(norte ou sul).É o ângulo entre a linha que une o centro da terra ao centro do sol e a Projeção desta linha no plano do equador. O ângulo de declinação  $\delta$  atinge o valor máximo de 23,45° no dia 22 de junho, que corresponde ao Solstício de verão no hemisfério norte e ao Solstício de inverno no hemisfério sul.

$$\text{Declinação}(\delta) = 23,45^\circ \text{ sen} \left[ \frac{360(284 + n)}{365} \right] \quad (\text{A.2})$$

Na equação (A.02) o dia do ano( $n$ ) refere-se ao número de dias percorridos desde o primeiro dia do ano (17 de fevereiro é o 48° dia do ano)

## A.2 Disponibilidade Teórica da Energia Solar para Latitude 2,55° S

Utilizando as equações ( A.1 ), ( A.2 ) e (3.2), podemos estimar a energia total incidente sobre uma área horizontal em função da latitude.

Para exemplificar esses cálculos determinamos a energia solar incidente durante um ano, sem levar em conta a absorção atmosférica, para a latitude de 2,55° Sul. Os resultados são apresentados na tabela. A.1

**TABELA A.1– Dados sobre a insolação em São Luís do Maranhão (Latitude 2.55° Sul)**

DIA	MES	N° / dias	Decl <sup>n</sup>	Ang .H	Hs / Ins	A	B	H <sub>o</sub> (cal / cm <sup>2</sup> dia )
22	JAN	22	- 19 ,93	89 ,10	11 ,88	- 0,18	7,17	851 ,00
22	FEV	53	- 10 ,87	89 ,51	11 ,93	- 0,10	7,49	890 ,40
22	MAR	81	0	90 ,00	12 ,00	0	7,63	906 ,32
22	ABR	112	11 ,93	90 ,54	12 ,07	0,11	7,47	884 ,87
22	MAI	142	20 ,34	90 ,94	12 ,22	0,19	7,16	846 ,10
22	JUN	173	23 ,45	91 ,11	12 ,15	0,22	7,00	824 ,92
22	JUL	203	20 ,24	90 ,94	12 ,13	0,19	7,16	841 ,16
22	AGO	234	11 ,40	90 ,51	12 ,10	0,11	7,48	877 ,68
22	SET	265	0	90 ,00	12 ,00	0	7,63	896 ,64
22	OUT	295	- 12 ,10	89 ,45	11 ,93	- 0,11	7,46	878 ,28
22	NOV	326	- 20 ,64	89 ,04	11 ,87	- 0,17	7,14	844 ,42
22	DEZ	356	- 23 ,64	88 ,90	11 ,85	- 0,19	7,00	828 ,05

$$C = 360G_{sc} \left[ 1 + 0,033 \cos \left( \frac{369n}{365} \right) \right]$$

$$H_o = C(A + B)$$

$$B = \left( \frac{24}{\pi} \right) \cos \phi \cos \delta \sin w_s$$

$$A = W_s \sin \phi \sin \delta$$

*ENERGIA MÉDIA DISPONIVEL 864,15 cal/cm<sup>2</sup> dia*

*Considerando :  $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2 \pm 1\%$*

A porcentagem **r** da energia incidente durante um ano, em relação à energia máxima, é dada pela equação A.03 [Luíz, 1996]

$$r = \left( 100 \frac{H_o}{H_m} \right) \quad (\text{A.3})$$

No caso específico de São Luís do Maranhão.

LATITUDE	Ho (Kcal/cm <sup>2</sup> .ano)	%
2,55 Sul	315,420	98

Onde:  $E_M = 322 \text{ Kcal/cm}^2 \cdot \text{ano}$  para latitude 0°

### A..3 Eficiência Teórico do Coletor Solar com Circulação Natural

DADOS ESTIMADOS:

- ⇒ Intensidade de Radiação  $H_o = 0,072 \text{ kcal/cm}^2 \text{ h}$
- ⇒ Temperatura da água na entrada do coletor:  $T_i = 30^\circ\text{C}$
- ⇒ Temperatura da água na saída do coletor:  $T_o = 70^\circ\text{C}$

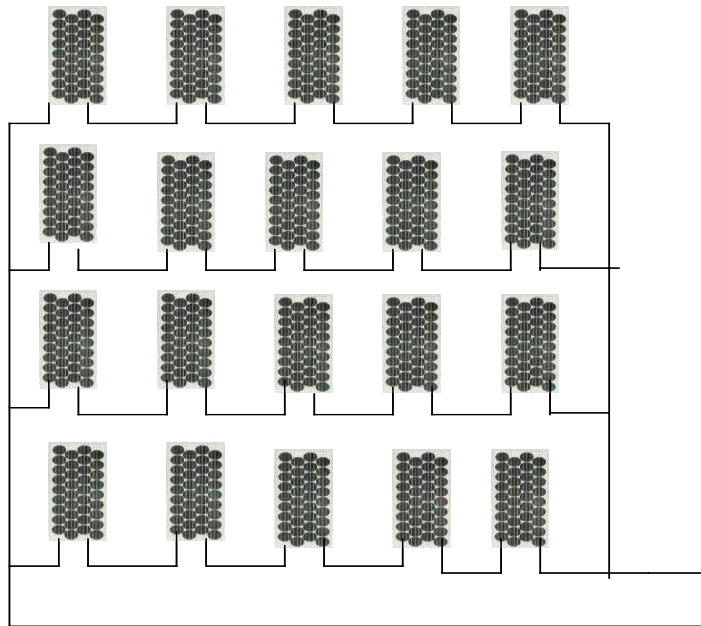


- ⇒ Volume da água a ser aquecida:  $V=36$  litros
- ⇒ Vazão Mássica :  $\dot{m} = 4,5l / h$
- ⇒ Inclinação do coletor:  $\Theta = 12,55^\circ$
- ⇒ Tempo de operação do coletor  $t=8$  horas/dia
- ⇒ Calor Especifico :  $C_p = 1,0cal / g.^{\circ}C$
- ⇒ Área do Coletor Solar Plano:  $A=0,5 m^2$  (dimensionado e construído)

O Rendimento do coletor solar plano com aplicação da equação (3.25) foi de 51,22%. Considerado muito bom. No teste de rendimento, o coletor será exposto à radiação solar para determinação da energia transferida para o fluido de trabalho ( $Q_U$ ). Para a determinação dessa energia, é necessário o conhecimento da radiação solar incidente no coletor, a vazão mássica do fluido que circula no coletor e as temperaturas de entrada e saída do coletor.

#### **A.4 Dimensionamento de um Sistema Fotovoltaicos**

Em qualquer dimensionamento de um sistema Fotovoltaico é necessário definir quais as necessidades do usuário, quantificando os equipamentos consumidores de energia que serão utilizados e quanto tempo ficarão ligados por dia. Definidos os equipamentos estaremos de posse de seus dados técnicos, como potência e tensão. Inicialmente determinamos a quantidade de calor necessário para que 14litros de água a  $70^\circ C$  no estado líquido, passe para o estado de vapor. Com aplicação das equações (3.59) e (3.60) encontramos 7966000 calorias, para um dia de 8 horas, e a potência solicita é 1157,8 W. Mostra que para esse dessalinizador serão necessário 20 (vinte) módulos fotovoltaicos de  $12V_p$  e  $5.0A_p$  cada um. Ligando os módulos em uma associação mista (fig.3.12) obtemos uma potência de  $1200W_p$  e a corrente  $20,0A_p$ . Usando a equação (3.53) determinamos o valor de 3.0 Ohms para a resistência elétrica do evaporador.



**FIGURA (A.2) – Associação Mista de Módulos Fotovoltaicos**

A escolha do material para a resistência de aquecimento depende das condições de temperatura desejadas. Todos os materiais usados se deterioram quando submetidos a elevadas temperaturas, porém, há ligas cuja durabilidade é alta. A liga com 60% de Cu e 40% de Ni, escolhida para a resistência neste trabalho, conhecida como “Constantan”, é das mais usadas, com inúmeras aplicações. O comprimento de 1,92m do fio de “Constantan” foi obtido, utilizando a equação (A.4), a resistividade  $49 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$  e diâmetro de 0,5mm ( $5,0 \times 10^{-4} \text{ m}$ ).

$$l = \frac{\pi R D^2}{4\rho} \quad (\text{A.04})$$

## APÊNDICE B

### B.1 - Dimensionamento do coletor solar

*B.1.1 Absorvedor de Alumínio de 0,5 m<sup>2</sup> de área e espessura de 1,0 mm ( pré - determinado)*

*B.1.2 Tubo de alumínio com 15,90mm de diâmetro ( pré- determinado)*

*B.1.3 Comprimento do tubo do absorvedor em forma de serpentina, com 3,61m. Determinado pela equação 5.1 (kamal. A. R. Ismail-2000)*

$$L = \frac{AN}{d(N-1)+D} \quad (B.1)$$

Dados:

A= 0,5 m<sup>2</sup> ; Área do Absorvedor do Coletor Solar

N=3 ; Números de Linhas Paralelas do Tubo

d=0,20m ; Distância entre o centro das duas Linhas Paralelas

D= 0,0159m ; Diâmetro do Tubo

$$L = \frac{0,5m^2 \times 3}{0,20m(3-1)+0,0159m} \quad (B.2)$$

Comprimento do tubo do Absorvedor , será:

$$L = 3,61m \quad (B.3)$$

*B.1.4 Espaço de ar no coletor solar plano*

Espaço de Ar do Coletor Solar do Presente Trabalho é de 0,018m (.3.16)

*B.1.5 Vidro de Cobertura do Coletor Solar Plano*

O Vidro de Cobertura do Presente Trabalho é um Vidro Comum, com Área de 0,624.m<sup>2</sup> e espessura.0,003 (3.12)

### B.1.6 Isolante utilizado no Coletor Solar Plano

O Isolante utilizado no Coletor Solar Plano foi o Poliestireno expandido ( Isopor), com 0,950m<sup>2</sup> de Área e 0,003m de espessura (3.17)

### B.1.7 Rendimento do Coletor Solar Plano.

Rendimento do coletor Solar Plano , foi determinado pela equação 3.25 do presente trabalho.

$$\eta = \frac{1,64 \text{ g/s} \times 1.0 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C} \times (70,12^\circ\text{C} - 33,46^\circ\text{C})}{5000 \text{ cm}^2 \times 0,02 \text{ Cal/cm}^2 \cdot \text{s}} \quad (B.4)$$

$$\eta = 0,601 \quad (B.5)$$

$$\eta = 60,1\% \quad (B.6)$$

### B.1.8 Temperatura média de saída do Coletor Solar

$$\bar{T}_0 = \frac{\sum_{i=1}^{11} T_i}{11} = \frac{T_1 + T_2 + \dots + T_{11}}{11} = 70,1236^\circ\text{C} \quad (B.7)$$

### B.1.9 Cálculo do Desvio da Temperatura de Saída do Coletor Solar

$$\begin{aligned} \Delta T_{01} &= 67,20 - 70,1236 = -2,9236 \\ \Delta T_{02} &= 65,40 - 70,1236 = -4,7236 \\ \Delta T_{03} &= 70,70 - 70,1236 = 0,5764 \\ \Delta T_{04} &= 71,75 - 70,1236 = 1,6264 \\ \Delta T_{05} &= 79,19 - 70,1236 = 8,9764 \\ \Delta T_{06} &= 66,08 - 70,1235 = -4,0436 \\ \Delta T_{07} &= 60,83 - 70,1236 = -9,2936 \\ \Delta T_{08} &= 76,20 - 70,1236 = 6,0764 \\ \Delta T_{09} &= 70,60 - 70,1236 = 0,4764 \\ \Delta T_{010} &= 73,75 - 70,1236 = 3,6264 \\ \Delta T_{011} &= 69,75 - 70,1236 = -0,3736 \end{aligned} \quad (B.8)$$

### **B.1.10 Cálculo da Temperatura Média e do desvio Médio na Saída do Coletor Solar Plano**

$$\Delta \bar{T}_0 = 3,8830^{\circ}C \quad (B.9)$$

$$\bar{T}_{coletor} = 70,1236^{\circ}C \quad (B.10)$$

$$\bar{T}_0 = 70,1236^{\circ}C$$

$$T_{coletor} = (70,1236 \pm 3,8830)^{\circ}C \quad (B.11)$$

**T** - indica uma faixa onde a probabilidade de estar o verdadeiro valor da Temperatura de saída no Coletor Solar Plano, do presente trabalho

$$T_0 = [74,0066; 66,2406]^{\circ}C \quad (B.12)$$

$$T_{0,s} = 74,0066^{\circ}C \quad \text{-----} \quad T_{0,I} = 66,2406^{\circ}C \quad (B.13)$$

### **B.1.11 Cálculo do Desvio Médio da Eficiência do Coletor Solar Plano**

$$\begin{aligned} \Delta \eta_1 &= 0,7960 - 0,6045 = 0,1975 \\ \Delta \eta_2 &= 0,7340 - 0,6045 = 0,1295 \\ \Delta \eta_3 &= 0,6100 - 0,6045 = 0,0055 \\ \Delta \eta_4 &= 0,7860 - 0,6045 = 0,1815 \\ \Delta \eta_5 &= 0,6270 - 0,6045 = 0,0225 \\ \Delta \eta_6 &= 0,4820 - 0,6045 = -0,1225 \\ \Delta \eta_7 &= 0,4940 - 0,6045 = -0,1105 \\ \Delta \eta_8 &= 0,5760 - 0,6045 = -0,0285 \\ \Delta \eta_9 &= 0,5470 - 0,6045 = -0,0575 \\ \Delta \eta_{10} &= 0,5700 - 0,6045 = -0,0345 \\ \Delta \eta_{11} &= 0,4270 - 0,6045 = -0,1775 \end{aligned} \quad (B.14)$$

**B.1.12 Desvio Médio e o Intervalo mais Provável do Valor da Eficiência do Coletor Solar Plano**

$$\bar{\eta}_{coletor} = 0,6045 \quad (\text{B.15})$$

$$\Delta \bar{\eta}_{coletor} = 0,0967 \quad (\text{B.16})$$

$$\eta_{coletor} = (60,45 \pm 9,67)\% \quad (\text{B.17})$$

$$\eta_{coletor} = [50,78; 70,12]\% \quad (\text{B.18})$$

**B.1.13 Faixa das Temperaturas mais Prováveis na Superfície da Bacia**

$$T_{m1} = 90,0500^{\circ}\text{C}$$

$$T_{m2} = 71,8031^{\circ}\text{C}$$

$$T_{m3} = 115,1730^{\circ}\text{C} \quad (\text{B.19})$$

$$\bar{T}_p = 92,3422^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_3 = 115,1739 - 9$$

**B.1.14 Cálculo do Desvio**

$$\Delta T_1 = 90,0500 - 92,3422 = -2,2922 \quad (\text{B.20})$$

$$\Delta T_2 = 71,8031 - 92,3422 = -20,5391 \quad (\text{B.21})$$

$$\Delta T_3 = 115,1739 - 92,3422 = 22,8308 \quad (\text{B.22})$$

$$T_p = (92,3422 \pm 15,2205)^{\circ}\text{C} \quad (\text{B.23})$$

$$T_p = [77,1217; 107,5627]^{\circ}\text{C} \quad (\text{B.24})$$

A equação B.23 representa o intervalo mais provável do valor da temperatura da Superfície da Bacia, do presente trabalho, analisado separado do sistema.

#### B.1.15 Eficiência do Destilador Solar

A Eficiência do Destilador é definido, segundo(Kamal.A. R. Ismail – eq. 5.1 – 2000)

$$\eta = \frac{W\Delta h}{H} \quad (\text{B.25})$$

onde:

$\Delta h$  é a variação de entalpia desde a água fria a vapor (J/Kg)

$W$  é a Massa do destilada por metro quadrado (de superfície de captação de radiação) por unidade de tempo (Kg/m<sup>2</sup>.h)

$H$  é a Intensidade da Radiação por metro quadrado( de superfície de captação de Radiação) por unidade de tempo (J/m<sup>2</sup>.h)

$$\begin{aligned} T_{m,v} &= 72,2745^{\circ}C \quad h_v = 2669,7000 \text{ KJ/Kg} \\ \Delta h &= 2368,3500 \text{ KJ/Kg} \\ H &= 7,9778 \text{ MJ/m}^2.\text{h} \\ W &= 1,6214 \text{ Kg/m}^2.\text{h} \end{aligned} \quad (\text{B.26})$$

$$\eta = \frac{(1,6214 \text{ Kg/m}^2.\text{h})(2368,3500 \text{ KJ/Kg})}{(7,9778 \text{ MJ/m}^2.\text{h})} \quad (\text{B.27})$$

$$\eta = 0,4813 \quad \eta = 48,13\% \quad (\text{B.28})$$

48,27% - Representa a Eficiência do Protótipo Destilador Solar, Analisado separado do Sistema.

*B.1.16 Eficiência do Dessalinizador Solar Híbrido do 1º Ensaio*

Utilizando a equação B.24, para determinação da eficiência do Dessalinizador Solar Híbrido.

Dados.

$$T_a = 89,3185^\circ\text{C} \quad h_a = 374,0743 \text{ KJ/Kg} \quad (\text{B.29})$$

$$T_v = 78,0988^\circ\text{C} \quad h_v = 2640,4000 \text{ KJ/Kg} \quad (\text{B.30})$$

$$\Delta h = 2266,3257 \text{ KJ/Kg} \quad (\text{B.31})$$

$$W = 1,9114 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{h} \quad (\text{B.32})$$

$$H = 7,9778 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{h} \quad (\text{B.33})$$

$$\eta = \frac{1,9114 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{h} \times 2266,3257 \text{ KJ/Kg}}{7,9778 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{h}} \quad (\text{B.34})$$

$$\eta = 0,5430 \quad (\text{B.35})$$

$$\eta = 54,30\% \quad (\text{B.36})$$

O Ensaio foi realizado com o sistema completo, conforme a figura 5.9.

*B.1.17 Eficiência do Dessalinizador Solar Híbrido, no 2º Ensaio*

$$T_{\text{água}} = 92,40^\circ\text{C} \quad T_{\text{vapor}} = 58,40^\circ\text{C} \quad (\text{B.37})$$

$$h_{\text{água}} = 385,36^\circ\text{C} \quad h_{\text{vapor}} = 2606,20^\circ\text{C} \quad (\text{B.38})$$

$$\Delta h = 2220,84 \text{ KJ/Kg} \quad (\text{B.39})$$

$$W = 1,94275 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{h} \quad (\text{B.40})$$

$$H = 7,9778 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{h} \quad (\text{B.41})$$

$$\eta = \frac{(1,94275 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{h})(2220,84 \text{ KJ/Kg})}{(7,9778 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{h})} \quad (\text{B.42})$$

$$\eta = 0,5409 \quad \eta = 54,09\% \quad (\text{B.43})$$



B.1.18 *Eficiência média, Desvio médio e Intervalo mais provável do valor da Eficiência, do Dessalinizador Solar Híbrido*

$$\bar{\eta} = \frac{(E_{ensaio,1} + E_{ensaio,2})}{2} \rightarrow \bar{\eta} = \frac{(0,5430 + 0,5409)}{2} \quad (B.44)$$

$$\bar{\eta} = 0,54195 \quad \bar{\eta} = 54,195\% \quad (B.45)$$

$$\Delta \eta_1 = 0,5430 - 0,54195 = 0,00105 \quad (B.46)$$

$$\Delta \eta_2 = 0,5409 - 0,54195 = -0,00105 \quad (B.47)$$

$$\Delta \bar{\eta} = \frac{|0,00105| + |-0,00105|}{2} = 0,00105 \quad (B.48)$$

$$\eta = (0,54195 \pm 0,00105) \rightarrow \eta = [0,5430; 0,5409] \quad (B.49)$$

B.1.19 *Produtividade Média do Dessalinizador Solar Híbrido*

$$P_m = \frac{P_1 + P_2}{2} \quad (B.50)$$

$$P_m = \frac{(1,9113 + 1,9428)}{2} \quad (B.51)$$

$$P_m = 1,92705 L / m^2 \cdot h \quad (B.52)$$

## B.2 Intervalo mais provável do valor da produtividade

### B.2.1 Desvio da Produtividade

$$1,9113 - 1,92705 = -0,01575 \quad (B.53)$$

$$1,9428 - 1,92705 = +0,01575 \quad (B.54)$$

### B.2.2 Desvio Médio da Produtividade

$$\bar{d} = \frac{|-0,01575| + |+0,01575|}{2} \quad (B.55)$$

$$\bar{d} = 0,0158 L/m^2 \cdot h \quad (B.56)$$

### B.2.3 Intervalo mais Provável do Valor da Produtividade do Dessalinizador Solar Híbrido

$$P = (1,9271 \pm 0,0158) L/m^2 \cdot h \quad (B.57)$$

$$P = [1,9429; 1,9113] L/m^2 \cdot h \quad (B.58)$$

## **BIBLIOGRAFIA CONSULTADA**

ALÁSZ, Judith Zoltán; MARTINS, Gilberto. **Princípio para o condicionamento de ar** (apostila didática para o curso de controle térmico de ambientes). São Paulo: UNICAMP, 1994.

ALENCAR, Francisco de; SAGLIETTI, José Roberto. **Análise da viabilidade de uma telha coletora de energia solar de comento de amianto** (parte de uma Tese de Doutorado). FAAC/UNESP-BAURU – SP, 2001.

ALENCAR, Francis de; SABLIIETTI, José Roberto Corrêa. **Análise de viabilidade de uma telha coletora de energia solar de cimento amianto** (parte de tese de Doutorado). Bauru/SP: 2000.

CARVALHO, Geraldo Camargo. **Química moderna**. São Paulo: Scipione, 1997.

CABRIOL, Thierry. **Aquecedor solar de água**. CETO (Centro de Ensino Técnico e Profissional à Distância, Ltda), 1980.

COMETTA, Emilio. **Energia solare. Utilizazione**. Ed. Impieghi pratici. São Paulo: Ed. Hemus, 1982.

CREDER, Hélio. **Instalação elétrica**. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC - Livro Técnico e Científico, 1982.

FELTRE, Ricardo; YOSHINAGA, Setsuo. **Físico-química: teoria e exercícios**. São Paulo: Moderna, 1974.

FRAIDENRAICH, Naum; LYRA, Francisco. **Energia solar. Fundamentos e tecnologia de Conversão Helotermolétrica e Fotovoltaica**. Recife – PE: Ed. Universidade da UFPE, 1995.

FRANCELINO, Márcio R.; FERNANDES FILHO, Elpídio I. & RESENDE, Mauro. **“Terra e água na reforma agrária do semi-árido norterio-grandense”**. Revista Brasileira de Energias Agrícola e Ambiental. Vol. 6, nº 1, p. 183-187, 2002.

ISMAIL, Kamal Abdel Radi. **Energia solar**. Campinas – São Paulo: Ed. do Autor, 2000.

ISMAIL, Kamal Abdel Radi. **Técnicas experimentais em fenômenos de transferência**. Campinas – São Paulo: Ed. do Autor, 2000. 488p.

ISMAIL, Kamal Abdel Radi. **Técnicas de medidas e instrumentação**. Campinas – São Paulo: Ed. do Autor, 2000. 369p.

JARDIN, Antonio. **Avaliação de um sistema de energia solar**. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2001.

LIMA, Waldemir Silva de. **“Estudo do fluxo conectivo de ar induzido por placas aquecidas no interior de canais verticais”** (Tese de Doutorado). São Carlos – SP, 1997.

**“Manual para Instaladores de Sistemas de Energia Solar”**. Ivete, 2000.

MOURA, Bezerra A. **Desenvolvimento de um protótipo de fogão solar desmontável destinado no esporte de “camping”**. Em Atas do 2º Congresso Latino-Americano de Energia Solar, vol. II, Universidade Federal da Paraíba, pp. 371-395, João Pessoa – PB.

NUSSENZUIG, H. Moysés. **Curso de Física Básica**. vol. 2. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1981.

NUSSENZUIG, H. Moysés. **Curso de Física Básica**. vol. 3. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1981.

NUSSENZUIG, H. Moysés. **Curso de Física Básica.** vol. 4. 1ª ed. São Paulo: Ed. Afiliada, 1998.

PASSAMAI, V.; MASSAY, C. Roberto de; TILCA F. **Cocinas solares de tipo cajá.** V. N. de Salta, 2002.

PEYTURAUX, Roger. **L'Energie solaire.** 4ª ed. francesa publicada por PRESSES Universitaires de France: Ed. Notícias, 1973.

PINHEIRO, José César Vieira. **Estratégias para formulação e implantação de um programa de dessalinização da água salobra no Ceará.** Fortaleza – CE: 2002.

PINHEIRO, Jose César Vieira; SILVA, Luís Artur Clemente. **Apropriação da água subterrânea, segundo sua qualidade para o uso doméstico no Ceará: uma aplicação de medida de desigualdade.** Congresso Brasileiro do Meio Ambiente. Fortaleza – Ceará: 2000.

QUEVEDO, Carlos Peres. **Eletromagnetismo.** São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977.

SEARS, Francis Weston. **Física: Mecânica – Calor – Acústica.** Rio de Janeiro: 1956.

SILVA, L. A. **Coletor de polietileno: uma alternativa de aproveitamento de energia solar a baixo custo.** Botucatu, 1982. (Dispatauss – Mestrado em Agronomia) Energia na Agricultura – UNESP).

STOECHER, Wilbert F.; JONES, Jerold W. **Refrigeração e Ar Condicionado.** McGraw-Hill, 1988.

TIBA, Chigueru. **Instalação de sistemas fotovoltaicos para residências rurais e bombeamento de água.** Recife: Ed. Universitária da UFPE, 1999.

VASCONCELOS, Marco Antonio Sanford de. **Laboratório de Eletricidade e Eletromagnetismo.** Florianópolis: UFSC, 1983.