

## *Monografia de Graduação*

# **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA HÍBRIDO DE DESTILAÇÃO SOLAR PARA TRATAMENTO DE ÁGUA PRODUZIDA**

**Rafael Eugênio Moura Ramos**

**Natal, agosto de 2009**



**Rafael Eugênio Moura Ramos**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA HÍBRIDO DE DESTILAÇÃO  
SOLAR PARA TRATAMENTO DE ÁGUA PRODUZIDA**

Relatório do trabalho final de curso apresentado à banca examinadora do Departamento de Engenharia Química (DEQ) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) como pré-requisito para obtenção do conceito na disciplina trabalho de conclusão de curso (DEQ0536) no período letivo de 2009.1.

Orientador: Prof. Phd. Osvaldo Chiavone Filho

NATAL/RN

Agosto/2009



**Rafael Eugênio Moura Ramos** - Desenvolvimento de um Sistema Híbrido de Destilação Solar Para Tratamento de Água Produzida. Monografia, UFRN, Departamento de Engenharia Química. Áreas de Concentração: Engenharia de Processos e Processo de Separação, Engenharia de Petróleo, Engenharia Ambiental, Natal/RN, Brasil.

Orientador: Prof. Phd. Osvaldo Chiavone Filho

---

**RESUMO:** O objetivo principal desse trabalho foi realizar a destilação solar da água de produção para remoção de sais e contaminantes da mesma, utilizando um sistema híbrido com pré-aquecimento solar. O sistema desenvolvido, denominado sistema solar, é composto pelo sistema de pré-aquecimento e pelo destilador solar; o primeiro constitui-se de uma caixa d'água de 250L, uma placa coletora solar plana de 2m<sup>2</sup> e um reservatório térmico de 200L; o tipo do destilador solar é duas águas, com 1m<sup>2</sup> de área útil e 20° de inclinação na cobertura. O sistema foi testado, separadamente, com água de abastecimento, solução salobra sintética de NaCl e água produzida. Foram realizadas medições de temperatura, a cada minuto, no reservatório térmico, na caixa d'água, no destilador (fases líquida e vapor) e no ar. Dados de radiação solar e precipitação pluviométrica foram obtidos junto ao INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). O pré-aquecimento solar mostrou-se eficiente para os líquidos testados, e o fluido no reservatório térmico apresentou uma pequena variação de temperatura para dias consecutivos, que resultou em aproximadamente 5°C em relação à temperatura média diária. Esse comportamento é favorável para a destilação solar, pois a água entra no destilador pré-aquecida, o que aumenta a taxa de evaporação. O perfil de temperaturas no destilador solar apresentou comportamento similar à radiação solar diária, com temperaturas máximas próximas a 70°C. Análises Físico-químicas da água, realizadas antes e após o processo de destilação, apresentaram resultados satisfatórios: O pH foi reduzido de um valor em torno de 10 para aproximadamente 7; a condutividade diminuiu consideravelmente, ou seja, de 26,8mS/cm para 14,6µS/cm, em média; o índice de Cloretos apresentou teores de redução de sais superiores a 97%; a análise de cátions e ânions, no geral, indicou uma redução acima de 97%. Uma modelagem matemática foi feita no programa Excel para o coletor solar e a análise de sensibilidade indicou os parâmetros de maior influência no rendimento desse equipamento. A eficiência efetiva média do destilador obtida experimentalmente foi de 27,2%.

---

**Palavras Chaves:**

- Destilação solar, sistema híbrido, água de produção.

**BANCA EXAMINADORA:**

Presidente: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Gorete Ribeiro de Macedo

Membros:

Prof. Prof. Phd. Osvaldo Chiavone Filho

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Josette Lourdes de Souza Melo

## ABSTRACT

The main goal of this study was to perform the solar distillation of produced water to remove salts and contaminants of the same, using a hybrid system with solar pre-heating. The developed system, called the solar system, consists of the pre-heating system and the solar distiller; the first consists of a water box of 250L, a solar flat plate collector of 2m<sup>2</sup> and a thermal reservoir of 200L; the type of solar distiller is two waters, with 1m<sup>2</sup> of floor area and 20° of tilt in the coverage. The system was tested, separately, with piped water, synthetic salt solution of NaCl and produced water. Measurements of temperature were performed, every minute, in the heat reservoir, in the water box, in the distiller (liquid and vapor phases) and in the air. Data of solar radiation and rainfall were obtained from the INPE (National Institute for Space Research). The pre-solar heating was efficient for the liquids tested, and the fluid in the heat reservoir showed a small change in temperature for consecutive days, which resulted in approximately 5 °C compared the daily average temperature. This behavior is favorable for the solar distillation, because the water enters the distiller pre-heated, which increases the rate of evaporation. The profile of temperatures in the solar distiller presented similar behavior to the daily solar radiation, with maximum temperatures near 70 °C. Physical-chemical analysis of water, taken before and after the process of distillation, showed satisfactory results: The pH was reduced from a value of about 10 to nearly 7; the conductivity decreased considerably, ie from 26.8 mS/cm to 14.6 µS/cm, on average; the rate of Chloride showed levels of reduction of salts above 97%; the analysis of cations and ânions, in general, indicated a reduction of more than 97%. A mathematical model was made in the Excel program for the solar collector and the sensitivity analysis indicated the parameters of greatest influence on yield of this equipment. The effective average efficiency of the distiller experimentally obtained was 27.2%.

“O reconhecimento de um indivíduo como ser humano nunca pode estar baseado na experiência ou na percepção que dele tenhamos, mas na certeza de que ele possui, desde a sua concepção, um valor infinito que provém de seu relacionamento com Deus”.

João Paulo II

Esta monografia é dedicada:

*A minha família.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por todas as oportunidades durante o curso, os resultados do projeto, e agora a permissão da formação acadêmica.

Aos meus Pais, que sempre me apoiaram em tudo para o meu crescimento como estudante e como pessoa.

Aos meus irmãos pelo apoio e companheirismo e a toda a minha família, que sempre se fez presente no cotidiano.

Ao Prof. Dr. Osvaldo Chiavone-Filho pela dedicação, competência e responsabilidade com que me orientou ao longo deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Jackson Araujo de Oliveira, pelas propostas, correções e apoio no projeto.

À Magna Angélica dos Santos Bezerra, pela literatura, auxílio e dedicação como colaboradora do projeto.

À Rogério Pitanga Santos, pela iniciativa e legado deixado.

À Daniel Firmino da Costa, pela parceria no projeto.

A todos os colegas do laboratório pelo companheirismo, incentivo e apoio.

A todos os amigos da graduação, que me acompanharam nessa caminhada.

A todos os Professores do NUPEG (Núcleo de Ensino e Pesquisa em Petróleo e Gás Natural/UFRN), pelo exemplo de dedicação, apoio e incentivo a todos os alunos pesquisadores.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFRN, pelo projeto, construção do destilador solar e apoio acadêmico.

À Petrobrás, pela concessão das amostras de água de produção.

Ao CENPES, pela parceria.

À ANP (Agencia Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) pelo apoio financeiro e acadêmico, bem como, ao NUPEG pela estrutura física e suporte a este trabalho.

À Banca examinadora, que prontamente recebeu este trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Química da UFRN, pelo apoio acadêmico, bem como a todos os professores que fazem a Engenharia Química, por todo aprendizado e experiência que me proporcionaram ao longo desses cinco anos.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
1. INTRODUÇÃO .....	2
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>4</b>
2. OBJETIVOS .....	5
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>6</b>
3. RELEVÂNCIA DO TRABALHO .....	7
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>8</b>
4. ASPECTOS TEÓRICOS .....	9
4.1. <i>Água de produção</i> .....	9
4.1.1. Composição e características .....	9
4.1.2. Dados de referência.....	10
4.1.3. Tratamento .....	11
4.1.3.1. Processos Físicos .....	11
4.1.3.2. Processos Físico-químicos.....	12
4.1.3.3. Tratamento Fotoquímico .....	13
4.1.3.4. Tratamento biológico.....	14
4.1.3.5. Comentários sobre os tipos de tratamento.....	14
4.2. <i>Energia solar</i> .....	14
4.2.1. Características .....	16
4.2.2. Aplicações.....	17
4.3. <i>O Sistema solar</i> .....	18
4.4. <i>Destilação solar</i> .....	19
4.4.1. Destilador solar .....	21
4.4.1.1. Tanque .....	22
4.4.1.2. Suportes .....	22
4.4.1.3. Cobertura .....	23
4.4.1.4. Canaletas de coleta .....	24
4.4.1.5. Componentes auxiliares.....	24
4.4.1.6. Parâmetros importantes .....	25
4.4.2. Balanço energético no destilador .....	26
4.5. <i>Coletor solar</i> .....	28
4.5.1. Placa absorvedora .....	30
4.5.1.1. Tratamento da Placa absorvedora.....	31
4.5.2. Cobertura transparente .....	31
4.5.3. Caixa do coletor .....	31
4.5.4. Isolamento térmico.....	32
4.5.5. Vedação.....	32
4.5.6. Eficiência térmica dos coletores .....	33
4.6. <i>Reservatório térmico (boiler)</i> .....	35
4.6.1. Estratificação térmica.....	35
4.7. <i>Piranômetro</i> .....	36
4.8. <i>Sistema de pré-aquecimento solar (Aquecedor solar)</i> .....	36
4.8.1. Modos de operação do aquecedor solar .....	37
4.9. <i>Dados Técnicos</i> .....	40



4.9.1. Destilador Solar .....	40
4.9.2. Coletor solar .....	40
4.9.2.1. Dimensões: .....	40
4.9.2.2. Especificações Técnicas .....	40
4.9.3. Reservatório térmico .....	41
4.9.4. Caixa d'água .....	41
4.9.5. Medição e aquisição de dados .....	42
4.9.5.1. Sensor de temperatura .....	42
4.9.5.2. Data logger (Registrador) .....	42
4.9.5.3. Interface de comunicação .....	42
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>43</b>
5. METODOLOGIA .....	44
5.1. Materiais e equipamentos .....	44
5.2. Metodologia empregada .....	45
5.3. Metodologia experimental .....	47
5.3.1. Testes no sistema de pré-aquecimento .....	48
5.3.2. Testes no destilador solar .....	49
5.3.3. Testes no sistema solar .....	50
5.3.4. Otimização do sistema .....	50
<b>CAPÍTULO VI .....</b>	<b>52</b>
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	53
6.1. Sistema de pré-aquecimento .....	53
6.1.1. Temperaturas no boiler e na caixa d'água .....	53
6.1.2. Modelagem e simulação do coletor solar .....	56
6.1.3. Análise de sensibilidade do coletor .....	58
6.2. Destilador solar .....	59
6.2.1. Produtividade .....	59
6.2.2. Eficiência .....	62
6.2.2.1. Eficiência otimizada .....	64
6.2.2.2. Comparação entre os cálculos de eficiência .....	65
6.2.2.3. Estimativa para vazões elevadas .....	66
6.2.3. Temperaturas e radiação solar .....	66
6.2.3.1. Operação em batelada .....	66
6.2.3.2. Operação contínua .....	70
6.2.3.3 Radiação solar anual .....	74
6.2.4. Análises físico-químicas .....	76
<b>CAPÍTULO VII .....</b>	<b>81</b>
7. CONCLUSÕES .....	82
<b>CAPÍTULO VIII .....</b>	<b>84</b>
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	85
<b>CAPÍTULO IX .....</b>	<b>85</b>
9. ANEXOS .....	90
9.1. Anexo I. Ordenamento das equações do modelo matemático .....	90

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1. ( <b>Fig. 4.1</b> ) – Sistema solar do projeto em operação – UFRN.....	19
Figura 2. ( <b>Fig. 4.2</b> ) - Esquema de destilador solar – (Soares, 2004).....	20
Figura 3. ( <b>Fig. 4.3</b> ) – Destilador solar de simples efeito, tipo duas águas, com inclinação de 20° na cobertura – UFRN.....	20
Figura 4. ( <b>Fig. 4.4</b> ) – Detalhe da canaleta esquerda do destilador do projeto – UFRN.....	24
Figura 5. ( <b>Fig. 4.5</b> ) - Detalhe da canaleta direita (visão interna trazeira).....	24
Figura 6. ( <b>Fig. 4.6</b> ) - Fluxos de energia de um destilador solar – (Pina, 2004).....	27
Figura 7. ( <b>Fig. 4.7</b> ) - Esquema de coletor solar plano. ....	30
Figura 8. ( <b>Fig. 4.8</b> ) - Componentes do coletor - (adaptado de Bezerra, 2001).....	30
Figura 9. ( <b>Fig. 4.9</b> ) - Esquema de aquecedor solar de água - ( <a href="http://www.soletrol.com.br">www.soletrol.com.br</a> ).....	37
Figura 10. ( <b>Fig. 4.10</b> ) - Esquema de funcionamento de aquecedor solar com termossifão ( <a href="http://www.soletrol.com.br">www.soletrol.com.br</a> ).....	38
Figura 11 ( <b>Fig. 5.1</b> ) - Projeção 3D do destilador solar.....	44
Figura 12. ( <b>Fig. 5.2</b> ) - Projeção 3D do sistema de pré-aquecimento.....	44
Figura 13. ( <b>Fig. 5.3</b> ) - Fluxograma do sistema solar com malha de controle.....	46
Figura 14. ( <b>Fig. 5.4</b> ) - Interior do destilador com medição das temperaturas do líquido e do vapor.....	48
Figura 15. ( <b>Fig. 5.5</b> ) - 2 PT-100 conectados a um registrador, com transmissão de dados a um PC.....	48
Figura 16. ( <b>Fig. 6.1</b> ) – Variação da temperatura no Boiler para a água comum.....	54
Figura 17. ( <b>Fig. 6.2</b> ) – Variação da radiação solar global média.....	54
Figura 18. ( <b>Fig. 6.3</b> ) – Variação da temperatura no Boiler para a solução salobra.....	55
Figura 19. ( <b>Fig. 6.4</b> ) – Variação da radiação solar global média.....	55
Figura 20. ( <b>Fig. 6.5</b> ) – Variação das temperaturas do boiler, caixa d’água e ar.....	55
Figura 21. ( <b>Fig. 6.6</b> ) – Modelagem e simulação do coletor solar.....	57
Figura 22. ( <b>Fig. 6.7</b> ) – Vazão de destilado durante um dia.....	60
Figura 23. ( <b>Fig. 6.8</b> ) – Variação do calor latente de evaporação da água com a temperatura.....	64
Figura 24. ( <b>Fig. 6.9</b> ) – Variação das temperaturas no boiler e no destilador em um dia.....	67
Figura 25. ( <b>Fig. 6.10</b> ) – Variação das temperaturas no destilador e no boiler em três dias e meio...68	
Figura 26. ( <b>Fig. 6.11</b> ) – Variação das temperaturas no boiler e no destilador em quatro dias.....	69
Figura 27. ( <b>Fig. 6.12</b> ) – Variação da Radiação solar global e difusa em quatro dias.....	69

Figura 28. (Fig. 6.13) – Índice pluviométrico em quatro dias.....	69
Figura 29. (Fig. 6.14) – Variação das temperaturas no destilador e no boiler em 24h.....	70
Figura 30. (Fig. 6.15) – Temperaturas no destilador, no boiler e temperatura do ar para alimentação contínua.....	71
Figura 31. (Fig. 6.16) – Radiação solar global média.....	72
Figura 32. (Fig. 6.17) – Temperaturas no destilador, no boiler e temperatura do ar para alimentação contínua e batelada.....	72
Figura 33. (Fig. 6.18) – Radiação solar global média e difusa.....	72
Figura 34. (Fig. 6.19) – Radiação solar global média e difusa e precipitação pluviométrica, em 2008 (Natal -RN).....	75
Figura 35. (Fig. 6.20) – Radiação solar global média e difusa e precipitação pluviométrica, em 2009 (Natal -RN).....	76

## *LISTA DE TABELAS*

Tabela 1. ( <b>Tab. 4.1</b> ) - Propriedades do alumínio e do cobre – (Lopes, 2004).....	30
Tabela 2. ( <b>Tab. 4.2</b> ) - Valores de $U_L$ para coletores solares - (adaptado de Lopes, 2004).....	35
Tabela 3. ( <b>Tab. 6.1</b> ) - Resultados da análise de sensibilidade para a eficiência média do coletor.....	59
Tabela 4. ( <b>Tab. 6.2</b> ) – volume diário de destilado.....	60
Tabela 5. ( <b>Tab. 6.3</b> ) – Volume destilado, tipo de operação, radiação solar e precipitação pluviométrica, de 30/09/08 a 10/10/08.....	62
Tabela 6. ( <b>Tab. 6.4</b> ) – Eficiência efetiva média diária do destilador solar considerando 10 horas de incidência solar.....	64
Tabela 7. ( <b>Tab. 6.5</b> ) - Comparação da eficiência efetiva com a eficiência efetiva média.....	65
Tabela 8. ( <b>Tab. 6.6</b> ) - Temperaturas máxima e mínima para o boiler, o líquido e o vapor.....	74
Tabela 9. ( <b>Tab. 6.7</b> ) – Análises de pH e condutividade para amostras de água salobra e água produzida.....	79
Tabela 10. ( <b>Tab. 6.8</b> ) – Análises de cloretos para amostras de água salobra e água produzida.....	79
Tabela 11. ( <b>Tab. 6.9</b> ) – Resultados das análises de cátions e ânions para a água produzida (mg/L).....	80
Tabela 12. ( <b>Tab. 6.10</b> ) – Resultados das análises pelo método TOC para a Água produzida.....	80

---

---

# Capítulo I

## INTRODUÇÃO

---

---

## 1. INTRODUÇÃO

Sabe-se que o petróleo é a principal fonte energética do mundo e, portanto, a cada dia crescem os investimentos na pesquisa, desenvolvimento, exploração e produção desse óleo. Nesse contexto, é fundamental que a indústria do petróleo vá ao encontro das necessidades sociais e ambientais do mundo moderno. Com relação a estas últimas, destaca-se o destino dos rejeitos dessa indústria, que estão presentes em grandes quantidades e são prejudiciais ao meio ambiente. O rejeito de maior volume em todo o processo de produção e exploração de petróleo, sem dúvida, são as águas de produção. Denomina-se água de produção, ou água produzida, toda a água que é carregada junto com o óleo, seja esta originada da água de formação, presente no reservatório, ou resultante também da água de injeção, usada para estimular a produção de um poço. Em campos maduros, a produção dessa água pode chegar a mais de 90% da produção total (Thomas, 2001), como é o caso de grande parte dos campos do estado do Rio Grande do Norte. Esse elevado volume de água produzida junto com o petróleo causa problemas logísticos e operacionais, necessitando de tratamentos antes de ser descartada, pois a mesma tende a formar emulsões estáveis com o óleo. Esses tratamentos são usualmente dispendiosos, e mesmo assim a água de produção, devido aos problemas de incrustação e corrosão que provoca em uma unidade industrial, necessita de tratamentos adicionais para que possa ser reinjetada em poços (recuperação de óleo), do contrário é descartada. Para todos os efeitos, mesmo a água tratada não atingindo requisitos tão rígidos quanto o da potabilidade, poderia ser empregada em processos industriais, como na geração de vapor, na irrigação de oleaginosas, ou para outras utilidades diversas, eliminando, ou ao menos diminuindo seu descarte. Dessa forma, soluções para esse problema são necessárias e de extrema importância.

Nesse contexto, o uso da energia solar se apresenta como uma alternativa interessante, já que utiliza uma fonte de energia gratuita e abundante, não gera poluição e é eficaz no tratamento de águas. Além disso, o Brasil apresenta um elevado potencial de uso dessa fonte energética, com altos índices anuais de radiação solar, especialmente na região Nordeste. Existem várias formas de utilizar a energia solar para esse fim, sendo a principal delas o aproveitamento da radiação solar como energia térmica em um destilador solar, para evaporação e posterior condensação da água poluída, obtendo ao final do processo água destilada. Essa operação imita, em pequena escala, o ciclo natural da água, e apesar de eficaz na purificação de águas, apresenta algumas limitações, especialmente sua baixa produtividade e eficiência energética, o que resulta na necessidade de ocupar extensas áreas para obter-se uma maior produção de água destilada.

Desse modo, a destilação solar dificilmente é empregada para tratamento de grandes volumes de água, sendo utilizada principalmente para abastecer pequenas comunidades que não têm

fácil acesso à água potável, onde se utiliza a dessalinização solar da água do mar. Nesse contexto, o uso de destiladores solares no tratamento de água de produção seria apenas parcialmente eficiente, pois, para se ter uma noção, tem-se a vazão de água de produção na UTPF (Unidade de Tratamento e Processamento de Fluidos) de Guamaré - RN, que segundo Engenheiros do local, era de aproximadamente 80000 m<sup>3</sup>/d no ano de 2008, com perspectiva de aumentar rapidamente com o aumento nos investimentos na perfuração de novos poços. Esse volume de água é bastante elevado para ser tratado por um destilador solar de pequena área.

Logo, o desafio é encontrar uma maneira de utilizar a energia solar no tratamento de maiores volumes de água de produção que não necessitem de áreas tão extensas. Tal feito só é possível a partir do estudo de meios que resultem no aumento da produtividade e eficiência de sistemas que utilizem energia solar, que apresentam como vantagens intrínsecas o baixo custo de manutenção e operação. Logo, uma alternativa promissora seria utilizar sistemas híbridos ou compostos, como o dessalinizador solar híbrido utilizado por Lopes (2004), caracterizado pelo uso de um coletor solar para pré-aquecer a água de alimentação do destilador, além de um painel fotovoltaico conectado a uma resistência elétrica para aquecimento adicional da água presente no destilador.

Nesse contexto, a forma de pré-aquecimento de água que parece mais sugestiva é a convencionalmente usada, ou seja, o aproveitamento do sistema de aquecimento solar de água utilizado em residências e estabelecimentos comerciais (aquecedor solar), que é formado basicamente por coletores solares planos, reservatório térmico e uma caixa d'água (alimentação do sistema). Esse sistema é, então, acoplado ao destilador solar, o que passa a constituir um sistema híbrido de pré-aquecimento/destilação solar de água, denominado, no presente trabalho, de sistema solar.

---

---

# **Capítulo II**

## **OBJETIVOS**

---

---



## 2. OBJETIVOS

Este trabalho visa desenvolver e otimizar um sistema híbrido de destilação solar para tratamento da água de produção, provinda de emissários Petrobras, com o intuito de remover os sais da mesma, bem como melhorar a qualidade desse efluente para que possa ser destinado ao reuso.

Os objetivos secundários são: quantificação da variação de temperatura dos fluidos (no destilador e no boiler), relacionando-a com as variáveis ambientais, especialmente a radiação solar; modelagem do sistema para estudo dos parâmetros mais influentes; estudo da taxa de evaporação da água no destilador solar; otimização das condições do sistema solar; realização de análises físico-químicas na água, antes e depois do tratamento, a fim de determinar a eficiência de remoção de contaminantes.

---

---

## **Capítulo III**

### **RELEVÂNCIA DO TRABALHO**

---

---

### **3. RELEVÂNCIA DO TRABALHO**

Sabe-se que o maior rejeito gerado na indústria do petróleo é a água de produção, que no caso de poços maduros alcança em torno de 90% do volume de fluido total produzido. Além dos problemas logísticos gerados por tal quantidade de efluente, existe ainda o problema ambiental, pois esta água passa por tratamento a fim de que possa ser descartada no mar. Desse modo, um grande volume de água é desperdiçado, quando, na verdade, poderia ser reutilizado para diversos fins, se for realizado um tratamento adicional eficaz e não poluente, como o uso da energia solar. Nesse contexto, o presente projeto apresenta aplicação direta na indústria do petróleo, na medida em que impede o descarte da água de produção, reduzindo o impacto ambiental; bem como, permite o reuso desse efluente em processos industriais como a geração de vapor e outros fins diversos. Vale destacar também o benefício econômico gerado em longo prazo, pois esse sistema apresenta baixo custo de operação e manutenção.

---

---

# **Capítulo IV**

## **ASPECTOS TEÓRICOS**

---

---

## 4. ASPECTOS TEÓRICOS

### 4.1. Água de produção

Água de produção, ou água produzida, é a denominação utilizada para designar toda água carregada junto com o óleo em um poço de produção de petróleo, podendo esta ser proveniente da formação geológica (água de formação) ou resultante da água de injeção usada na recuperação do óleo e está presente tanto nas operações *onshore* quanto *offshore*. Segundo Fernandes Júnior (2002), esse efluente pode estar presente na forma livre, em fase diferente do óleo, ou em emulsão. As águas de produção são consideradas o rejeito de maior volume em todo processo de exploração e produção do petróleo, configurando-se assim como um grande problema ambiental, operacional e econômico.

Lima (1996), apud Bezerra (2004) afirma que as causas para produção da água contida no reservatório são os poços de petróleo perfurados próximos à interface óleo/água; poços produtores de óleo em etapa posterior de produção (campos maduros), em que houve avanço na frente de água; falhas no revestimento dos poços; recuperação de óleo, onde água na forma líquida ou de vapor é injetada no reservatório para aumentar ou mesmo manter a produção.

#### 4.1.1. Composição e características

As águas de produção são efluentes complexos, de salinidades elevadas, cuja composição pode variar consideravelmente, dependendo do tipo e idade do campo, origem e qualidade do óleo, bem como do procedimento usado para sua extração. Além disso, a composição dessas águas muda ao longo da vida útil do campo produtor. Azevedo (1998), apud Bezerra (2004) afirma que os componentes dissolvidos presentes nesse fluido são divididos em três classes: compostos inorgânicos, incluindo metais pesados e radionuclídeos; compostos orgânicos, incluindo alifáticos (polares ou não), aromáticos e ácidos graxos e aditivos (orgânicos ou inorgânicos). Em geral, os componentes encontrados nesta água são: óleo disperso e dissolvido; sais minerais dissolvidos; sólidos oriundos da corrosão; graxas e asfaltenos; produtos químicos adicionados para prevenir ou tratar problemas operacionais, como biocidas, anti-incrustantes, anti-espumantes e inibidores de corrosão; e gases dissolvidos, incluindo CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S.

De acordo com Fernandes Júnior (2002), os sólidos dispersos nas águas de produção são areia, lodo, argila, outros silicatos e gipsita e os teores de sais podem variar entre 15.000 mg/L a

300.000 mg/L. Os metais possivelmente presentes são Cálcio, Sódio, Potássio, Magnésio, Manganês, Ferro, Zinco, Bário e Estrôncio, além de outros metais pesados como o Chumbo, Cromo, etc. Deve-se ressaltar que os metais pesados causam um sério impacto ambiental, pois sua toxicidade é elevada.

A presença de óleos e graxas em efluentes da indústria petrolífera representa um dos principais contaminantes a serem removidos nos processos de tratamento. As empresas produtoras de óleo precisam obedecer a normas cada vez mais rígidas para descarte de seus efluentes, de forma que existe a necessidade do constante monitoramento de seus rejeitos (Bezerra, 2004).

Com relação às propriedades física, química e biológica da água de produção, pode-se dizer que são conseqüências da concentração e do tipo de espécies presentes na água de formação, que por sua vez dependem de diversos fatores como a formação geológica, a localização geográfica do reservatório e o tempo de vida do poço produtor. Devido a isso, a determinação de parâmetros termodinâmicos para sistemas de água de produção não é uma tarefa fácil. Segundo Curbelo (2002), a corrosividade da água de produção está relacionada aos teores de gás carbônico, H<sub>2</sub>S e oxigênio. Com relação à solubilidade dos hidrocarbonetos em água, sabe-se que esta aumenta com a temperatura e diminui com o aumento da salinidade, que por sua vez acarreta em maior condutividade elétrica.

Segundo Oliveira (2008), a presença, em elevadas concentrações, de íons SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> na água de injeção e de Ba<sup>2+</sup> e Sr<sup>2+</sup> na água de formação (presente no reservatório) acarreta a formação de precipitados de BaSO<sub>4</sub> e SrSO<sub>4</sub>, que se depositam nas paredes dos tubos. Estas incrustações podem dificultar ou até mesmo impedir o fluxo do óleo no poço, de modo que quando necessário, deve-se fazer a retirada das tubulações para limpeza de incrustações. No entanto, tal medida é técnica e economicamente indesejável, pois causa prejuízos significativos quando da paralisação de um poço em plena atividade de exploração petrolífera.

#### **4.1.2. Dados de referência**

Segundo Thomas (2001), a produção de água em campos maduros pode chegar a mais de 90 % do que é produzido nos poços, como é o caso de muitos poços do Estado do Rio Grande do Norte – RN. A presença de grandes volumes de água de produção é sempre indesejável, pois aumenta os custos com transporte, energia, armazenamento e os problemas de incrustação e corrosão às tubulações e equipamentos.

Segundo Silva (2007), durante as atividades de produção de petróleo, os processos de recuperação necessitam, muitas vezes, de grandes volumes de água para a manutenção da pressão

do reservatório produtor. Como consequência, ocorre a geração de elevada quantidade de água, posteriormente descartada no mar, após tratamento, em emissários submarinos. Esse mesmo autor afirma que em diversas situações a quantidade de águas produzidas com o petróleo determina a viabilidade econômica do campo produtor, pois o custo para tratar estas águas é muito elevado. Desta forma é de suma importância desenvolver processos para tratamento de águas produzidas de menor custo.

#### **4.1.3. Tratamento**

Em geral, as águas produzidas são de difícil tratamento, devido à variedade e à elevada toxicidade dos contaminantes presentes. Os produtos adicionados durante a produção do petróleo são, em muitos casos, complicadores para o tratamento destas águas. De acordo com Thomas (2001), o tratamento da água visa recuperar parte do óleo nela presente em emulsão e condiciona-la para reinjeção ou descarte. Silva (2007) afirma que o tratamento das águas de produção pode ser basicamente de quatro tipos: Físicos, Físico-químicos (mais convencionais), Fotoquímicos ou Biológicos ou mesmo uma combinação entre eles. O sistema de tratamento adotado no pólo petroquímico de Guamaré – RN, por exemplo, é do tipo Físico-químico e consiste de um sistema decanto-flotador com adição de um polieletrólito e posterior passagem por um separador Eletrostático.

##### **4.1.3.1. Processos Físicos**

Os processos Físicos são aqueles que utilizam propriedades mecânicas para a separação óleo/água e outros contaminantes (geralmente não separam metais e outros compostos inorgânicos). Com essa finalidade alguns equipamentos de separação são mais utilizados como os hidrociclones, os flotadores e os decantadores (ou sedimentadores). Juntamente com os flotadores, os hidrociclones são os equipamentos mais utilizados no tratamento de água produzida, e são baseados na separação gravitacional óleo-água; nos hidrociclones além do efeito gravitacional, há a atuação da força centrífuga, que acelera o processo de separação: A água oleosa entra sob pressão tangencialmente no trecho de maior diâmetro do hidrociclone, sendo direcionada em espiral para o trecho de menor diâmetro (a força centrífuga força os componentes mais pesados, a água e os sólidos, contra as paredes); os decantadores também utilizam a ação gravitacional, mas por ocuparem muito espaço, devem ser instalados em locais distantes da extração do óleo, o que requer

o bombeamento da água até o sistema de tratamento, elevando os custos. Nos decantadores utiliza-se um agente coagulante (para aumentar a eficiência do processo) que tem um alto valor agregado, o que encarece ainda mais o tratamento da água produzida; a separação eletrostática também é aplicada e é geralmente usada após a decantação – flotação, pois aumenta consideravelmente a formação das duas fases óleo-água, especialmente por permitir a separação de micro-gotas de óleo na água; outro processo físico é a filtração, que consiste na separação dos constituintes de uma suspensão mediante sua passagem através de um meio poroso. Para a separação óleo/água, utilizou-se, na literatura (em nível de pesquisa) a microfiltração, com poros de 2 a 10  $\mu\text{m}$ . O tamanho das gotas de emulsão de óleo variou de 1-40  $\mu\text{m}$  e os autores concluíram que a eficiência do filtro diminuía com o aumento do tamanho dos poros, sendo a melhor eficiência para diâmetros de partículas de até 2  $\mu\text{m}$ , o que limita o uso desta operação no tratamento de águas produzidas.

#### 4.1.3.2. Processos Físico-químicos

Os processos Físico-químicos de separação utilizam propriedades relacionadas à afinidade química entre compostos para promoverem a separação física dos mesmos. Como exemplos de processos utilizados e os que apresentam potencial de uso têm-se: flotação; tratamento por membranas; adsorção em carvão ativado; adsorção em zeólitos sintéticos; destilação solar.

A flotação é um processo de separação de partículas suspensas em meio líquido baseado na propriedade da interface sólido-líquido. No processo, as partículas (hidrofóbicas) acumulam-se na interface líquido-gás das bolhas de ar. Estas (em borbulhamento) migram para superfície arrastando as partículas seletivamente aderidas, em função da afinidade química existente. É um processo eficiente, com custo reduzido, pois as colunas de flotação economizam espaço, podendo ser instaladas na própria área produtiva; o tratamento por membranas promove a remoção de óleo das misturas água-óleo através de, por exemplo, membranas PVDF (polyvinylidene fluoride) hidrofóbicas. É importante controlar o tamanho do poro da membrana e a velocidade da alimentação. Nesse método, a eficiência de remoção das gotas de óleo pode ser de 77%.

A adsorção em carvão ativado é utilizada na separação de diversos tipos de compostos, pois esse componente apresenta uma elevada superfície de contato por unidade de massa, podendo remover metais e compostos orgânicos. No processo, os compostos aderem à superfície dos grãos de carvão. O material adsorvido pode ser removido, permitindo a reutilização do carvão. O processo recomendado é o leito móvel de carvão ativado granulado (GAC), pois tem a vantagem de que o carvão granulado (e saturado) pode ser continuamente removido do processo e regenerado num sistema de oxidação a gás úmido, em que os compostos nitrogenados são convertidos em amônia, RAMOS, R. E. M.



os compostos de enxofre são convertidos em sulfatos e os hidrocarbonetos são convertidos em gás carbônico e água.

A adsorção em zeólitos sintéticos tem efeito semelhante às resinas de troca iônica. Para a adsorção de compostos orgânicos dissolvidos nas águas produzidas usualmente se empregam os zeólitos hidrofóbicos. Como o zeólito é friável, utiliza-se o processo em leito fixo. Antes da passagem da água produzida através do leito adsorvedor, é necessária a remoção do óleo disperso e dos sólidos em suspensão.

Outro processo Físico-químico para tratamento de águas produzidas, que não é utilizado na indústria, é a destilação solar. Esse processo usa o aquecimento promovido pelo sol para evaporar e condensar os componentes leves da água; os componentes pesados, como metais; compostos orgânicos de longa cadeia de Carbono, como graxas e asfaltenos, e os sais ficam retidos no tanque (resíduo). Esse processo, apesar de eficaz no tratamento de águas, apresenta como principal empecilho a necessidade de ocupar extensas áreas para tratar maiores vazões de efluente, mas usa uma fonte energética abundante, não poluente e o processo apresenta baixo custo de manutenção e operação.

#### **4.1.3.3. Tratamento Fotoquímico**

É um tipo de Processo de Oxidação Avançada (POA), baseado na geração de espécies muito reativas utilizadas na degradação de compostos orgânicos dissolvidos ou dispersos em meios aquáticos. Segundo Mota et al (2008), esse tratamento é alternativo onde os compostos orgânicos não seriam bem removidos por métodos convencionais. Os radicais hidroxila ( $\text{HO}\bullet$ ) e hidroperoxil ( $\text{HO}_2\bullet$ ) atacam aqueles compostos. Os principais componentes utilizados na fotoquímica são: UV/ $\text{H}_2\text{O}_2$ , UV/ $\text{O}_3$  e UV/ $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ ; Foto-Fenton ( $\text{Fe}^{2+}$  ou  $\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ ); fotocatalise heterogênea: ZnO/UV, SnO<sub>2</sub>/UV, TiO<sub>2</sub>/UV e TiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV. Os POA são caros devido ao elevado custo dos reagentes, como o H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e o O<sub>3</sub>, e da energia elétrica quando do uso da radiação UV. Na redução dos custos pode-se utilizá-los como tratamento preliminar na redução da toxicidade, seguida por tratamentos biológicos. Na fotoquímica o uso da radiação solar diminui os custos operacionais, como nos processos com TiO<sub>2</sub>/UV e foto-Fenton. As pesquisas são ainda em escala laboratorial.

#### **4.1.3.4. Tratamento biológico**

O tratamento biológico é aquele efetivado por microorganismos e pode ser aeróbico ou anaeróbico. Este ocorre na ausência de oxigênio, e por ser muito lento não é recomendado para tratar águas produzidas. Já o aeróbico é economicamente viável para esse fim, em que a carga deve ser misturada aos nutrientes (fósforo, nitrogênio e traços de minerais) e a biocultura deve ser realizada em excesso de ar, para uma alta biodegradação. O desempenho desse tratamento é governado pela biodegradabilidade da água produzida, no entanto a presença de compostos tóxicos nas águas produzidas, como os biocidas e o metanol, reduzem, consideravelmente, a taxa de biodegradação.

#### **4.1.3.5. Comentários sobre os tipos de tratamento**

Alguns métodos de separação são restringidos pelo diâmetro crítico das gotas de óleo a ser tratado. Outros processos são limitados economicamente devido ao grande volume de água afluyente. No entanto, todos os métodos usualmente aplicados para o tratamento de água produzida têm a limitação de gerar subprodutos que necessitam de posterior manuseio ou descarte: A troca iônica produz ácido clorídrico, contaminado com íons metálicos; o processo biológico produz uma lama que requer disposição final; Os processos de adsorção em zeólitos e a filtração em membranas geram correntes de água contaminada que devem ser recicladas para o processamento primário; No tratamento fotoquímico permanece matéria orgânica remanescente; o tratamento biológico e a flotação (com gás) também produzem emissões atmosféricas como mercúrio elementar e H<sub>2</sub>S; a destilação solar gera um resíduo sólido concentrado de metais, componentes orgânicos pesados e sais.

## **4.2. Energia solar**

De acordo com Lopes (2004), a energia solar é gerada no núcleo do sol à temperatura de aproximadamente 15.000.000 °C e à pressão de 340 bilhões de vezes a pressão atmosférica da terra ao nível do mar. São tão intensas que ocorrem reações nucleares. Estas reações de fusão nuclear transformam quatro prótons ou núcleos de átomos de hidrogênio em uma partícula alfa, que é o

núcleo do átomo de Hélio. Ao mesmo tempo uma pequena parte da massa destes átomos se converte em energia, de acordo com a fórmula de Einstein  $E = mc^2$ , que flui de seu interior até a superfície (fotosfera), sendo daí irradiada para todas as direções do espaço.

O planeta Terra situa-se a 151 milhões de quilômetros do sol e recebe a radiação solar extraterrestre (fora da atmosfera), denominada Constante Solar (Gs). Quantitativamente, o valor médio de  $1367 \text{ W/m}^2$  foi reconhecido pelo The World Radiation Center como sendo o mais aproximado para a irradiância extraterrestre, radiação medida por satélites artificiais em órbita da Terra. Este valor corresponde à energia recebida do sol por unidade de área perpendicular à direção do fluxo de radiação e apresenta uma pequena variação ao longo de um ano, devido ao fato de a distância do nosso planeta ao Sol não ser rigorosamente a mesma durante sua translação. No entanto, segundo Bezerra (1982), ao entrar na atmosfera parte dessa energia é absorvida pelas impurezas, gases, vapor d'água, etc, de modo que apenas 50% dessa potência chegam à superfície da terra. Nas aplicações correntes considera-se um valor médio correspondente em torno  $0,7 \text{ kW/m}^2$ , para dias abertos e claros.

Além da constante solar há outra convenção utilizada no dimensionamento de instalações solares, denominada "Air Mass" ou Massa de Ar. Esta indica a quantidade total de energia incidente sobre a superfície terrestre. Air Mass 1, ou AM1, identifica a energia incidente sobre o solo ao nível do mar, em um dia límpido, com o Sol a  $90^\circ$  desta superfície, ou seja, cerca de  $1 \text{ kW/m}^2$ . AM2 representa uma intensidade radiante de  $800 \text{ W/m}^2$ . AM0 seria, em comparação, a radiação medida sobre a atmosfera terrestre (constante solar). Essa variação de energia entre AM1 e AM2 relaciona-se diretamente à latitude do local medido, pois quanto mais afastado do equador, maior é a porção de atmosfera que o raio incidente do sol tem que atravessar, o que reduz por difusão e dispersão a sua energia até chegar ao solo.

Anualmente, o sol fornece cerca de  $1,5 \times 10^{18} \text{ kWh}$  de energia para a atmosfera terrestre, o que corresponde a 10000 vezes o consumo mundial de energia para um mesmo período de tempo. Em apenas três dias, a quantidade de radiação solar incidente na terra é equivalente à energia armazenada em todas as fontes conhecidas de energia fóssil (petróleo, gás natural e carvão). Ainda, considerando o período de apenas um dia, a quantidade de radiação incidida no nosso planeta equivale a toda energia consumida no mundo por 27 anos (Aldabó, 2002). A Terra recebe somente dois milionésimos de toda a energia emitida pelo Sol. E se considerarmos a energia total emitida por essa estrela em um breve intervalo de um segundo, será correspondente a uma quantidade de energia muito superior do que a que foi consumida por toda a raça humana, desde o princípio de sua evolução até os dias de hoje.

Pode-se afirmar, então, que a energia solar se configura como uma fonte energética de elevado potencial, pois é inesgotável; natural; não poluente; de elevada intensidade; e além de tudo, pode ser utilizada em quase todos os cantos do planeta. A tendência atual, especialmente com a crise energética, naturalmente, é que a pesquisa e aplicação da energia solar cresçam grandemente, e cada vez mais em todo o mundo.

#### 4.2.1. Características

A radiação solar é uma superposição de ondas eletromagnéticas e está distribuída do seguinte modo: 3% de ultravioleta, 42% de luz visível e 55% de infravermelho. Os comprimentos de onda das radiações mencionadas no espectro da radiação solar estão compreendidos, respectivamente, entre 0,25 $\mu$  e 0,4 $\mu$ ; 0,4 $\mu$  e 0,75 $\mu$ ; 1 $\mu$  a 4 $\mu$ . Porém, a atmosfera tem a propriedade de eliminar grande parte da energia solar, principalmente na faixa do ultravioleta e do infravermelho.

A radiação solar, devido a interações com as partículas na atmosfera subdivide-se em duas parcelas: a radiação direta, que não sofreu desvio de sua trajetória, e a radiação difusa, que sofreu modificações de sua trajetória na atmosfera, e por esse motivo apresenta menor intensidade. De acordo com Aldabó (2002), a insolação difusa é resultante da dispersão causada por nuvens, vapor d'água, gases, cerração, partículas sólidas ou outra obstrução na atmosfera. Em um dia de tempo claro, as proporções entre elas variam ao longo do dia, sendo a direta 10 vezes superior à difusa quando o sol se encontra próximo do zênite e aproximadamente igual quando o sol está próximo do horizonte. De acordo com Bezerra (1982), em um dia ensolarado e sem nuvens, a radiação difusa representa 10 a 16% da radiação global; com o tempo parcialmente nublado, a radiação difusa pode se igualar à direta e em dias completamente cobertos, a incidência difusa corresponde à global. A variação da energia recebida é função da duração da irradiação solar, da massa de atmosfera atravessada, da inclinação dos raios e da nebulosidade. Esses fatores são determinados pela estação do ano, pela hora, pela latitude e pelo estado do céu (Basso, 2008).

Ao atingir a superfície terrestre, a radiação solar já se encontra bastante diluída, motivo pelo qual os sistemas de captação da energia do sol necessitam ocupar áreas tão extensas. Quando se deseja temperaturas elevadas em equipamentos que utilizem a energia solar, tem-se a necessidade de concentrar essa energia. De acordo com aquele autor, a concentração da energia solar nunca é superior a 20000, permitindo obter temperaturas de até 3.600 °C. Para tanto, é necessário o emprego de sistemas óticos precisos, constituídos por espelhos planos heliostáticos e sistemas parabólicos de

RAMOS, R. E. M.

concentração. Sabe-se que radiação solar é praticamente idêntica à radiação do corpo negro a 6000 K. Entretanto, esta energia é sujeita a flutuações e variações ao longo de cada dia e durante o ano. Levando-se em conta que a intensidade da radiação é menor no inverno, é fundamental buscar tecnologia de recepção, acumulação e distribuição da energia solar.

O Brasil possui um dos mais elevados índices mundiais dessa fonte energética, especialmente na região Nordeste, onde, segundo Aldabó (2002), os valores típicos de radiação anual situam-se na faixa de 1752 kWh/m<sup>2</sup> a 2190 kWh/m<sup>2</sup>; O deserto do Saara recebe em torno de 2600 kWh/m<sup>2</sup> por ano; Já na França os valores correspondentes estão entre apenas 1000 kWh/m<sup>2</sup> e 1500 kWh/m<sup>2</sup> por ano.

#### 4.2.2. Aplicações

A energia solar pode ser utilizada de forma direta ou indireta. Indiretamente tem-se o uso da biomassa, da energia eólica, maremotriz, a fotossíntese, e até mesmo, distante, tem-se o uso das fontes não renováveis, como o petróleo e o gás natural, que foram originadas também por restos orgânicos, que utilizaram a energia proveniente do sol.

O aproveitamento da energia solar de forma direta, de acordo com Lion (2007) pode ser dividido, dependendo da aplicação, nos seguintes grupos: aplicações térmicas, obtenção de força motriz, obtenção de eletricidade e obtenção de energia química.

As aplicações térmicas utilizam a radiação solar para convertê-la em energia térmica na forma de calor. Exemplos dessas aplicações são: aquecimento de água, destilação, secagem de frutas e grãos, refrigeração por absorção e adsorção, calefação e o cozimento de alimentos com fogões solares. No aquecimento solar de águas, dois tipos de equipamentos são mais utilizados: Os coletores solares planos e os coletores concentradores.

No que diz respeito à obtenção de energia mecânica, força motriz para diversas atividades como irrigação e bombeamento de água, essa pode ser obtida por duas maneiras: Obtenção, primeiramente, de eletricidade por painéis fotovoltaicos e posterior alimentação de um motor elétrico; Conversão térmica e posterior alimentação de um motor ciclo térmico; Na obtenção de eletricidade, o método de conversão mais usual é o método fotovoltaico, em que se utilizam fotocélulas para conversão direta da energia captada pelo sol em energia elétrica, que pode ser armazenada por uma bateria; A obtenção de energia química ocorre na natureza nas reações de fotossíntese das plantas, algas e alguns microorganismos. Para aplicação humana, destacam-se as

reações de oxidação avançada que utilizam como fonte de energia a radiação solar (reações fotoquímicas)

Por fim, conforme publicado no endereço eletrônico da empresa Soletrol ([www.soletrol.com.br](http://www.soletrol.com.br)): A ABRAVA encomendou uma pesquisa que revela que a energia solar evita muitos danos ao meio ambiente. Apenas um metro quadrado de coletor solar instalado evita: O uso de 215 quilos de lenha e 66 litros de diesel por ano; o consumo anual de 55 quilos de gás; a inundação de quase 56 m<sup>2</sup> de terras férteis para a construção de hidrelétricas; a construção de novas usinas nucleares, que trazem enormes riscos à população.

Desse modo, pode-se dizer que as aplicações da energia solar trazem benefícios, sobretudo, ao meio ambiente.

### **4.3. O Sistema solar**

Como já mencionado, um dos objetivos do projeto foi utilizar o aquecedor solar para realizar o pré-aquecimento da água, acoplado ao destilador solar. Esse sistema é denominado sistema solar. Assim, é de fundamental importância conhecer como funciona o aquecedor solar, bem como cada um de seus constituintes. Além disso, o conhecimento do destilador solar é fundamental para a correta operação do sistema solar.

Na operação do sistema, é importante monitorar certas variáveis, especialmente a temperatura e a radiação solar. O sistema de pré-aquecimento solar (aquecedor solar) é composto de uma caixa d'água, um reservatório térmico (boiler), e um coletor solar (conectados por tubulações de cobre).

A figura 4.1 mostra o sistema solar do projeto montado e em operação. Tem-se de acordo com a legenda:



**Fig. 4.1-** Sistema solar do projeto em operação – UFRN.

1 - Destilador solar; 2 - Placa coletora solar plana; 3 - Reservatório térmico (Boiler); 4 - Caixa d'água; 5 – Frasco de vidro de 1L; 6 – Registradores de temperatura (abrigados do sol e da chuva); 7 – Sensores de temperatura (no destilador e no boiler); 8 – Tubulações de cobre para conexão do aquecedor solar; 9 – Mangueira de silicone para alimentação do destilador; 10 – Suportes metálicos para elevação e sustento do sistema.

#### 4.4. Destilação solar

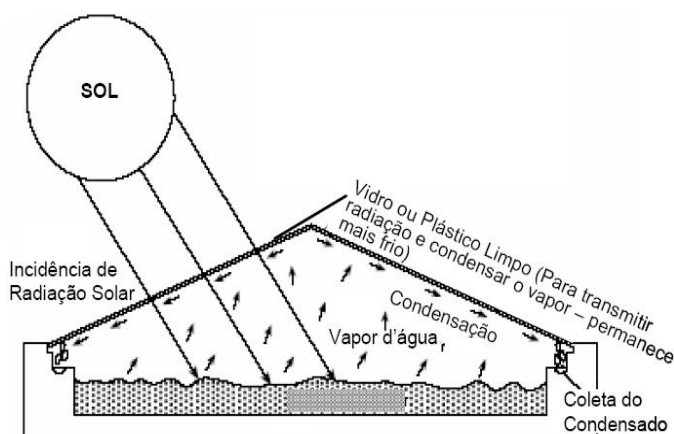
Ao contrário do que se possa imaginar, a destilação é considerada, há muito tempo, uma maneira de transformar água salgada em água potável. Já no século IV a.C., Aristóteles descreveu um método para evaporar água imprópria e então condensá-la para poder ser ingerida. Em 1593, o navegador “Sir” Richard Hawkins já usava a destilação solar para obter água potável do mar em suas viagens aos mares do sul. No entanto, o primeiro destilador solar moderno foi construído em Las Salinas (Chile), em 1872, por Charles Wilson. Ele consistia de 64 tanques de água (4.459 m<sup>2</sup>, no total) feitos de madeira pintada de negro com coberturas inclinadas de vidro. Esse sistema supria 20 mil litros diários de água potável para animais que trabalhavam nas minas. A maior parte dos destiladores solares que surgiram depois deste seguem basicamente seu desenho.

O interesse na destilação solar foi retomado durante a década de 1950, e o objetivo era construir grandes destiladores centralizados. Porém, algum tempo depois, os cientistas perceberam

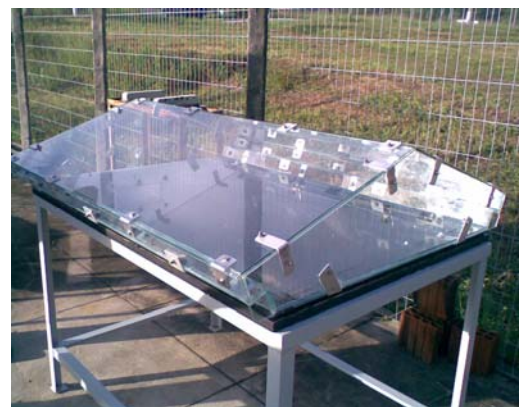
que a destilação solar para grandes demandas era custosa demais em relação a outros tipos de destilação. Assim, a pesquisa deu ênfase a sistemas de destilação de pequeno porte. Atualmente com o aumento do preço dos combustíveis fósseis, aliado à demanda ambiental, essa situação tende a mudar, com um provável crescimento no número de destiladores solares para instalações de médio e grande porte. Segundo Bezerra (2004), a produção de água destilada a partir de corpos d'água contaminados é uma alternativa, pois testes de laboratório mostram que o destilador solar pode eliminar, além de sólidos não voláteis, bactérias.

A destilação solar feita por um destilador solar tipo tanque raso é uma tecnologia simples que imita o ciclo natural da água: a radiação solar aquece a água contida em um recipiente raso revestido por uma superfície negra; a água se transforma em vapor; este condensa ao entrar em contato com a superfície da cobertura de vidro (de temperatura mais baixa); a lâmina de água destilada é então coletada, na parte lateral do destilador, por canaletas. O efeito estufa ocorre no interior do destilador solar (energia solar fica aprisionada dentro da câmara), pois a cobertura é transparente à radiação solar e opaca à radiação térmica emitida pela água. Quando a água evapora, as impurezas (componentes pesados) permanecem no tanque, constituindo o resíduo.

Nas figuras 4.2 e 4.3 podem ser visualizados, em cada uma delas, um destilador de tanque raso, de simples efeito e com duas superfícies de condensação (“duas águas”); a figura 4.2 representa um esquema simplificado de funcionamento desse tipo de destilador solar; na figura 4.3 pode-se observar o destilador solar desenvolvido nesse projeto.



**Fig. 4.2** - Esquema de destilador solar – (Soares, 2004).



**Fig. 4.3** - Destilador solar do projeto – UFRN.

A cobertura de vidro é instalada em posição inclinada para permitir o fluxo das gotas de água destilada e evitar que estas caiam de volta para o tanque, o que causaria uma perda por reevaporação. O destilador deve ter um grande comprimento no sentido leste-oeste, com o objetivo de maximizar o ganho solar.



A operação do destilador solar é muito simples e não requer alto custo de manutenção e operação ou mão-de-obra especializada. O destilador deve ser limpo regularmente para evitar acúmulo de impurezas. Além disso, a fim de evitar a perda de eficiência devido aos vazamentos de calor, indica-se o uso de bons selantes e vedadores (como o silicone). Ainda, o vidro deve estar sempre limpo e sem trincas que possam ocasionar uma perda extra de calor.

De acordo com McCracken (1985) apud Maluf (2005), há diversas perdas energéticas típicas em um destilador solar do tipo tanque raso, que vão resultar em uma eficiência energética média na faixa de 38% a 43%. Elas são causadas pela reflexão da radiação incidente na cobertura (10% da radiação total); absorção no vidro (10%); radiação da cobertura de vidro para o céu (3,7%); convecção do vidro para o ambiente (12,2%); condução da base do reservatório para o solo (16%, mas com o uso de um bom isolante térmico pode cair para 5%); e outras perdas menores devido aos vazamentos de calor (9,7%). Esses valores foram tirados de experimentos feitos na Índia.

#### **4.4.1. Destilador solar**

Diferentemente de outros equipamentos do sistema solar, como o coletor solar e o reservatório térmico, que já podem ser comprados prontos, o destilador solar deve ser construído. A correta montagem desse equipamento é crítica, já que é o elemento mais importante do sistema. Assim, uma revisão bibliográfica das partes constituintes de um destilador solar é fundamental, a fim de permitir a escolha dos melhores materiais e a melhor forma de montagem. Nesse sentido, Maluf (2005) afirma que geralmente é preferível que os destiladores sejam construídos em pequenos módulos, pois assim as unidades podem ser adicionadas ou subtraídas, a manutenção e limpeza podem ser feitas com equipamentos mais simples e por mão de obra menos qualificada, além de poder ser feita alternadamente, sem interromper totalmente a produção. Apesar de terem menor capacitância térmica, os destiladores menores produzem mais água por área.

O tamanho ótimo para destiladores pequenos está entre oitenta e noventa centímetros. De acordo com Pina (2004), o destilador deve ter um grande comprimento no sentido leste-oeste, com o objetivo de maximizar o ganho solar. Segundo Bezerra (2004), os vitrais dos destiladores duas águas (duas superfícies de condensação) devem sempre ter a orientação norte – sul, com uma das faces voltadas ao nascente e a outra ao poente, de modo à melhor aproveitar a incidência dos raios solares.

Os materiais utilizados para a construção de destiladores solares devem possuir uma série de características, como: Longa vida útil nas condições às quais serão expostos ou suficientemente baratos para serem substituídos quando necessário; resistência às intempéries; atoxicidade; inércia

química; resistência às altas temperaturas; resistência à corrosão; peso e tamanho adequados ao transporte e montagem. Uma construção mais cara e bem feita pode levar a economias futuras, pois muitos dos destiladores de baixo custo construídos foram abandonados em pouco tempo. Os principais componentes de um destilador solar tipo tanque raso são: Tanque; cobertura; suportes; canaletas e isolamento térmico.

#### **4.4.1.1. Tanque**

O tanque contém a água de alimentação, normalmente salobra ou salina, e no caso específico desse projeto, a água de produção. Logo, este deve ser resistente a essa água e pintado de uma cor escura, para que possa absorver melhor a radiação incidente e transformá-la em calor.

Maluf (2005) cita alguns fatores importantes na escolha do material: durabilidade, custo, disponibilidade, limpeza, portabilidade e toxicidade. Na tese, recomenda-se o concreto, pela simplicidade e baixo custo, mas é propenso ao surgimento de trincas, o que dificulta o estudo. Esse autor afirma que metais não são indicados para o tanque, pois facilmente danificam-se. O cobre, o ferro galvanizado e o alumínio anodizado são alguns exemplos citados, todos com pouco tempo de vida útil. Em termos quantitativos, sabe-se que tanques feitos de cobre são destruídos em poucos anos; os de ferro galvanizado e alumínio anodizado duram apenas alguns meses. Uma sugestão dada é o uso de alumínio revestido com borracha de silicone, que tem uma boa durabilidade (de 10 a 15 anos). Deve-se considerar que as reações químicas são acentuadas com o aumento da temperatura no tanque e assim, mesmo o alumínio naval, que dura 20 anos no mar (a 25°C), teria durabilidade de apenas um ou dois anos a 50°C. Nesse projeto, como se utilizou água produzida, o tanque deveria ser resistente à corrosão que esse fluido provoca em diversos materiais. Desse modo, baseando-se no trabalho de Bezerra (2004), foi utilizado o vidro, que atende perfeitamente a essa condição e pode chegar a temperaturas próximas a 70°C com a incidência solar, desde que esteja em contato com uma chapa metálica.

#### **4.4.1.2. Suportes**

Há dois tipos de suporte para o destilador: o suporte metálico da base e os suportes da cobertura. Estes últimos são geralmente feitos com metal, como o alumínio e o aço galvanizado. Apesar de sujeitos à corrosão, eles duram bastante se devidamente protegidos, mas o silicone de vedação adere bem ao alumínio, o que indica esse material ao uso como suporte da cobertura; o

RAMOS, R. E. M. *Monografia - DEQ/PRH14-ANP/UFRN – Natal/RN - Brasil*

suporte metálico da base do destilador serve para a sustentação do mesmo e geralmente é de um metal pintado (como o Ferro).

#### 4.4.1.3. Cobertura

A cobertura é o componente mais importante do destilador solar, pois é responsável pela máxima transmissão de radiação dentro da faixa do espectro solar; mantém o calor gerado dentro do destilador; além de permitir a condensação e fluxo da água destilada. Devido à exposição à radiação ultravioleta, o material deve resistir bem a esta, e como as temperaturas podem alcançar 70° C, deve suportar seu próprio peso nessas condições e não expandir muito, o que pode danificar a vedação. Além disso, a cobertura deve ser resistente, capaz de suportar ventos e chuvas. O fluxo da água que condensa na superfície da cobertura deve ocorrer com a formação de uma lâmina de água, em vez de gotas de água. Tal fato só é possível com uma boa molhabilidade.

Considerando todos esses fatores, o melhor material é o vidro, que apresenta melhor molhabilidade à água. O plástico, a princípio, pode ser utilizado, mas a maioria dos plásticos se deteriora sob altas temperaturas, apresenta uma baixa molhabilidade, além de ter uma eficiência energética menor, pois o efeito estufa produzido pelo vidro é mais intenso do que o efeito estufa produzido pelo plástico e, além disso, devido à baixa molhabilidade do plástico, o fluxo de destilado na cobertura é por gotas d'água. Tal fato gera perdas de produção devido ao gotejamento do destilado diretamente no tanque. Esses motivos tornam o plástico, até o momento, inadequado ao uso eficiente na destilação solar.

Com relação aos tipos de vidro para a cobertura, Lopes (2004) mostra que quanto maior a porcentagem de óxido de ferro ( $Fe_2O_3$ ) presente no vidro, maior são as perdas por absorção e menor a porcentagem de radiação transmitida, ou seja, o vidro é menos transparente, o que acarreta em menor transmitância. O vidro temperado é a melhor escolha em termos de molhabilidade e resistência a altas temperaturas. É também de 3 a 5 vezes mais resistente que o vidro comum, além de ser mais seguro para se trabalhar, no entanto apresenta um custo elevado. Comparado com o vidro comum ele aumenta a produção do destilador em cerca de 6%, mas os custos totais aumentam em 15%. Logo, o vidro comum de três ou quatro milímetros de espessura é a melhor escolha. O mais delgado tem um melhor desempenho, mas é mais frágil e deve ser evitado para vãos maiores que 60 cm.

#### 4.4.1.4. Canaletas de coleta

Como se pode visualizar nas figuras 4.4 e 4.5, as canaletas de coleta ficam localizadas na base da cobertura de vidro e servem para coletar a água condensada e levá-la ao tanque de armazenamento. Estas devem ser pequenas, para não provocar sombreamento no tanque. Segundo Maluf (2005), o material mais indicado é o aço inoxidável. Mas, o alumínio e o PVC também são opções viáveis. No caso particular desse projeto, as canaletas são de vidro, unindo o tanque à cobertura do destilador.



Fig. 4.4 - Detalhe da canaleta esquerda do destilador do projeto – UFRN.



Fig. 4.5 - Detalhe da canaleta direita (visão interna trazeira).

#### 4.4.1.5. Componentes auxiliares

Os principais componentes auxiliares são o isolamento térmico e os vedadores (ou selantes). O isolamento térmico serve para evitar perdas de calor para o ambiente, aumentando a eficiência do destilador em até 14% para tanques rasos, e geralmente é utilizado por baixo do tanque. Se construído com bom isolamento térmico, durante a noite também há destilação devido ao calor armazenado na massa de água do tanque. Segundo Maluf (2005), pode-se utilizar areia na base para diminuir as perdas de calor, pois ela atua como um armazenador de calor, que acumula calor durante o dia e o devolve para o tanque à noite, mantendo o processo de destilação após o pôr-do-sol. Geralmente se usa fibra de vidro na espessura de 0,10 m como isolamento térmico para o destilador solar, pois sua condutividade tem um valor baixo ( $k = 0,037 \text{ W/m.K}$ ). Al-Hinai et al (2002), a partir de um modelo matemático constatou como espessura de isolamento ótima esse mesmo valor de 0,10 m para o destilador.

A vedação também é um fator importante, especialmente por manter o ar quente preso dentro da estrutura, evitando perda de calor. Uma vedação ineficiente pode permitir ainda a entrada de água de chuva e insetos no tanque, além da fuga de vapor e conseqüente perda de destilado. A literatura recomenda, para tanto, o silicone moldado *in loco*.

É importante enfatizar que, no contexto do sistema solar, onde a água entra pré-aquecida no destilador, o isolamento térmico e a vedação são de extrema importância em todo o sistema, já que se deve evitar ao máximo a perda de calor da água. Se assim não for, o sistema de pré-aquecimento não tem grande contribuição.

#### 4.4.1.6. Parâmetros importantes

Além das partes já descritas, ainda existem dois parâmetros importantes a serem observados na construção e operação de destiladores: a inclinação da cobertura e a altura de lâmina d'água no tanque.

Quanto ao ângulo de inclinação da cobertura, sabe-se que este tem influência na quantidade de radiação solar que entra no destilador. Quanto mais ortogonal à superfície do vidro for esse ângulo de incidência, melhor. Ou seja, quanto menor o ângulo de inclinação, mais radiação é transmitida pelo vidro. Baseando-se em Bezerra (2004), escolheu-se o ângulo de 20° como ideal em termos energéticos, já que permite uma boa transmissão de radiação solar, o que equivale a altas taxas de evaporação (a perda por reflexão é menor). Maiores ângulos de inclinação provocam um aumento na condensação devido ao aumento da área da cobertura, mas apresentam maior perda por convecção do ar presente, além de menor eficiência energética. O modelo computacional empregado no trabalho de Al-Hinai et al (2002) indicou como inclinação ótima um ângulo de 23° com a horizontal.

Atualmente, uma tese de doutorado está sendo desenvolvida com o objetivo de se obter o mais indicado ângulo de inclinação, se é de 20° ou de 45°. Não é necessário haver uma inclinação muito grande do vidro para que a água escorra por ele: com o vidro limpo, uma inclinação de apenas 1° é necessária para que isso ocorra. Uma inclinação pequena é sugestiva, pois assim se gasta menos vidro, o destilador tem volume e peso menores (custando menos) e a quantidade de ar entre a água e o vidro é menor, aumentando a eficiência.

Quanto à profundidade da água no tanque, a literatura recomenda um valor entre 1,5 cm e 2,5 cm (Al-Hayek, 2004, e McCracken, 1985, apud Maluf, 2005). De modo geral, quanto mais raso o tanque, melhor. Mas, se o tanque for raso demais, secará facilmente (em um dia de verão o RAMOS, R. E. M.

destilador pode evaporar 0,5 cm de profundidade de água) e haverá mais depósitos de sal, o que não é positivo para seu desempenho, pois a maior concentração de sais provoca um aumento no ponto de ebulição da solução, o que dificulta a evaporação. Além desse fato, a camada de sais depositada cobre a superfície negra do tanque, o que diminui a produção de calor. Assim, 2 cm seria uma profundidade de água interessante, mas é importante testar outras profundidades para observar como o sistema se comporta. Al-Hinai et al (2002), por exemplo, indica uma lâmina de água ótima de 0,05 m. profundidades maiores reservam uma energia térmica extra, o que aumenta a produção noturna, quando a temperatura do ar ambiente é menor. Na prática, nenhum destilador com tanques mais profundos atinge a eficiência típica de 43% dos destiladores de tanque rasos. No caso particular desse projeto, o tanque não seca, pois é alimentado continuamente pelo boiler. No entanto, ocorre um aumento na concentração de sais por esse método, o que não é positivo.

Bezerra (2004) afirma ainda que a distância entre a cobertura de vidro e a superfície da água é outro parâmetro importante na configuração do destilador e não deve ser maior que cinco ou sete centímetros. À medida que a distância entre o vidro e a água aumenta as perdas térmicas por convecção com o ar presente também aumentam e a eficiência do destilador diminui.

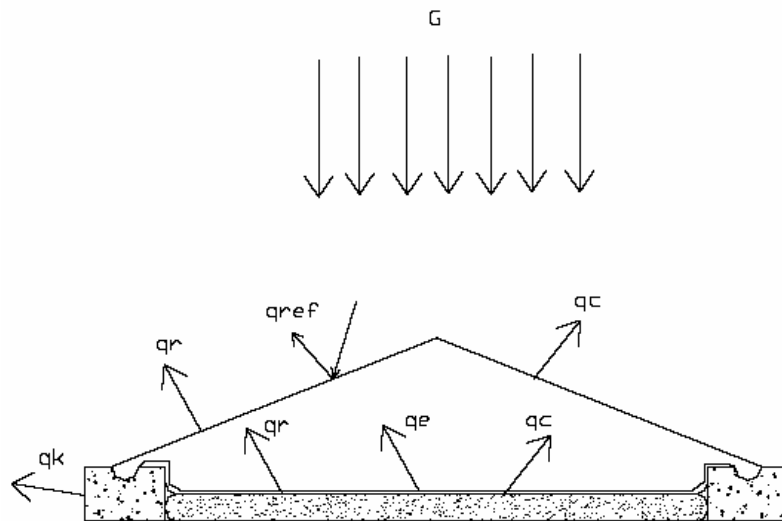
#### 4.4.2. Balanço energético no destilador

O estudo do balanço energético de um destilador solar é fundamental para a análise da eficiência energética desse equipamento, visando à otimização do mesmo (com a diminuição das perdas térmicas). Segundo Duffie et al (1991), o balanço energético do destilador necessita que o total da energia solar absorvida seja igual à energia transferida da cobertura,  $q_{c, g-a}$  e  $q_{r, g-a}$ , mais as perdas pelo fundo e pelas bordas do destilador,  $q_k$ , mais a energia armazenada dentro do sistema. A energia útil,  $q_e$ , é diretamente proporcional à produção da água. A máxima produção do destilador ocorre quando a energia de evaporação de uma quantidade de água seja igual à energia solar incidente sobre o destilador, o que, na prática, não é possível.

Para uma unidade de superfície de um destilador solar, a uma intensidade de radiação solar  $G$ , com uma cobertura transparente e um tanque de água, o balanço energético na água no interior do destilador (em conjunto com o tanque), por unidade de área do tanque, pode ser escrito pela Equação 01.

$$G\tau\alpha = q_e + q_{r, b-g} + q_{c, b-g} + q_k + (dT_b / dt) (m C_p)_b \quad (01)$$

Em que os sub-índices  $e$ ,  $r$ ,  $c$  e  $k$  representam evaporação-condensação, radiação, convecção e condução, respectivamente. Os sub-índices  $b$  e  $g$  referem-se ao tanque e cobertura, respectivamente.  $\tau$  representa a transmitância da cobertura, e  $\alpha$  a absorvância da chapa metálica em contato com o tanque. A figura 4.6 ilustra os fluxos de energia em um destilador solar, em que:  $G$  é a radiação solar incidente; com exceção de  $q_e$  (o calor útil), os outros índices de  $q$  representam as perdas energéticas diversas.



**Fig. 4.6** - Fluxos de energia de um destilador solar – (Pina, 2004).

Sabendo-se que a capacitância do vidro é normalmente inferior à da água e do tanque, então se pode desprezar a energia solar absorvida pelo vidro. Assim, considerando aproximadamente a mesma área da cobertura e do tanque, o balanço de energia na cobertura pode, por sua vez ser escrito por:

$$q_e + q_{r, b-g} + q_{c, b-g} + q_k = q_{c, g-a} + q_{r, g-a} \quad (02)$$

Na Equação 02 percebe-se que ocorrem perdas energéticas por condução, convecção e radiação, tanto pela base quanto pelo topo do destilador e a máxima eficiência do destilador se dá com a maior minimização possível dessas perdas de calor para o meio.

A eficiência instantânea do destilador é definida pela razão entre o calor transferido pela evaporação-condensação e a radiação que chega ao destilador naquele momento (Equação 03).

$$\eta = \frac{q_e}{A_c \cdot G_T} \quad (03)$$

Integrando essa equação para um período (dia, mês ou ano), tem-se o desempenho do destilador. Numericamente, a integral é equivalente ao somatório de cada adição da variável dependente (calor útil ou radiação solar) a um determinado tempo com o seu valor no tempo seguinte, dividida por dois e multiplicada pelo intervalo de tempo (método dos trapézios para integração numérica), conforme pode ser visto na Equação 04. A partir de resultados experimentais pode-se chegar à eficiência efetiva do sistema, que também leva em conta algumas perdas (gotas que caem diretamente no tanque, vazamentos nas canaletas, etc) utilizando o  $h_{fg}$  no lugar de  $q_e$ :

$$\eta = \frac{m_p \int_{t_1}^{t_2} h_{fg} dt}{A_C \int_{t_1}^{t_2} G_T dt} \cong \frac{m_p \sum_{i=1}^{n-1} [(h_{fg(i)} + h_{fg(i+1)}) \cdot (t_{(i+1)} - t_{(i)}) / (2)]}{A_C \cdot \sum_{i=1}^{n-1} [(G_{T(i)} + G_{T(i+1)}) \cdot (t_{(i+1)} - t_{(i)}) / (2)]} \quad (04)$$

Onde:  $m_p$  é a taxa de destilado produzido pelo destilador (medido – kg/s) e  $h_{fg}$  é o calor latente de vaporização (kJ/kg), que equivale ao calor útil  $q_e$  (do balanço energético) considerando as perdas por vazamentos;  $A_C$  é a área útil do tanque do destilador;  $G_T$  é a radiação solar global incidente por unidade de área; “ $t_2 - t_1$ ” é o intervalo de tempo considerado entre um dado e outro.

#### 4.5. Coletor solar

No sistema, o coletor solar é o responsável pelo pré-aquecimento da água que entra no destilador, visando a uma maior produtividade de água destilada. Depois do destilador, ele é o elemento mais importante, devendo-se conhecer bem seu funcionamento.

Existem três principais tipos de coletores solares: planos, concentradores e os coletores concentradores parabólicos (CPC).

Os coletores solares planos são os mais usualmente utilizados no aquecimento solar de água, e por isso foram os escolhidos para esse projeto. Esses coletores recebem tanto a radiação solar direta quanto a difusa, mas não tem a capacidade de direcionar os raios solares em um ponto, como fazem os coletores concentradores, e por esse motivo, a temperatura máxima que podem alcançar geralmente é inferior a 80° C.

Os elementos constituintes dos coletores planos são: placa metálica absorvedora (com aletas), cobertura de vidro, caixa e isolamento térmico. O coletor funciona, em resumo, da seguinte maneira: os raios de sol atravessam o vidro da tampa, esquentam a placa absorvedora e as aletas, de



cobre ou alumínio (pintadas com tinta escura para ajudar na absorção da radiação solar), e o calor passa, então, para os tubos ou serpentina (geralmente de cobre), esquentando a água aí presente.

Assim como no destilador solar, também no coletor solar com cobertura transparente ocorre o efeito estufa, responsável pelo aprisionamento do calor no interior do mesmo, que aumenta a energia térmica do sistema. Isso ocorre porque a cobertura (geralmente de vidro) recupera grande parte da radiação emitida pela superfície negra da placa absorvedora. O comprimento de onda dessa radiação emitida é tão menor quanto maior a temperatura da chapa. De acordo com Bezerra (1982), para uma temperatura na faixa de 60 a 70 °C, a chapa emite uma radiação de comprimento de onda entre 4 $\mu$  e 70 $\mu$ , que se encontra na faixa de emissão do infravermelho.

De acordo com Esteban (2000) e Lopes (2004), os coletores solares podem ser utilizados em conjunto com o destilador solar para melhorar a eficiência deste, através do pré-aquecimento da água. O coletor solar, ao contrário do destilador solar, foi comprado já pronto da empresa Soletrol. No entanto, é importante o estudo desse equipamento a fim de permitir o melhor aproveitamento energético. Lopes (2004) descreve os principais aspectos de um coletor solar plano, apresentando detalhes da construção do coletor, materiais utilizados e balanço energético. Alguns dos elementos que constituem o coletor, como a cobertura de vidro e o isolamento térmico, já foram apresentados no tópico sobre destiladores (4.4.1.3 e 4.4.1.5), porém serão comentados no decorrer desta seção (4.5), pois apresentam algumas particularidades nos coletores. As principais equações para o cálculo da eficiência de um coletor solar plano são mostradas na seção 4.5.6.

Para que os coletores planos tenham um ótimo aproveitamento energético, devem ser instalados de forma que a superfície de captação da energia solar fique o mais perpendicular possível aos raios solares. No caso do hemisfério Sul, seu posicionamento deve ser ao norte geográfico e sua inclinação depende da latitude do local. Para a sua correta localização é necessária a utilização de uma bússola (o norte geográfico está situado sempre à direita do norte magnético e varia de acordo com o local. No Brasil, ele está aproximadamente a 20° à direita do norte magnético). A inclinação dos coletores geralmente segue a seguinte regra básica: inclinação ideal = Latitude do local + 10°.

A figura 4.7 apresenta um coletor solar plano vertical, com um corte esquemático, mostrando sua constituição e o fluxo de água em aquecimento ao longo do equipamento. A figura 4.8 mostra os componentes de um coletor solar plano.



Fig. 4.7 - Esquema de coletor solar plano.

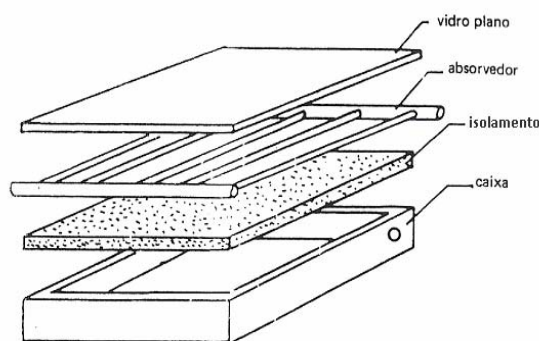


Fig. 4.8 - Componentes do coletor - (adaptado de Bezerra, 1982).

#### 4.5.1. Placa absorvedora

A placa absorvedora (juntamente com as aletas) é o item mais importante do coletor. Por isso sua construção deve obedecer a critérios rígidos quanto à estanqueidade e aderência, pois 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. O uso do alumínio reduz sensivelmente os custos de fabricação, porém a sua corrosão é normalmente maior que a do cobre. Além disso, analisando-se a tabela 4.1, percebe-se que a condutividade térmica do cobre é significativamente maior que a do alumínio, sendo praticamente o dobro em termos numéricos. Segundo Aldabó (2002), o cobre tem uma resistência à corrosão muito superior a outros materiais, como o aço e o alumínio, e por isso, não necessita de proteção (verniz) ou inibidores contra a corrosão, e a instalação dispensa manutenção por muitos anos. Essas afirmações permitem concluir que o cobre é o melhor material, em termos energéticos e operacionais, para constituir os tubos de serpentina dos coletores solares.

Tabela 4.1 Propriedades do alumínio e do cobre – (Lopes ,2004).

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>

#### **4.5.1.1. Tratamento da Placa absorvedora**

Com o intuito de aumentar a absorvidade da placa, faz-se um tratamento na mesma, que pode ser uma pintura com tinta preto fosco, ou um tratamento químico com superfícies seletivas.

Na pintura simples de preto fosco, segundo Bezerra (1982), há duas considerações importantes que influem no rendimento do coletor: A pintura deve ser feita preferencialmente em pistola e uma única vez; A tinta deve ser fosca para evitar a reflexão da radiação, bem como, possuir resistência mecânica às elevadas temperaturas da placa absorvedora, que podem alcançar valores superiores a 80 °C. Vale salientar que essa pintura deve ser tão delgada quanto possível, pois do contrário, pode até servir como isolante térmico, pois é má condutora de calor. Esse fato é altamente indesejável, pois prejudica a transmissão do calor para a placa absorvedora, e conseqüentemente, para o fluido de trabalho.

Bezerra (1982) afirma que as superfícies seletivas geralmente são de óxido de cobre; níquel-preto; ou cromo-preto. Apesar da maior eficiência que proporcionam aos coletores solares, aquelas não são comercializadas em larga escala a custos razoáveis. Logo, a pintura de preto fosco é mais comumente utilizada, e apesar da menor eficácia, apresenta resultados bastante satisfatórios.

#### **4.5.2. Cobertura transparente**

No caso dos coletores solares planos, a cobertura transparente cumpre duas importantes funções: Reduzir as perdas por convecção, pelo fato de isolar a placa absorvedora do contato direto com o ar ambiente; provocar o efeito estufa, como ocorre no destilador solar, pois a superfície é transparente à radiação solar e opaca à radiação emitida pela placa absorvedora.

Diferentemente dos destiladores solares, a cobertura transparente usada nos coletores não necessita ter uma boa molhabilidade, o que sugere o uso do plástico ou acrílico. Porém o vidro ainda é o material mais indicado devido à resistência às altas temperaturas. É utilizado geralmente na espessura de 3 mm.

#### **4.5.3. Caixa do coletor**

A caixa do coletor é o elemento estrutural do mesmo e pode ser construída dos modos e materiais a seguir: Fibra de vidro; chapa de ferro galvanizado; plástico rígido; fibrocimento; chapa ou perfil de alumínio; alvenaria de cimento; madeira. Dentre esses materiais, a escolha depende do

custo e da disponibilidade e a preferência deve ser dada àqueles materiais com baixa condutividade térmica, o que ajuda a reduzir as perdas térmicas para o meio.

Nesse contexto, a madeira seria indicada por possuir uma baixa condutividade térmica, no entanto apresenta uma reduzida vida útil quando submetida às intempéries. O que geralmente é usado em coletores solares planos é o perfil de alumínio, que facilita a construção da caixa e dispensa a mão-de-obra de acabamento. No caso da construção em chapa, necessita-se construir uma estrutura em cantoneira (ferro ou alumínio), sendo posteriormente revestida com a chapa escolhida. A superfície superior da caixa deve ser a mais regular possível a fim de facilitar a colocação da cobertura transparente, bem como a vedação.

#### **4.5.4. Isolamento térmico**

Assim como nos destiladores solares, o isolamento térmico é fundamental a fim de diminuir as perdas térmicas para o ambiente a níveis aceitáveis. No caso dos coletores solares para aquecimento de água, a espessura do isolamento recomendada é de 0,05 m. Frequentemente é utilizada lã de vidro ( $k = 0,038 \text{ W/m.K}$ ), que resiste bem até temperaturas próximas a  $450 \text{ }^\circ\text{C}$ , ou espuma de poliuretano ( $k < 0,03 \text{ W/mK}$ ). Além de uma baixa condutividade térmica, o isolamento deve ter as seguintes características: Baixo custo, resistência às temperaturas de trabalho, boa resistência mecânica e resistência às intempéries. Juntamente com isolamento do coletor solar, é necessário um isolamento para as tubulações que comunicam o coletor com o reservatório térmico, a fim de evitar uma maior perda térmica (da água em circulação) para o meio.

#### **4.5.5. Vedação**

A vedação é realizada na superfície externa do coletor solar. É essencial para evitar interferências externas e a perda extra de calor para o meio. Além disso, a vedação impede a entrada de água de chuva e da própria umidade, responsável pela degradação do isolamento térmico e da pintura da placa absorvedora.

#### 4.5.6. Eficiência térmica dos coletores

Para que os coletores solares apresentem um aproveitamento energético adequado, algumas considerações básicas são feitas: A cobertura deve possuir alta transparência para a radiação solar e alta absorvidade para a radiação infravermelha; a placa absorvedora deve ser preta para garantir maior absorção de energia e possuir alta condutividade térmica para transferir esta energia ao fluido de trabalho; 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. Essas características contribuem para que o rendimento do coletor solar seja satisfatório. No entanto o cálculo dessa variável envolve uma série de outros parâmetros e certa complexidade experimental.

Em resumo, o rendimento de um coletor solar é dado pela Equação 05:

$$\eta = \frac{\int_{t_1}^{t_2} Q_U dt}{A_c \int_{t_1}^{t_2} G_T dt} \quad (05)$$

Onde  $\eta$  é o rendimento (ou eficiência),  $Q_U$  é a energia transferida ao fluido de trabalho (calor útil),  $G_T$  é a radiação solar global incidente no plano do coletor e  $A_c$  é a área útil do coletor.

Em regime permanente, a energia transferida ao fluido de trabalho é definida pela diferença entre a energia solar absorvida pelo coletor e as perdas térmicas (Equação 06).

$$Q_U = A_C \left[ S - U_L (T_{pm} - T_a) \right] \quad (06)$$

Na Equação 06, tem-se que:  $S$  é a radiação solar absorvida considerando as perdas óticas;  $U_L$  é o coeficiente global de perdas térmicas do coletor;  $T_{pm}$  é a temperatura média da placa absorvedora;  $T_a$  é a temperatura ambiente.

Na prática, no entanto, a temperatura média da placa absorvedora é de difícil obtenção, pois está relacionada com a radiação incidente, com as condições de entrada do fluido (vazão e temperatura) e com as características de construção do coletor. Devido a essa complexidade, a equação pode ser reformulada, sendo expressa em termos da temperatura de entrada do fluido e de um fator denominado fator de remoção de calor do coletor  $F_R$ . Esse fator 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 à temperatura de entrada do fluido.  $F_R$  pode ser representado matematicamente pela Equação 07:

$$F_R = \frac{m_f C_{Pf} (T_{f0} - T_{fi})}{A_C [S - U_L (T_{fi} - T_a)]} \quad (07)$$

Onde  $m_f$  é a vazão mássica do fluido,  $C_{Pf}$  é o seu calor específico,  $T_{f0}$  é a temperatura de saída do fluido e  $T_{fi}$  é a temperatura de entrada deste.

A radiação absorvida  $S$  depende dos materiais empregados na construção do coletor e do ângulo de incidência da radiação solar. Da Equação 06, e de uma simplificação admitida para a radiação solar absorvida  $S$ , pode-se escrever a Equação 08, utilizada para análise de coletores solares. Como se pode observar, a energia útil é calculada em função da temperatura de entrada do fluido, uma grandeza de simples medição.

$$Q_U = A_C F_R [G_T (\tau\alpha) - U_L (T_{fi} - T_a)] \quad (08)$$

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 efetiva ( $\eta_i$ ), definida pelas Equações 09 e 10:

$$\eta_i = \frac{Q_U}{A_C G_T} = \frac{m_f C_P (T_{f0} - T_{fi})}{A_C G_T} \quad (09)$$

$$\eta_i = F_R (\tau\alpha) - \frac{U_L (T_{fi} - T_{f0})}{A_C G_T} \quad (10)$$

A Equação 09 representa a eficiência efetiva do coletor solar, enquanto que a Equação 10 refere-se à eficiência calculada a partir do balanço energético para aquele equipamento. O fator  $F_R$  é da ordem de 0,9 (faixa de 0 a 1,0) para coletores usando líquido. Os valores do coeficiente  $U_L$  são também determinados experimentalmente e sua faixa de valores estimada está na tabela 4.2.

**Tabela 4.2** - Valores de  $U_L$  para coletores solares - (adaptado de Lopes, 2004).

<b>Tipo de envidraçamento</b>	<b><math>U_L</math> (W/m<sup>2</sup>K)</b>
Sem cobertura	13 – 15
Simplex	6 – 7
Duplo	3 – 4

Aumentando-se o número de vidros, para recuperar parte das perdas, ocorrerá, também, uma diminuição da transparência global e o que se precisa observar é se, ao acrescentar vidros, a perda de transparência é ou não superada pelo calor recuperado.

No capítulo IX (ANEXOS) é apresentado o ordenamento das equações utilizadas para o cálculo da eficiência média de um coletor solar plano.

#### **4.6. Reservatório térmico (boiler)**

O boiler é como uma caixa d'água especial que mantém quente a água que passou pelo coletor solar. Assim, ele garante água quente mesmo nas horas em que a insolação é muito baixa ou inexistente (depois do pôr-do-sol). Devido à variação diária da radiação solar o boiler deve armazenar a água quente para consumo para cerca de dois dias.

Para manter a água aquecida, esse equipamento deve contar com um baixo coeficiente de trocas térmicas com o ambiente e ser constituído de materiais resistentes à corrosão, que tenham uma boa rigidez estrutural e suportem temperaturas próximas a 100° C. Esses fatores levam ao uso do aço inoxidável. No entanto, devido ao custo deste outros metais, como o cobre, também são utilizados.

Para garantir um eficiente isolamento térmico, o tanque metálico é normalmente recoberto por um bom material isolante (lã de vidro e poliuretano), com coeficientes de condução térmica na ordem de 0,03 a 0,04 W/mK. Um encapsulamento de aço galvanizado ou alumínio garante um bom acabamento e certa rigidez ao sistema. A estocagem de água quente pode ser feita em reservatórios com múltiplos isolamentos térmicos, o que reduz as perdas térmicas, mas aumenta o custo do reservatório.

##### **4.6.1. Estratificação térmica**

Com a extração de água quente para utilização e conseqüente entrada de água fria no boiler (vinda da caixa d'água), no tanque permanecem a água fria, quente e morna. Por causa das

diferentes densidades forma-se um efeito de estratificação térmica no boiler: A água quente (menos densa) se junta no topo e a água fria (mais densa), na área inferior do tanque. Este efeito de estratificação é uma condição fundamental para o bom funcionamento do sistema solar. De acordo com Solar Térmico (2004), têm de se criar condições para que a água fria não misture com a água quente, devendo manter-se uma boa estratificação térmica que possa ser conservada. Nesse contexto, recomenda-se o uso de reservatórios térmicos de estrutura vertical, sendo a razão altura-diâmetro de pelo menos 2,5:1. A temperatura de compensação entre camadas é menor no caso dos tanques de armazenamento mais verticais quando não está a ser aquecida devido às diferenças de densidade. A existência de uma zona mais fria assegura a eficiência do sistema solar, mesmo em condições de baixa radiação.

#### **4.7. Piranômetro**

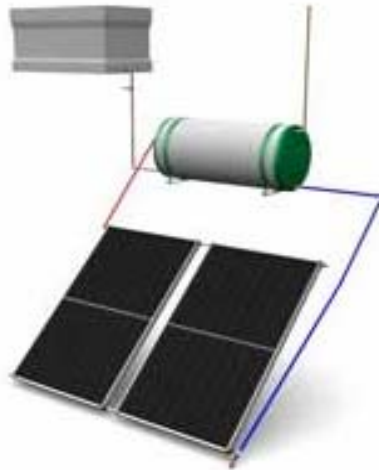
Piranômetros são instrumentos que medem a radiação solar global. Eles se caracterizam pelo uso de uma termopilha que mede a diferença de temperatura entre duas superfícies, uma preta e outra branca. A expansão das superfícies provoca um diferencial de potencial, que ao ser medido, mostra o valor instantâneo da energia solar. Para a leitura dos dados dos piranômetros, se faz necessário o uso de um aparelho denominado datalogger, que é um sistema de aquisição de dados (registrador) já que aqueles são apenas instrumentos de medida.

Sensores de radiação global, líquida ou refletida devem ser montados em suportes que garantam seu perfeito nivelamento com a normal e em locais abertos sem a presença de sombras, obstáculos e áreas reflexivas. Em condições normais, este instrumento é instalado em uma altura entre dois e três metros. A existência de altos níveis de particulados no ar (poeira) pode comprometer a leitura do sensor, necessitando, então, de constante limpeza.

#### **4.8. Sistema de pré-aquecimento solar (Aquecedor solar)**

Um sistema básico de aquecimento solar de água é constituído de coletores solares planos, reservatório térmico (boiler) e caixa d'água e pode ser representado pela figura 4.9, onde são mostrados em detalhes a caixa d'água, que é a alimentação do sistema (fonte de água fria), os coletores solares e o reservatório térmico, com as devidas conexões. Na figura 4.9 pode-se ver, ainda, a entrada de água fria nos coletores (tubulação em azul), e a saída de água quente dos mesmos, em direção ao boiler (tubulação em vermelho).





**Fig. 4.9** - Esquema de aquecedor solar de água - ([www.soletrol.com.br](http://www.soletrol.com.br)).

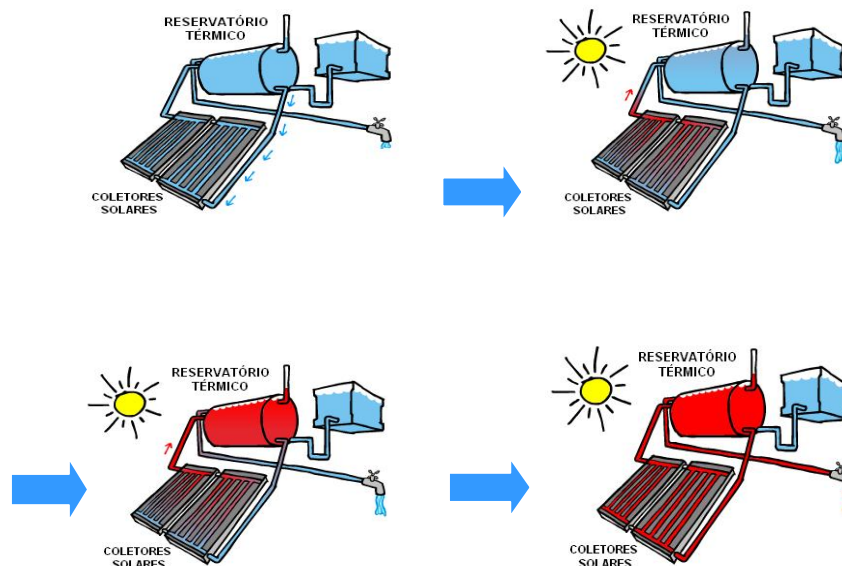
De acordo com ABNT (1992), apud Basso (2008), a NBR 12269 sugere a instalação de meios para limitar a pressão do reservatório térmico a valores que não excedam os limites de pressão especificados pelo fabricante. Um dispositivo de alívio de pressão deve ser utilizado para este fim: respiro (suspiro), válvula de alívio ou válvula quebra-vácuo. No caso de respiro, a tubulação deve ser livre, desobstruída e aberta à atmosfera o tempo todo.

#### **4.8.1. Modos de operação do aquecedor solar**

Existem basicamente quatro formas de operação de um aquecedor solar constituído por coletores solares planos. Duas dessas formas estão relacionadas à troca de calor, se é feita direta ou indiretamente; as outras duas formas tratam da circulação de água entre coletor e boiler, que pode ser realizada por termossifão (circulação natural) ou com o auxílio de bombas (circulação forçada).

No caso da troca de calor direta, a circulação do fluido é em circuito aberto, ou seja, o fluido de aquecimento é o próprio fluido de trabalho, apresentando a vantagem de não utilizar um outro fluido para o aquecimento e o calor ser transmitido diretamente ao fluido de interesse; Na troca de calor indireta, a chamada circulação em circuito fechado, utiliza-se um outro fluido para aquecimento e a transferência de calor desse fluido ao fluido de interesse é realizada dentro do boiler através de tubulações que funcionam como um trocador de calor. Essa operação tem a vantagem de recircular o fluido de aquecimento, que pode, então, ter propriedades térmicas mais adequadas ao aquecimento térmico, estando apto a alcançar temperaturas mais elevadas. Além disso, o fluido de aquecimento pode não apresentar propriedades corrosivas nem incrustantes, o que aumenta o tempo de uso do coletor solar, diminuindo, conseqüentemente, os custos operacionais.

A circulação natural, denominada de termossifão é a circulação baseada na diferença de densidade causada pelo gradiente de temperatura no coletor solar e se baseia no fato de que, quanto maior a temperatura da água, menor sua densidade (mais leve é a água). Esse princípio pode ser bem visualizado na figura 4.10.



**Fig. 4.10** - Esquema de funcionamento de aquecedor solar com termossifão - ([www.soletrol.com.br](http://www.soletrol.com.br)).

Como se pode observar na figura 4.10, o boiler está em um nível mais alto que os coletores, e por gravidade, a água passa do boiler para aqueles. O sol então aquece essa água, que passa a estar mais quente e menos densa, e tem a tendência de subir para o boiler e “empurrar” a água fria deste para os coletores, que é então aquecida novamente, gerando um ciclo que promove a circulação natural da água. Como se pode ver na ilustração 4 da figura 4.10, quando há necessidade de água quente, ela é retirada do boiler, e a água fria da caixa d’água completa o volume do boiler, de modo que este esteja sempre cheio de água. A água fria da caixa esfria a água do boiler, o que dá continuidade ao processo de circulação. A circulação natural só é interrompida quando a intensidade da radiação solar é insuficiente para manter a temperatura em níveis diferentes ou quando se alcança o equilíbrio térmico entre o coletor e o reservatório.

De acordo com Basso (2008), a caixa d’água deve estar com seu fundo, no mínimo, a 20 cm acima do nível superior do reservatório térmico e este, no mínimo, a 10 cm acima do lado superior dos coletores. A altura da caixa não deve exceder à pressão máxima de trabalho do reservatório térmico. A tubulação de alimentação deve ter registro de gaveta e fazer um sifão de, pelo menos, 50 cm acima de sua parte mais baixa e próxima ao reservatório térmico, a fim de evitar o retorno de água quente para a tubulação de alimentação, que deve ter registro de gaveta e uma queda mínima de 3%. Entre o nível inferior do boiler e a saída de água quente do coletor deve existir um desnível de pelo menos 0,6 m. Segundo aquele autor, uma desvantagem da circulação natural é que a baixa velocidade de fluxo da água pode ocasionar deposição de sais, diminuindo a seção dos tubos (conseqüente diminuição da eficiência do sistema) e, eventualmente, até do depósito de água quente (boiler).

No que diz respeito ao ângulo de inclinação do coletor em relação ao plano horizontal, para pequenas latitudes (inferiores a 15°), como é o caso da cidade de Natal-RN, o seu valor é equivalente à latitude local acrescida de 10°.

Na circulação forçada, utiliza-se uma bomba para promover a circulação do fluido entre o coletor e o boiler. Essa configuração apresenta a vantagem de permitir a utilização do coletor solar com a inclinação da latitude local, sem inclinação adicional. É um sistema indicado para médias e grandes instalações (acima de 15 placas e depósito de 1500L).

No caso do presente projeto, a circulação utilizada é do tipo termossifão e a troca de calor é de modo direto, sendo o fluido de aquecimento a própria água de produção. Esse sistema é facilmente conectado ao destilador solar, de modo que, quando o registro (ou válvula) é aberto, a água quente do boiler seja conduzida ao destilador, onde é tratada.

## 4.9. Dados Técnicos

### 4.9.1. Destilador Solar

Função: Destilação solar da água produzida.  
(Fabricação própria – UFRN).  
Tipo: Tanque raso; Duas águas; Simples efeito.  
Área útil: 1 m<sup>2</sup>.  
Inclinação na cobertura: 20°.  
Tipo de vidro: Comum liso (cobertura e tanque).  
Espessura do vidro: 6 mm.  
Metal da base: Alumínio.  
Espessura da chapa metálica: 2 mm.  
Isolamento térmico: Compensado de madeira.  
Espessura do isolamento: 0,01 m.  
Condutividade térmica do isolamento: 0,12 W/m.K

### 4.9.2. Coletor solar

Função: Pré – aquecimento da água produzida.  
Identificação: Placa Coletora Solar Max Soletrol  
Modelo: MAX AL. 2,00 M<sup>2</sup> - VERTICAL C/C PP

#### 4.9.2.1. Dimensões:

Comprimento: 2000 mm.  
Largura: 1000 mm.  
Altura: 55 mm.  
Área coletora nominal: 2,06 m<sup>2</sup>.  
Área coletora real: 2,0 m<sup>2</sup>.  
Diâmetro dos tubos de entrada e saída de água: 22 mm.  
Diâmetro do tubo de entrada de água fria da rede e o diâmetro do tubo de saída de água quente: 28 mm.

#### 4.9.2.2. Especificações Técnicas

Caixa externa: perfis de alumínio.  
Cantoneiras em material termoplástico.  
Tipo de vidro: Comum liso – 3 mm.  
Placa absorvedora de cobre, com pintura especial.

Diâmetro interno do tubo do absorvedor: 0,009 m.  
Diâmetro externo do tubo do absorvedor: 0,01 m.  
Espaçamento entre tubos: 0,10 m.  
Aletas em alumínio.  
Vedação em borracha de silicone.  
Isolamento térmico: Poliuretano rígido.  
Espessura do isolamento: 0,023m.  
Condutividade térmica do isolamento: 0,023 W/m.K  
Peso aproximado: 22 kg.  
Pressão de trabalho: até 40 m.c.a (metros de coluna d'água).  
Isolamento térmico dos tubos de conexão: Espuma de poliuretano.

- Faixa: **A**
- Eficiência Energética Média: **59,7 %**
- Produção Média Mensal de Energia: **137 kWh/mês**

#### **4.9.3. Reservatório térmico**

Função: Armazenamento da água aquecida no coletor  
Modelo: 200 Litros HZ. MAX D60.  
Tipo: Cilíndrico, horizontal.  
Capacidade: 200L.  
Diâmetro (externo): 600 mm  
Comprimento: 900 mm  
Material interno: Aço inoxidável AISI (chapa).  
Peso (cheio): 217 kg.  
Isolamento: poliuretano expandido sem CFC.  
Revestimento externo: alumínio.

#### **4.9.4. Caixa d'água**

Função: Alimentação (fria) do coletor.  
Capacidade: 250L.  
Material: Polietileno.  
NBR 14799

#### **4.9.5. Medição e aquisição de dados**

##### **4.9.5.1. Sensor de temperatura**

Função: Medição de temperatura

Tipo: Pt100.

Faixa de temperatura: 0 a 120°C.

Haste em Aço Inox 316, 3x300 mm (dxc).

Pote selado 10x30 mm (dxc).

Cabo de silicone - 2 m.

Precisão: 0,2%

##### **4.9.5.2. Data logger (Registrador)**

Função: Aquisição e armazenamento dos dados de temperatura.

Modelo: LogBox-AA.

2 canais de entrada Universais.

(Uso do software LogChart II - configuração, coleta, visualização e exportação dos dados).

##### **4.9.5.3. Interface de comunicação**

Função: Transferência dos dados do datalogger para o PC.

Modelo: IrLink3-USB.

Cabo de 1,7m e conector USB.

Comunicação entre o LogBox e o PC: infra-vermelho.

Comunicação com o PC: Porta USB ou RS232.

OBS: Fonte dos dados da seção 4.9.5: [www.novus.com.br](http://www.novus.com.br).

---

---

**Capítulo V**  
METODOLOGIA

---

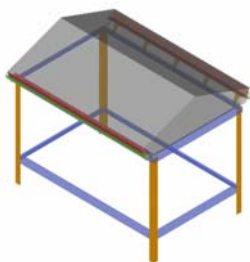
---

## 5. METODOLOGIA

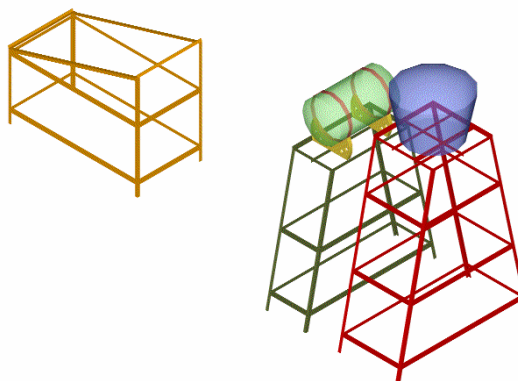
### 5.1. Materiais e equipamentos

Os materiais que foram utilizados nesse trabalho são: Escalímetro, para medida do nível de água no tanque; proveta de 1000 mL, para medição do volume de destilado coletado em um determinado período; 2 provetas de 100 mL, para medição da vazão de destilado em cada canaleta; 2 frascos de vidro de 1L e 2 bombonas de 20L, para coleta do destilado em cada canaleta; frascos de vidro (âmbar) de 1L para coleta, conservação em geladeira e posterior análise da água; 5 sensores de temperatura (termorresistências tipo PT-100); 3 caixas registradoras, para armazenamento e configuração dos dados dos sensores; 1 interface de comunicação (USB com leitor infra-vermelho), para transferência dos dados dos registradores a um computador; computador, para visualizar e salvar os dados obtidos.

Para o desenvolvimento do projeto, foram utilizados os seguintes equipamentos, que compõem o sistema de pré-aquecimento solar: Uma caixa d'água com capacidade para 250L; um reservatório térmico de 200L; um coletor solar plano de 2m<sup>2</sup> de área útil; e as respectivas tubulações de cobre (revestidas com isolamento térmico) para a conexão do sistema. Esses equipamentos foram adquiridos e instalados por uma empresa especializada na área de aquecimento solar. Para compor o sistema solar, destaca-se o destilador solar. Este foi projetado e desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Mecânica da UFRN (Universidade Federal do Rio Grande do Norte), assim como todos os suportes metálicos para o sistema. O destilador solar é de simples efeito; tanque raso, tipo duas águas; tem 1m<sup>2</sup> de área e apresenta 20° de inclinação na cobertura. Além disso, ele possui a particularidade de ter as canaletas, a cobertura e o tanque sendo todos de vidro, constituindo uma só unidade. Uma projeção 3D para o destilador e para o sistema de pré-aquecimento, ambos com os suportes, são mostrados, respectivamente nas figuras 5.1 e 5.2.



**Fig. 5.1** - Projeção 3D do destilador solar.



**Fig. 5.2** – Projeção 3D do sistema de pré-aquecimento.



## 5.2. Metodologia empregada

O primeiro passo na metodologia do projeto foi realizar uma revisão bibliográfica dos usos da energia solar e de sua aplicação no tratamento de águas. Estudou-se o destilador solar e a teoria envolvida no processo de destilação. Foi dada ênfase ao estudo de otimização de sistemas solares para tratamento de águas, com o objetivo de chegar a uma configuração que permita o tratamento de vazões moderadas de água produzida mantendo as características intrínsecas dos destiladores solares, como o baixo custo de manutenção e operação. Foi necessária a pesquisa sobre equipamentos que poderiam ser utilizados junto ao destilador solar no sistema, como o coletor solar plano.

O piranômetro, para medição da radiação solar instantânea, não foi adquirido, pois demanda um custo razoável. Em substituição a esse equipamento se buscou acessoria junto ao INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – para aquisição dos dados de radiação solar, além de outros dados meteorológicos, como índice pluviométrico e temperatura do ar. Esses dados, de um modo geral, apresentaram coerência com os resultados experimentais, sendo, portanto, satisfatórios.

Uma malha de controle foi elaborada para o sistema, de modo a avaliar e prever o seu comportamento. A elaboração de malhas de controle é útil para estudo de ampliação de escala, onde o sistema opera de forma contínua ou semi-contínua, e precisa, portanto, de mecanismos de controle para uma operação segura e eficaz.

No caso do sistema solar, a princípio, a variável que deve ser controlada é o nível de água no destilador. Além da questão de segurança (evitar transbordamento), o controle de nível é necessário para manter o nível ótimo de água no tanque do destilador, o que, por sua vez, é importante para aumentar a eficiência do processo. Esse controle é bastante simples, necessitando basicamente de um sensor de nível e de uma válvula solenóide. No entanto, deve-se perceber as particularidades do sistema, como a pequena lâmina de água e a alta temperatura do fluido, o que dificulta a obtenção de um sensor de nível adequado a essa situação. Baseando-se nas pesquisas em endereços eletrônicos específicos e na orientação de um dos colaboradores do projeto, o controlador de nível poderia ser do tipo chave ótica, com detecção da presença ou ausência de líquido. Esse tipo de controle não é rigoroso, mas suficiente para o tipo de aplicação do projeto. O fluxograma do sistema solar com a malha de controle pode ser visualizado na figura 5.3.

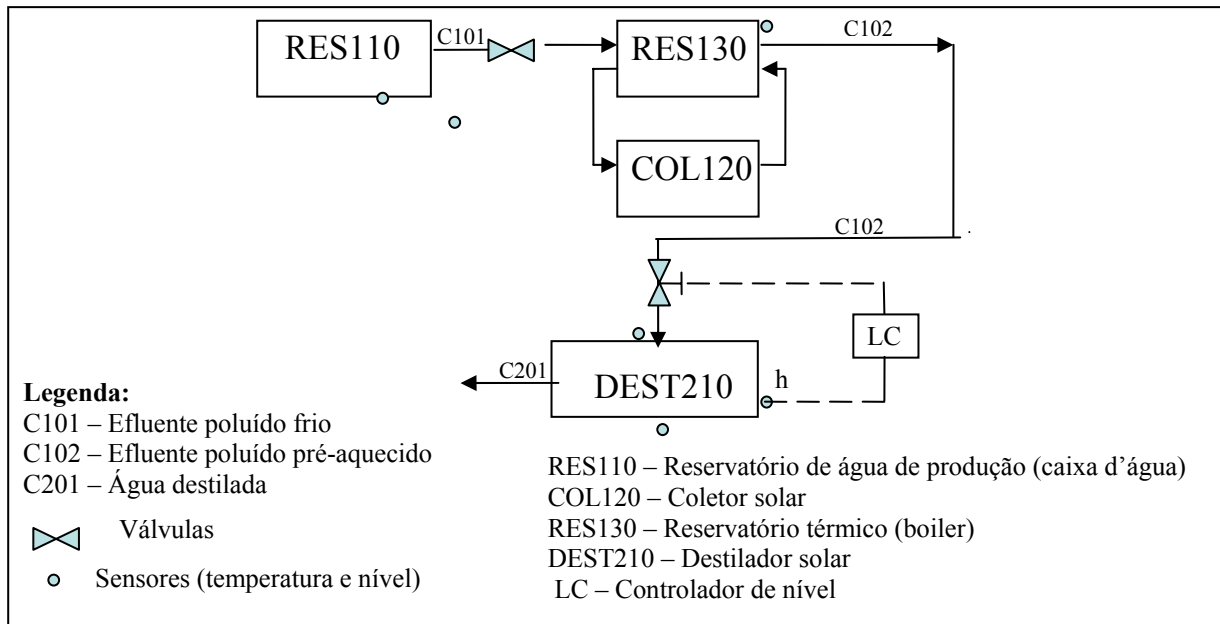


Fig. 5.3 - Fluxograma do sistema solar com malha de controle.

Nesse fluxograma pode-se observar que a água a ser tratada parte fria da caixa d'água e alimenta o boiler (reservatório térmico). A válvula que promove essa alimentação deve estar sempre aberta, pois o boiler necessita permanecer cheio para operar corretamente, já que possui um respiro aberto à pressão atmosférica. Do boiler, uma parte da água vai para o coletor solar, onde é aquecida pela incidência do sol, e pelo processo de termossifão, já explicado anteriormente (item 4.8.1), permanece em circulação nesses dois equipamentos. Por fim, a válvula que alimenta o destilador é aberta, permitindo a entrada de água aquecida no mesmo.

Vale salientar que a figura 5.3 não mostra a corrente de resíduo da destilação, que são os saís depositados no tanque, ou um concentrado elevado de saís, pois a mesma não existe continuamente, sendo estimada, uma pequena parada no sistema para a limpeza do tanque do destilador. Uma forma de se ter essa corrente de resíduo continuamente seria através da adição de um reciclo na mesma, que iria alimentar a caixa d'água, necessitando de uma bomba, pois esta se encontra a certa altura do destilador, onde há uma elevada perda de carga.

Como já informado, o controle de nível previsto para a água no tanque do destilador pode ser realizado por um sensor de nível e uma válvula solenóide. Segundo Thomazini & Albuquerque (2005), apud Basso (2008), solenóides são atuadores, ou seja, são dispositivos que modificam uma variável controlada: Recebem um sinal proveniente do controlador e agem sobre o sistema controlado, sob a ação de um eletroímã que provoca o deslocamento da haste da válvula.

Essa malha, apesar de não possuir controle de temperatura e ser, portanto, menos estável, atende às necessidades do sistema, tendo as vantagens de manter a configuração do aquecedor solar e ser mais simples.

Um controle de temperatura da água no boiler também é fundamental para a operação contínua do sistema. Uma alternativa para implementar esse controle de modo simples, sem alterar a vazão de alimentação do coletor, seria através da instalação de um controlador de temperatura (termostato) com uma resistência elétrica no boiler. Desse modo, na medida em que a temperatura do boiler fosse inferior ao valor desejado, a resistência elétrica seria ligada. Quando a temperatura atingisse o valor desejado, a resistência seria desligada, resultando em um controle não preciso, mas satisfatório para esse projeto. Apesar do gasto adicional de energia elétrica com o funcionamento desse termostato, esse controle apresenta a importante vantagem de não interferir na vazão de alimentação do boiler, o que seria mais complexo.

Como pode ser observado na figura 5.3, foram realizadas medidas de temperatura no boiler, na caixa d'água, no ar e principalmente no destilador solar, na fase vapor (no interior do destilador) e na fase líquida (água do tanque). Além disso, teve-se a aquisição de dados de temperatura ambiente, radiação solar e índice de precipitação pluviométrica. Para as medições de temperatura nos pontos anteriormente mencionados, foram utilizadas termorresistências (sensores de temperatura) do tipo PT-100, de aço inox, com uma faixa de temperatura de 0 a 120°C.

### **5.3. Metodologia experimental**

Com relação aos experimentos, estes foram realizados já na escala piloto, pois tal fato auxilia em estudos posteriores de ampliação de escala.

O sistema solar, como informado, é composto de um sistema de pré-aquecimento solar (aquecedor solar) e do destilador solar. A água que alimenta o sistema de pré-aquecimento origina-se de uma caixa d'água e o destilador solar recebe a água do boiler (pré-aquecida) e é o equipamento responsável pelo tratamento da água de produção. A metodologia experimental está fundamentada em testes no sistema solar (piloto) e encontra-se dividida em quatro etapas: Testes no sistema de pré-aquecimento; Testes no destilador solar; Testes no sistema solar; Otimização do sistema.

A metodologia de medição e aquisição das temperaturas é resumida nas seguintes etapas seqüenciadas:

1. Medição das temperaturas através de PT-100 (termo resistências) de aço inox, nos seguintes pontos: No boiler, na caixa d'água, no destilador (líquido e vapor) e no ambiente (temperatura do ar);
2. Coleta dos dados de temperatura nos registradores (feita durante ou após as medições), com leitura a cada minuto;
3. Transmissão dos dados do registrador para um computador, realizada a partir de uma interface de comunicação (infravermelho – USB);
4. Obtenção de dados de: Temperatura do ar, radiação solar incidente e precipitação pluviométrica, adquiridos através do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais);
5. Tratamento dos dados obtidos, com geração de gráficos em planilhas eletrônicas;

A figura 5.4 mostra o interior do destilador em operação, em que estavam sendo medidas as temperaturas (no líquido e no vapor) por dois PT-100. A figura 5.5 apresenta o procedimento utilizado para transmissão dos dados obtidos (no registrador) para um computador, em que essa transmissão é feita a partir de uma interface (por infravermelho).



**Fig. 5.4** – Interior do destilador com medição das temperaturas do líquido e do vapor.



**Fig. 5.5** – 2 PT-100 conectados a um registrador, com transmissão de dados a um PC.

### 5.3.1. Testes no sistema de pré-aquecimento

No sistema de pré-aquecimento, no período de Maio a Agosto de 2008, foram realizados testes com água comum e com solução aquosa salobra (sintética), com concentrações de NaCl (Cloreto de Sódio) próximas a 1000 ppm (mg/L), que é a concentração de sais normalmente presente na água de produção na saída de emissários Petrobrás (depois de ter passado por diversos tratamentos), destinada ao descarte no mar, sem aproveitamento. O tratamento desse efluente, portanto, constitui-se no foco deste trabalho. Depois desses testes iniciais, foram realizados testes no sistema solar com água produzida, cedida pela empresa *Petrobrás S/A*.

Com relação à solução aquosa salobra, pode-se dizer que a mesma foi utilizada com o intuito de simular a água produzida. Essa solução foi preparada do seguinte modo: Pesou-se em uma balança analítica no laboratório 250g de NaCl. Este foi então adicionado lentamente (e sob RAMOS, R. E. M.

agitação) à caixa d'água (de capacidade de 250L), preenchida anteriormente com água comum (água de abastecimento). Ao final, fez-se a homogeneização na mesma.

No que diz respeito aos experimentos com a água comum, estes foram realizados a partir do final do mês de Maio de 2008, quando o sistema de pré-aquecimento foi montado, até a metade do mês de junho desse mesmo ano, época em foram iniciados os testes com a água salobra. A partir de Setembro foram iniciados os testes com água produzida. Em maiores detalhes, os experimentos com água salobra foram realizados nos dias 26, 28, 29 e 30 do mês de Maio e nos dias 03, 05, 06, 10, 11, 13 e 14 de Junho. Nos dias 30/05 e nos dias 03/05 e 06/06, houve precipitação pluviométrica. As medições de temperatura da solução salobra foram feitas nos meses de Junho, Julho e Agosto de 2008. Já as medições de temperatura da água produzida realizaram-se no período de Setembro de 2008 a Fevereiro de 2009.

### 5.3.2. Testes no destilador solar

Foram realizados testes de funcionamento do destilador solar com água comum, com solução sintética salobra a 1000 ppm de NaCl e com água produzida. Esses experimentos foram feitos com a alimentação do destilador em batelada. Para medição da quantidade de destilado coletada foram utilizados dois frascos de vidro de 1L, sendo cada um deles usado em uma das laterais, na saída das canaletas. Os valores obtidos foram, então, lidos em uma proveta de 1000 mL. A coleta de destilado em cada lado separadamente foi realizada com o intuito de perceber alguma falha na geometria do destilador e de detectar possíveis vazamentos.

Para a medida da vazão de destilado produzido a cada minuto foi tomado o seguinte procedimento: Colocaram-se duas provetas de 100 mL em substituição aos frascos de coleta e mediu-se, diretamente, a quantidade de destilado obtido em cada uma delas. As leituras foram feitas a cada hora em um intervalo de tempo variável, que foi cronometrado. Para a obtenção da vazão por minuto dividiu-se o volume obtido pelo intervalo de tempo usado na coleta (em min.).

Por fim somaram-se as vazões obtidas em cada lado, obtendo-se o volume total de destilado por minuto (vazão) a cada hora medida (das 08h26min às 17h26min). Com esses valores, calculou-se então a vazão média (em um dia típico de sol) a ser utilizada na alimentação do destilador continuamente pelo sistema de pré-aquecimento (sem controle de nível da lâmina d'água no tanque). Para a manutenção do nível de lâmina d'água no tanque do destilador, necessariamente, deve-se ter a vazão de alimentação do destilador (entrada) igual à vazão de destilação (saída). Desse modo, não há acúmulo de água no tanque e pode-se afirmar que se está operando em regime permanente ou estacionário (no qual as propriedades não variam com o tempo).

Análises físico-químicas da água estudada, antes e após o processo de destilação, são essenciais para comprovar a eficácia do tratamento solar de águas. As análises realizadas foram: pH; condutividade; índice de cloretos; índice de cátions e ânions. Para as análises, foram coletadas amostras do afluente (alimentação), do destilado e do efluente (resíduo ou concentrado). As amostras foram resfriadas a 4°C, em geladeira. Os resultados das análises podem ser visualizados no capítulo “VI” (resultados e discussão).

Existem dois modos de alimentar o destilador em batelada. O primeiro caso consiste na alimentação de uma quantidade específica de água (15L, por exemplo), permanecendo assim por vários dias destilando até que toda a água alimentada evapore e deixe no tanque somente os sais secos. Desse modo, a água do tanque fica a cada dia mais concentrada, mas com um nível gradativamente menor; no segundo caso, alimenta-se o destilador com uma quantidade fixa, mede-se o nível da lâmina d'água, e, então, ao final de cada dia de operação, preenche-se o tanque com mais água, de modo a manter o mesmo nível inicial. Nessa configuração, a água fica cada vez mais concentrada, com um nível aproximadamente constante.

O modo de alimentação usado nesse trabalho foi o primeiro caso mencionado. No entanto, para operação contínua do destilador alimentado pelo boiler (“sistema solar”), se mantém o nível ótimo da água do tanque constante. Por outro lado, no caso de se fazer alimentação intermitente, a operação será mais próxima do primeiro modo de alimentação, de modo que as duas configurações devem ser estudadas.

### **5.3.3. Testes no sistema solar**

Os testes no sistema solar configuram-se como a última etapa de experimentos no sistema piloto. Esses testes foram feitos, primeiramente com água salobra (1000 ppm NaCl), e em seguida, com água de produção. No teste preliminar do sistema solar, deu-se partida no mesmo (alimentação contínua do destilador pelo boiler) às 19h20min do dia 01/08/08, com enchimento do tanque do destilador a uma vazão de alimentação média de 4,1mL/min. Outros testes foram realizados, mantendo-se uma vazão de alimentação próxima àquela. Os resultados podem ser visualizados na seção de resultados de temperatura no destilador para operação contínua (seção 6.2.3.2).

### **5.3.4. Otimização do sistema**

Essa etapa representa a otimização: Do sistema de pré-aquecimento; do destilador; do sistema solar como um todo. Além disso, ela envolve também uma modelagem para o coletor solar,

que permite identificar os parâmetros que mais influenciam na eficiência do coletor. Essa análise é importante para uma futura ampliação de escala. A otimização de cada parte do sistema em separado e do sistema completo constitui-se na análise e configuração dos parâmetros que propiciem a melhor eficiência e produtividade para o sistema.

Para a otimização do sistema de pré-aquecimento, melhorou-se o isolamento térmico das tubulações. Com exceção da tubulação de saída da caixa d'água (alimentação fria), todas as outras foram envolvidas com espuma de Poliuretano, revestidas com fita espelhada de Alumínio, pois enquanto existe uma diferença de temperatura, a água permanece em circulação no circuito fechado (coletor-boiler), e, portanto, as tubulações de conexão, especialmente por serem constituídas por um material com elevada condutividade térmica (o cobre), são propensas a trocarem calor com o ar ambiente; Para a otimização do destilador, aumentou-se a inclinação das canaletas. Em trabalhos futuros, pode-se, ainda, otimizar a altura da lâmina d'água do tanque. Sabe-se que quanto menor o nível de água mais rápida é a evaporação; Foi otimizada ainda, a transferência de calor entre a chapa metálica e o tanque de vidro, pois o tanque foi diretamente posto em contato com a chapa metálica, quando antes havia um espaço de ar separando esses constituintes; Outro parâmetro importante é o isolamento térmico do destilador, que se otimizado, permite um aumento na eficiência energética, pois como visto na seção 4.4.2 (balanço energético no destilador), ocorre uma minimização nas perdas energéticas para o ambiente, responsáveis pela diminuição da eficiência energética do destilador; Além disso, Bilal et al (1998) afirmam que a produtividade de um destilador solar pode ainda ser aumentada com a presença de alguns materiais absorventes no tanque, como corantes, tintas e tapete de borracha.

A otimização do sistema solar é feita a partir de configurações de alimentação que resultem na maior produtividade do destilador solar. Em virtude de fatores climáticos desfavoráveis e problemas técnicos, a otimização do sistema não foi realizada. Algumas alternativas para tal são apresentadas na sessão 6.2.1 (produtividade do destilador).

---

---

# **Capítulo VI**

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

---

---



## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados encontram-se divididos em resultados do sistema de pré-aquecimento e resultados do destilador.

### 6.1. Sistema de pré-aquecimento

#### 6.1.1. Temperaturas no boiler e na caixa d'água

Com relação aos resultados obtidos no sistema de pré-aquecimento, foram obtidos dados de temperatura no boiler e temperatura do ar, primeiramente para o sistema operando com água comum (de abastecimento), e depois, com os testes com solução salobra sintética de NaCl (Cloro de Sódio) a 1000 ppm (mg/L). Em cada uma das figuras 6.1 e 6.2 é mostrada, respectivamente, a variação com o tempo da temperatura da água comum no boiler, da temperatura do ar e da radiação solar global média; Na seqüência, são mostrados os mesmos tipos de gráficos para a água salobra a 1000 ppm de NaCl (figura 6.3 e figura 6.4). Em ambos os casos, as medições foram feitas durante dois dias consecutivos, sem interrupção.

Essa medida foi tomada com o intuito de analisar quanto a temperatura da água no boiler diminui nas horas sem radiação solar. Como pode ser observado nos gráficos mencionados, o sistema de pré-aquecimento apresenta um comportamento esperado, ou seja, durante toda a noite (para dias distintos), a temperatura da água no boiler, tanto para o sistema operando com água comum quanto com solução salobra, só baixou em torno de 5°C em relação à temperatura média (54,8 °C) e, aproximadamente, 10 °C em relação ao pico de temperatura obtido (59,2 °C), o que resultou em uma temperatura mínima próximo a 50 °C. Esse fato permite uma alimentação quente da água a ser tratada no destilador, de forma contínua, mesmo nas horas sem radiação solar. Tal característica, com certeza, é satisfatória para que o sistema opere ininterruptamente.

Por fim, foram realizadas medidas de temperatura também na água da caixa d'água (alimentação do sistema de pré-aquecimento), no período de 01 a 13 de Setembro de 2008. Os resultados encontram-se na figura 6.5, que apresenta também a variação das temperaturas do boiler e do ar (medida e a variação dada pelo INPE). As temperaturas na caixa d'água foram próximas das temperaturas do ar, porém apresentando uma maior elevação nos horários de pico de sol (próximos do meio-dia), o que é resultado do aquecimento da caixa (de material plástico) com a exposição à radiação solar. Tal fato é positivo para a operação do aquecedor solar, pois a água fria da caixa que alimenta o boiler terá uma temperatura mais elevada. As temperaturas do ar dadas pelo INPE foram

um pouco inferiores às temperaturas medidas no sistema (média de 1 °C menor). Por enquanto ainda não se sabe o motivo do ocorrido. Somente com mais análises feitas é que se pode chegar a uma conclusão a respeito.

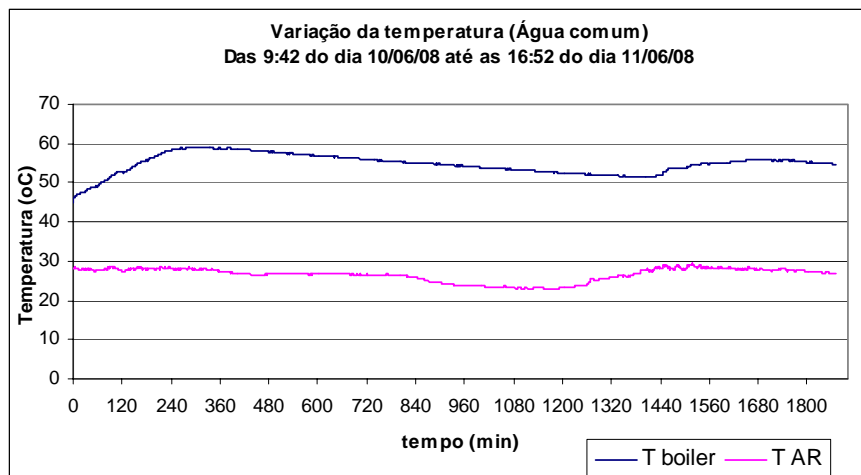


Fig. 6.1 - Variação da temperatura no Boiler para a água comum.

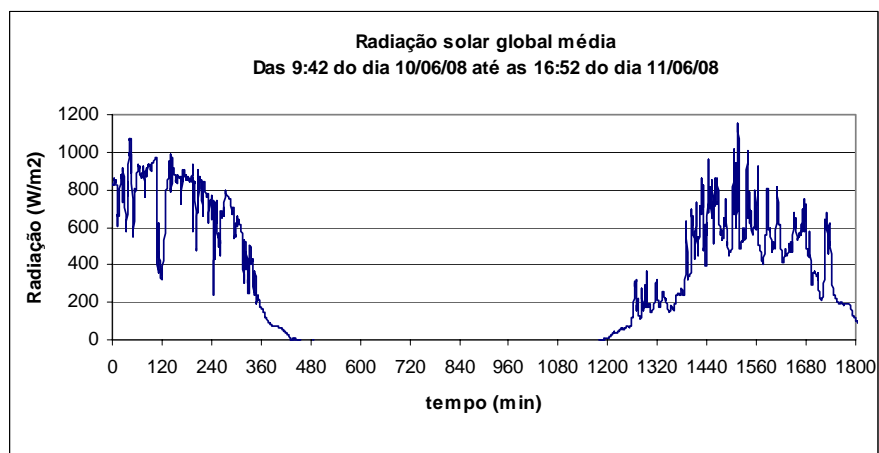


Fig. 6.2 - Variação da radiação solar global média.

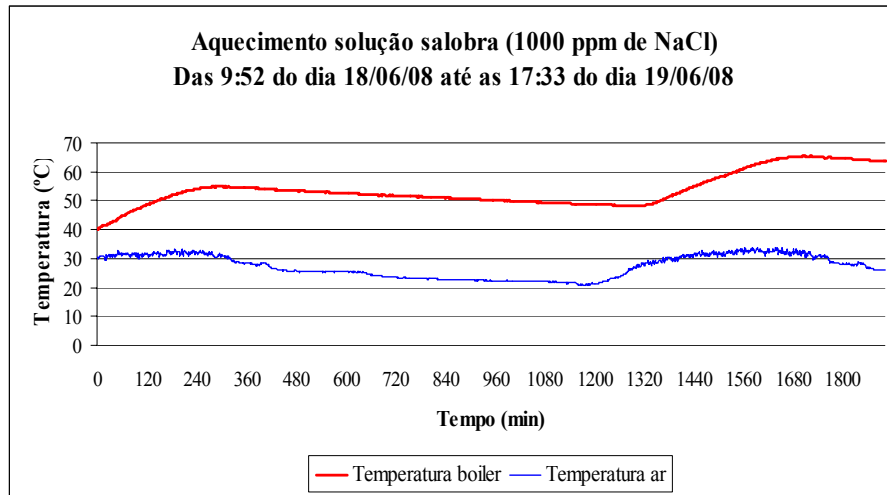


Fig. 6.3 - Variação da temperatura no Boiler para a solução salobra.

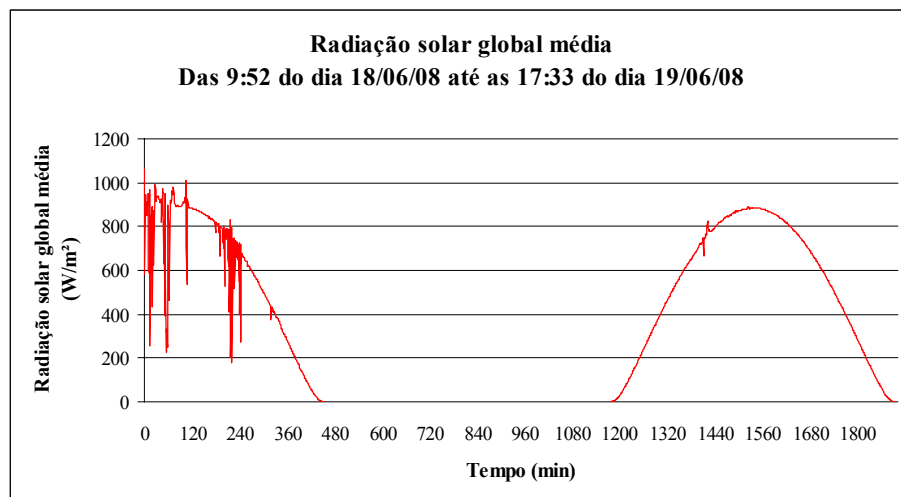


Fig. 6.4 - Variação da radiação solar global média.

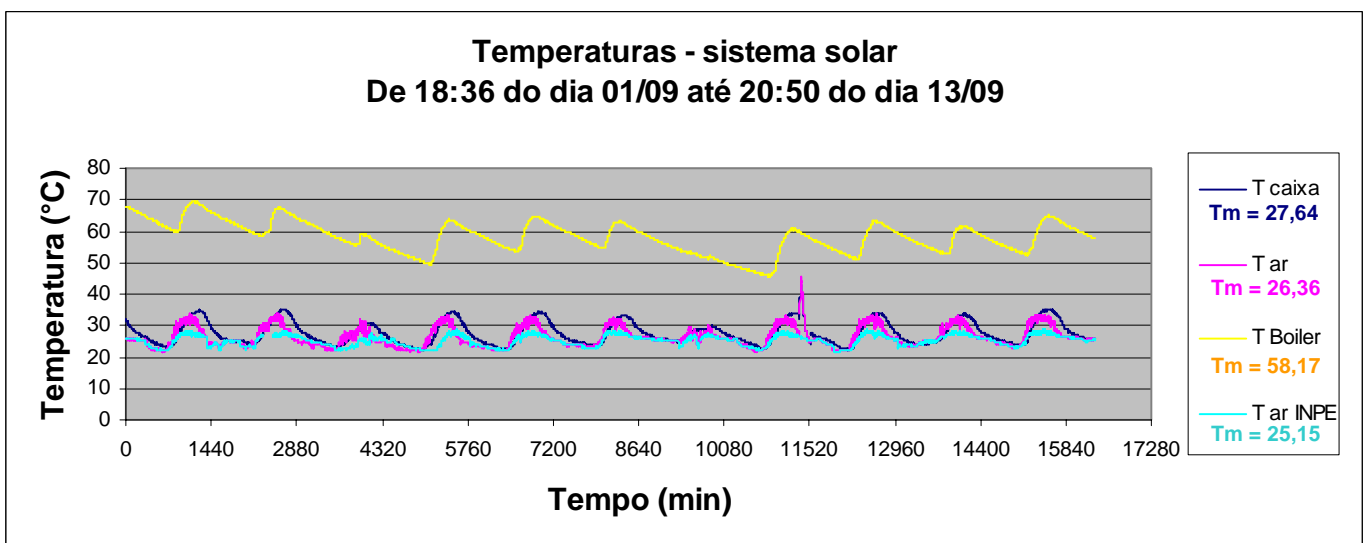


Fig. 6.5 - Variação das temperaturas do boiler, caixa d'água e ar.

### 6.1.2. Modelagem e simulação do coletor solar

Uma modelagem e uma simulação foram feitas para o coletor solar a partir das equações do balanço energético desse equipamento (Anexo I), que foram retiradas da literatura, especialmente de Duffie et al (1991). A figura 6.6 apresenta o recorte em três partes da planilha utilizada para os cálculos (do Microsoft Excel 2003). A planilha mostra as variáveis enumeradas na ordem de cálculo, em que se diferem as variáveis dependentes (calculadas) e as variáveis independentes (parâmetros). As variáveis calculadas estão apresentadas na fonte verde, enquanto que os parâmetros apresentam-se em vermelho, azul ou preto; os valores em vermelho são estimativas, tanto por cálculos quanto por dados climatológicos do INPE; as variáveis em azul são parâmetros retirados da literatura, especialmente de Incropera et al (1996); os parâmetros em preto são relativos à geometria do coletor, dados do fabricante; as células em amarelo indicam tanto os parâmetros geométricos quanto os que se referem aos materiais constituintes do coletor; e as células D62 a D70 mostram as estimativas calculadas de algumas variáveis.

Os dados de radiação solar global média e temperatura do ar foram estimados com base em informações climatológicas para a cidade de Natal – RN (das 07h às 17h, diariamente), obtidos do INPE, em que a radiação global média apresentou um valor médio anual de, aproximadamente, 600 W/m<sup>2</sup> (célula D60 da fig. 6.6) e a temperatura média do ar correspondente foi de 27,4 °C (célula D25). De acordo com a literatura e resultados da tabela 6.4 (seção 6.2.2), utilizou-se uma composição da radiação global de 40% de radiação difusa e 60% de radiação direta (células D56 e D55, respectivamente).

Como mostra a figura 6.6 (Parte III), a eficiência resultante para o coletor solar foi de, aproximadamente, 58,9% (célula D61), apresentando um erro relativo de apenas 1,35% (célula D71) em relação ao valor de eficiência dado pelo fabricante desse coletor (59,7%). Esse resultado é bem próximo da realidade, o que torna a modelagem e simulação satisfatórias e adequadas para análise.

Nº	Nome da variável	Variável	Valor	Unidade principal
1	Temperatura média da placa (°C)	$T_{pm}$	57,02	°C
2	Temperatura média da cobertura (°C)	$T_{cm}$	30,23	°C
3	Temperatura média da placa (K)	$T_p$	330,02	K
4	Temperatura média da cobertura (K)	$T_c$	303,23	K
5	Temperatura do ar no coletor	$T_{ar}$	316,625	K
6	Coefficiente volumétrico de expansão do ar	$\beta'_{ar}$	0,0031583	$K^{-1}$
7	Diferença de temperatura entre a placa e a cobertura	$\Delta T$	26,79	K
8	Aceleração da gravidade	$g$	9,81	$m/s^2$
9	Espaçamento entre a placa e a cobertura	$L$	0,022	m
10	Viscosidade cinemática do ar	$\nu_{ar}$	1,71E-05	$m^2/s$
11	Difusividade térmica do ar	$\alpha_{ar}$	2,43E-05	$m^2/s$
12	Número de Rayleigh	$Ra$	2,13E+04	Adimensional
13	Ângulo de inclinação do coletor	$\beta$	16	°
14	Número de Nusselt	$Nu$	2,81E+00	Adimensional
15	Condutividade térmica do ar	$k_{ar}$	0,0276086	W/m.K
16	Coef. de transferência de calor por convecção entre a placa e a cobertura	$h_{c,p-c}$	3,5217056	$W/m^2.K$
17	Constante de Stefan-Boltzmann	$\sigma$	5,67E-08	$W/m^2.K^4$
18	Emissividade da placa	$\epsilon_p$	0,03	Adimensional
19	Emissividade da cobertura	$\epsilon_c$	0,9	Adimensional
20	Coef. de transferência de calor por radiação entre a placa e a cobertura	$h_{r,p-c}$	0,215641	$W/m^2.K$
21	Perda de calor pelo topo do coletor	$q_{loss,top}$	100,12351	$W/m^2$
22	Resistência à transferência de calor entre a placa e a cobertura	$R_{p-c}$	0,2675695	$m^2.K/W$

Fig. 6.6 – Modelagem e simulação do coletor solar – Parte I.

23	Temperatura ambiente (°C)	$T_a$	27,4	°C
24	Temperatura "do céu"	$T_s$	294,4	K
25	Temperatura ambiente (K)	$T_a$	300,4	K
26	Coef. de transferência de calor por radiação entre a cobertura e o ambiente	$h_{r,c-a}$	16,99659	$W/m^2.K$
27	Coef. de transf. de calor convectivo entre cobertura e ambiente (vento)	$h_w$	18,4	$W/m^2.°C$
28	Resistência à transferência de calor entre a cobertura e o ambiente	$R_{c-a}$	0,0282513	$m^2.K/W$
29	Coefficiente de perda de calor do coletor pelo topo	$U_t$	3,3804246	$W/m^2.K$
30	Condutividade térmica do isolamento do fundo do coletor	$k_i$	0,023	W/m.K
31	Espessura do isolamento no fundo do coletor	$L_i$	0,021	m
32	Coefficiente de perda de calor do coletor pelo fundo	$U_b$	1,0952381	$W/m^2.K$
33	Coefficiente global de perda de calor do coletor	$U_f$	4,4756627	$W/m^2.K$
34	Condutividade térmica da placa	$k_p$	401,98	W/m.K
35	Espessura da placa	$\delta_p$	0,001	m
36	Dimensional de aleta	$m$	3,3367714	$m^{-1}$
37	Espaçamento entre os tubos	$W$	0,1	m
38	Diâmetro do tubo (interno)	$D$	0,009	m
39	Fator de eficiência da aleta	$F$	0,9923868	Adimensional
40	Coefficiente de transferência de calor no interior dos tubos	$h_{fi}$	300	$W/m^2.°C$
41	Fator de eficiência do coletor	$F'$	0,9436267	Adimensional
42	Vazão mássica média de fluido no coletor	$m_f$	0,0041	kg/s
43	Capacidade calorífica do fluido	$C_{pf}$	4181,3	J/kg.K
44	Área do coletor	$A_c$	2	$m^2$
45	Adimensional razão de vazão mássica	$\omega$	2,0295867	Adimensional
46	Fator de vazão do coletor	$F''$	0,7895747	Adimensional

Fig. 6.6 – Modelagem e simulação do coletor solar – Parte II.

	A	B	C	D	E
49	47	<b>Fator de remoção do coletor</b>	$F_R$	<b>0,7450638</b>	Adimensional
50	48	<b>Transmitância da cobertura</b>	$\tau$	<b>0,85</b>	Adimensional
51	49	<b>Absorvidade da placa</b>	$\alpha$	<b>0,94</b>	Adimensional
52	50	<b>Radiação solar absorvida (radiação solar incidente menos perdas ópticas)</b>	$S$	<b>485,92197</b>	W/m <sup>2</sup>
53	51	<b>reflectância do solo</b>	$\rho_g$	<b>0,6</b>	Adimensional
54	52	<b>refletância difusa</b>	$\rho_d$	<b>0,16</b>	Adimensional
55	53	<b>Incidência solar direta</b>	$I_b$	<b>360</b>	W/m <sup>2</sup>
56	54	<b>Incidência solar difusa</b>	$I_d$	<b>240</b>	W/m <sup>2</sup>
57	55	<b>Temperatura de entrada do fluido (°C)</b>	$T_{fi}$	<b>30</b>	°C
58	56	<b>Temperatura de entrada do fluido (K)</b>	$T_{fi}$	<b>303</b>	K
59	57	<b>Calor útil</b>	$Q_u$	<b>706,74554</b>	W
60	58	<b>Radiação solar global incidente (média anual)</b>	$G_T$	<b>600</b>	W/m <sup>2</sup>
61	59	<b>Eficiência do coletor</b>	$\eta$	<b>58,895462</b>	%
62	60	<b>Estimativa da Temperatura média da placa (K)</b>	$T_{pm}$	<b>330,01555</b>	K
63	61	<b>Estimativa da Temperatura média da placa (°C)</b>	$T_{pm}$	<b>57,015546</b>	°C
64	62	<b>Estimativa da Temperatura média da cobertura (K)</b>	$T_{cm}$	<b>303,22875</b>	K
65	63	<b>Estimativa da Temperatura média da cobertura (°C)</b>	$T_{cm}$	<b>30,228752</b>	°C
66	64	<b>Estimativa da Temperatura média do fluido no coletor (K)</b>	$T_{fm}$	<b>324,04168</b>	K
67	65	<b>Estimativa da Temperatura média do fluido no coletor (°C)</b>	$T_{fm}$	<b>51,041677</b>	°C
68	66	<b>Estimativa da vazão mássica média no coletor</b>	$m_f$	<b>0,0040995</b>	kg/s
69	67	<b>Estimativa da Temperatura de saída do fluido (K)</b>	$T_{fo}$	<b>344,22569</b>	K
70	68	<b>Estimativa da Temperatura de saída do fluido (°C)</b>	$T_{fo}$	<b>71,225686</b>	°C
71	69	<b>Erro relativo da eficiência</b>	$\epsilon$	<b>1,348</b>	%
72					

Fig. 6.6 – Modelagem e simulação do coletor solar – Parte III.

### 6.1.3. Análise de sensibilidade do coletor

A partir de uma modelagem feita para o coletor solar (seção 6.1.2.) baseada nas equações do balanço energético (Anexo I), pôde-se realizar uma análise de sensibilidade nos vinte e três parâmetros do coletor. A análise de sensibilidade é bastante útil no dimensionamento e operação de um equipamento ou processo industrial, sendo muito utilizada na engenharia química, pois permite descobrir, a partir de um modelo matemático, quais parâmetros mais influem em determinada variável. É realizada do seguinte modo: Faz-se um acréscimo de 1% no valor de um parâmetro e observa-se em quanto que a variável analisada vai mudar. No presente caso a variável em questão foi a eficiência do coletor ( $\eta$ ).

Os resultados são mostrados na tabela 6.1, em ordem decrescente de influência. Pode-se perceber claramente que os parâmetros mais influentes são a transmitância da cobertura e a absorvidade da placa; Já para a condutividade térmica e a espessura da placa, diferente do que se pensa, a influência na eficiência do coletor é quase inexistente. Assim, a vantagem maior em se utilizar o cobre como material constituinte da placa absorvedora está no elevado valor da

absorvidade que ele confere à placa; As variações negativas apresentam-se na letra azul e significam que um acréscimo no parâmetro resulta na diminuição da eficiência. Para o caso da área útil do coletor ( $A_C$ ), percebe-se que um aumento no seu valor, mantendo os demais parâmetros constantes, resulta na diminuição da eficiência do coletor, pois o aproveitamento energético por unidade de área do coletor é menor.

**Tabela 6.1** - Resultados da análise de sensibilidade para a eficiência média do coletor.

Parâmetro	Sigla	Varição em $\eta$
Transmitância da cobertura	$\tau$	<b>1,025</b>
Absorvidade da placa	$\alpha$	<b>0,867</b>
Temperatura de entrada do fluido	$T_{fi}$	<b>-0,282</b>
Área do coletor	$A_C$	<b>-0,226</b>
Vazão mássica do fluido no coletor	$m_f$	<b>0,226</b>
Capacidade calorífica esp. do fluido	$C_{pf}$	<b>0,226</b>
Temperatura ambiente	$T_a$	<b>0,187</b>
Espessura do isolamento do coletor	$L_i$	<b>0,071</b>
Condutividade térmica do isolamento do coletor	$k_i$	<b>-0,071</b>
Espaçamento entre placa e cobertura	$L$	<b>0,058</b>
Espaçamento entre os tubos	$W$	<b>-0,049</b>
Diâmetro interno do tubo	$D$	<b>0,041</b>
Coef. de transf. de calor no interior dos tubos	$h_{fi}$	<b>0,039</b>
Incidência solar direta	$I_b$	<b>0,020</b>
Reflectância do solo	$\rho_g$	<b>0,012</b>
Emissividade da placa	$\epsilon_p$	<b>-0,010</b>
Refletância difusa	$\rho_d$	<b>0,010</b>
Emissividade da cobertura	$\epsilon_c$	<b>-0,010</b>
Velocidade média dos ventos	$v$	<b>-0,008</b>
Ângulo de inclinação do coletor	$\beta$	<b>0,008</b>
Incidência solar difusa	$I_d$	<b>0,005</b>
Condutividade térmica da placa	$k_p$	<b>0,005</b>
Espessura da placa	$\delta_p$	<b>0,005</b>

## 6.2. Destilador solar

### 6.2.1. Produtividade

Com relação aos dados de produtividade (ou rendimento) do destilador, o resultado da medição da vazão de destilado em um dia típico de sol pode ser observado na figura 6.7, tipo coluna, com a vazão de destilação versus a hora do dia. Percebe-se que a vazão do líquido destilado varia com o tempo de forma semelhante à radiação solar em dias ensolarados e pode ser

razoavelmente aproximada a uma curva polinomial de ordem dois. Esta apresenta um máximo na hora de maior insolação medida (nesse caso, 12h26min), como pode ser observado. O ponto referente às 16h26min não pôde ser medido devido a problemas técnicos, mas uma vazão média de destilado durante todo o dia pôde ser estimada, sendo de 3,6 mL/min, que corresponde à vazão de alimentação a ser usada enquanto não se faz o controle de nível da água no tanque do destilador.

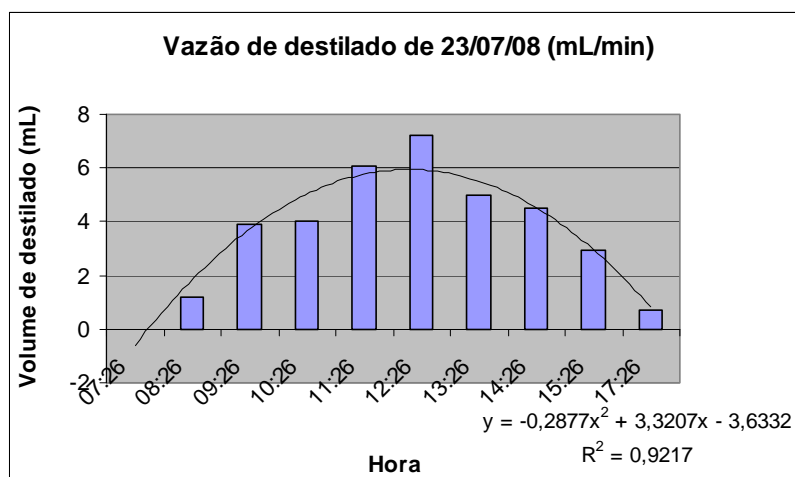


Fig. 6.7 - Vazão de destilado durante um dia.

Tabela 6.2 - Volume diário destilado.

Dia	Destilado (L)
14/7/2008	1,605
19/7/2008	1,640
23/7/2008	1,861
24/7/2008	1,638
<b>Média</b>	<b>1,686</b>

Os volumes de destilado foram obtidos para quatro dias ensolarados e estão apresentados na tabela 6.2. Percebe-se que a vazão de destilado é ainda pequena (inferior a 2L/m<sup>2</sup>d), mas deve-se levar em consideração que essas medidas foram realizadas no inverno, quando a radiação solar é mais baixa. Além disso, nesse projeto, as canaletas do destilador não possuem inclinação, sendo o suporte inclinado. Dessa forma, com o aumento da inclinação do suporte, pode-se evitar uma considerável reevaporação da água destilada na canaleta, o que resulta em perda de produtividade de água destilada, e conseqüentemente, em menor eficiência, como será visto na seção 6.2.2. A reevaporação é bem provável de ocorrer, pois a água, devido ao equilíbrio L-V (líquido-vapor) condensa ainda quente, tendendo a evaporar novamente se não for coletada logo.

Na Tabela 6.3 são apresentados: o volume de destilado coletado por dia; o tipo de operação; a radiação solar global e a difusa; e a precipitação pluviométrica, no período de 30/09/08 a 10/10/08. A ocorrência de precipitação acarreta diretamente no menor volume destilado, como é o caso dos dias 01, 08 e 09 de Outubro. Assim, por exemplo, comparando-se os dias 7 e 8 de Outubro, que apresentam todos os tipos de radiação solar com valores bem aproximados, o volume destilado do dia 7 foi mais de 10% acima do volume coletado no dia 8, quando ocorreu precipitação pluviométrica.

Comparando-se a tabela 6.3 com a tabela 6.2, percebe-se que o volume de destilado durante todos os sete dias de medição do mês de outubro é bem superior ao destilado de quaisquer RAMOS, R. E. M.



dos quatro dias de coleta do mês de julho. Nesse caso, o volume médio coletado em Outubro (2,44 L) foi superior em 40% do volume médio coletado no mês de Julho (1,69 L). Tal fato deve-se provavelmente a três fatores: à radiação solar, que em Julho é inferior à de Outubro; à inclinação da canaleta, que foi aumentada no mês de Agosto do mencionado ano, com o aumento da inclinação do suporte metálico do destilador; à nova configuração do destilador, com o tanque de vidro diretamente em contato com a chapa metálica, que propiciou uma melhor transferência de calor da chapa para o tanque, e deste para a água. Infelizmente, a estação solarimétrica do INPE estava em reforma no mês de Julho de 2008 e, portanto, não foi possível fazer uma comparação quantitativa precisa em termos de eficiência do destilador solar entre Julho e Outubro, no entanto foi feita uma estimativa da eficiência média do destilador em Julho de 2008, baseada na radiação solar média no mês de Julho de 2009 para dias ensolarados (seção 6.2.2.).

Vale salientar ainda, que o tipo de fluido, se água comum ou água produzida, não apresentou praticamente diferença no volume de água que foi destilada. O mesmo fato ocorreu com o tipo de alimentação do sistema, se contínuo ou em batelada, que também foi indiferente nesse parâmetro. Esse resultado era previsível, pois a alimentação contínua foi de apenas um gotejamento aproximadamente constante, com o intuito de manter o mesmo nível de lâmina d'água no tanque.

Desse modo, outras configurações de alimentação contínua deverão ser testadas em trabalhos futuros. Pode-se, por exemplo, dar a partida no sistema no início do dia a fim de aproveitar melhor o calor da água do boiler; talvez um fluxo laminar com reciclo aumente a produtividade; pode-se utilizar uma alimentação intermitente de uma fina lâmina d'água com a água quente do boiler; Segundo Fuentes et al (1997), uma pressão de vácuo aumentaria consideravelmente a taxa de evaporação, aumentando conseqüentemente, a destilação, mas é um processo caro; outra solução seria a incidência de ventilação no interior do destilador, processo que favoreceria a transferência de massa (líquido para o vapor), já que o ar de entrada é bem seco se comparado com o ar presente no destilador, e ainda, permitiria um resfriamento na cobertura, favorecendo a condensação do vapor.

**Tabela 6.3** - Volume destilado, tipo de operação, radiação solar e precipitação pluviométrica, de 30/09/08 a 10/10/08.

$m_p$ (L/d)	Tipo de operação	Fluido	$G_T$ Méd. (W/m <sup>2</sup> .d)	$G_T$ total (W/m <sup>2</sup> .d)	$I_d$ Méd. (W/m <sup>2</sup> .d)	$I_d$ Total (W/m <sup>2</sup> . d)	Precip. (mm)	Data
2,660	Batelada	Água comum	654,292	393229,600	160,053	96191,950	0	30/set
2,548	Batelada	Água comum	673,744	404920,250	150,000	90149,87	0,254	1/out
Não med.	Contínuo	Água produzida	539,679	324347,07	250,430	150508,400	0	3/out
2,434	Contínuo	Água produzida	582,012	349789,340	250,232	150389,300	0	4/out
2,430	Contínuo	Água produzida	592,334	355993,000	286,610	172252,800	0	5/out
Não med.	Batelada	Água produzida	643,736	386885,220	250,050	150279,800	0	6/out
2,456	Batelada	Água produzida	612,05	367842,32	245,701	147666,200	0	7/out
2,422	Batelada	Água produzida	657,394	395093,630	203,218	122133,900	1,27	8/out
2,197	Batelada	Água produzida	521,118	313192,030	294,537	177016,600	3,81	9/out
Não med.	Contínuo	Água produzida	714,859	429630,58	158,104	95020,74	0	10/out

### 6.2.2. Eficiência

A tabela 6.4 mostra o resultado da eficiência diária média efetiva do destilador solar, obtida a partir dos dados de radiação solar global média, do calor latente de evaporação médio e do rendimento do destilador. A eficiência é dada através da equação da eficiência efetiva de um destilador solar (Equação 04), em que a integral foi calculada utilizando o método dos trapézios.

$$\eta = \frac{m_p \sum_{i=1}^{n-1} [(h_{fg(i)} + h_{fg(i+1)}) \cdot (t_{(i+1)} - t_{(i)}) / (2)]}{A_C \cdot \sum_{i=1}^{n-1} [(G_{T(i)} + G_{T(i+1)}) \cdot (t_{(i+1)} - t_{(i)}) / (2)]} \quad (04)$$

Na Equação 04  $h_{fg(i)}$  ou  $G_{T(i)}$  é a base menor do trapézio “i” (b);  $h_{fg(i+1)}$  ou  $G_{T(i+1)}$  é a correspondente base maior (B);  $(t_{(i+1)} - t_{(i)})$  é a altura respectiva (h). A área de um trapézio qualquer é dada pela relação:  $((b + B) \cdot h) / 2$ .

No entanto, verificou-se que se utilizando o valor médio, ao invés da regra do trapézio (integral), tanto do calor latente de evaporação quanto da radiação solar global incidente, se obteria

um valor equivalente para a eficiência, pois através de cálculos em planilha eletrônica, obteve-se que o somatório dos histogramas equivale ao valor médio multiplicado pelo tempo do experimento (10 horas, no caso). O erro relativo correspondente é inferior a 0,2%. Assim temos:

$$\eta \cong \frac{m_p \sum_{i=1}^n [(h_{fg(i)}) \cdot (t_{(i+1)} - t_{(i)})]}{A_C \sum_{i=1}^n [(G_{T(i)}) \cdot (t_{(i+1)} - t_{(i)})]} \cong \frac{m_p \cdot \overline{h_{fg}} \cdot (\text{tempo do exp.})}{A_C \cdot \overline{G_T} \cdot (\text{tempo do exp.})} = \frac{m_p \cdot \overline{h_{fg}}}{A_C \cdot \overline{G_T}} \quad (11)$$

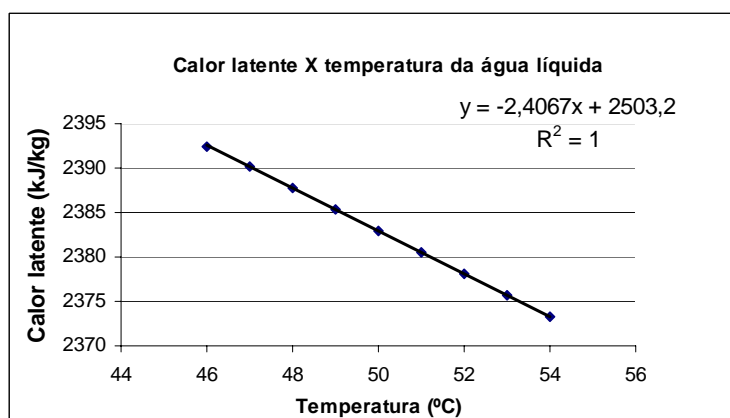
A vantagem em se utilizar o valor médio está na maior simplicidade de aquisição dos dados para o calor latente de evaporação da água, visto que o seu valor muda com a temperatura do líquido do destilador, que varia consideravelmente ao longo de um dia. Esse fato pode ser verificado nas figuras 9, 10, 11, 14, 15 e 17 da seção 6.2.3 (Temperaturas e radiação solar). Assim, utilizou-se o valor médio diário da temperatura do líquido no destilador para obter-se o calor latente médio de evaporação da água, dado a partir de uma aproximação linear de tabelas de vapor saturado (retiradas de Van Ness et al, 1996), que pode ser visualizada na figura 6.8. O calor latente de evaporação utilizado para a água produzida foi o mesmo da água comum, como uma aproximação, já que houve praticamente indiferença no volume de destilado coletado em relação ao fluido utilizado (Tab. 6.3).

Percebe-se pela análise da tabela 6.4 que quanto maior é o valor médio da radiação diária, mais elevada é a temperatura média da fase líquida do destilador. A obtenção dessa temperatura média é necessária para se conhecer o valor do calor latente ( $h_{fg}$ ), que como já informado, decresce linearmente com o aumento da temperatura da água (figura 6.8).

A eficiência média obtida para o destilador, nos dias de experimento (Tab. 6.4), foi de 27,18%, cerca de 14% inferior ao valor ideal encontrado na literatura para esse tipo de destilador (de 38% a 43%). Tal fato é coerente, pois o isolamento térmico utilizado no fundo do tanque do destilador foi divergente do recomendado pela literatura, bem como a espessura do mesmo (10 vezes menor). Além disso, o tanque utilizado é de vidro, que possui uma baixa condutividade térmica; a porcentagem da radiação difusa na radiação global foi de 38,32%, condizente com o valor encontrado na literatura (40%, em média); o volume médio de destilado obtido foi de 2,52 L; o valor médio da radiação global média, para Outubro de 2008 foi de 615,2 W/m<sup>2</sup>.d (das 07h às 17h); a temperatura média resultante do líquido no destilador foi de 50,6 °C.

**Tabela 6.4** – Eficiência efetiva média diária do destilador solar considerando 10 horas de incidência solar.

DATA	$m_p$ (L/d)	$\overline{G_T}$ (W/m <sup>2</sup> .d)	$\overline{I_d}$ (W/m <sup>2</sup> .d)	$\overline{T_{liq}}$ (°C)	$\overline{h_{fg}}$ (kJ/kg)	$\overline{I_d} / \overline{G_T}$ (%)	$\overline{\eta}$ (%)
1/10/2008	2,548	673,74	150,00	52,95	2375,77	22,26	24,96
4/10/2008	2,434	582,01	250,23	51,05	2380,34	42,99	27,65
5/10/2008	2,430	592,33	286,61	50,38	2381,95	48,39	27,14
7/10/2008	2,456	612,05	245,70	50,28	2382,19	40,14	26,55
8/10/2008	2,422	657,39	203,22	50,97	2380,53	30,91	24,36
9/10/2008	2,197	521,12	294,54	46,29	2391,79	56,52	28,01
18/10/2008	2,920	660,55	171,26	52	2378,05	25,93	29,20
19/10/2008	2,786	622,36	245,19	50,86	2380,80	39,40	29,60
<b>MÉDIA</b>	<b>2,524</b>	<b>615,20</b>	<b>230,84</b>	<b>50,60</b>	<b>2381,43</b>	<b>38,32</b>	<b>27,18</b>
<b>Média Julho</b>	<b>1,686</b>	<b>587,94</b>	-----	<b>50</b>	<b>2382,87</b>	-----	<b>18,98</b>

**Fig. 6.8** – Variação do calor latente de evaporação da água com a temperatura.

### 6.2.2.1. Eficiência otimizada

A partir de mudanças na configuração do destilador, mencionadas na seção 6.2.1. (4º parágrafo), uma comparação da eficiência antes e depois dessas mudanças foi realizada, percebendo-se um aumento de 42% em seu valor. Para a comparação foram utilizados os dados da destilação solar, respectivamente, em Julho e Outubro de 2008; para Outubro, como mostra a tabela 6.4, a eficiência efetiva média foi de 27,18%; já em Julho de 2008, o valor correspondente foi de apenas 18,98%. Para a estimativa, foi calculada a média da radiação solar global média em Julho de 2009, para dias sem precipitação pluviométrica (das 07 h às 17 h). Como não foram utilizados os dados da radiação solar para Julho de 2008, pois a estação solarimétrica do INPE estava em reforma nesse período, não se tem uma comparação mais precisa da eficiência. Para todos os efeitos, a comparação é consistente, pois mesmo assumindo que a média da radiação solar para Julho de 2008

fosse ainda menor,  $530 \text{ W/m}^2$ , por exemplo, a eficiência resultante seria de, aproximadamente, 21%, o que equivale ainda, a um aumento de 28,6%; No caso da média da radiação solar global média de Julho de 2008 ser superior ao valor encontrado para Julho de 2009 ( $587,94 \text{ W/m}^2$ ), a eficiência correspondente seria ainda menor (inferior a 18,98%). Assim, pode-se afirmar que, conforme esperado, mudanças na geometria do destilador provocam mudanças em sua eficiência.

### 6.2.2.2. Comparação entre os cálculos de eficiência

A tabela 6.5 mostra os resultados obtidos da eficiência efetiva do destilador solar para os mesmos dias apresentados na tabela 6.4. A diferença entre esses resultados é a forma de cálculo da eficiência: Para o primeiro caso apresentado (tabela 6.4), a eficiência foi calculada, como estimativa, a partir de valores médios do calor latente de evaporação da água ( $h_{fg}$ ) e de valores médios da radiação solar global ( $G_T$ ) para um mesmo período; já no segundo caso (tabela 6.5) utilizou-se o cálculo da eficiência para um período (no caso, um dia) baseado na integral com o tempo tanto de  $G_T$  quanto de  $h_{fg}$ . As integrais foram calculadas utilizando-se a regra do trapézio: a integral é calculada pelo somatório das áreas de trapézios sucessivos (abaixo da curva), em que a altura de cada trapézio é dada no eixo “x” (intervalo de tempo) e a base maior é o valor seguinte da base menor (eixo “y”)

A tabela 6.5 mostra que na eficiência média do destilador, com o cálculo baseado na média de  $G_T$  e de  $h_{fg}$ , o erro, em média, foi de aproximadamente 0,12% em relação à eficiência calculada através das integrais. Esse fato deve-se ao grande número de dados envolvidos, tanto de  $G_T$  quanto de  $h_{fg}$ , 600 cada (referentes a 600 minutos, o que equivale a 10 horas de experimento). Porém, apesar desse resultado é sempre aconselhado calcular as integrais para determinar com segurança a eficiência, especialmente quando se dispõe de um menor número de dados, onde o erro é bem mais relevante.

**Tabela 6.5** – Comparação da eficiência efetiva com a eficiência efetiva média.

DATA	$m_p$ (L/d)	$\int G_T \cdot dt$ ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{d}$ )	$\int h_{fg} \cdot dt$ (kJ/kg)	$\eta$ (%)	$\bar{\eta}$ (%)	Erro rel. (%)
1/10/2008	2,548	404699,7	1425416	24,93	24,96	0,1240
4/10/2008	2,434	349585,8	1425734	27,57	27,65	0,2742
5/10/2008	2,430	355926,8	1429132	27,10	27,14	0,1368
7/10/2008	2,456	367739,0	1429281	26,52	26,55	0,1290
8/10/2008	2,422	394311,2	1428281	24,37	24,36	0,0389
9/10/2008	2,197	312862,0	1435039	27,99	28,01	0,0632
18/10/2008	2,920	396881,7	1426787	29,16	29,20	0,1391
19/10/2008	2,786	373792,4	1428440	29,57	29,60	0,0878
<b>MÉDIA</b>	<b>2,524</b>	<b>369474,8</b>	<b>1428513,7</b>	<b>27,15</b>	<b>27,18</b>	<b>0,116</b>

### 6.2.2.3. Estimativa para vazões elevadas

Tomando como base a eficiência ótima para destiladores duas águas de um só efeito (43%), calculou-se, a partir da equação (11), que com 1m<sup>2</sup> de área do destilador (tanque), uma radiação solar média de 600 W/m<sup>2</sup> e uma temperatura média no destilador de 55 °C, o destilador deveria produzir 3,92 litros diários de água tratada. Para o tratamento de 80000 m<sup>3</sup>/d de água produzida (vazão encontrada em Guamaré – RN, em 2008), obteve-se que a área útil da destilação seria extremamente elevada, em torno de 20408163 m<sup>2</sup> (aproximadamente, 2041 hectares). Para tanto, é fundamental o estudo da otimização de sistemas que utilizem a energia solar, a fim de aumentar a sua produtividade e tornar viável a sua implementação em larga escala, ao menos como um tratamento adicional alternativo.

Vale destacar ainda que esse tipo de destilador do projeto seja o mais simples. Logo um sistema contínuo que resulte no aumento da produtividade desse destilador, com certeza provocará efeito semelhante em destiladores mais eficientes (de múltiplos efeitos).

$$\eta = \frac{m_p \cdot \overline{h_{fg}}}{A_C \cdot \overline{G_T}} \quad (11) \quad \longrightarrow \quad m_p = \frac{\eta \cdot A_C \cdot \overline{G_T}}{\overline{h_{fg}}} = 3,92L$$

$$A_C = \frac{80000m^3 \cdot 1m^2}{0,00392m^3} = 20408163m^2$$

### 6.2.3. Temperaturas e radiação solar

Medições de temperatura no destilador foram realizadas, primeiramente com a alimentação do destilador em batelada, e na seqüência, com a operação contínua do sistema solar.

#### 6.2.3.1. Operação em batelada

Foram obtidos dados das temperaturas do vapor e do líquido no destilador solar (figuras 6.9 a 6.11).

Na figura 6.9, pode-se visualizar a temperatura da água no boiler (solução salobra) e as temperaturas do líquido e do vapor no interior do destilador. Percebe-se que, diferentemente das temperaturas no destilador, a temperatura no boiler sofre uma leve queda de aproximadamente 5°C durante a madrugada do dia 23/07/08 e apresenta um máximo poucas horas depois do horário de maior insolação, acusando temperaturas próximas a 70°C, ou seja, com uma faixa de variação menor do que 15°C. Já as curvas das temperaturas no destilador assemelham-se a uma parábola, com uma significativa variação de quase 40°C na temperatura.

O fato crítico presente é a queda elevada de temperatura depois do pôr do sol até antes do amanhecer, fato este que inviabiliza o uso da alimentação do destilador com o sistema de pré-aquecimento no período noturno, já que a vazão de destilação média (3,6 mL/min.), correspondente à vazão de alimentação a ser usada enquanto não se faz o controle de nível da água no tanque do destilador, é bem inferior à massa de líquido presente no tanque do destilador (cerca de 20 L), o que a torna incapaz de aquecê-la. Esse fato repete-se nas figuras seguintes, 6.10 e 6.11, e confirma que o isolamento térmico do destilador é ineficiente e deve, portanto, ser otimizado, de forma a garantir a utilidade do sistema de pré-aquecimento não somente para dias ensolarados, mas também em dias nublados e chuvosos e mesmo durante a noite.

Na figura 6.10, tem-se a variação das temperaturas no destilador e no boiler durante três dias e meio, do dia 22/07 até o dia 25/07 de 2008. Podem-se observar dois picos maiores de temperatura, referentes aos dias 22 e 23, dias típicos de sol. No dia 25, que foi um dia chuvoso, as temperaturas no destilador mantiveram-se baixas; no boiler, as temperaturas foram sempre superiores e com uma pequena variação de um dia para o outro (de até 10 °C).

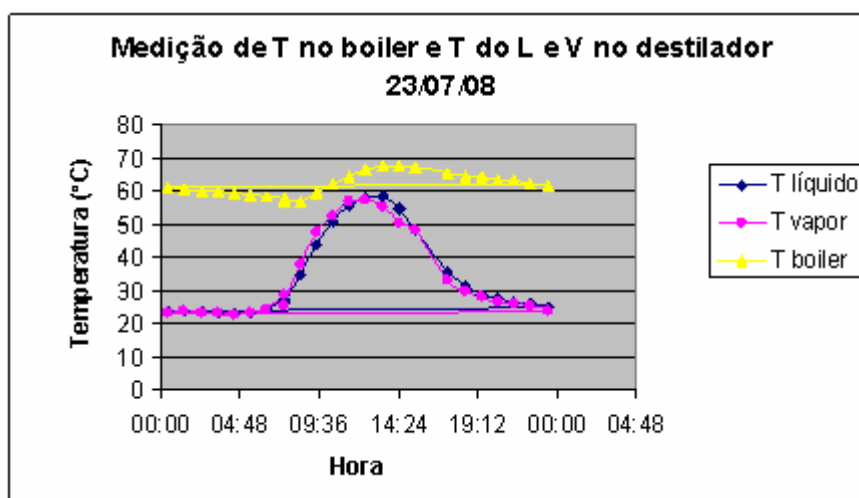


Fig. 6.9 - Variação das temperaturas no boiler e no destilador em um dia.

Por fim, foram feitas medições de temperatura para quatro dias consecutivos no destilador e no boiler, em que os dois últimos dias apresentaram elevados índices pluviométricos e praticamente não houve radiação solar direta. A figura 6.11 mostra a variação das temperaturas no boiler e no destilador nesses quatro dias, onde conforme ocorrido nos outros dias de medição, as temperaturas no destilador apresentaram uma elevada variação de um dia para o outro, diferentemente da temperatura da água no boiler, que variou em média somente 10 °C nos primeiros dias e 15°C no quarto dia, que foi o que apresentou menor radiação solar (figura 6.12). Esse gráfico trata da radiação solar, tanto a global quanto a difusa para o mesmo período considerado. Percebe-se que as temperaturas no destilador (figura 6.11) apresentam o mesmo comportamento que a radiação solar global para o mesmo período.

A radiação global, como explicado na seção 4.2 (Energia solar), é composta, essencialmente, pela radiação direta (incidência solar direta) e pela radiação difusa, que sofreu desvios, sendo menos intensa. Percebe-se que a componente da radiação difusa está presente em maior porcentagem nos dias onde a radiação global é menor, que corresponde, justamente, ao período de maior índice pluviométrico. Esse fato pode ser observado nas figuras 6.12 e 6.13.

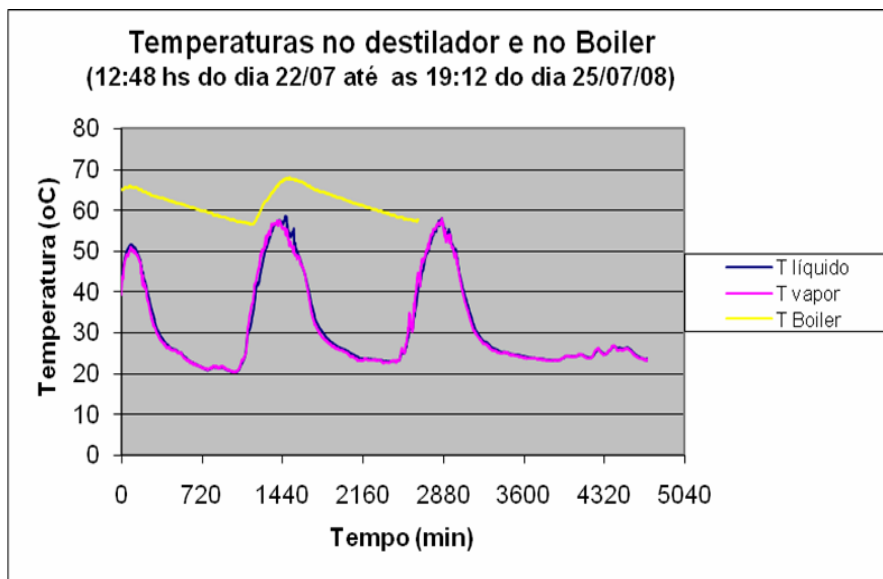


Fig. 6.10 - Variação das temperaturas no destilador e no boiler em três dias e meio.



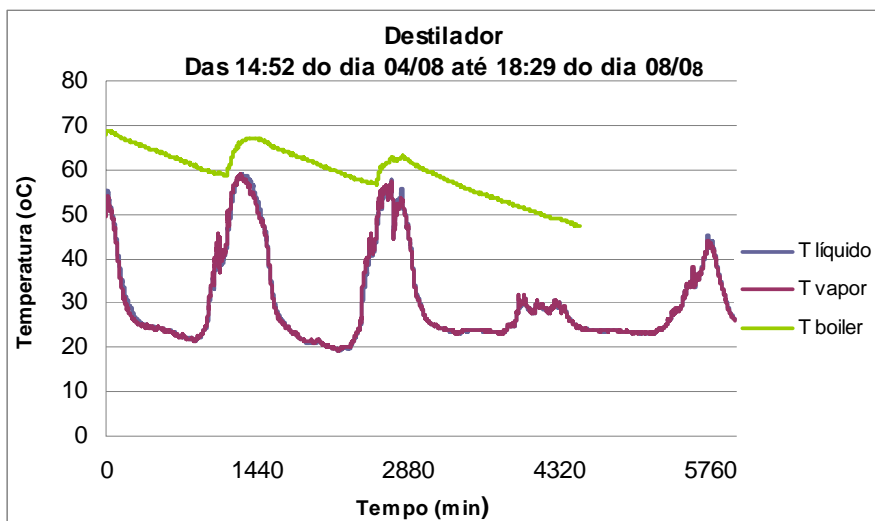


Fig. 6.11 - Variação das temperaturas no boiler e no destilador em quatro dias.

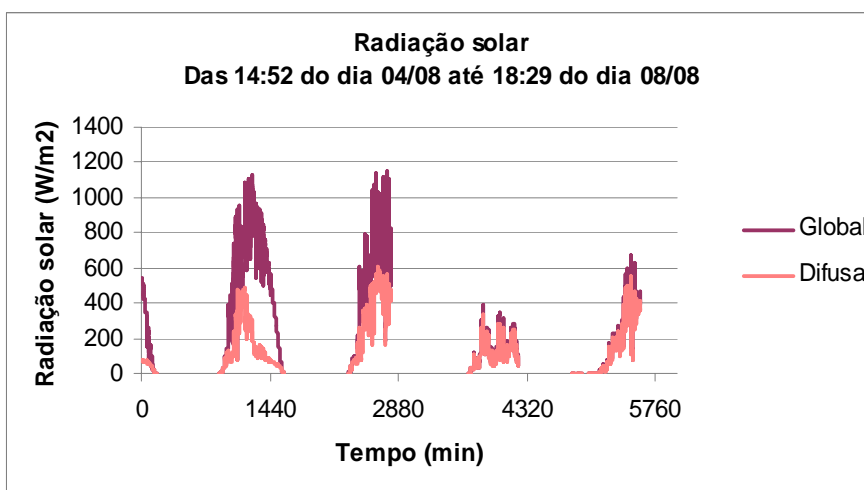


Fig. 6.12 - Variação da Radiação solar global e difusa em quatro dias.

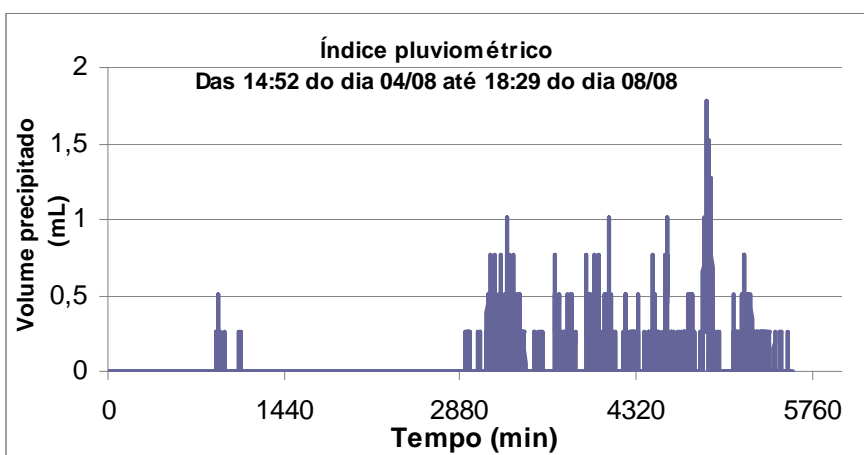


Fig. 6.13 – Índice pluviométrico em quatro dias.

### 6.2.3.2. Operação contínua

A figura 6.14 mostra as temperaturas no destilador e no boiler durante um período de pouco mais de 24 horas. Ele representa o experimento preliminar do sistema solar, com alimentação do destilador feita à noite com a temperatura do boiler, que estava bem elevada (acima de 60 °C). Devido a isso se percebe um pico de temperatura no tempo inicial das medidas no destilador. No entanto, como o tanque se encontrava em equilíbrio térmico com o ar ambiente (temperaturas em torno de 26 °C), o pico de temperatura alcançado para a água do tanque quando da alimentação do destilador teve um valor baixo (em torno de 44 °C). De qualquer modo, as temperaturas baixaram mais ainda durante a noite e a madrugada, o que mostra que a água do tanque está trocando calor livremente com o ambiente. A alimentação contínua por gotejamento (cerca de 4,0 mL/min.) não está impedindo tal fato.

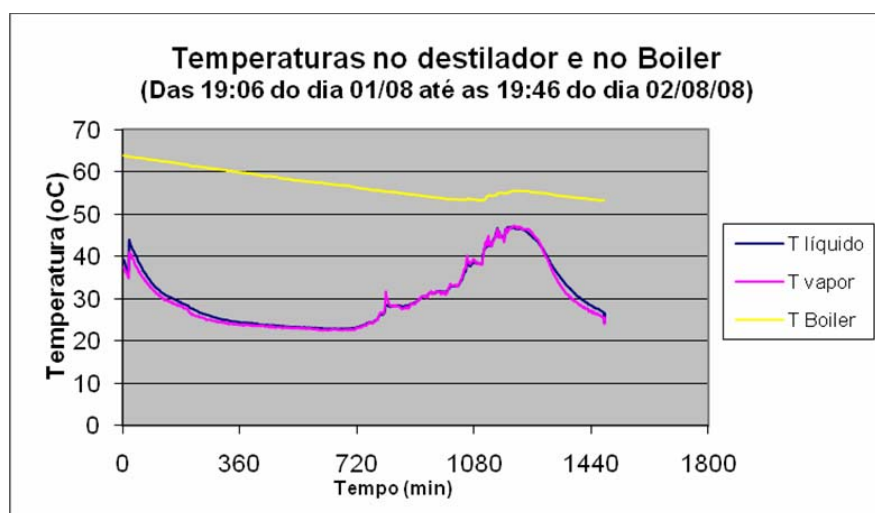


Fig. 6.14 - Variação das temperaturas no destilador e no boiler em 24h.

Nas figuras 6.15 e 6.17 são apresentadas, além das temperaturas do líquido e do vapor no destilador e da temperatura da água no boiler, as temperaturas do ar (adquiridas no endereço eletrônico do INPE). No primeiro caso, a alimentação foi feita no final da manhã e o sol já estava bastante "quente", logo as temperaturas do líquido e do vapor no destilador foram superiores às temperaturas da água no boiler para o mesmo período. A vazão de alimentação não foi medida, mas foi estimada em 0,5 L/h (8,3 mL/min.).

A figura 6.17 mostra que nos dias 03 a 05/10 a vazão média de alimentação foi de 0,3 L/h, que corresponde a 5 mL/min. (a válvula de alimentação é do tipo gaveta, de difícil controle da vazão, e esta varia, principalmente porque é muito baixa - gotejamento). As temperaturas elevadas (próximas a 70 °C) no início da medição, provavelmente, ocorreram porque os sensores estavam medindo a temperatura do vidro do tanque, onde as temperaturas são superiores às do líquido. A RAMOS, R. E. M.

ocorrência de precipitação entre os minutos próximos a 6945 e 8455 provocou um abaixamento nas temperaturas no destilador.

Ainda na figura 6.17, o sistema contínuo de alimentação foi utilizado no período de 03 a 05 de Outubro e no dia 10 desse mesmo mês, respectivamente às 12h20min e às 10h20min. Nos dois casos houve um sub-aproveitamento da temperatura alta do boiler para alimentação, pois o tanque do destilador já estava bastante aquecido. Desse modo, espera-se uma maior produtividade do sistema se a alimentação for realizada no início do dia, bem como, para outras configurações como um fluxo laminar com reciclo, alimentação intermitente, etc.

Nas figuras 6.15 e 6.17 pode-se visualizar que para períodos com baixa ou nenhuma radiação solar, as temperaturas no destilador tendem a se aproximar das temperaturas do ar ambiente. Para esses gráficos são mostradas, na legenda de cada um deles, as temperaturas médias de todas as variáveis: Temperaturas do líquido, do vapor, do ar ambiente e da água no boiler. Na figura 6.15, as temperaturas médias tanto do líquido quanto do vapor são razoavelmente elevadas (52 °C, em média). O mesmo não ocorre para as mesmas temperaturas na figura 6.17, que apresentam média de 37,5 °C. Tal fato ocorreu porque no mencionado gráfico, as medições foram realizadas em um período de vários dias consecutivos e a baixa média de temperatura é explicada pelo resfriamento do sistema nos períodos sem radiação solar; já o boiler demonstrou comportamento completamente diferente: Em ambas as figuras (6.15 e 6.17) a temperatura média foi praticamente a mesma (58,5 °C), o que comprova que o boiler opera nas mesmas condições para um só dia ou vários dias consecutivos; A temperatura média do ar foi um pouco inferior na figura 6.17. As figuras 6.16 e 6.18 mostram, respectivamente, a radiação solar global média para as duas medições.

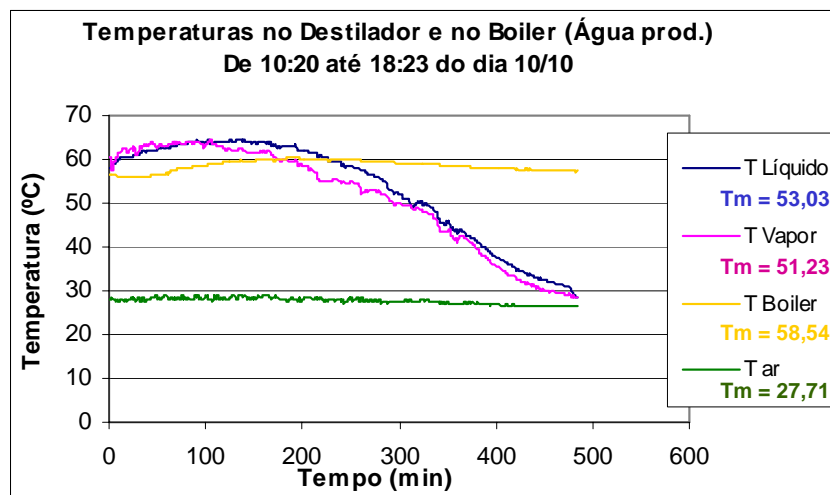


Fig. 6.15 - Temperaturas no destilador, no boiler e temperatura do ar para alimentação contínua.

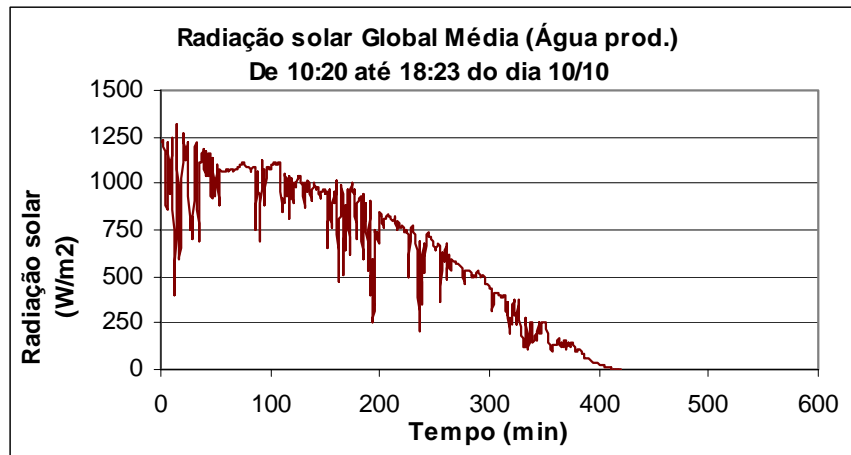


Fig. 6.16 - Radiação solar global média.

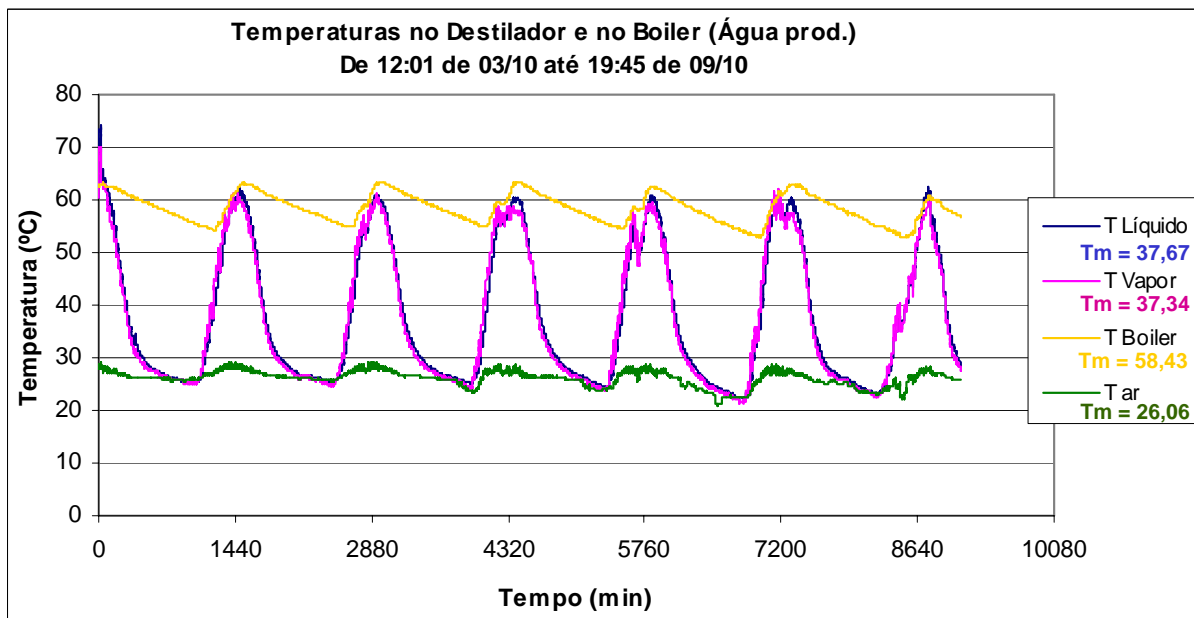


Fig. 6.17 - Temperaturas no destilador, no boiler e temperatura do ar para alimentação contínua e batelada.

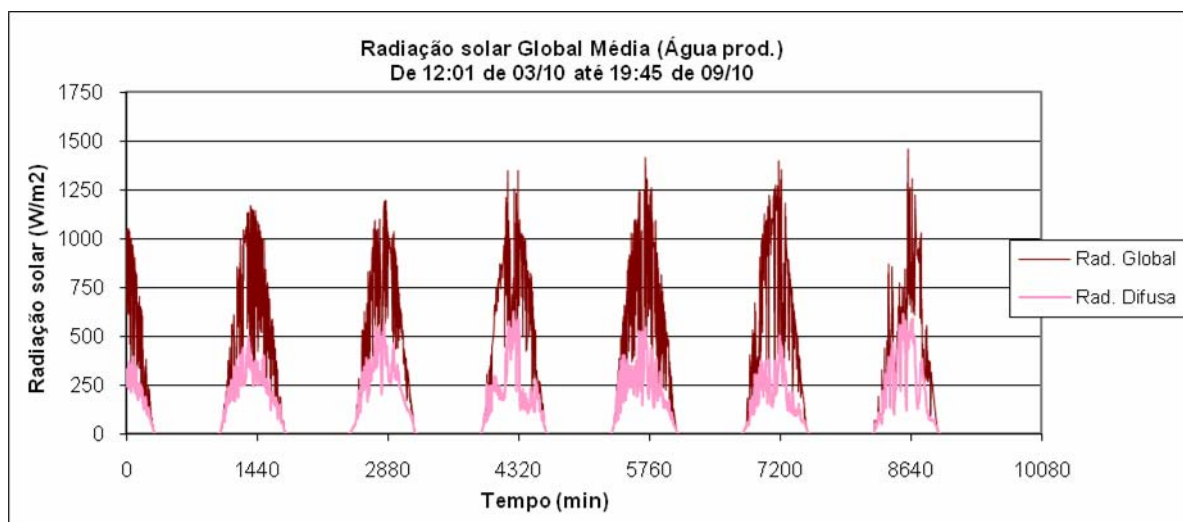


Fig. 6.18 - Radiação solar global média e difusa.

Outros experimentos foram realizados no período de Novembro a Fevereiro de 2009 e os resultados obtidos foram similares aos já apresentados.

Como pôde ser observado, em praticamente todas as figuras desta seção, especialmente nas figuras 6.15 a 6.18, a temperatura da água (líquido e vapor) no tanque do destilador não é diretamente dependente da temperatura ambiente. Na verdade, a temperatura no destilador tem uma relação mais íntima com a radiação solar incidente. Esse fato deve-se aos diferentes fatores que as influenciam: a temperatura ambiente sofre forte influência de ventos e umidade do ar, enquanto a temperatura do destilador é mais influenciada pela radiação solar incidente e as condições do céu (se o dia está nublado ou claro).

No entanto, percebe-se que nos períodos sem insolação (depois do pôr-do-sol e antes do amanhecer), as temperaturas do líquido e do vapor no destilador entram em equilíbrio térmico com a temperatura ambiente, alcançando valores próximos a 20 °C, o que é altamente indesejável para o sistema. Esse fato ocorreu devido à falta de um isolamento térmico eficiente para o destilador. Primeiramente, o isolamento inferior utilizado possui apenas 0,010 m de espessura, diferentemente do valor recomendado pela literatura, que é de 0,10 m de espessura, e o material isolante foi compensado naval, que apresenta uma condutividade térmica não muito baixa para ser usado como isolante térmico eficiente ( $k = 0,12 \text{ W/m.K}$ ); esse material também absorve umidade, o que aumenta a sua condução térmica em períodos chuvosos; além disso, pôde ser observado durante os experimentos no destilador, que em horários de forte insolação durante o dia, esse isolamento inferior apresentou certo aquecimento, o que confirma uma fuga de calor nessa região. Dessa forma, para que o sistema opere de maneira contínua, com destilação também à noite, é preciso que se tenha um isolamento térmico eficiente para o destilador. Segundo Ribeiro et al (2008), um compósito a base de gesso e EPS poderia ser utilizado satisfatoriamente nessa função.

Por fim, a tabela 6.6 mostra as temperaturas máxima e mínima já alcançadas, tanto no destilador solar quanto no boiler. Percebe-se que o boiler nessa configuração, pode ser seguramente útil para uma alimentação quente de água no destilador, já que a temperatura máxima alcançada no mesmo é superior à temperatura máxima alcançada no destilador e a temperatura mínima encontra-se na faixa de temperaturas normalmente alcançadas em uma destilação solar, que é de 40 °C a 70 °C.

**Tabela 6.6** – Temperaturas máxima e mínima para o boiler, o líquido e o vapor.

Medições	Temperatura máx.(°C)	Temperatura mín.(°C)
Líquido (destilador)	63,6	20,4
Vapor (destilador)	63,3	20,3
Boiler	69,6	40,0

### 6.2.3.3 Radiação solar anual

As figuras 6.19 e 6.20 apresentam a radiação solar global e difusa, e a precipitação pluviométrica para cada mês, respectivamente, do ano de 2008 e do ano de 2009 (em Natal - RN), sendo que para o ano de 2009 são mostrados os dados até o último mês do presente ano (Julho de 2009). Em cada uma dessas figuras pode-se perceber que a radiação Global média anual na mencionada cidade é em torno de  $500 \text{ W/m}^2$ ; a radiação máxima possui valores médios de  $1400 \text{ W/m}^2$  e se apresenta em maior intensidade nos meses de fevereiro, Março, Outubro, Novembro e Dezembro; já as precipitações pluviométricas ocorrem em maior quantidade nos meses onde a radiação global é menor, ou seja, no período de Março a Julho, embora tenham ocorrido em quantidades relativas nos meses de Agosto de 2008 e Fevereiro de 2009. É importante destacar que os valores de radiação obtidos nas figuras 6.19 e 6.20 consideram a radiação incidente em todo o dia, apresentando como radiação média um valor de aproximadamente  $500 \text{ W/m}^2$ ; Já nos experimentos, relativos ao coletor solar e destilador, a estimativa utilizada no projeto para os cálculos foi no intervalo de 07h às 17h, onde a radiação solar global média sobe para aproximadamente  $600 \text{ W/m}^2$ . Essa é uma estimativa mais consistente, pois considera um período de 10 horas em que a insolação solar é mais significativa.

Vale salientar que a precipitação acumulada em cada mês, como é mostrada em ambas as figuras 6.19 e 6.20 não acarreta necessariamente em um período pouco produtivo para os sistemas solares, pois um elevado volume de água de chuva pode cair em poucos dias do mês e os outros dias serem ensolarados, como ocorre frequentemente na cidade de Natal. No entanto, o conhecimento da precipitação acumulada em um mês é fundamental para uma planta que utilize tecnologia solar, pois geralmente meses com elevados índices pluviométricos resultam em períodos com prolongada nebulosidade e, portanto, baixa incidência da radiação solar direta. Deve-se então, antes de instalar um sistema solar em determinado local, conhecer o clima do mesmo e como é o “tempo” nas quatro estações do ano.

Como se pode visualizar na figura 6.19, Não houve medições no mês de Julho de 2008, pois a estação climatológica do INPE estava em manutenção nesse período.

Os dados anuais de radiação solar e precipitação pluviométrica são fundamentais para a instalação e operação de uma planta solar, porém como já pôde ser observado nas figuras 6.2, 6.4, 6.12, 6.16 e 6.18 da presente sessão (6.1 a 6.2.3), a radiação solar global, principal variável em um sistema solar, varia constantemente no decorrer de um dia. Logo, para se operar um equipamento que utilize a energia solar, deve-se medir a radiação solar, tanto a global quanto a difusa ao longo do dia, conhecer o valor da precipitação pluviométrica do dia (e o respectivo horário), se houver, além de outras variáveis importantes como a temperatura do ar, realizando o monitoramento das mesmas.

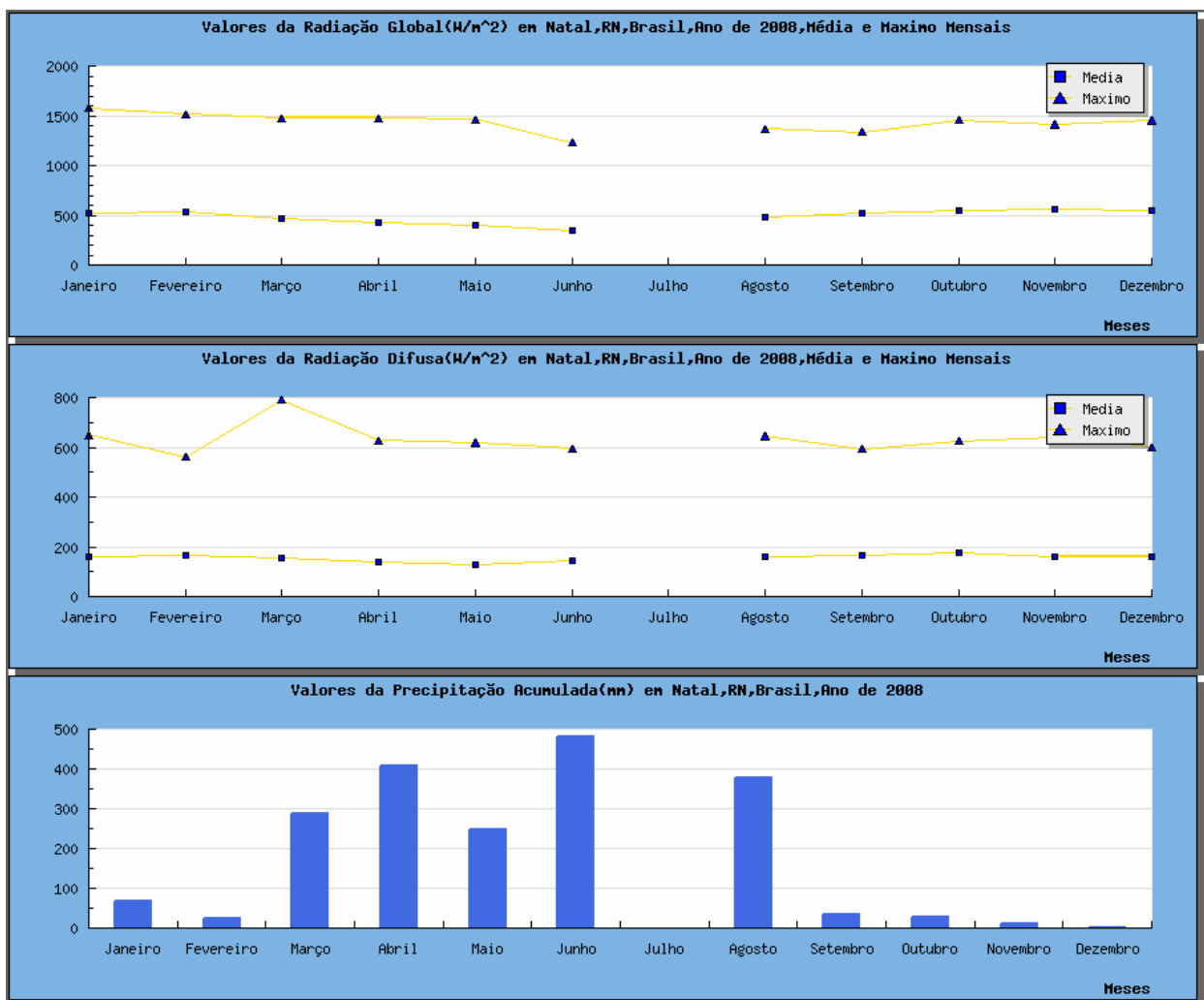


Fig. 6.19 - Radiação solar global média e difusa e precipitação pluviométrica, em 2008 (Natal - RN).

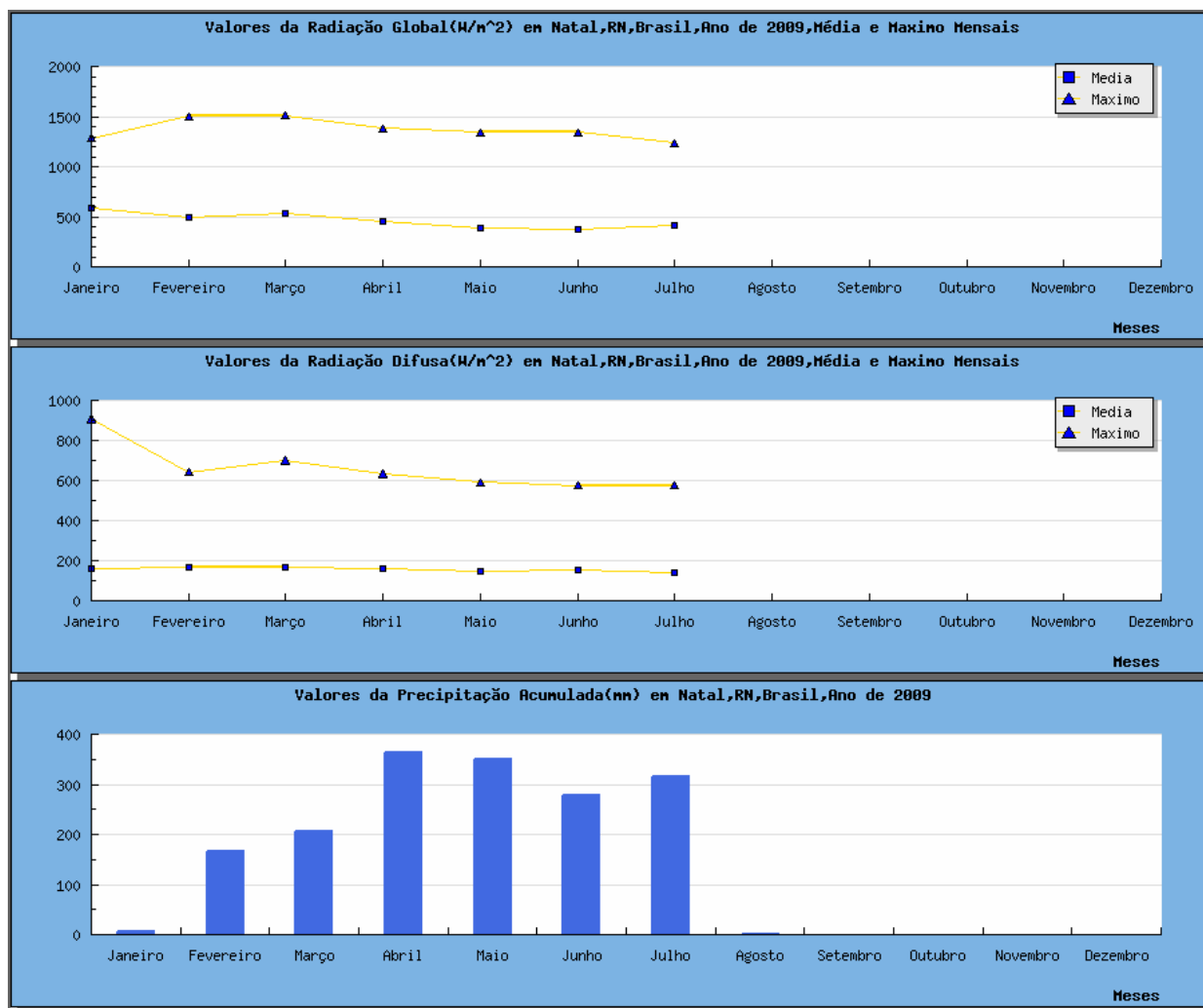


Fig. 6.20 - Radiação solar global média e difusa e precipitação pluviométrica, em 2009 (Natal - RN).

#### 6.2.4. Análises físico-químicas

As análises físico-químicas de água realizadas foram: Potencial hidrogeniônico (pH); condutividade (S/cm); quantidade de cloretos presentes (mg/L de Cl<sup>-</sup>); e concentração de cátions e ânions (mg/L). As amostras das análises foram a solução aquosa salobra a 1000 mg/L de NaCl e água produzida (emissários - Petrobrás). A medição de pH foi realizada apenas para as amostras de água produzida. Nas análises foram feitas comparações entre três tipos de amostras obtidos do processo de destilação: A alimentação (boiler), o destilado e o concentrado (resíduo).

A Tabela 6.7 apresenta os resultados das análises de pH e condutividade (alimentação, concentrado e destilado); A tabela 6.8 mostra os resultados da análise de cloretos; Na tabela 6.9 pode-se ver os resultados da análise de cátions e ânions; já a tabela 6.10, diferentemente, apresenta o resultado da análise de TOC no ebuliômetro de Fisher (retirado de Oliveira, 2008).



Pela análise da tabela 6.7, percebe-se que o pH é básico para o concentrado (resíduo) e alimentação (boiler) e, aproximadamente, neutro para as amostras de destilado. Com relação à condutividade pode-se dizer que houve uma redução acima de 95% da alimentação e do resíduo para o destilado em todas as amostras, tanto de água produzida quanto da solução salobra a 1000 ppm de NaCl. Observando-se a grandeza da condutividade em amostras de destilado e de resíduo e boiler (afluente), percebe-se que para esses dois últimos casos, a condutividade é dada em mS/cm, no mínimo na ordem de  $10^3$  vezes maior do que a condutividade nas amostras de destilado, que apresenta leitura em  $\mu\text{S/cm}$ . Pela tabela 6.8 percebe-se que tanto o destilado do dia 25/07/08 quanto do dia 05/08/08 apresentaram valores negativos para o índice de cloretos. Isso se deve ao fato de que ambas as amostras de destilado necessitaram de um menor volume da solução de nitrato de prata do que o destilado padrão de laboratório utilizado ( $A < B$ , de acordo com a Equação 12). Como consequência também desse fato, a redução correspondente do índice de cloretos foi superior a 100%.

As análises de pH foram realizadas à temperatura de  $25^\circ\text{C}$ , enquanto que a condutividade de cada amostra foi medida em temperaturas variadas, mas com valores bastante próximos. Essa variação pode ser desprezada tendo em vista que é de apenas uma casa decimal no valor da condutividade para uma variação de  $0,1^\circ\text{C}$  na temperatura. As medidas de pH foram realizadas por um phmetro convencional, modelo TEC – 3MP da TECNAL, e as medidas de condutividade também foram feitas com um medidor eletrônico convencional, um condutivímetro da DIGIMED, modelo DM – 32, com uso de uma célula com constante K de valor 1; As análises de Cloretos foram realizadas utilizando-se um método Argométrico bastante usual, o método de MOHR. Trata-se de uma titulação simples em que se faz uso de uma solução de Nitrato de Prata - previamente padronizada com solução de NaCl e 1 mL do indicador Cromato de Potássio; Já as análises de cátions e ânions foram realizadas pelo laboratório NEPGN (Núcleo de Estudos em Petróleo e Gás Natural) da UFRN, onde LD representa o Limite de Detecção do equipamento e método da análise (Tabela 6.9).

A quantidade de Cloretos presente em uma amostra é dada em mg/L de  $\text{Cl}^-$ , sendo calculada a partir da Equação 12:

$$\text{mg/L}(\text{Cl}^-) = \frac{(A - B) \cdot N \cdot 35450}{V} \quad (12)$$

Onde:

- A = Volume de Nitrato de Prata gasto na titulação da amostra
- B = Volume de Nitrato de Prata gasto na titulação do branco (água dest. padrão)
- N = Normalidade da solução de Nitrato de Prata (0,0118)
- V = Volume da amostra utilizado

OBS: O volume da amostra utilizado é o volume considerado sem a diluição (volume total com diluição = 100 mL), pois é aconselhável utilizar 100 ml de amostra na titulação para uma boa homogeneização da mesma; Para amostras de água destilada utilizou-se um volume de 10 mL; Para amostras de resíduo e boiler utilizou-se 1 mL (em virtude da elevada concentração de cloretos).

O método de Mohr baseia-se na reação dos Cloretos presentes na amostra com o Nitrato de Prata (solúvel), produzindo o cloreto de prata, que por ser insolúvel em água, vai turvando de branco, aos poucos a amostra. O ponto da viragem é cor de telha, correspondendo ao final da reação, quando o indicador Cromato de Potássio reage com o residual de Nitrato de prata, produzindo o Cromato de prata, cor de telha.

A tabela 6.9 apresenta os resultados da análise de cátions e ânions para amostras de água produzida do destilado e do resíduo da destilação solar. Percebe-se que os resultados são satisfatórios para todos os ânions e grande parte dos cátions (metais) analisados; as exceções, nesse caso, são os metais Ferro e Zinco, que apresentaram remoções médias, respectivamente, de 74,3% e 83,7%, relativamente inferiores às remoções médias para os outros metais, sempre superiores a 97%. No caso particular do Chumbo e do Cromo, o resultado da remoção não é muito confiável, pois somente uma amostra, para os dois metais, apresentou valores acima do limite de detecção (LD). Pela análise da tabela 6.9, pode-se ver que o baixo valor médio de remoção para o Ferro e para o Zinco, foram acentuados pelo resultado da amostra do dia 20/01/09, que apresentou valores bem inferiores aos das outras amostras (21/01/09 e 05/02/09). Percebe-se ainda, que para praticamente todos os parâmetros analisados, a remoção aumenta da amostra 1 para a amostra 3, o que é lógico, pois o resíduo era mais concentrado, respectivamente nessa ordem, já que para as análises o destilador operou em batelada (diminuição no nível da água / aumento da concentração do resíduo).

Na tabela 6.10, pode-se ver o resultado de TOC ou COT (Carbono Orgânico Total) para uma amostra inicial de água produzida e duas amostras de fase líquida e duas da fase vapor no equilíbrio L-V. Percebe-se que os componentes leves orgânicos tendem a passar para a fase vapor, que apresentou, para ambos os casos, 1 e 2, cerca do dobro do valor de TOC em relação à fase líquida. Diferentemente desse resultado, no trabalho de Bezerra (2004) foi comprovado que a destilação é eficaz também no tratamento de águas com óleos e graxas, com uma boa eficiência de remoção (acima de 80%). Com isso, deduz-se que os contaminantes orgânicos leves tendem a passar para a fase vapor, enquanto que as frações pesadas permanecem no resíduo (fase líquida).

Pode-se afirmar que os resultados das análises realizadas são satisfatórios, pois o destilado da dessalinização solar da água produzida apresentou valores de pH próximos do valor do destilado padrão do dia (6,27). O mesmo ocorreu para a condutividade, onde houve uma quase totalidade de

redução. Vale salientar que essa análise apresentou uma redução superior a 95% no destilado em relação ao resíduo para todos os experimentos. Resultado equivalente foi obtido para a análise de Cloretos, que apresentou redução ainda mais significativa no destilado.

Tabela 6.7 - Análises de Ph e condutividade para amostras de água salobra e água produzida.

Data da coleta	Tipo	PH	Condutividade	Temp. (°C)	Red. da condutividade (%)
<b>ÁGUA SALOBRA - 1000 ppm de NaCl</b>					
25/7/2008	Destilado	---	16,167 µS/cm	27	
5/8/2008	Destilado	----	6,157 µS/cm	26,9	<b>99,89</b>
5/8/2008	Boiler	---	2,590 mS/cm	26,5	
5/8/2008	Resíduo	----	5,730 mS/cm	26,4	
<b>ÁGUA PRODUZIDA</b>					
3/10/2008	Destilado	7,18	226,9 µS/cm	26,8	<b>95,42</b>
3/10/2008	Resíduo	10,38	4,958 mS/cm	26,3	
3/10/2008	Boiler	10,18	4,61 mS/cm	26,4	
17/10/2008	Boiler	9,86	4,644 mS/cm	26,6	
20/10/2008	Destilado	6,72	27,99 µS/cm	27,3	<b>99,67</b>
20/10/2008	Resíduo	10,04	8,396 mS/cm	26,2	
-----	<b>Destilado Padrão</b>	<b>6,27</b>	<b>6,254 µS/cm</b>	<b>25,5</b>	

Tabela 6.8 - Análises de cloretos para amostras de água salobra e água produzida.

Data da coleta	Tipo	Vol. AgNO <sub>3</sub> gasto (mL)	(mg/L de Cl <sup>-</sup> )	Red. de Cloretos (%)
<b>ÁGUA SALOBRA - 1000 ppm de NaCl</b>				
25/7/2008	Destilado	2	-12,5493	
5/8/2008	Destilado	1,9	-16,7324	<b>101,82</b>
5/8/2008	Boiler	4	711,127	
5/8/2008	Resíduo	4,5	920,282	
<b>ÁGUA PRODUZIDA</b>				
3/10/2008	Destilado	2,9	25,0986	<b>97</b>
3/10/2008	Resíduo	4,3	836,62	
3/10/2008	Boiler	4,5	920,282	
17/10/2008	Boiler	não med.		
20/10/2008	Destilado	2,6	12,5493	<b>99,36</b>
20/10/2008	Resíduo	7	1966,057	

Tabela 6.9 - Resultados das análises de cátions e ânions para a água produzida (mg/L).

Data	20/01/09			21/01/09			05/02/09			% Rem. Méd.
	Dest.	Res.	% Rem.	Dest.	Res.	% Rem.	Dest.	Res.	% Rem.	
<b>Cádmio</b>	<LD	<LD		<LD	<LD		<LD	<LD		
<b>Cálcio</b>	0,058	1,243	95,33	0,068	2,784	97,56	0,108	8,456	98,72	97,20
<b>Chumbo</b>	<LD	0,287		<LD	0,999		0,104	0,822	87,35	87,35
<b>Cromo Total</b>	<LD	<LD		<LD	<LD		0,003	0,065	95,38	95,38
<b>Ferro Total</b>	0,026	0,047	44,68	0,021	0,117	82,05	0,012	0,305	96,07	74,27
<b>Magnésio</b>	0,019	1,378	98,62	0,029	<LD		0,021	1,178	98,22	98,42
<b>Manganês</b>	<LD	<LD		<LD	0,008		<LD	0,011		
<b>Mercúrio</b>	<LD	<LD		<LD	<LD		<LD	<LD		
<b>Potássio</b>	0,581	68,05	99,15	0,563	218,2	99,74	11,56	<LD		99,45
<b>Sódio</b>	1,33	1867	99,93	1,278	4654	99,97	306	47132,979	99,35	99,75
<b>Vanádio</b>	<LD	<LD		<LD	<LD		<LD	<LD		
<b>Zinco</b>	0,013	0,048	72,92	0,017	0,151	88,74	0,017	0,162	89,51	83,72
<b>Cloreto</b>	0,106	1754,846	99,99	0,115	5714,439	100,00	0,125			99,99
<b>Nitrato</b>	0,103	4,619	97,77	0,112	11,187	99,00	0,115			98,38
<b>Nitrito</b>	0,008	<LD		0,008	<LD		<LD			
<b>Sulfato</b>	0,169	4,870	95,53	0,168	15,172	98,89	0,142			97,21

Tabela 6.10 - Resultados das análises pelo método TOC para a Água produzida.

N° da amostra	ID Amostra	Valores Médios		
		TOC	IC	TC
1	Amostra Inicial (Água produzida)	12,79	57,77	70,56
2	Fase Líquida 1	14,21	0,00	14,21
3	Fase Vapor 1	26,11	0,00	26,11
4	Fase Líquida 2	21,56	0,00	21,60
5	Fase Vapor 2	46,06	0,00	46,06

(Retirado de Oliveira, 2008)

---

---

**Capítulo VII**  
CONCLUSÕES

---

---

## 7. CONCLUSÕES

Os experimentos demonstraram que o sistema de pré-aquecimento solar é eficiente no aquecimento de água, tanto de água comum como de água salobra, ou água produzida, onde o fluido atingiu temperaturas próximas a 70°C nos dias de maior radiação solar, e temperaturas próximas a 50 °C em dias com pouca radiação. Além disso, o reservatório térmico do aquecedor solar (boiler) apresentou uma pequena variação de temperatura para dias consecutivos. Como a faixa de temperatura da destilação solar se encontra entre 40 °C e 70 °C, o pré-aquecimento é adequado, pois a água entra no destilador já pré-aquecida, o que aumenta a produção deste equipamento, e pode viabilizar a destilação mesmo em horas sem radiação solar; a radiação solar é a variável de maior influência em todo o sistema solar, pois influencia diretamente nas temperaturas do mesmo; para melhorar o rendimento e a eficiência energética do destilador, que apresentaram valores abaixo do encontrado na literatura, deve-se otimizar seu isolamento térmico a fim de “segurar” por mais tempo as altas temperaturas; mudanças na configuração do destilador permitiram um aumento no aproveitamento energético.

Levando em consideração as baixas temperaturas alcançadas no destilador, tanto no líquido quanto no vapor, no período sem radiação solar (após o pôr-do-sol e antes do amanhecer), o sistema de pré-aquecimento solar não terá utilidade para a destilação solar para esse período, bem como para dias típicos de chuva. Desse modo, o desafio para o uso do sistema solar em períodos sem radiação é proporcionar um isolamento térmico eficiente para o destilador com o intuito de impedir ao máximo as trocas térmicas da água e do vapor no destilador com a vizinhança, e assim, manter o interior deste quente durante todo o tempo.

A modelagem e simulação do coletor solar permitiram chegar a um valor de eficiência bem próximo ao dado pelo fabricante; a análise de sensibilidade respectiva permitiu identificar quais parâmetros mais influenciam na eficiência deste equipamento, bem como os parâmetros que exercem pouca influência.

As análises físico-químicas realizadas comprovam a eficácia da destilação solar para tratar águas salinas. E a análise de TOC no equilíbrio L-V da água produzida indica maior concentração orgânica no vapor.

A dúvida que persiste, no entanto, é se o sistema solar será capaz de aumentar a produtividade de água destilada a tal ponto que seja economicamente viável e tecnicamente possível de ser aplicado no tratamento de águas de produção. Vale salientar que o sistema pode ser aprimorado, tanto com uma área maior de coletores solares, quanto com o uso de outros equipamentos, como coletores solares concentradores, que proporcionam temperaturas maiores que

os coletores planos, e painéis fotovoltaicos. Pode-se ainda utilizar equipamentos para propiciar uma pressão de vácuo no destilador, uma ventilação interna, etc. Pode-se dizer, então, que o uso da energia solar no tratamento de águas tem um grande potencial, e este sistema solar ainda pode ser melhorado, o que permite que a participação da energia solar no tratamento de águas esteja continuamente crescendo.

---

---

# Capítulo VIII

REFERÊNCIAS  
BIBLIOGRÁFICAS

---

---



## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALDABÓ, RICARDO, “**Energia solar**”, Artliber Editora, São Paulo – SP, 2002.

AL-HINAI, H. AL-NASSRI, M. S., JUBRAN, B. A., “**Parametric investigation of a double-effect solar still in comparison with a single-effect solar still**”, 2002. *Desalination*, 150(2002)75-83.

BASSO, LUIZ HENRIQUE, “**Utilização da energia solar em sistemas de aquecimento de água residencial**”, 2008. 120f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola. Universidade Estadual do Oeste do Paraná – PR.

BENTIVENHA, LUIZ CARLOS, “**Determinação da eficiência de um coletor solar plano com aletas de vidro**”, 2005. 84f. Dissertação de Mestrado em Agronomia-Energia na Agricultura. Faculdade de Ciências Agrônomicas. Universidade Estadual Paulista, Botucatu - SP.

BEZERRA, ARNALDO MOURA, “**Energia Solar**”, Editora Universitária UFPB, João Pessoa - PB, 1982.

BEZERRA, MAGNA ANGÉLICA DOS SANTOS, “**Desenvolvimento de um destilador solar para tratamento de águas de produção de petróleo com vistas a sua utilização na agricultura e geração de vapor**”. 2004. 106f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN.

BILAL A. AKASH, MOUSA S. MOHSEN, OMAR OSTA, YASER ELAYAN, “**Experimental Evaluation of a Single-basin Solar Still Using Different Absorbing Materials**”, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Applied Science University Amman, 11931, Jordan, *Renewable Energy*, Vol. 14, Nos. 1-4, pp. 307-310, 1998

CURBELO, F. D. da S., “**Estudo da Remoção de Óleo em Águas Produzidas na Indústria de Petróleo, por Adsorção em Coluna Utilizando a Vermiculita Expandida e Hidrofobizada**”. 2002. 93f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN.

RAMOS, R. E. M.

*Monografia - DEQ/PRH14-ANP/UFRN – Natal/RN - Brasil*

DUFFIE, JOHN A., BECKHAM, WILLIAM A., 1991. **“Solar Engineering of Thermal Processes”**. 2ª Edição, J. Wiley, New York.

ESTEBAN, CARMEN, **“Distilador solar asistido con colector solar acumulador”**, Universidad Nacional de San Luis, 2000.

FERNANDES JR., W. E., **“Planejamento experimental aplicado a um novo separador líquido-líquido utilizado no tratamento de águas residuais contaminadas com petróleo”**. 2002. 125f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN.

FUENTES, R., ROTH, P., **“Teoría de La Destilación Solar en Vacío”**, Revista Facultad de Ingeniería, U. T. A., Chile, vol. 4, 1997.

INCROPERA, FRANK P., DEWITT, DAVID P., **“Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa”**, 4ª ed. Rio de Janeiro – RJ, 1996.

INPE – **“Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais”**. Disponível em: <http://www.inpe.br>. Acessado em 01 de Agosto de 2009.

LION, C. A. P. Q., **“Construção e análise de desempenho de um fogão solar à concentração utilizando dois focos para cozimento direto”**, 2007. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN.

LOPES, JOAQUIM TEIXEIRA, **“Dimensionamento e Análise Térmica de um Dessalinizador Solar Híbrido”**, 2004. 109f. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica Universidade Estadual de Campinas – SP.

MALUF, ALEXANDRE PRATA, **“Destiladores Solares no Brasil”**, 2005. 39f. Monografia de especialização em Fontes Alternativas de Energia. Departamento de Engenharia. Universidade Federal de Lavras - MG.

MOTA, A. L. N.; ALBUQUERQUE, L. F.; BELTRAME, L. T. C.; CHIAVONE-FILHO, O.; MACHULEK JR., A.; NASCIMENTO, C. A. O, “**Advanced oxidation processes and their application in the petroleum industry: a review**”. Brazilian Journal of Petroleum and Gas. v. 2, n. 3, p. 122-142, 2008.

NOVUS, “**Folheto Comercial LogBox-AA**”. Disponível em:<<http://www.novus.com.br>>. Acessado em 10 de Julho de 2009.

OLIVEIRA, I. P., “**Determinação de dados de Equilíbrio de Fases utilizando o Ebuliômetro de Fisher**”, 2008. Monografia de graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN.

PINA, ANTONIO VICTOR VAZ DE, “**Dessalinização solar no abastecimento de água para uma família no arquipélago de Cabo Verde**”, 2004. 28f. Monografia de graduação em Engenharia Mecânica. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – RS.

RIBEIRO, FERNANDA ALVES, SANTOS, REGINALDO DIAS DOS, LIMA, RUDSON DE SOUZA, SOUZA, LUIZ GUILHERME MEIRA DE, MENDES, JOSÉ UBIRAGI DE LIMA, “**Destilador solar de cobertura piramidal e isolamento térmico em material compósito**”, UFRN, Natal – RN. V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Salvador – BA, 2008.

SILVA, J. H., “**Estudo da captura de óleo em uma coluna de flotação utilizada para o tratamento de água produzida**”, 2007. 128f. Monografia de graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – RN.

SOARES, CLARISSA, “**Tratamento de água unifamiliar através da destilação solar natural utilizando água salgada, salobra e doce contaminada**”, 2004. 110f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina – SC.

SOARES, GUSTAVO, PIMENTA, JOÃO, “**Projeto e simulação de um coletor solar plano inflável**” Universidade de Brasília - DF, VII Congresso Iberoamericano de Aire Acondicionado, Calefacción y Refrigeración, 2005.

SOLAR TÉRMICO, “**Manual Sobre Tecnologias, Projecto e Instalação**”, Rio de Janeiro – RJ, 2004.

SOLETROL, “**Aquecedores Solares de água**”. Disponível em: <<http://www.soletrol.com.br>>. Acessado em 22 de Julho de 2009.

THOMAS, J. E., “**Fundamentos de Engenharia de Petróleo**”, Editora Interciência, Rio de Janeiro – RJ, 2001.

VAN NESS, H.C., SMITH, J.M. AND ABBOTT, M.M., “**Introdução à termodinâmica da Engenharia Química**”, 5ª Edição, McGraw-Hill International Editions, 1996.

---

---

# Capítulo IX

ANEXOS

---

---

## 9. ANEXOS

### 9.1. Anexo I. Ordenamento das equações do modelo matemático

$$T_{ar} = \frac{T_{pm} + T_{cm}}{2} \quad (1)$$

$T_{ar}$  = temperatura do ar (interior do coletor), média entre a temperatura da placa e da cobertura para efeitos de estimativa.

$T_{pm}$  = temperatura média da placa [K]

$T_{cm}$  = temperatura média da cobertura [K]

Observação 1: Os valores para  $T_{pm}$  e  $T_{cm}$  foram estimados inicialmente e depois, calculados a partir das equações I e II, respectivamente. Foi feita uma iteração numérica até a conversão entre os valores estimados e os calculados.

$$T_{pm} = T_{fi} + \frac{Q_U(1-F_R)}{A_c \cdot U_L \cdot F_R} \quad (I) - \text{(Klein et al, 1979, apud Soares, 2005)}$$

$$T_{cm} = T_{pm} - \frac{U_S(T_{pm} - T_a)}{(h_{c,p-c} + h_{r,p-c})} \quad (II) - \text{(Lopes, 2004)}$$

$$\beta'_{ar} = \frac{1}{T_{ar}} \quad (2)$$

$\beta'_{ar}$  = coeficiente volumétrico de expansão (para gás ideal,  $\beta'_{ar} = 1/T_{ar}$ )

$$\Delta T = T_{pm} - T_{cm} \quad (3)$$

$\Delta T$  = diferença de temperatura entre a placa e a cobertura

$$Ra = \frac{g\beta'_{ar}\Delta T L^3}{\nu_{ar}\alpha_{ar}} \quad (4)$$

Ra = número de Rayleigh [adimensional]

g = aceleração da gravidade = 9,81 m/s<sup>2</sup>

L = espaçamento entre a placa e a cobertura [m]

$\nu_{ar}$  = viscosidade cinemática do ar [m<sup>2</sup>/s]

$\alpha_{ar}$  = difusividade térmica do ar [m<sup>2</sup>/s]

$$Nu = 1 + 1,44 \left[ 1 - \frac{1708(\sin 1,8\beta)^{1,6}}{Ra \cos \beta} \right] \left[ 1 - \frac{1708}{Ra \cos \beta} \right]^+ + \left[ \left( \frac{Ra \cos \beta}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]^+ \quad (5)$$

$Nu$  = número de Nusselt [adimensional]

$\beta$  = ângulo de inclinação do coletor

$$h_{c,p-c} = Nu \frac{k_{ar}}{L} \quad (6)$$

$h_{c,p-c}$  = coeficiente convectivo de transferência de calor entre a placa e a cobertura [ $W/m^2.K$ ]

$K_{ar}$  = condutividade térmica do ar [ $W/m.K$ ]

$$h_{r,p-c} = \frac{\sigma(T_{pm} + T_{cm})(T_{pm}^2 + T_{cm}^2)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1} \quad (7)$$

$h_{r,p-c}$  = coeficiente de transferência de calor por radiação entre a placa e a cobertura [ $W/m^2.K$ ]

$\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann =  $5,67 \times 10^{-8} W/m^2.K^4$

$\epsilon_p$  = emissividade da placa [adimensional]

$\epsilon_c$  = emissividade da cobertura [adimensional]

$$q_{loss,top} = (h_{c,p-c} + h_{r,p-c})(T_{pm} - T_{cm}) \quad (8)$$

$q_{loss,top}$  = perda de calor pelo topo (cobertura) [W]

$$R_{p-c} = \frac{1}{h_{c,p-c} + h_{r,p-c}} \quad (9)$$

$R_{p-c}$  = resistência à transferência de calor entre a placa e a cobertura [ $K.m^2/W$ ]

$$h_{r,c-a} = \frac{\sigma \epsilon_c (T_{cm} + T_s)(T_{cm}^2 + T_s^2)(T_{cm} - T_s)}{(T_c - T_a)} \quad (10)$$

$h_{r,c-a}$  = coeficiente de transferência de calor por radiação entre a cobertura e o ambiente [ $W/m^2.K$ ]

$T_a$  = temperatura ambiente [K]

$T_s$  = temperatura “do céu” [K] ( $T_s = T_a - 6$ ) – (Lopes, 2004)

$$h_w = 2,8 + 3,0v \quad [W/m^2.K] \quad (11)$$

$h_w$  = coeficiente de transferência de calor do vento

$v$  = velocidade média do vento [m/s] (de 0 a 7 m/s)

$$R_{c-a} = \frac{1}{h_w + h_{r,c-a}} \quad (12)$$

$R_{c-a}$  = resistência à transferência de calor entre a cobertura e o ambiente [K.m<sup>2</sup>/W]

$$U_t = \frac{1}{R_{p-c} + R_{c-a}} \quad (13)$$

$U_t$  = Coeficiente de perda térmica do coletor para o ambiente pelo topo [W/m<sup>2</sup>.K]

$$U_b = \frac{1}{R_i} = \frac{k_i}{L_i} \quad (14)$$

$U_b$  = coeficiente de perda térmica do coletor pelo fundo [W/m<sup>2</sup>.K]

$k_i$  = condutividade térmica do isolamento [W/m.K]

$L_i$  = espessura do isolamento no fundo [m]

$$U_L = U_t + U_b + U_e$$

Observação 2: a perda de calor pelas bordas foi considerada desprezível, pois o cálculo dessa variável é bastante complexo. Logo, o coeficiente de perda térmica pelas bordas do coletor,  $U_e$ , foi considerado nulo.

$$U_L = U_t + U_b \quad (15)$$

$U_L$  = coeficiente global de perda térmica do coletor [W/m<sup>2</sup>.K]

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k_p \delta_p}} \quad (16)$$

$m$  = Dimensional da aleta [m<sup>-1</sup>]

$k_p$  = condutividade térmica da placa [W/m.K]

$\delta_p$  = espessura da placa [m]

$$F = \frac{\tanh[m(W - D)/2]}{m(W - D)/2} \quad (17)$$

$F$  = fator de eficiência da aleta [adimensional]

$W$  = espaçamento entre os tubos [m]

$D$  = diâmetro interno do tubo [m]

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left[ \frac{1}{U_L [D + (W - D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} \right]} = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left[ \frac{1}{U_L [D + (W - D)F]} + \frac{1}{\pi D h_{fi}} \right]} \quad (18)$$

$F'$  = fator de eficiência do coletor [adimensional]

$C_b$  = condutância da solda (ver observação 3)



$h_{fi}$  = coeficiente de transferência de calor no interior dos tubos (300 W/m<sup>2</sup>.K)

Observação 3: a condutância da solda está relacionada à condutividade térmica da ligação entre a placa e os tubos e aletas, e se refere à qualidade da solda. Em coletores bem construídos, a qualidade da solda deve ser boa, o que gera um valor alto de condutância e faz com que o termo  $(1/C_b)$  se aproxime de zero, podendo ser desconsiderado na Equação 18.

Observação 4: não há fórmula na literatura para o cálculo do coeficiente de transferência de calor no interior dos tubos ( $h_{fi}$ ). Como os tubos do coletor são de cobre, e na literatura o material de referência também é o cobre, foi utilizado o mesmo valor proposto na literatura, de 300 W/m<sup>2</sup>.K.

$$\omega = \frac{\dot{m}_f C_{P_f}}{A_C U_L F'} \quad (19)$$

$\omega$  = adimensional razão de vazão mássica  
 $\dot{m}_f$  = vazão mássica média do fluido no coletor [kg/s]  
 $C_{P_f}$  = capacidade calorífica do fluido no coletor [J/kg.K]  
 $A_C$  = área útil do coletor [m<sup>2</sup>]

Observação 5: O valor de  $C_{P_f}$  foi obtido baseando-se na temperatura média da água no interior do coletor ( $T_{fm}$ ) dada pela equação III;  $\dot{m}_f$  foi estimada a partir da Equação IV, onde  $T_{f0}$  foi aproximada pela Equação V.

$$T_{fm} = T_{fi} + \frac{Q_U(1-F'')}{A_s U_L F_R} \quad \text{(III) - (Klein et al, 1974, apud Soares, 2005)}$$

$$\eta = \frac{\dot{m}_f C_{P_f} (T_{f0} - T_{fi})}{A_C G_T} \quad \text{(IV)}$$

$$T_{f0} = T_{fi} + \frac{F_R A_C [S - U_L (T_{fi} - T_a)]}{\dot{m}_f C_{P_f}} \quad \text{(V)}$$

$$F'' = \omega \left( 1 - e^{-\frac{-1}{\omega}} \right) = \frac{F_R}{F'} \quad (20)$$

$F''$  = fator de vazão do coletor [adimensional]

$$F_R = F' F'' = \frac{\dot{m} C_p}{A_C U_L} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-1}{\omega}\right) \right] \quad (21)$$

$F_R$  = fator de remoção do coletor [adimensional]

$$(\tau\alpha) = \frac{(\tau\alpha)}{1 - (1 - \alpha)\rho_d} \quad (22)$$

$\tau\alpha$  = produto transmitância-absorbância  
 $\rho_d$  = refletância difusa.

$$S = I_b R_b (\tau\alpha)_b + I_d (\tau\alpha)_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho_g (I_b + I_d) (\tau\alpha)_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (23)$$

$S$  = Diferença entre a radiação solar incidente e as perdas ópticas [W/m<sup>2</sup>]  
 $I_b$  = incidência solar direta em certo período de tempo (ex.: um dia) [W/m<sup>2</sup>]  
 $I_d$  = incidência solar difusa em certo período de tempo (ex.: um dia) [W/m<sup>2</sup>]  
 $\rho_g$  = reflectância do solo [adimensional entre 0 e 1]

Observação 6: O valor de  $\rho_d$  depende do número das tampas de vidro que é usado na placa solar. Assim, para 1, 2, 3 e 4 tampas, os valores do  $\rho_d$  são aproximadamente 0,16; 0,24; 0,29 e 0,32, respectivamente (Bentivenha, 2005).

Observação 7: Foram utilizados os valores médios anuais para  $I_b$  e  $I_d$  para a cidade de Natal –RN (360W/m<sup>2</sup> e 240W/m<sup>2</sup>, respectivamente).

Observação 8: o valor de reflectância do solo ( $\rho_g$ ) utilizado nos cálculos foi o mesmo indicado na literatura (0,6).

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L (T_{f_i} - T_a)] \quad (24)$$

$Q_u$  = Taxa de calor útil [W]  
 $T_{f_i}$  = temperatura de entrada do fluido

$$\eta = \frac{\int_{t_1}^{t_2} Q_u dt}{A_c \int_{t_1}^{t_2} G_T dt} \cong \frac{\overline{Q_u}}{A_c \cdot \overline{G_T}} \quad (25)$$

$\eta$  = eficiência térmica média do coletor  
 $G_T$  = radiação solar global instantânea [W/m<sup>2</sup>]

$\overline{Q_u}$  = calor útil médio [W]

$\overline{G_T}$  = radiação solar global média [W/m<sup>2</sup>]

Observação 9: A Equação 25 representa a eficiência do coletor para um determinado período, que equivale à eficiência média para o mesmo período; O calor útil obtido já representa um valor médio, pois todas as variáveis utilizadas no seu cálculo foram valores médios, não instantâneos; A

eficiência instantânea é calculada sem o uso da integral; O valor médio aproximado para a radiação solar anual na cidade de Natal-RN é de  $600 \text{ W/m}^2$  (no período das 07:00 às 17:00).

A simulação apresenta resultados para a taxa de calor captado (calor útil), e a eficiência energética média do equipamento. Além disso, é possível conhecer também os fatores de eficiência  $F'$ , de fluxo  $F''$  e de remoção de calor  $F_R$ , bem como o valor do coeficiente global de perda térmica  $U_L$ . Foram feitas as seguintes considerações:

- Coletor solar estacionário;
- A geometria do coletor do tipo placa absorvedora e tubos paralelos;
- Condutividades térmicas médias independentes da temperatura;
- Regime permanente;
- Perdas laterais de calor por convecção ou condução desprezíveis;
- Produto ( $\tau \alpha$ ) constante devido à sua irrisória variação durante o dia.
- Irradiação solar média para a cidade de Natal obtida pelo INPE.
- Eficiência média calculada a partir do calor útil médio e da radiação solar global média.