

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Coletor Solar Plano de Baixo Custo

**Fabio Massato Hori
Vitor Ken Tabata**

Orientador: Eitaro Yamane



**São Paulo
2003**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Coletor Solar Plano de Baixo Custo

**Trabalho de formatura apresentado
à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para a obtenção do
título de Graduação em Engenharia**

**Fabio Massato Hori
Vitor Ken Tabata**

Orientador: Eitaro Yamane

**São Paulo
2003**

“Agradecemos ao professor Eitaro por proporcionar uma oportunidade de construir um projeto real que correspondesse com nosso desejo de constituir algo concreto em nossa formação.”

“Agradecemos ao Prof. Mariani por estar sempre presente nos momentos de necessidade e demonstrar seu entusiasmo e curiosidade pelo projeto.”

“Agradecemos ao Eng. Akiyoshi Tabata pela ajuda e principalmente pela motivação fornecida nos momentos críticos de extrema dificuldade e desânimo enfrentados.”

“Agradecemos também ao Bill Gates, por insistir em querer convencer a todos de que toda essa parafernália tecno-informática é essencial em nossas vidas.”

“Agradecemos a todos os fabricantes de ferramentas, pois sem elas jamais conseguiríamos construir nosso projeto munidos somente de martelo e chave de fenda.”

ÍNDICE

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Resumo

1	Objetivos.....	1
2	Cronograma.....	2
3	Características da Radiação Solar.....	4
3.1	A Constante Solar.....	4
3.2	Emissão do Corpo Negro	4
3.3	Medidas da Duração da Luz Solar.....	9
4	Características de Transferência de Calor.....	10
4.1	Superfícies Seletivas	10
4.2	Mecanismos de Seletividade	10
4.3	Propriedades Ótimas.....	11
5	Comportamento dos Materiais.....	12
5.1	Reflexão da Radiação.....	12
5.2	Absorção pelo vidro.....	12
5.3	Propriedades Ópticas de Coberturas de Coletores	13
5.4	Transmissividade para Radiação Difusa.....	13
5.5	Produto Transmissividade- Absorvidade.....	14
5.6	Radiação Solar Absorvida	14
6	Aquecimento Solar com Placas Solares Planas Convencionais.....	18
6.1	Geometria dos Coletores.....	19
6.1.1	A Cobertura Transparente.....	19
6.1.2	A Placa Absorvedora da Radiação Solar.....	20
6.1.3	Isolamento Térmico	21
6.1.4	Caixa do Coletor	21
6.1.5	Reservatório de Água Quente	22
6.2	Montagem dos Coletores.....	22
6.3	Ângulo de Inclinação do Coletor.....	23
6.4	Dimensões do Coletor em Função do Número de Pessoas	24
6.5	Considerações sobre o vidro e outros materiais	24

7	Balanco Térmico.....	25
7.1	Eficiência Térmica do Coletor.....	25
7.2	Temperatura da Água na Saída do Coletor.....	26
8	Aquecedores Solares de Baixo Custo.....	29
8.1	Placas Solares Planas de PVC de Filme de Água	29
8.2	Coletor Solar de Espiral.....	34
9	Solução Adotada : Coletor Solar de Placas de PVC	37
9.1	Coletor Solar	37
9.2	Reservatório Quente/Frio	39
10	Pesquisa e Compra de Materiais Para Construção.....	42
11	construção.....	43
11.1	Construção Da Caixa D'água	43
11.1.1	Furação das Caixas.....	43
11.1.2	Fixação das flanges	43
11.1.3	Construção do Anteparo.....	43
11.2	Construção do Coletor de Água Quente/Fria	45
11.2.1	Construção do seletor.....	47
11.2.2	Construção da Válvula	49
11.2.3	Construção do flutuador	50
11.3	Construção das Placas Solares	51
11.3.1	Preparação do equipamento para efetuar os cortes dos rasgos no tubo do coletor solar	51
11.3.2	Corte dos rasgos no tubo do coletor solar	53
11.3.3	Preparação do forro de pvc.....	55
11.3.4	Montagem do forro no tubo.....	56
11.3.5	Vedação por massa epóxi Araldite.....	56
11.3.6	Vedação por aplicação de silicone quente	58
12	Ensaio Hidrostático	59
12.1	Ensaio Hidrostático do Coletor	59
12.2	Ensaio Hidrostático do Coletor	59
13	Resultados	62
13.1	Medições atmosféricas.....	62
13.2	Temperaturas Obtidas	88
13.3	Análise de Resultados.....	93
14	Conclusão.....	94
15	Bibliografia.....	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Relação Sol-Terra	4
Figura 3.2 - Espectro Eletromagnético	5
Figura 3.3 - Espectro de um corpo negro, cinzento a $T=6000K$	7
Figura 3.4 - Espectro de emissão térmica a diferentes temperaturas.	8
Figura 4.1 - Uma superfície seletiva hipotética com um.....	10
Figura 4.2 - Característica do material em função da emissividade/absorvidade	11
Figura 5.1 - Reflexão e refração de um feixe de luz	12
Figura 5.2 - Transmissividade (considerando absorção e reflexão) de 1,2,3 e 4	15
Figura 5.3 - Ângulo de incidência efetivo da radiação difusa e radiação.....	16
Figura 5.4 - Curvas típicas de $(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n$ para 1 a 4 coberturas.	17
Figura 6.1 - Instalação convencional do sistema de aquecimento solar	18
Figura 6.2 - Sistema convencional de circulação de água através do termo-sifão	19
Figura 6.3 - Esquemas de construção	20
Figura 6.4 - Diagrama do reservatório quente	22
Figura 6.5 - Esquema de uma montagem de coletores em paralelo.	23
Figura 6.6 - Inclinação máxima para a região de São Paulo.....	24
Figura 7.1 - Gráfico de eficiência do coletor para.....	26
Figura 8.1 - Coletor solar plano de PVC	29
Figura 8.2 - Reservatório de água quente / frio	33
Figura 8.3 - Coletor solar espiral	35
Figura 9.1 - Coletor solar de placas de PVC (com tinta preta fosca)	37
Figura 9.2 - Recipiente anti-convectivo (com plástico transparente de 0,4 mm).....	38
Figura 9.3 - Térmico proposto inicialmente, sem alterações.....	39
Figura 9.4 - Novo sistema coletor proposto	40
Figura 9.5 - Reservatório térmico de 250 l de concreto (teste hidrostático)	41
Figura 9.6 - Válvula Fria de alumínio com haste de latão.....	41
Figura 9.7 - Tubo seletor de temperaturas flutuante.....	41
Figura 11.1 - Anteparo	43
Figura 11.2 - Marcação da posição do tubo do coletor de água	43
Figura 11.3 - Furação inicial	44
Figura 11.4 - Alargamento do furo.....	44
Figura 11.5 - Coletor de água	45
Figura 11.6 - Detalhe da válvula fria do coletor de água (protótipo)	45
Figura 11.7 - Marca do níveis da água	45
Figura 11.8 - Marcação do nível máximo de água no tubo do coletor de água quente.....	45
Figura 11.9 - Marcação da posição do anteparo no tubo do coletor de água quente.....	46
Figura 11.10 - Marcação dos furos.....	46
Figura 11.11 - Furos e marcas do furos próximos ao anteparo	46
Figura 11.12 - Furação	46
Figura 11.13 - Anéis de vedação	47
Figura 11.14 - Disposição dos anéis de vedação no tubo do coletor.....	47
Figura 11.15 - Corte do tubo de 1 polegada	47
Figura 11.16 - Esquadramento	47
Figura 11.17 - Verificação da ortogonalidade da face	47

Figura 11.18 - Ajuste da face por abrasão (lixa)	47
Figura 11.19 - Face ortogonalizada	48
Figura 11.20 - Aquecimento do tubo para ajuste dos anéis	48
Figura 11.21 - Acerto da concentricidade dos anéis	48
Figura 11.22 - Seletor finalizado	48
Figura 11.23 - Válvula industrializada	49
Figura 11.24 - Protótipo da válvula	49
Figura 11.25 - Nova válvula fabricada	49
Figura 11.26 - Traçando molde em poliestireno expandido	50
Figura 11.27 - Montagem do flutuador com o seletor	50
Figura 11.28 - Flutuador montado	50
Figura 11.29 - Makita	51
Figura 11.30 - Fixação na morsa	51
Figura 11.31 - Posicionamento da guia	51
Figura 11.32 - Fixação da guia	51
Figura 11.33 - Verificação da posição da guia	52
Figura 11.34 - Determinação da linha de centro com régua T	53
Figura 11.35 - Marcação da linha de centro	53
Figura 11.36 - Furação das extremidades dos rasgos	53
Figura 11.37 - Marcação dos rasgos	53
Figura 11.38 - Corte com makita	53
Figura 11.39 - Corte inicial	53
Figura 11.40 - Tubo cortado	54
Figura 11.41 - Corte das extremidades das aletas com ferro de solda	55
Figura 11.42 - Extremidade recortada	55
Figura 11.43 - Marcação da linha de profundidade	55
Figura 11.44 - Tratamento da superfície do forro	55
Figura 11.45 - Encaixe	56
Figura 11.46 - Placas encaixadas	56
Figura 11.47 - Massa epoxi Araldite	57
Figura 11.48 - Mistura dos componentes	57
Figura 11.49 - Dosagem igual	57
Figura 11.50 - Mistura dos componentes	57
Figura 11.51 - Aplicação	57
Figura 11.52 - Acabamento final	57
Figura 11.53 - Aplicação com pistola de silicone	58
Figura 11.54 - Vedação das extremidades	58
Figura 11.55 - Acabamento final	58
Figura 12.1 - Ensaio Hidrostático	59
Figura 12.2 - Vazamentos ocorridos durante o Ensaio (1)	60
Figura 12.3 - Vazamentos ocorridos durante o Ensaio (2)	60
Figura 12.4 - Detalhe do vazamento sob o cordão de silicone	61
Figura 13.1 - Gráfico da temperatura ambiente em °C do dia 01/11/2003	66
Figura 13.2 - Gráfico da radiação solar (em °C) do dia 01/11/2003	66
Figura 13.3 - Gráfico da radiação ultravioleta (W/m ² .μM) do dia 01/11/2003	67
Figura 13.4 - Gráfico da velocidade do vento em km/h do dia 01/11/2003	67
Figura 13.5 - Gráfico da temperatura ambiente em °C do dia 02/11/2003	72

Figura 13.6 - Gráfico da radiação solar ($\text{W/m}^2 \cdot \mu\text{M}$) do dia 02/11/2003	73
Figura 13.7 - Gráfico da radiação ultravioleta ($\text{W/m}^2 \cdot \mu\text{M}$) do dia 02/11/2003	73
Figura 13.8 - Gráfico da velocidade do vento em km/h do dia 02/11/2003	74
Figura 13.9 - Gráfico da temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$) do dia 08/11/2003	79
Figura 13.10 - Gráfico da radiação solar ($\text{W/m}^2 \cdot \mu\text{M}$) do dia 08/11/2003	80
Figura 13.11 - Gráfico da radiação ultravioleta ($\text{W/m}^2 \cdot \mu\text{M}$) do dia 08/11/2003	80
Figura 13.12 - Gráfico da velocidade do vento em km/h do dia 08/11/2003	81
Figura 13.13 - Gráfico da temperatura ambiente $^{\circ}\text{C}$ do dia 09/11/2003	86
Figura 13.14 - Gráfico da radiação solar ($\text{W/m}^2 \cdot \mu\text{M}$) do dia 09/11/2003	86
Figura 13.15 - Gráfico da radiação ultravioleta ($\text{W/m}^2 \cdot \mu\text{M}$) do dia 09/11/2003	87
Figura 13.16 - Gráfico da velocidade do vento em km/h do dia 09/11/2003	87
Figura 13.17 - Gráfico de temperaturas medidas no dia 01/11/03	89
Figura 13.18 - Gráficos de temperaturas medidas no dia 02/11/03	90
Figura 13.19 - Gráfico de temperaturas medidas no dia 08/11/03	91
Figura 13.20 - Gráfico de temperaturas medidas no dia 09/11/03	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 - Cronograma.....	2
Tabela 6-1 - Dimensão do coletor em função do número de pessoas (médias obtidas através de pesquisas em diversos fornecedores de aquecimentos solares comerciais)	24
Tabela 10-1 - Custos de Materiais não pertencentes ao projeto	42
Tabela 10-2 - Custos de Materiais pertencentes ao projeto (adaptações necessárias)	42
Tabela 13-1 - Medições do dia 01/11/2003	62
Tabela 13-2 - Medições do dia 02/11/2003	68
Tabela 13-3 - Medições do dia 08/11/2003	75
Tabela 13-4 - Medições do dia 09/11/2003	82
Tabela 13-5 - Temperaturas medidas no dia 01/11/03	88
Tabela 13-6 - Temperaturas medidas no dia 02/11/03	89
Tabela 13-7 - Temperaturas medidas no dia 08/11/03	90
Tabela 13-8 - Temperaturas medidas no dia 09/11/03	91

RESUMO

O texto se resume basicamente em 3 etapas: Fundamentos teóricos (incluindo características da radiação solar e comportamento dos materiais), estudo de viabilidade/concepção (análise dos coletores já existentes no mercado, visitas ao IPEN-USP e diversos fabricantes) e construção/testes (metodologia de construção, testes hidrostáticos e de eficiência térmica).

O objetivo deste trabalho é projetar e construir uma placa solar plana a baixo custo, introduzindo o produto em um novo nicho do mercado: a classe média – baixa. A meta estabelecida para este projeto é de um custo máximo por unidade (1 placa + adaptações) de R\$ 110,00. É importante lembrar que a busca de alta eficiência não é o escopo do projeto, servindo a placa somente para dar algum conforto térmico aos usuários (aumento de 6 ° C na temperatura final de consumo).

Devido às limitações de custo há uma grande restrição quanto aos materiais adotados na construção do coletor, inviabilizando a utilização de materiais nobres (cobre, vidro e lã de vidro, comumente utilizado na fabricação de coletores solar).

Entre diversas configurações elaboradas, adotou-se o sistema de coletores solares de forro de PVC com vedações de silicone termoplástico e um reservatório quente/frio com válvula seletora de temperaturas. O uso do PVC, material isolante térmico, é justificado pelo seu baixo custo (R\$ 34,00 para o total de 4 placas de 2 m) e também pelo tempo de exposição solar disponível do conjunto.

O reservatório térmico é composto por 2 compartimentos, água quente e fria, separados por um anteparo feito do mesmo material da caixa d'água (não tóxico). A válvula fria, associada a um tubo seletor, força o consumo de água aquecida até que a mesma se esgote para depois utilizar água não aquecida. O consumo regular de água não aquecida (torneiras, cozinha, etc) é possibilitado pela presença de flanges na lateral do reservatório.

A temperatura final alcançada pela superfície externa do coletor solar é de 68,7 ° C em condições climáticas ideais (temperatura ambiente de 32° C), resultando em uma temperatura final de consumo de 29,6 ° C ao final do dia (19:00 h).

A grande dificuldade encontrada neste trabalho foi, sem dúvida alguma, superar os problemas encontrados no teste hidrostático. A vedação entre o forro de PVC e os tubos de PVC de 1" mostraram-se extremamente sensíveis à pressão e à fadiga térmica. Após a proposta inicial, de vedação de Araldite Epóxi 24 h, não sendo bem sucedida, optou-se pela vedação de silicone termoplástico. O sucesso só pôde ser obtido após diversas tentativas frustradas, ora variando-se métodos de aplicação da vedação, ora mudando-se a construção do coletor.

1 OBJETIVOS

O Projeto consiste basicamente em projetar e construir uma placa solar plana a baixo custo, introduzindo o produto em um novo nicho do mercado: a classe média – baixa.

A meta estabelecida para este projeto é de um custo máximo por unidade (1 placa + 1 reservatório) de R\$ 110,00.

É importante lembrar que a busca de alta eficiência não é o escopo do projeto, servindo a placa somente para dar algum conforto térmico aos usuários (aumento de 6 ° C na temperatura final de consumo).

O uso de técnicas e materiais diferentes será muito explorado, o que nos leva a pesquisar sobre inúmeros projetos-piloto sobre energia solar.

Por fim, o produto deverá passar por testes hidrostáticos e de eficiência térmica.

2 CRONOGRAMA

Tabela 2-1 - Cronograma

	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Fundamentação teórica										
Pesquisa de Coletores Solares										
Estudo sobre os coletores pesquisados										
Definição do coletor										
Pesquisa e compra dos materiais										
Construção										
Ensaio hidrostático										
Ensaio do coletor										
Finalização										
Montagem Relatório Parcial										
Montagem Relatório Final para Orientador										
Montagem do Artigo Técnico										
Apresentação do Trabalho										
Montagem Relatório Final para Biblioteca										

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta etapa do projeto será realizado um estudo das características da radiação solar, processos de transferência de calor, comportamento dos materiais e coletores solares, a fim de se obter o embasamento teórico necessário para a construção de um coletor solar.

Esta etapa porem poderá ser retornada caso haja a necessidade de se pesquisar algum fator não previsto inicialmente no projeto.

PESQUISA DE COLETORES SOLARES

Inicialmente, antes do projeto do coletor solar, será realizada uma pesquisa sobre os coletores solares já existentes. Esta etapa consistirá em pesquisar os coletores comercializados, contatando fabricantes para a obtenção de dados, e os coletores desenvolvidos em pesquisas para projetos de aproveitamento de energia solar.

Estudo sobre os coletores solares

Com base na pesquisa realizada na etapa anterior, os coletores serão classificados quanto ao tipo, construção e materiais utilizados. Serão analisadas as diferentes formas de geometria, construção e montagem dos coletores. E a partir desta estratificação, estudar a eficiência de cada categoria.

DEFINIÇÃO DO COLETOR

Nesta etapa, as diversas alternativas pesquisadas na etapa anterior serão analisadas para se definir a solução que corresponda com o objetivo deste projeto. E ao final desta etapa, pretende-se ter o projeto do coletor solar definido e especificado através de documentação técnica (relatórios e desenhos).

PESQUISA E COMPRA DOS MATERIAIS

Tendo sido definido o projeto do coletor, será realizada uma pesquisa de preços dos materiais utilizados para se ter uma estimativa dos custos do coletor solar. E ao mesmo tempo, será feita a compra progressiva dos materiais necessários.

A etapa de compra será realizada junto com a etapa de construção uma vez que os materiais serão adquiridos conforme o andamento da construção do coletor.

CONSTRUÇÃO

Esta fase consiste na fabricação e montagem do sistema do coletor solar, sendo o próprio coletor, base de apoio, reservatório térmico e conexões.

Ensaio hidrostático

Este ensaio visa verificar a vedação e fluxo do fluido, e o comportamento do sistema do coletor em condições adversas de carga. É durante esta etapa que também será feita as devidas correções no projeto caso este apresente algum problema durante os ensaios.

ENSAIO DO COLETOR

Estando o sistema do coletor funcional, será estudada a eficiência do coletor com base nos dados de insolação e nos dados coletados durante o ensaio.

Finalização

Esta etapa consistirá em finalizar o projeto formalmente, sintetizando os dados obtidos e gerando o relatório final do projeto.

CONSIDERAÇÕES SOBRE O CRONOGRAMA

O cronograma admitido tem por finalidade auxiliar o projeto em sua organização e execução. Podendo durante o desenvolvimento do trabalho ser alterado sempre que necessário, sem perdas para o projeto final.

Como pode ser observado, a etapa de Fundamentação Teórica iniciou-se após o prazo estipulado, atrasando assim as etapas seguintes de Pesquisa de Coletores Solares e Estudo Sobre Os Coletores Pesquisados. O atraso se deu principalmente pela falta de disponibilidade de material de pesquisa.

A etapa de Montagem do Resumo para Banca foi propositalmente atrasado, pois não havia necessidade de despender muito tempo para esta etapa. Já a etapa de Montagem do Relatório final foi iniciado com atraso, pois o grupo estava mais focado na parte de pesquisa de coletores.

3 CARACTERÍSTICAS DA RADIAÇÃO SOLAR

3.1 A CONSTANTE SOLAR

A Fig.(3.1) mostra esquematicamente a geometria da relação Sol-Terra. Devido à excentricidade da órbita da Terra, a distância varia 1,7%. Tomando $1,495 \times 10^{11}$ m como a distância média, o Sol subtende um ângulo de 32 minutos a um ponto da Terra.

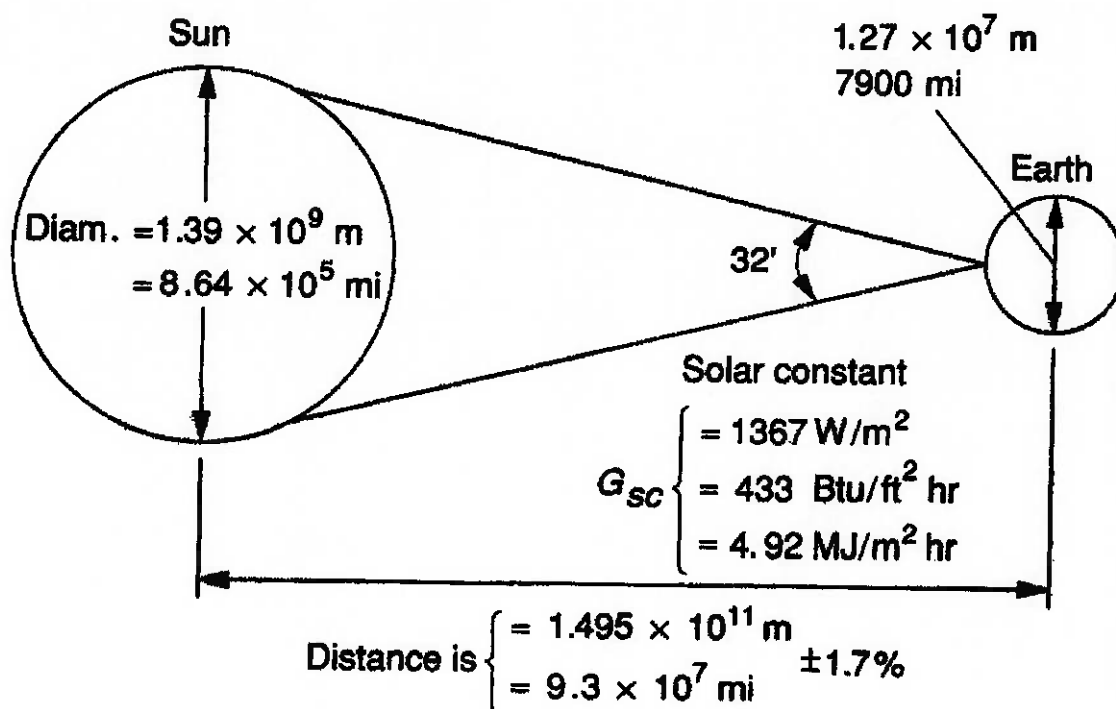


Figura 3.1 - Relação Sol-Terra

A radiação emitida pelo Sol e a relação Sol-Terra resultam em uma intensidade aproximadamente fixa através da atmosfera terrestre. A constante solar, G_{sc} , é a energia do Sol por unidade de área da seção perpendicular à direção de propagação da radiação pela distância média entre o Sol e a Terra desconsiderando os efeitos da atmosfera.

Existem diversos valores para a constante solar. Neste trabalho, adotaremos o valor de:

$$G_{sc} = 1.367 \text{ W/m}^2$$

que é um valor com variação de $\pm 1\%$ devido a erros de leitura e tomada de dados.

3.2 EMISSÃO DO CORPO NEGRO

Quando a radiação eletromagnética é incidida na superfície de um corpo, este pode transmitir, refletir ou absorver. Se o corpo for opaco não é possível transmitir a radiação. A energia radiante por unidade de tempo e comprimento de onda incidente sobre a superfície é chamada de fluxo espectral incidente, $F_{\lambda}^{(i)}$. Da mesma forma, os fluxos espectrais absorvido e refletidos são chamados $F_{\lambda}^{(a)}$ e $F_{\lambda}^{(r)}$ respectivamente. O fluxo total na distribuição é:

$$F = \int_0^{\infty} F_{\lambda} d\lambda$$

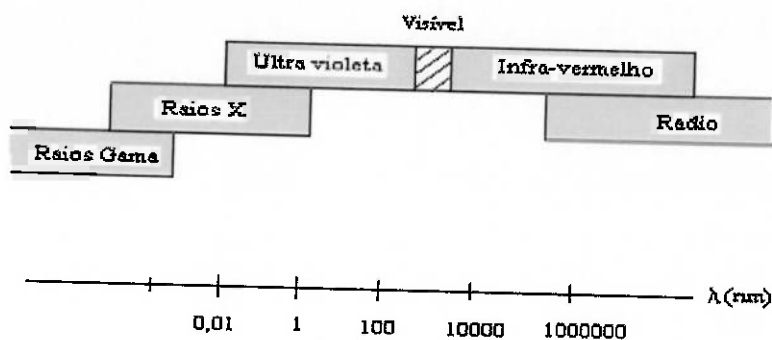


Figura 3.2 - Espectro Eletromagnético

Definimos a absorvidade espectral a_λ e a refletividade espectral r_λ da superfície do corpo por:

$$a_\lambda = \frac{F_\lambda^{(a)}}{F_\lambda^{(i)}} \text{ e } r_\lambda = \frac{F_\lambda^{(r)}}{F_\lambda^{(i)}} \quad (3.1)$$

Quando o corpo é opaco, o que não é refletido da superfície precisa ser absorvido, então podemos escrever:

$$a_\lambda + r_\lambda = 1 \quad (3.2)$$

Realmente, a_λ e r_λ , para superfícies reais, dependem do comprimento de onda do fluxo incidente e da direção de incidência da radiação. Por exemplo, muitas superfícies absorvem radiação bem quando incididas normalmente, mas não absorvem eficientemente quando a radiação é incidida em ângulos oblíquos, é o chamado efeito direcional. Não levaremos em conta esta dependência da direção de incidência e assumiremos que a superfície é um absorvedor isotrópico. Entretanto, a refletividade e a absorvidade espectrais variam consideravelmente de acordo com o comprimento de onda do fluxo radiante incidente. Muitos pigmentos podem aparecer brancos para o olho, porque eles refletem bem no espectro visível, mas podem ser excelentes absorvedores de radiação infravermelha.

Isto pode ser útil para definir as seguintes idealizações de superfícies reais:

-**Corpo Negro:** qualquer corpo cuja superfície absorve todos componentes de radiação eletromagnética incidente, independentemente do comprimento de onda ou direção de incidência. Temos:

$$a_\lambda = 1 \quad (r_\lambda = 0) \text{ para todo } \lambda$$

-**Corpo Cinzento:** qualquer corpo cuja absorvidade está abaixo da do Corpo Negro (e acima de zero). Para esses corpos, temos:

$$a_\lambda = a \text{ (para todo } \lambda) \text{ onde } 0 < a < 1$$

Não existem superfícies reais perfeitamente negras. Para radiação solar, corpo negro tem, em média, uma absorvidade de $a = 0,97$. Prata polida, cuja maior refletividade tem $a = 0,07$.

É um fato experimental da natureza que quando qualquer corpo se mantém a uma temperatura constante, sua superfície emite radiação eletromagnética característica chamada de radiação térmica. Esta radiação é geralmente emitida em todas as direções e contém todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético. O fluxo térmico emitido pelo corpo depende das suas características superficiais e também de sua temperatura. Para superfícies absorvedoras isotrópicas, o fluxo térmico é isotrópico e sua distribuição espectral é dada por:

$$F_{\lambda} = \epsilon_{\lambda} W_{B,\lambda}(T) \quad (3.3a)$$

onde ϵ_{λ} é uma característica da superfície chamada de emissividade espectral e $W_{B,\lambda}(T)$ é chamado de potência emissiva monocromática de um corpo negro. Esta função universal de λ e T é dada por:

$$W_{B,\lambda}(T) = \frac{2\pi hc_0^2}{n^2 \lambda^5 \left(\exp\left(\frac{hc_0}{n\lambda kT}\right) - 1 \right)} \quad (3.3b)$$

onde as constantes da função são:

$$h(\text{constante de Planck}) = 6,6252 \cdot 10^{-16} \text{ J}\cdot\text{s}$$

$$c_0(\text{velocidade da luz}) = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$k(\text{constante de Boltzman}) = 1,3806 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

O fluxo total radiante emitido pela superfície é dado pela Lei de Stefan-Boltzmann

$$W_B(T) = \int_0^{\infty} \epsilon_{\lambda} W_{B,\lambda}(T) d\lambda = n^2 \sigma T^4 \quad (3.4)$$

$$\text{onde } \sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c_0^2 h^3} = 4,88 \cdot 10^{-8} \text{ kcal/m}^2 \text{ hK}^4 = 5,67 \cdot 10^{-12} \text{ N/cm}^2 \text{ K}^4$$

A emissividade espectral de uma superfície isotrópica, é igual a sua absorvidade espectral ou

$$\epsilon_{\lambda} = a_{\lambda} \quad (\text{Lei de Kirchhoff}) \quad (3.5)$$

Segue-se da equação anterior, que o corpo negro ($a_{\lambda} = 1$) é o mais ineficiente radiador com $\epsilon_{\lambda} = 1$ para todos comprimentos de onda. Então para o corpo negro a equação 3.3a fica:

$$F_{\lambda,CN} = W_{B,\lambda}(T)$$

esta função que descreve o fluxo espectral emitido por uma superfície negra a uma temperatura T , é a função de Planck. Já um corpo branco ($a = \epsilon = 0$), não emite radiação térmica; e para um corpo cinzento, emite radiação de acordo com:

$$F_{\lambda,CC} = \epsilon W_{B,\lambda}(T) \quad (0 < \epsilon < 1) \quad (3.6)$$

A emissão espectral de corpos negro, cinzento e real a $T=6000\text{K}$ está mostrada na Fig.(3.3.).

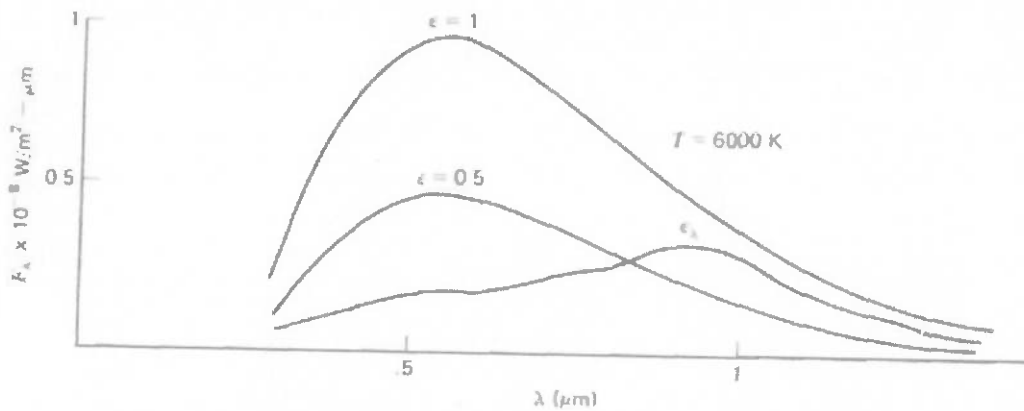


Figura 3.3 - Espectro de um corpo negro, cinzento a $T=6000K$

Note que a função espectral de um corpo negro é igual a função de Planck, enquanto que a função espectral de um corpo cinzento tem o mesmo formato mas com um fator de redução ϵ .

A Fig. (3.4) mostra a função de Planck como função do comprimento de onda para diferentes temperaturas. Cada curva tem área finita abaixo dela e cada uma tem um comprimento de onda máximo, λ_{\max} , que resulta em um $W_{B,\lambda}$ máximo. Pode-se mostrar que a seguinte propriedade matemática de $W_{B,\lambda}$ é válida:

$$\lambda_{W(B,\lambda)\max} \cdot T = \alpha \text{ (cte)} \quad (3.7a)$$

e

$$\int_0^{\infty} W_{B,\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad (\text{Lei de Stefan-Boltzmann}) \quad (3.7b)$$

onde α e σ são constantes universais:

$$\alpha = 2898 \mu m K$$

$$\sigma = \frac{5,6696 \cdot 10^{-8} \text{ N}}{m^2 \cdot K^4} \quad (\text{constantes de Stefan-Boltzmann})$$

O λ de uma distribuição de Planck qualquer é freqüentemente dita que representa a “cor” característica, embora não necessariamente a cor detectada pelo olho humano. Apesar disso, o fato de que λ decresce com o crescimento de T , explica o porquê um corpo fica vermelho forte em uma dada temperatura e fica esbranquiçado quando a temperatura aumenta. A brancura indica a presença de componentes azulados.

O fluxo total emitido por um corpo negro deriva da equação da lei de Stefan-Boltzmann:

$$F_{CN} = W_B(T) = \sigma T^4 = (5,67 \cdot 10^{-8} \text{ N} / m^2 K^4) T^4 \quad (3.8)$$

A emissão do corpo negro aumenta muito quando aumentamos a temperatura. Para um corpo cinzento, temos as equações:

$$F_{CC} = \epsilon \sigma T^4 \quad (0 < \epsilon < 1) \quad (3.9)$$

$$\epsilon = \frac{W(T)}{W_B(T)} \quad \text{emissividade total}$$

$$\epsilon_\lambda = \frac{W_\lambda(T)}{W_{B,\lambda}(T)} \quad \text{emissividade monocromática}$$

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (\text{se o corpo for negro } \tau = 0)$$

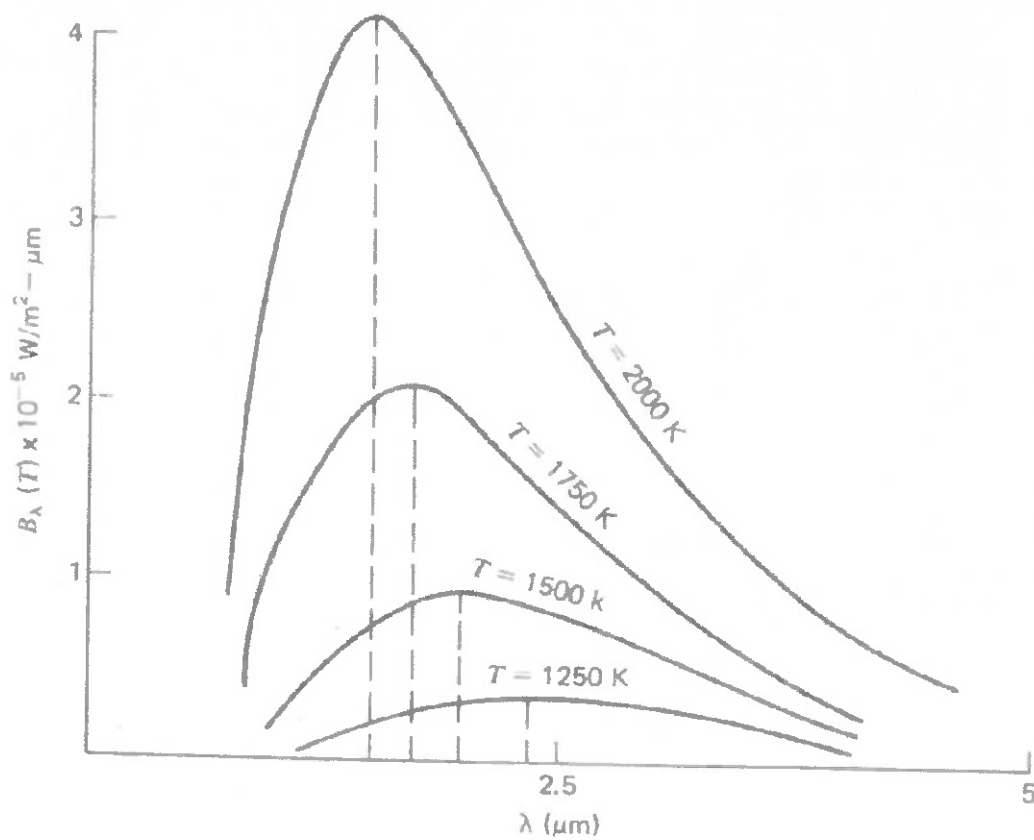


Figura 3.4 - Espectro de emissão térmica a diferentes temperaturas.

As linhas tracejadas mostram os valores de λ_{\max}

3.3 MEDIDAS DA DURAÇÃO DA LUZ SOLAR

O tempo de luz solar, que é, o tempo durante o qual a luz do Sol é visível, é usada para estimar a radiação média da radiação solar. Dois instrumentos são muito usados, o registrador de luz solar Campbell-Stokes usa uma esfera de vidro de aproximadamente 10 cm de diâmetro como uma lente que produz uma imagem do Sol na superfície oposta da esfera. Uma tira de papel tratado padronizado é montado ao redor de uma apropriada parte da esfera, e a imagem do Sol queima o papel sempre que a radiação direta está acima de um nível crítico. O comprimento da porção queimada do papel fornece um índice de duração da luz do Sol. Essas medições são incertas em diversas contas: a interpretação do que constitui a porção queimada é incerta, o instrumento não responde a baixos níveis de radiação no começo e fim do dia, e a condição do papel depende da sua umidade.

Oheliógrafo (registrador fotoelétrico de luz solar) incorpora duas células fotoelétricas de selênio, uma das quais é obscurecida da radiação direta e a outra é exposta. Na ausência de radiação direta, os dois detectores indicam (aproximadamente) o mesmo nível de radiação. Quando a radiação direta incide no disco exposto, a saída desta célula é maior do que a do obscurecido. A duração da diferença de radiação crítica detectada pelas duas células é uma medida da duração da luz do Sol.

4 CARACTERÍSTICAS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

4.1 SUPERFÍCIES SELETIVAS

Coletores solares devem ter alta absorvidade para radiação no espectro da energia solar. Ao mesmo tempo, eles perdem energia por uma combinação de mecanismos incluindo radiação térmica das superfícies absorvedoras, e é desejável ter a mais baixa possível perda. A temperatura destas superfícies é menor que 200 °C (473K), enquanto a temperatura efetiva da superfície do Sol é aproximadamente 6000 K. Assim, a faixa do comprimento de onda da radiação emitida só sobrepõe ligeiramente o espectro solar. Dado essas circunstâncias, é possível *criar uma superfície com alta absorvidade solar e baixa emissividade de longo comprimento de onda*, que são, as superfícies seletivas.

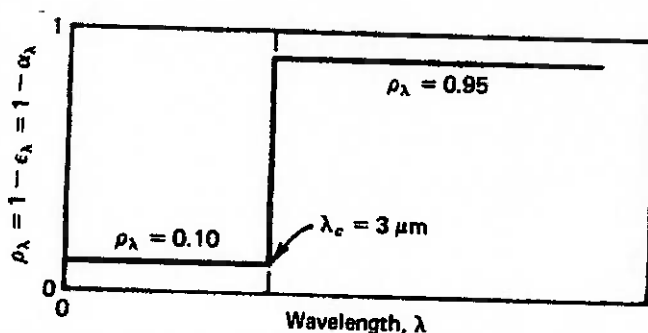


Figura 4.1 - Uma superfície seletiva hipotética com um comprimento de onda de corte de $3 \mu\text{m}$.

O conceito de superfície seletiva está ilustrado na Fig. (4.1). Essa superfície idealizada é chamada de uma superfície semi-cinzenta, pois pode ser considerada cinzenta no espectro solar (i.e., em comprimentos de onda menores do que aproximadamente $3 \mu\text{m}$) e também cinzenta, mas com propriedades diferentes, no espectro infravermelho (i.e., em comprimentos de onda maiores do que aproximadamente $3 \mu\text{m}$). Para esta superfície idealizada, a refletividade abaixo desse nível de comprimento de onda é muito baixa. Para uma superfície opaca $\alpha_\lambda = 1 - \rho_\lambda$, então nesta faixa α_λ é muito alta. Em comprimentos de onda maiores do que λ_c , a refletividade é quase unitária, e assim $\epsilon_\lambda = \alpha_\lambda = 1 - \rho_\lambda$, a emissividade nesta faixa é baixa.

A absorvidade da energia solar e a refletividade da radiação de longo comprimento de onda são determinados de dados da refletividade monocromática pela integração sobre uma faixa espectral apropriada. Para uma operação normal de coletores solares planos, as temperaturas serão sempre baixas o suficiente nas quais essencialmente todas as energias irão emitir comprimentos de onda maiores do que $3 \mu\text{m}$.

4.2 MECANISMOS DE SELETIVIDADE

Coberturas que tem alta absorvidade para radiação solar e alta transmissividade para radiação de pequeno comprimento de onda podem ser aplicados em substratos com baixa emissividade. A cobertura absorve energia solar e o substrato diminui a emissão de radiação de radiação de longo comprimento de onda. As coberturas podem ser homogêneas ou ter estrutura particular, suas propriedades são então, as propriedades inerentes ópticas de qualquer material de cobertura ou de propriedades do material e da estrutura da cobertura. Muitas das coberturas usadas são de metal-óxido e os substratos são metais. Exemplos são os

óxidos de cobre em alumínio e óxido de cobre em cobre. Uma cobertura de sulfeto de níquel-zinco pode ser aplicada sobre ferro galvanizado.

Superfícies seletivas de tinta preta (cromo preto) têm sido amplamente adotadas. O substrato é usualmente uma camada de níquel em uma base de aço ou cobre. As superfícies são formadas por eletrodeposição em um banho em ácido crômico e outros agentes. Em amostras de laboratório, foram obtidas absorvidades de 0.95 a 0.96 e emissividades de 0.08 a 0.14, enquanto as propriedades médias de amostras de linha de produção de coletores planos foram de $\alpha = 0.94$ e $\varepsilon = 0.08$. As superfícies apresentam boa durabilidade em exposição a ambientes úmidos.

A absorvidade das coberturas podem aumentar com a adoção de avançados fenômenos de interface. Algumas superfícies usadas em substratos altamente reflexivas são semicondutores que tem alta absorvidade no espectro da energia solar, mas que tem alta transmissividade de ondas de longo comprimento de onda. Muitos desses materiais também têm altos índices de refração e assim refletem a energia solar incidente. Essa perda por reflexão pode ser reduzida com coberturas secundárias anti-reflexivas.

Uma consideração crítica no uso de superfícies seletivas é sua durabilidade. Coletores solares precisam ser projetados para operar essencialmente sem manutenção por muitos anos, e as coberturas e os substratos precisam manter suas propriedades em atmosferas úmidas, oxidantes e em elevadas temperaturas. Experiências mostraram que coberturas de cromo preto em outros tipos de aplicações e óxido de cobre em cobre ou em cromo preto podem ser duráveis.

4.3 PROPRIEDADES ÓTIMAS

Em coletores de placa plana, é geralmente mais crítico ter alta absorvidade do que baixa emissividade. É a característica de muitas superfícies que existem em relações entre α e ε como mostrados pela Fig. (4.2). No caso da superfície de cromo preto, a melhor espessura da camada é óbvia. Numa cobertura de PbS, a massa ótima por unidade de área não é imediata. A melhor combinação precisa ser em função dos efeitos das duas propriedades na operação do sistema de energia solar completo. Mas a generalização pode ser feita para que α esteja próxima da sua melhor performance.

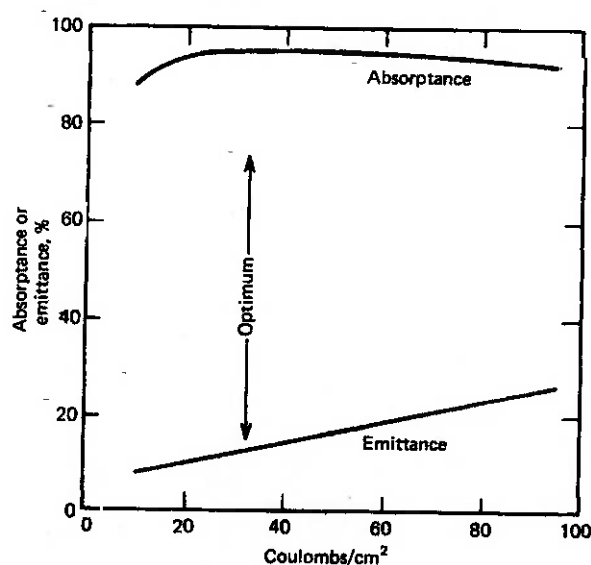


Figura 4.2 - Característica do material em função da emissividade/absorvidade

5 COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS

A transmissão, reflexão, e absorção de radiação solar pelas várias partes de um coletor solar são importantes na determinação da performance do coletor. A transmissividade, refletividade, e absorvidade são funções da radiação incidente, espessura, índice de refração, e coeficiente de extinção do material. Geralmente os índices de refração n e os coeficientes de extinção K do material da cobertura são funções do comprimento de onda da radiação. Entretanto, neste capítulo, todas as propriedades serão inicialmente assumidas como independente do comprimento de onda.

5.1 REFLEXÃO DA RADIAÇÃO

Em aplicações solares, a transmissão de radiação é através de uma parede ou filme de material então, existem duas interfaces por cobertura que causam perdas por reflexão. Na incidência oblíqua, a radiação refletida na interface é diferente para cada componente de polarização, então a radiação transmitida e a refletida tornam-se particularmente polarizadas. Conseqüentemente, ela é necessário tratar cada componente de polarização separadamente.

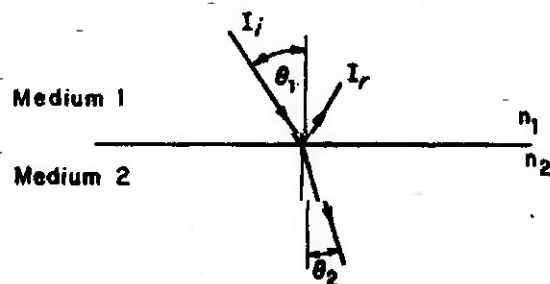


Figura 5.1 - Reflexão e refração de um feixe de luz

5.2 ABSORÇÃO PELO VIDRO

A absorção da radiação em um meio particularmente transparente é descrito pela lei de Bouguer, que é baseada na suposição da radiação absorvida ser proporcional à intensidade local do meio e a distância x que a radiação tem que atravessar no meio:

$$dI = -IKdx \quad (5.1)$$

onde K é a constante de proporcionalidade, o coeficiente de extinção, que é assumido para ser uma constante no espectro solar. Integrando ao longo do comprimento atual no meio (i.e., de zero a $L/\cos \theta_2$) fornece

$$\tau_a = \frac{I_{transmitido}}{I_{incidente}} = \exp\left(-\frac{KL}{\cos \theta_2}\right) \quad (5.2)$$

onde o subscrito a lembra que somente a perda por absorção foi considerada. Para vidro, o valor de K varia de aproximadamente 4m^{-1} para vidro "água branca" (que aparece branco quando visto na extremidade) a aproximadamente 32m^{-1} para um vidro pobre (esverdeado na extremidade).

5.3 PROPRIEDADES ÓPTICAS DE COBERTURAS DE COLETORES

A transmissividade, refletividade, e absorvidade de uma cobertura simples, causam perdas de reflexão e absorção. Para a componente perpendicular da polarização, a transmissividade τ_{\perp} , refletividade ρ_{\perp} , e absorvidade α_{\perp} da cobertura são

$$\tau_{11} = \tau_a \frac{1-r_{\perp}}{1+r_{\perp}} \left(\frac{1-r_{\perp}^2}{1-(r_{\perp}\tau_a)^2} \right) \quad \tau = \frac{1}{2} [\tau_{11} + \tau_{\perp}] \quad (5.3)$$

$$\rho_{11} = r_{\perp} (1 + \tau_a \tau_r) \quad (5.4)$$

$$\alpha_{11} = (1 - \tau_a) \left(\frac{1-r_{\perp}}{1-r_{\perp}\tau_a} \right) \quad (5.5)$$

Resultados similares são encontrados para as componentes paralelas da polarização. Para radiação incidente não polarizada, as propriedades ópticas são encontradas pela média das duas componentes.

A equação para a transmissividade de uma cobertura de coletor pode ser simplificada notando que o último termo da Equação 5.3 (e sua equivalente para a componente paralela da polarização) é aproximadamente unitária, assim τ_a é raramente menor do que 0.9 e r é da ordem de 0.1 para as coberturas de coletores na prática.

$$\tau \cong \tau_a \tau_r \quad (5.6)$$

Esta é uma relação satisfatória para coletores com materiais de cobertura e ângulos de interesse prático.

A absorvidade de uma cobertura de coletor solar plano pode ser aproximado deixando o último termo da Equação 5.5 ser unitário de forma que

$$\alpha \cong 1 - \tau_a \quad (5.7)$$

Embora o termo desprezado na Equação 5.5 seja maior do que o termo desprezado na Equação 5.3, a absorvidade é muito menor do que a transmissividade de forma que a acurácia total das duas aproximações é aproximadamente a mesma.

A refletividade de uma cobertura simples é então encontrada de $\rho = 1 - \alpha - \tau$, de forma que

$$\rho \cong \tau_a (1 - \tau_r) = \tau_a - \tau_r \quad (5.8)$$

A vantagem das Equações 5.6 a 5.8 sobre as Equações 5.3 a 5.5 é que a polarização considerada em equações aproximadas para o termo τ_r no lugar de expressões complicadas para cada propriedade óptica.

5.4 TRANSMISSIVIDADE PARA RADIAÇÃO DIFUSA

A análise anterior só se aplica para a componente direta da radiação solar. A radiação incidente em um coletor solar também consiste de radiação solar espalhada pelo céu e refletida no solo. Em princípio, a maior parte da radiação que passa através da cobertura pode ser calculada integrando a radiação transmitida sobre todos os ângulos. Entretanto, a distribuição angular desta radiação é geralmente desconhecida.

Para a radiação incidente isotrópica (i.e., independente do ângulo), a integração pode ser realizada. A apresentação dos resultados pode ser simplificada pela definição de um ângulo equivalente para radiação direta que dá a mesma transmissividade como para a radiação difusa. Para uma ampla faixa de condições encontradas em aplicações de coletores solares, o ângulo equivalente é 60°. Em outras palavras, a radiação direta incidente em um ângulo de 60° tem a mesma transmissividade que uma radiação isotrópica difusa.

Coletores solares são usualmente orientados de forma que eles “possam ver” tanto céu como terra. Se a radiação difusa do céu e a radiação refletida da terra são isotrópicas, então a transmissividade do vidro pode ser encontrada pela integração da radiação direta sobre ângulos de incidência apropriados.

5.5 PRODUTO TRANSMISSIVIDADE- ABSORVIDADE

Para usar a análise do próximo capítulo, é necessário avaliar o produto transmissividade-absorvidade ($\tau\alpha$). Da passagem da radiação através da cobertura e incidente na placa, uma fração é refletida de volta à cobertura. Embora, toda essa radiação não seja perdida parte dela é refletida de volta à placa.

A situação é ilustrada na Fig. (5.2) onde τ é a transmissividade da cobertura no ângulo desejado e α é a absorvidade angular da placa absorvedora. Da energia incidente, $\tau\alpha$ é absorvida pela placa absorvedora e $(1-\alpha)\tau$ é refletida de volta à cobertura. A reflexão da placa absorvedora é assumida como difusa, então a fração $(1-\alpha)\tau$ que incide na cobertura é de radiação difusa e $(1-\alpha)\tau\rho_d$ é refletida de volta à placa absorvedora. A quantidade ρ_d refere-se à refletividade da cobertura para radiação difusa incidente pelo lado dos fundos e pode ser estimada pela Equação 5.8 como a diferença entre τ_a e τ no ângulo de 60° .

5.6 RADIAÇÃO SOLAR ABSORVIDA

Pré-determinar a performance do coletor requer informações da energia solar absorvida pela placa absorvedora. A radiação incidente tem três distribuições espectrais diferentes: *radiação direta*, *radiação difusa*, e *radiação refletida terrestre*, e cada uma delas deve ser tratada separadamente. Os detalhes dos cálculos dependem de qual modelo de radiação difusa pelo céu será usado. Usando o conceito de radiação difusa isotrópica na base horária, pode-se utilizar a equação da radiação absorvida através do produto($\tau\alpha$):

$$S = I_b R_b (\tau\alpha)_b + I_d (\tau\alpha)_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho_d (I_b + I_d) (\tau\alpha)_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (5.9)$$

onde $(1+\cos\beta)/2$ e $(1-\cos\beta)/2$ são os fatores de forma do coletor para o céu e do coletor para a terra, respectivamente. Os subscritos b , d , e g representam direta, difusa, e terrestre. Para um dado ângulo do coletor, a Fig. (5.3) dá o ângulo efetivo de incidência da radiação difusa e refletida terrestre, e a Fig. (5.2) podem ser usadas para encontrar os valores de absorvidade e transmissividade. O ângulo θ para radiação direta, que é necessária na determinação de R_b , é usado para encontrar $(\tau\alpha)_b$. O produto $(\tau\alpha)$ pode ser encontrado das propriedades de cobertura e a Fig. (5.4) pode ser usada nos ângulos apropriados de incidência em cada fluxo de radiação para determinar os três produtos de transmissividade-absorvidade.

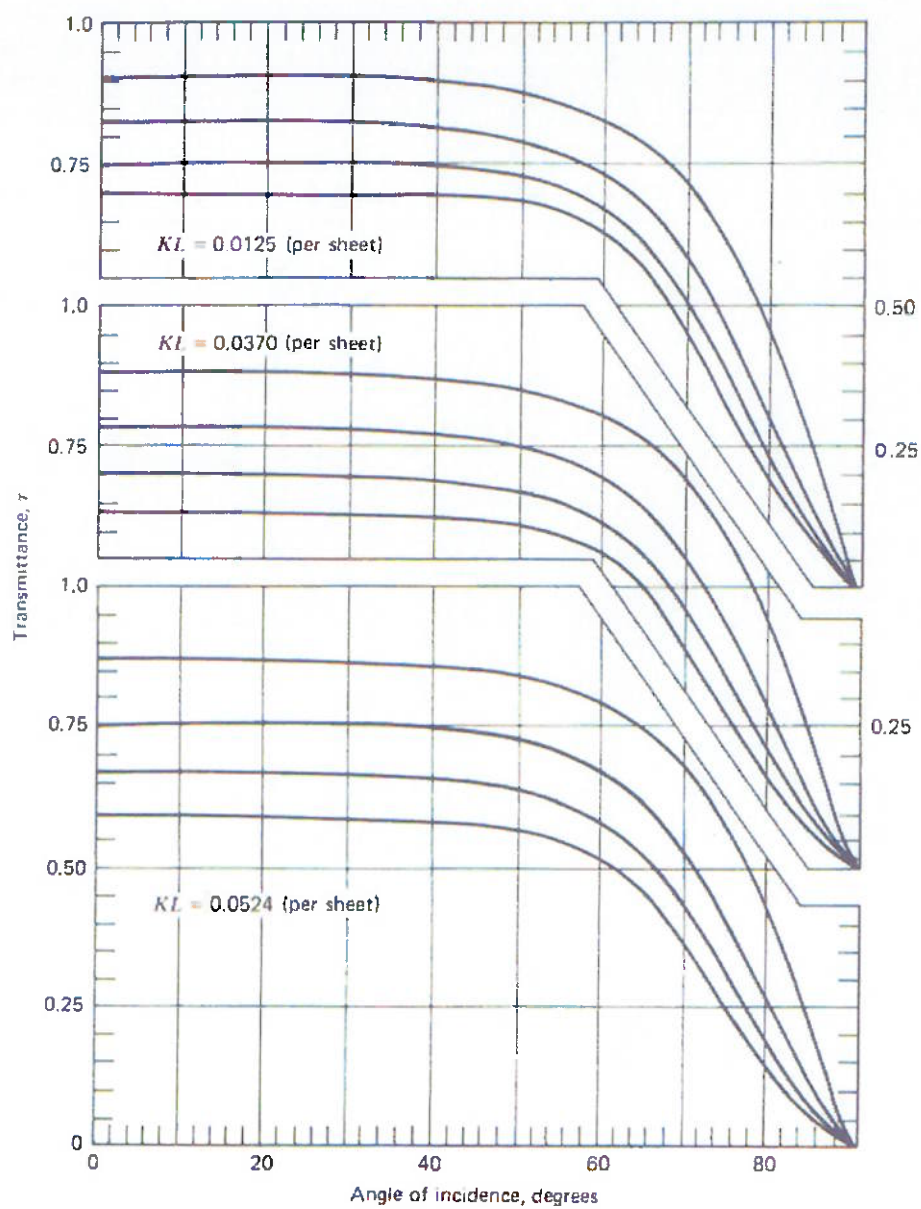


Figura 5.2 - Transmissividade (considerando absorção e reflexão) de 1,2,3 e 4 coberturas para três tipos de vidros.

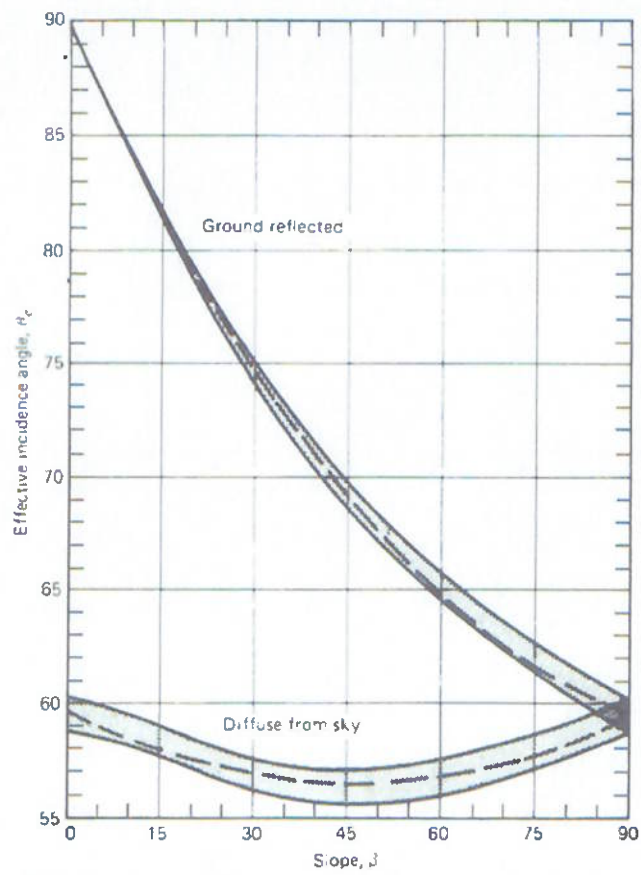


Figura 5.3 - Ângulo de incidência efetivo da radiação difusa e radiação terrestre em superfícies inclinadas.

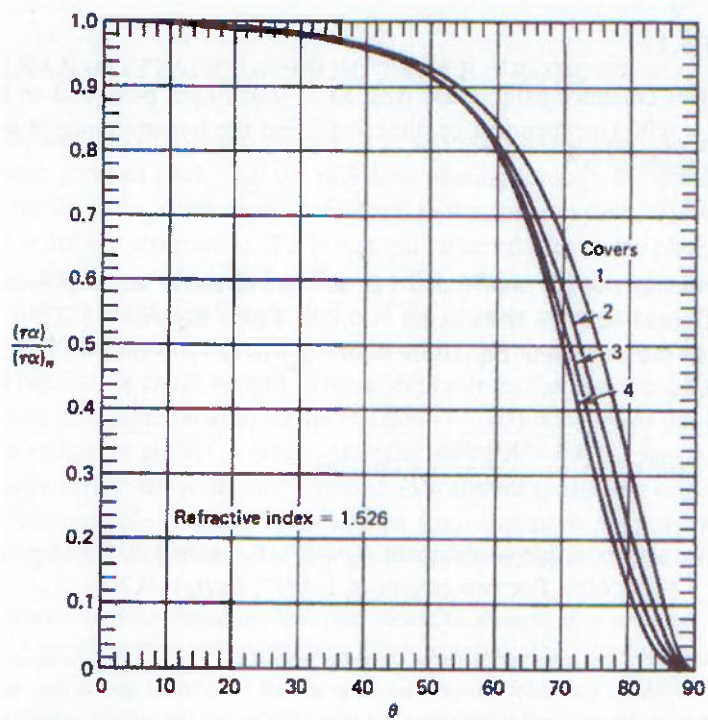


Figura 5.4 - Curvas típicas de $(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n$ para 1 a 4 coberturas.

6 AQUECIMENTO SOLAR COM PLACAS SOLARES PLANAS CONVENCIONAIS

O sistema convencional de aquecimento de água por energia solar é composto de coletores solares e reservatório térmico.

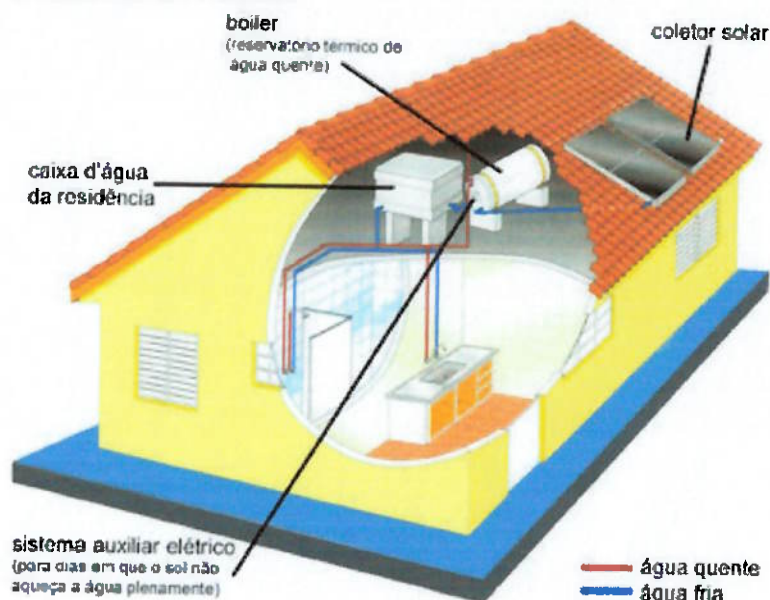


Figura 6.1 - Instalação convencional do sistema de aquecimento solar

Coletores solares, também conhecidos por coletores de placa plana ou coletores planos, são dispositivos utilizados na captação da radiação solar. Estes coletores são sistemas que empregam a conversão termodinâmica e conforme a temperatura obtida, são classificados em coletores de baixa, média e alta concentração.

De um modo geral eles são constituídos de uma caixa termicamente isolada na parte inferior, contendo sobre este isolamento o sistema de escoamento do fluido onde ocorre a troca de calor para o fluido. A parte superior do coletor está fechada por um plano transparente, cujo material dependendo do nível de temperatura desejado para o fluido de trabalho.

O funcionamento baseia-se na simples transformação de energia que ocorre da seguinte maneira: Energia luminosa é absorvida pelos coletores, o qual transforma em energia térmica, elevando a temperatura da água no coletor.

O reservatório térmico, também conhecido por Boiler, é um recipiente para armazenamento da água aquecida. São cilindros de cobre, inox ou polipropileno, isolados termicamente com poliuretano expandido. Desta forma, a água é conservada aquecida para consumo posterior. A caixa de água fria alimenta o reservatório térmico, mantendo-o sempre cheio.

Em sistemas convencionais, Fig. (6.1), a água circula entre os coletores e o reservatório térmico através de um termo-sifão. A água dos coletores fica mais quente e, portanto, menos densa que a água no reservatório. Assim, a água fria, de maior densidade, concentra-se na região inferior por convecção. A circulação da água também pode ser feita através de bombas em um processo chamado de circulação forçada ou bombeado, e são normalmente utilizados em piscinas e sistemas de grandes volumes.

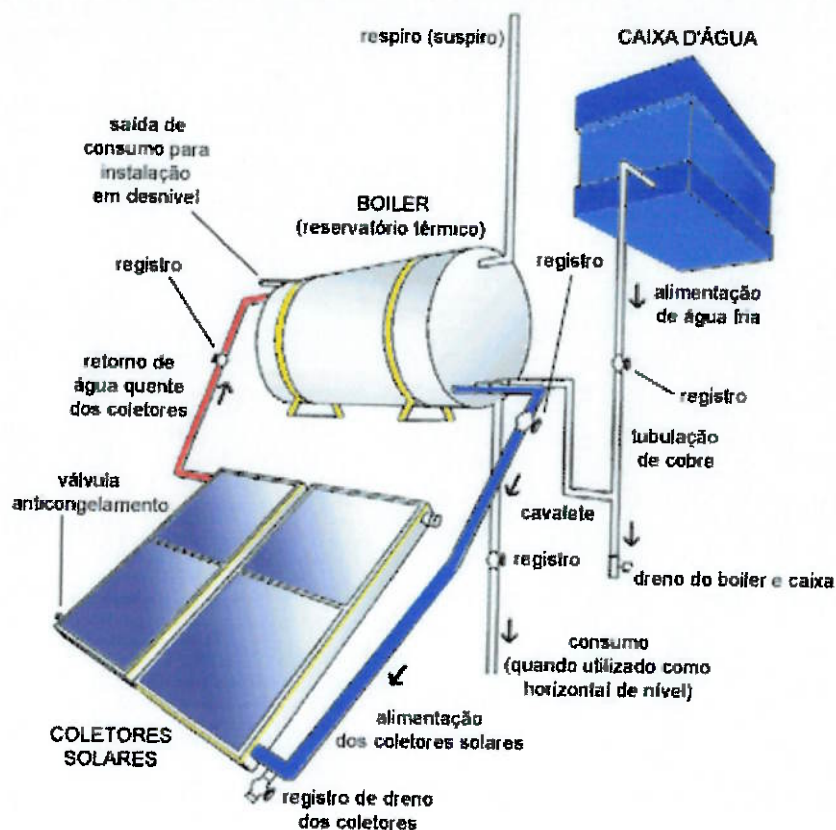


Figura 6.2 - Sistema convencional de circulação de água através do termo-sifão

6.1 GEOMETRIA DOS COLETORES

A forma geométrica empregada na construção dos coletores planos é via de regra a forma retangular, nada impede, contudo que outras formas como a circular, quadrada, trapezoidal, possam ser utilizadas, muito embora estas formas conduzam a desperdícios dos materiais empregados na construção dos coletores devido às dimensões padronizadas destes materiais encontrados comercialmente.

Um coletor plano para aquecimento de água é constituído de:

- Cobertura transparente;
- Placa absorvedora da radiação;
- Camada de material isolante;
- Caixa metálica, com fundo;
- Reservatório de água quente.

6.1.1 A COBERTURA TRANSPARENTE

Devido à falta nacional de polímeros que possam substituir com eficiência o vidro plano empregado na cobertura transparente dos coletores, este item pesa consideravelmente

no custo de fabricação dos sistemas de absorção, devido ao alto preço de comercialização deste material.

A espessura do vidro empregado na cobertura está compreendida entre 3 a 4 mm. A cobertura transparente tem duas finalidades básicas:

- Reduzir as perdas térmicas devido ao efeito convectivo;
- Provocar o efeito estufa;

6.1.2 A PLACA ABSORVEDORA DA RADIAÇÃO SOLAR

No conjunto do coletor plano, a placa absorvedora é o item mais importante do sistema de aquecimento considerando o fato de que é ao nível de sua superfície que se processa a conversão da radiação em calor.

A placa absorvedora é formada pelo conjunto chapa-tubo, constituindo uma peça única, o que proporciona melhor transferência da energia calorífica entre esta e o fluido de trabalho, a água.

Os tubos são dispostos em forma de uma grade. Entre as inúmeras disposições, a grade formada por tubos paralelos é a mais usual.

A construção da placa absorvedora da radiação solar empregada nos coletores planos para aquecimento de água, obedece normalmente aos esquemas de construção da Fig. (6.3)

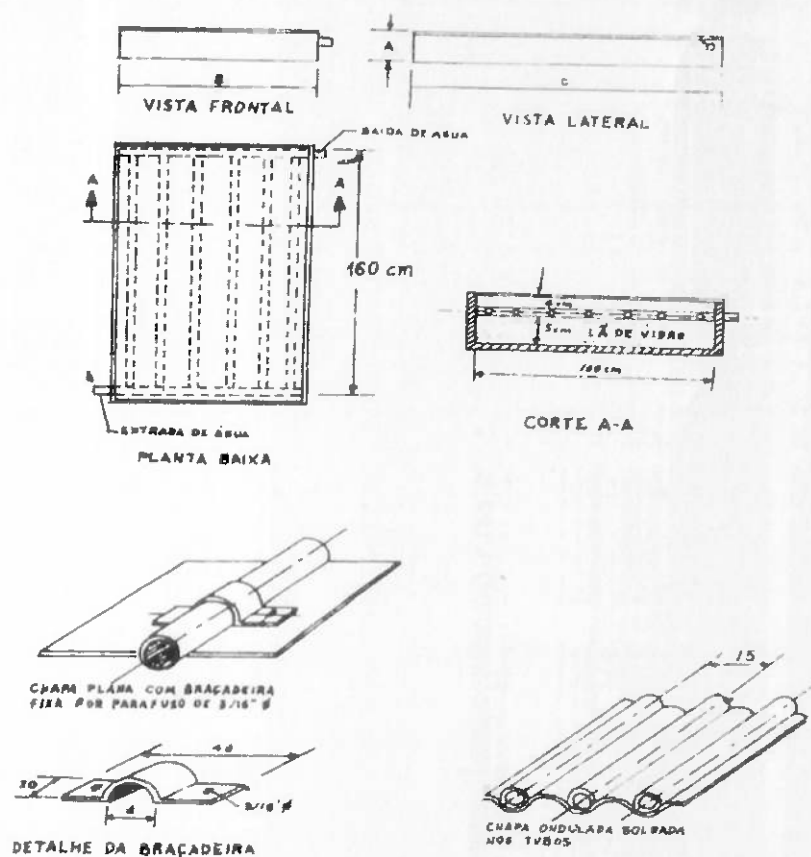


Figura 6.3 - Esquemas de construção

As dimensões básicas podem ser alteradas dependendo da conveniência do usuário.

Entre as disposições mostradas para fixação da chapa aos tubos, a que indica a união feita por solda branca corrida em toda a extensão do tubo, é a mais indicada por garantir uma melhor ligação entre os dois elementos. As outras soluções oferecem, contudo resultados satisfatórios, porém sempre que possível deverão ser evitadas por oferecerem a possibilidade de um mal contato entre a chapa e o tubo, o que dificultaria a transferência de calor entre estes elementos.

Algumas fábricas de coletores nacionais estão empregando perfis especiais de chapa onde os tubos são fixados por pressão. Uma solução interessante é o emprego de chapas onduladas pois isto proporciona um aumento de área na captação da radiação solar incidente.

6.1.3 ISOLAMENTO TÉRMICO

Os coletores planos são dispositivos que funcionam segundo a conversão térmica da radiação solar, transferindo o fluxo energético proveniente da radiação incidente para o fluido de trabalho que circula no interior da grade de tubos da placa coletora.

Para que o sistema possa funcionar de acordo com os níveis térmicos desejados, é importante reduzir ao máximo as perdas térmicas, já que se tratando de sistemas que funcionam a temperaturas superiores às do ambiente, é importante evitar as respectivas trocas de calor. Isto é obtido com o emprego de materiais isolantes, de baixa condutibilidade térmica (K), onde a lã de vidro é entre todos o material mais empregado.

Um baixo valor de (K) não é suficiente para definir um bom isolante térmico. Ele deve ainda satisfazer aos seguintes requisitos:

- Custo aquisitivo baixo;
- Ser resistente às temperaturas a que será submetido;
- Possuir boa resistência mecânica;
- Ser resistente à ação das intempéries atmosféricas;

O melhor isolamento é o ar cujo (K) é igual a 0,02 W/m.K.

Sendo a maioria dos isolantes térmicos de constituição fibrosa ou porosa, eles serão tão mais isolantes quanto maior for a quantidade de ar neles aprisionado, pois isto torna o (K) destes materiais tanto quanto possível próximo do (K) do ar. Apesar disso, a porosidade dos isolantes deve obedecer a dimensão determinada. O aumento progressivo da porosidade poderá ocasionar movimentos convectivos no ar aprisionado, o que gerará um aumento nas trocas de calor, fazendo com que o material perca as suas propriedades isolantes.

6.1.4 CAIXA DO COLETOR

A caixa do coletor é o elemento estrutural do sistema de aquecimento. Vários são os materiais empregados em sua construção:

- Fibra de vidro;
- Chapa de ferro galvanizado;
- Plástico rígido;
- Chapa ou perfil de alumínio;
- Madeira;
- Perfis especiais, geralmente alumínio extrudado;

Apesar do alumínio ser um bom condutor de calor, ele tem sido usado com frequência, em forma de perfil, para compor a caixa do coletor.

Os perfis leves utilizados na construção da caixa do coletor são projetados para eliminar a tendência à flexão lateral, o que poderá ocasionar danos à cobertura transparente durante o transporte do coletor para o local de instalação.

6.1.5 RESERVATÓRIO DE ÁGUA QUENTE

A fim de garantir o suprimento noturno de água quente, assim como nos dias chuvosos, a água previamente aquecida na placa coletora é armazenada em um tanque termicamente isolado, parte integrante do sistema de aquecimento.

A estocagem é formada por um duplo tanque construído em chapa metálica, de ferro galvanizado, entre os quais existe um revestimento de lã de vidro ou de outro material isolante de mesmas características.

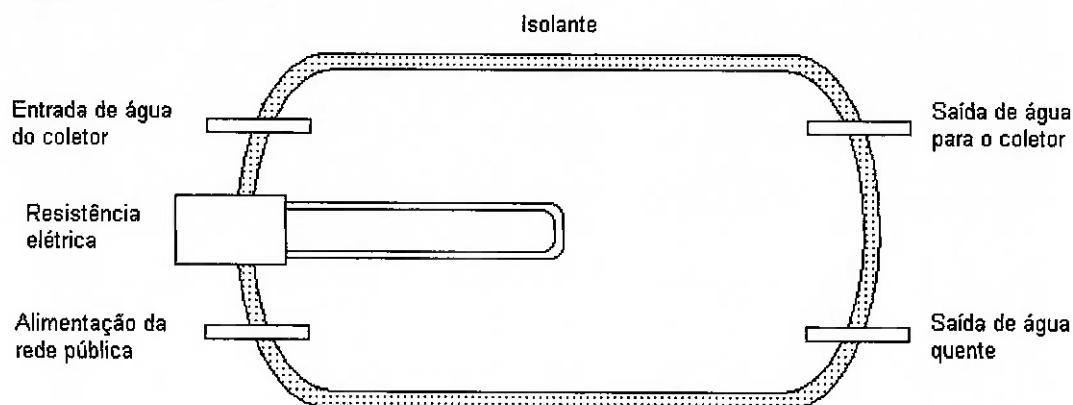


Figura 6.4 - Diagrama do reservatório quente

Muito embora não seja de emprego corrente, a estocagem de água quente pode ser feita em reservatórios com múltiplo isolamento térmico. Esta prática proporciona uma redução das perdas térmicas, porém tem a desvantagem de aumentar os custos de construção do reservatório. Nas aplicações domiciliares o emprego de reservatórios com múltiplo isolamento é desnecessário, salvo nos casos em que se deseja um mínimo de variação da temperatura da água 24 horas por dia.

Para os casos de quando os coletores solares são incapazes de aquecer a água a temperatura adequada, os reservatórios são equipados de uma resistência elétrica que ligado a rede de energia, aquece a água do reservatório. Sendo por esta razão, o nome comercial destes reservatórios ser boiler (do inglês, ferver).

6.2 MONTAGEM DOS COLETORES

Normalmente as dimensões dos coletores para aquecimento de água estão entre 1,6 a 2,0 metros quadrados, muito embora isto não signifique que não possam ser construídos módulos de maiores dimensões.

Sistemas de aquecimento de água em grandes volumes exigem a instalação de vários coletores. Nestes casos costuma-se dispor os módulos de três maneiras distintas, dependendo do tipo de circulação da água no sistema: paralelo, série e série-paralelo.

Para o aquecimento domiciliar, costuma-se empregar a montagem em paralelo, sendo assim somente esta a ser analisada.

Neste tipo de montagem a água circula no interior do coletor através da tubulação da placa coletora da mesma maneira que circularia no caso de um único coletor. Portanto não se

verifica aumento da temperatura da água de um módulo de coletor para o seguinte, na hipótese de que todos os módulos sejam de mesmas dimensões e igualmente construídos.

Na montagem em paralelo a circulação natural (termo-sifão), funciona corretamente. O depósito de estocagem de água quente é montado de tal modo que a sua parte inferior mantenha uma cota de mínima em relação à saída de água quente dos coletores, pois a pressão exercida pela respectiva coluna de água assim obtida e a diferença de temperatura da água do sistema facilita o início e a manutenção do processo de circulação de água pôr termo-sifão.

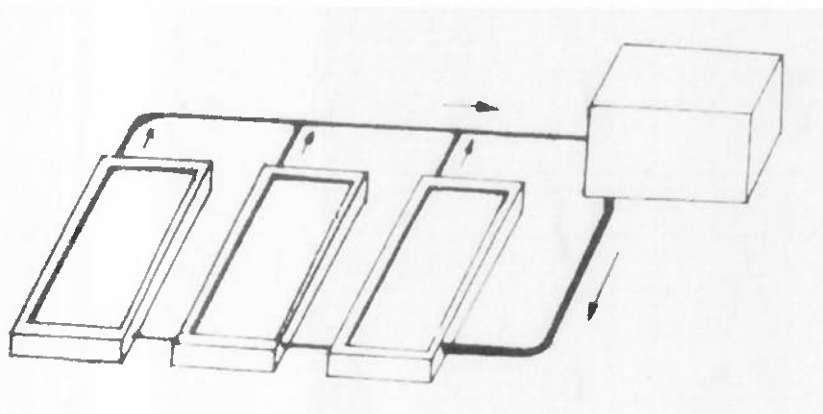


Figura 6.5 - Esquema de uma montagem de coletores em paralelo.

No caso de instalação residencial os coletores são instalados sobre o telhado, quer diretamente sobre as telhas, quer montados em apoios de alvenaria ou mesmo estruturas metálicas projetadas com tal finalidade.

As instalações de superfície, no caso de residência, devem ser evitadas não somente por questões estéticas mais, principalmente, por motivo de segurança contra danos materiais por eventuais arremessos de pedras, objetos e movimentação de animais domésticos.

6.3 ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DO COLETOR

Os coletores devem estar direcionados para o Norte, com menor desvio lateral possível. Assim, antes de iniciar a instalação, deve-se verificar qual das águas do telhado melhor se presta a esta função.

A inclinação dos coletores deve ser a da latitude local mais 10° para compensar a variação anual da declinação solar, principalmente nos sistemas a termo-sifão pois isto facilita a convecção natural da água no circuito do coletor.

Em São Paulo (capital), a latitude é de 23° . Assim o ângulo de inclinação ideal com a horizontal deve ser de aproximadamente $23 + 10 = 33^\circ$, Fig. (6.6). Na prática, a inclinação que temos à nossa disposição é uma das águas do telhado. É esta que vale. A estrutura mecânica a ser produzida para obter direção e inclinação corretas é bem mais complexa e cara do que adicionar um coletor a mais para obter a temperatura desejada durante o inverno.

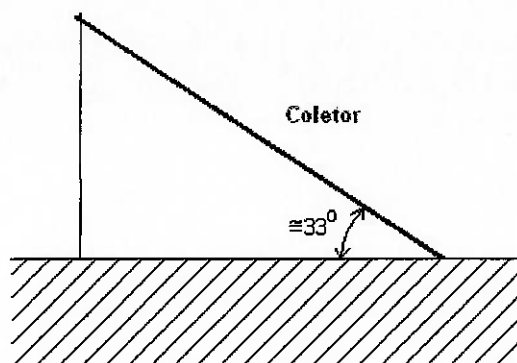


Figura 6.6 – Inclinação máxima para a região de São Paulo

6.4 DIMENSÕES DO COLETOR EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE PESSOAS

As dimensões de um coletor são via de regra obtida pelo cálculo onde vários parâmetros são levados em consideração entre eles, a radiação, tipo de superfície absorvedora, material do coletor. Apesar disso, nas regiões bem ensolaradas como é o caso do nordeste brasileiro, a prática recomenda que é possível dimensionar o coletor apenas em função do número de usuários. Sem incorrer em erros significativos, pode-se empregar a seguinte tabela:

Tabela 6-1 - Dimensão do coletor em função do número de pessoas (médias obtidas através de pesquisas em diversos fornecedores de aquecimentos solares comerciais)

Número de Pessoas	Área do Coletor	Volume de água, Aquecida por dia
4	3,0 m ²	200 litros
8	5,0 m ²	500 litros
12	8,0 m ²	1000 litros

6.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE O VIDRO E OUTROS MATERIAIS

A cobertura transparente utilizada nos coletores planos é um dos itens que pesam bastante no custo do coletor, devido a seu preço elevado.

O alto teor de óxido de ferro existente na composição do vidro nacional normalmente encontrado no comércio é identificado pelos vidros de bordas esverdeadas, o que os torna de qualidade inferior para as aplicações solares. A não planeidade do vidro compromete suas qualidades óticas, podendo concorrer para aumentar as perdas da radiação incidente, por reflexão.

Os vidros de bordas esverdeadas chegam a absorver de 5 a 10% da radiação solar.

O vidro mais indicado é o de bordas de cor branca. O teor de óxido de ferro nestes vidros é de 0,01%, o que permite transmitir cerca de 92% da radiação solar.

O vidro temperado, mais resistente e de melhor qualidade que os vidros comuns, seria o indicado para a cobertura transparente dos coletores planos. Ocorre, porém que o custo elevado desse material torna o custo final do sistema muito elevado.

7 BALANÇO TÉRMICO

O desempenho de um coletor está relacionado com a energia por ele absorvida e a energia perdida. A relação entre elas define o seu balanço térmico. A equação representativa deste balanço é dada por:

$$Q = Q_a - Q_p$$

onde:

Q = calor líquido transferido ao fluido de trabalho

Q_a = calor absorvido pelo coletor

Q_p = calor perdido pelo coletor (perdas térmicas)

O calor absorvido Q_a é função de:

- Energia incidente (I_r)

- Área útil do coletor (A_c)

- Fator $P\tau\alpha$ que representa o produto transmissividade-absorvidade da cobertura transparente e placa absorvedora, fator este referido como eficiência ótica do sistema.

Assim temos:

$$Q_a = I_r \cdot A_c \cdot P\tau\alpha$$

As perdas térmicas (Q_p) são referidas à temperatura (T_p) da placa coletora em relação à temperatura (T_a) do ambiente. Outras perdas térmicas como as verificadas por convecção, são bem mais significativas. Se bem que estas perdas podem ser calculadas, porém na prática a representamos por um coeficiente de perda (P_t), de tal modo que:

$$Q_p = P_t \cdot A_c \cdot (T_p - T_a)$$

Substituindo os valores de Q_a e Q_p , temos:

$$Q = I_r \cdot A_c \cdot \lambda\alpha - P_t \cdot A_c \cdot (T_p - T_a)$$

Sendo I_r normalmente expresso por unidade de área e sendo Q o calor líquido na área do coletor, poderemos expressar o seu valor por unidade de área, de modo que:

$$q = \frac{Q}{A_c} = \frac{I_r \cdot A_c \cdot \lambda\alpha}{A_c} - \frac{P_t \cdot A_c \cdot (T_p - T_a)}{A_c} = I_r \cdot P\tau\alpha - P_t (T_p - T_a)$$

A equação acima é conhecida como equação de HOTTEL-WHILLIER.

7.1 EFICIÊNCIA TÉRMICA DO COLETOR

A eficiência térmica do coletor é expressa por:

$$\eta = \frac{q}{I_r}$$

Substituindo a equação de Hottel-Whillier na expressão acima:

$$\eta = P\tau\alpha - \frac{P_t \cdot (T_p - T_a)}{I_r}$$

A representação gráfica desta equação em um par de eixos cartesianos, dá origem a uma reta que permite obter informações importantes relacionadas com a eficiência do coletor.

As perdas representadas por P_t ocorrem por diversos mecanismos. Entre a placa absorvedora e a cobertura transparente assim como entre as laterais do coletor e seu exterior, as perdas térmicas são devidas à radiação e convecção, porém em diferentes proporções. Entre o isolamento térmico e o exterior do coletor, as perdas são por condução.

Muito embora estas perdas possam ser calculadas, é comum estimar um valor para elas, de tal modo que (P_t) possa ser considerado constante. Para um coletor bem projetado o valor de P_t se situa entre 0,5 e 0,75 W/°Cm².

O termo $\lambda\alpha$ (produto transmissividade do vidro pela absorvidade da placa coletora de radiação), depende do tipo da cobertura transparente, número de coberturas e tipo de placa absorvedora.

No caso mais geral (pintura de preto fosco e uma cobertura transparente) o produto $\lambda\alpha$ é considerado constante e igual a 0,8.

Analisando o gráfico abaixo concluímos que:

- Ponto de intersecção (B) da reta AB com o eixo das abscissas representa o quociente de $\lambda\alpha / P_t$;
- Ponto de intersecção (A) da reta AB com o eixo das ordenadas dá o valor do produto $\lambda\alpha$ a reta AB é o valor negativo de P_t ;

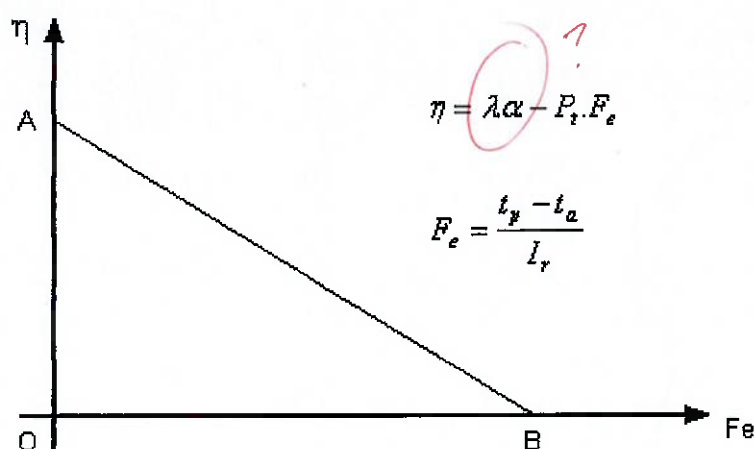


Figura 7.1 - Gráfico de eficiência do coletor para determinados valores de ($\lambda\alpha$) e (P_t)

É importante notar que o eixo OY e o eixo OX do gráfico representam respectivamente os valores da eficiência (η) e da função eficiência (F_e) do coletor considerado.

7.2 TEMPERATURA DA ÁGUA NA SAÍDA DO COLETOR

As variações da temperatura ambiente e radiação incidente em um coletor solar durante um determinado tempo de operação do sistema, não oferece condições para determinar com precisão a temperatura de trabalho efetiva do fluido, a não ser no caso em que se utilize a média diária ou mensal dos parâmetros tais como intensidade de radiação, temperatura ambiente, outros.

o presente cálculo os valores obtidos são valores instantâneos que servem para se ter uma razoável idéia da temperatura da água na saída do coletor, podendo no instante seguinte haver uma variação do valor calculado, bastando para isso que haja uma variação significativa da incidência solar no sistema de aquecimento.

Consideramos os seguintes elementos:

te – temperatura da água na entrada do coletor

t_s – temperatura da água na saída do coletor

O calor aumento de temperatura da água será:

$$\Delta T = t_s - t_e$$

A quantidade de calor necessária para transferir à água uma temperatura correspondente a ΔT será:

$$Q_u = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T = \dot{m} \cdot C_p \cdot (t_s - t_e)$$

onde:

\dot{m} = fluxo de massa dado em litros/hora

C_p = calor específico da água dado em Kcal/kg °C

Parte do calor transferido para água pelo coletor é cedida ao ambiente, que se encontra a uma temperatura T_a .

Durante o percurso da água no interior da grade de tubos do coletor, a sua temperatura vai gradativamente aumentando, a partir de t_e até atingir t_s na saída do coletor, ao mesmo tempo em que parte do calor absorvida pela água é transferida para o ambiente. Isto constitui uma perda térmica (T_p) dado por:

$$T_p = \left(\frac{t_s + t_e}{2} \right) - T_a$$

onde o calor perdido (Q_p) devido a queda de temperatura do fluido ao trocar calor com o ambiente, vem dado por:

$$Q_p = K \cdot A_c \cdot T_p = K \cdot A_c \cdot \left[\left(\frac{t_s + t_e}{2} \right) - T_a \right]$$

onde:

K = coeficiente de absorção do vidro (W/m² °C)

A_c = área do coletor em m²

T_a = temperatura ambiente em °C

A quantidade de calor incidente no coletor será:

$$Q_i = I_r \cdot A_c \cdot \lambda \alpha$$

e o calor útil absorvido pelo coletor será:

$$Q_u = Q_i - Q_p$$

Expressão que expressa o balanço térmico do coletor.

Substituindo nesta equação os seus termos pelos seus respectivos valores:

$$\dot{m} \cdot C_p \cdot (t_s - t_e) = I_r \cdot A_c \cdot \lambda \alpha - K \cdot A_c \cdot \left[\left(\frac{t_s + t_e}{2} \right) - T_a \right]$$

$$t_s = \frac{2I_r \cdot A_c \cdot \lambda \alpha + t_e \left(2\dot{m} \cdot C_p - K \cdot A_c \right) + 2K \cdot A_c \cdot T_a}{2\dot{m} \cdot C_p + K \cdot A_c}$$

onde os valores correntes de K são:

- vitral: $K = 5,5 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
- dois vitrais: $K = 3,3 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
- fator $\lambda\alpha$ é aproximadamente 0,8

8 AQUECEDORES SOLARES DE BAIXO CUSTO

8.1 PLACAS SOLARES PLANAS DE PVC DE FILME DE ÁGUA

O sistema básico para uma família de quatro ou cinco pessoas é composto por três placas em plástico interligadas e pintadas de preto (à frente denominadas coletores), por onde circula a água a ser aquecida, e um reservatório de volume útil de 160 a 170 litros. O peso dos três coletores em operação (com água) é de cerca de 23 kg, distribuídos numa área de $2,2\text{m}^2$, e de dimensões aproximadas de 1,3 m de altura por 0,7 m de largura cada.



Figura 8.1 – Coletor solar plano de PVC

Não obstante, é possível aumentar a quantidade de coletores e o volume do reservatório a fim de atender um maior número de pessoas. Para efeito de aproximação, pode-se calcular 80 a 100 litros por cada m^2 de coletor em S. Paulo e 100 a 120 litros no interior paulista. Cada coletor de $0,75\text{m}^2$ é composto um perfil de forro de PVC modular (do tipo forro de cobertura de escritórios, postos de gasolina, etc.) com tubos de PVC agregados às suas extremidades. Estes coletores ficam expostos ao Sol, apoiados sobre o telhado. A tubulação e conexões dos circuitos são feitas em PVC comercial.

A circulação da água ocorre naturalmente, mas para isso é necessário que o reservatório esteja acima do nível dos coletores. Esta disposição promove o efeito “termo sifão” (circulação natural entre coletores e reservatório térmico), baseado em diferença de densidade entre a água fria enviada aos coletores e a água quente dentro dos mesmos. Este efeito corresponde a uma efetiva bomba de água solar.

Assim, pelos mecanismos de radiação solar e convecção, a água é aquecida. A circulação pára quando da ausência de sol ou quando alcançada a máxima temperatura dentro do reservatório, limite natural de eficiência do sistema. Ou seja, é um sistema auto-regulável, onde o objetivo é alcançar a temperatura máxima dentro do reservatório (de 20 a 25 graus acima da temperatura máxima do ar medida no dia do aquecimento). Ele é simples e estável (sem peças, calibragem ou controles potencialmente problemáticos). Por sua característica de

utilizar um filme de água de pequena espessura (10mm) e, portanto, de pequena massa e grande superfície de contato com a superfície negra do coletor, apresenta pequena inércia, logo, rápido tempo de reação. Característica importante quando, por exemplo, o sol aparece por poucos minutos entre duas nuvens.

Vale ressaltar ainda que por não possuir um vidro de cobertura (para geração do efeito estufa que permite a elevação da temperatura do coletor bem acima de 100°C), que é típico de coletores tradicionais, apresenta em contrapartida mais rápidas respostas térmicas no início da manhã e no final de tarde. É que a cobertura vítrea reflete praticamente toda a luz quando ela incide sobre o vidro com pequena inclinação.

Segue abaixo sequência de construção do coletor solar plano de PVC.



Foto 1: Fixação do tubo em placa com pregos



Foto 2: Marcação com lápis do rasgo a ser feito



Foto 3: Furo com ferro de solda para introdução da serra



Foto 4: Corte seguindo a marcação



Foto 05: Lixamento das superfícies



Foto 06: Limpeza antes da colagem



Foto 07: Encaixe do forro no tubo



Foto 08: Introdução de 5mm do forro no tubo



Foto 09: "Montinho" de araldite para reforço

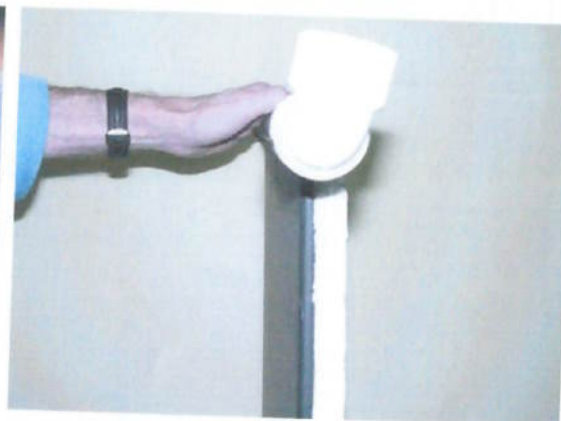


Foto 10: Colagem do isopor no verso



Foto 11: Fita crepe para proteção na pintura



Foto 12: Pintura com pincel e preto fosco



Foto 13: Saco de impermeabilização e higienização



Foto 14: Furo da caixa de isopor com ferro de solda



Foto 15: Caixa de isopor 180 litros com todas adaptações para uma caixa de água quente

Em locais em que não é possível a instalação de uma nova caixa (exclusiva para água quente), seja por falta de espaço ou por motivos financeiros, ou até mesmo por dificuldade de colocá-la no forro da residência, existe a opção da adaptação da já existente caixa d'água, para conter simultaneamente água quente e água fria. Este tipo de opção é destinado a casas que já contém caixas de água de volume igual ou maior do que 500 litros e em que não haja válvulas de descarga conectadas nestas. Isso porque a turbulência causada por uma descarga de bacia poderia misturar as camadas quente/fria. Existem algumas sugestões de como driblar esse efeito, como a colocação de uma “peneira” sobre a tomada de água para descargas, dentro da caixa, mas ainda nenhum teste prático foi feito sobre a validade deste mecanismo.

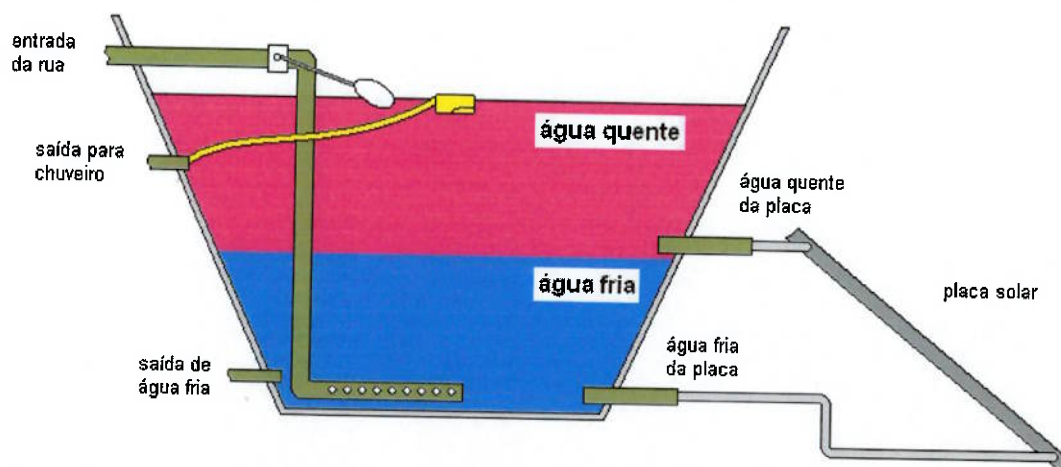


Figura 8.2 – Reservatório de água quente / frio

O princípio utilizado é o da água quente ser mais leve do que a água fria, já tratada anteriormente, formando assim um “colchão” de água quente sobre a fria. (Veja um esquema ilustrativo no final da página “Aquecedor ASBC”, no site sunpower). A única diferença com relação aos reservatórios descritos no item anterior é a altura do flange que leva água fria aos coletores e da flange que recebe a água quente proveniente deles. Estas alturas devem ser iguais, e calculadas da seguinte forma:

Determina-se o volume de água quente que se deseja armazenar, p.ex. 200 litros, e sabendo que estes irão ficar na porção superior do reservatório, calcula-se qual é a altura referente a tal volume, a partir da linha d’água.

O próximo passo é fazer as adaptações necessárias na caixa. Esta deve ser esvaziada e seca. Fazer os dois furos para as flanges de 1”, em paredes opostas, com os centros na altura determinada acima (esta altura deve ser contada a partir da linha d’água!), com serra copo ou broca comum.

Fazer um terceiro furo, para flange de ½”, destinado à coleta d’água quente para consumo, com centro a 10 cm abaixo do centro dos furos anteriores, numa parede perpendicular a estas. Nesta flange deve ser colocado um pescador, idêntico ao detalhado no item anterior, assim como é necessária a preparação de um tubo “redutor de turbulência” adaptado à torneira de bóia, também da mesma forma. A saída da água fria de consumo deve estar na posição a mais baixa possível, mas provavelmente já foi feita assim.

Por último, mas não menos importante, deve ser feito um bom isolamento térmico da tampa e porção superior das laterais, do lado externo da caixa. Quanto melhor a qualidade (e espessura) deste isolamento, que pode ser feito em lã de rocha, de vidro, isopor, celulose batida em água, manta de polietileno expandido, cobertores, etc., melhor será seu rendimento.

8.2 COLETOR SOLAR DE ESPIRAL

O coletor solar de Espiral é comumente utilizado em países da América do Norte para o aquecimento de piscinas, sendo uma alternativa de baixíssimo custo. Para uma montagem típica de 4 pessoas, temos:

- 3 caracóis de tubos de irrigação pretos reciclados de ¾ “;
- 1 bomba centrífuga de 1/2 hp;
- 2 sensores de temperatura;
- 1 controlador de temperatura;
- 1 reservatório de água quente;
- 1 armação de madeira para efeito estufa;
- 1 plástico transparentes;

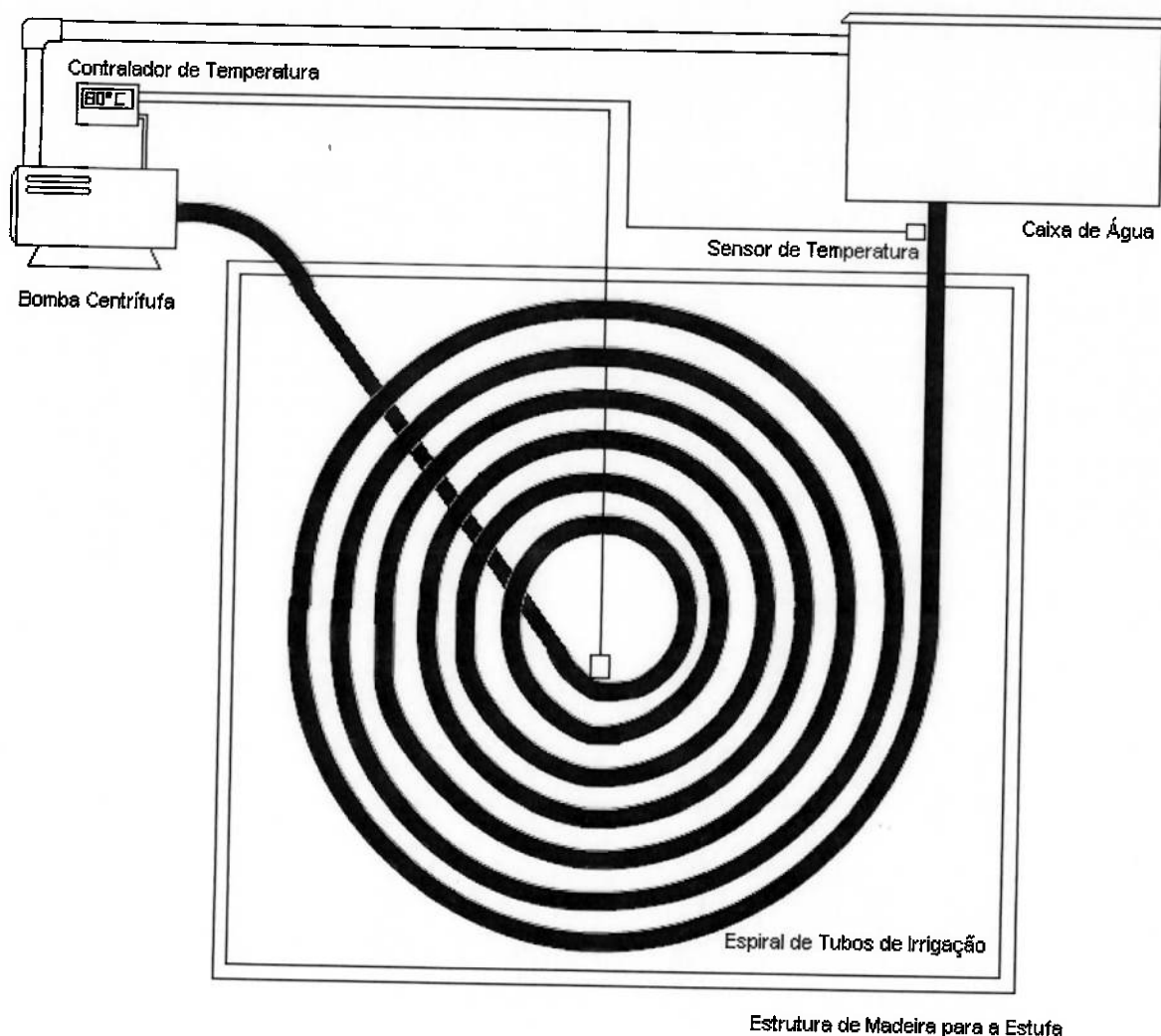


Figura 8.3 – Coletor solar espiral

A grande vantagem deste sistema é seu baixo custo. Cada metro de tubo reciclado pode ser facilmente obtido por R\$ 0,10/metro. Uma bomba centrífuga para esse uso pode ser obtida por R\$ 10,00. Para o controlador de temperatura há a proposta de se programar um PIC (microprocessador programável), possibilitando um baixíssimo custo.

Um outro fator notável é a durabilidade do sistema, sendo limitado basicamente pelas partes atritantes de borracha da bomba centrífuga. O tubo de irrigação tem uma vida média de 6 anos, dependendo da exposição à radiação solar. Mesmo assim, pode-se virar a caracol a cada seis anos, dobrando sua durabilidade.

Mas o que realmente impressiona neste conjunto é sua facilidade de construção e instalação.

A bomba de água é utilizada, pois a geometria do caracol de tubos recicláveis não possibilita o termosifão (não há continuidade vertical na convecção). Para não haver desperdício de energia elétrica (o que é a essência do aquecimento solar) há a utilização do

microcontrolador de temperaturas, que calcula a diferença de temperaturas entre coletor e reservatório, adicionando a bomba apenas quando necessário.

Uma maneira encontrada para amenizar o efeito da convecção de ar e ao mesmo tempo não onerar o custo do projeto é a utilização de uma estufa com armação de madeira revestida por plásticos transparentes não espessos.

9 SOLUÇÃO ADOTADA : COLETOR SOLAR DE PLACAS DE PVC

Entre as diversas configurações elaboradas, adotou-se o sistema de coletores solares de forro de PVC com vedações de silicone termoplástico e um reservatório quente/frio com válvula seletora de temperaturas. O uso do PVC, material isolante térmico, é justificado pelo seu baixo custo (R\$ 34,00 para o total de 4 placas de 2 m) e também pelo tempo de exposição solar disponível do conjunto (ou seja, saindo-se do pressuposto que em áreas tropicais temos grande parte do dia com altas taxas de radiação solar, pode-se utilizar um material isolante térmico, uma vez que ao final do dia o isolante terá sido exposto por várias horas, acumulando grande montante de energia).

O reservatório térmico é parte integrante fundamental do sistema, sendo responsável pelo acúmulo de energia térmica. Composto por 2 compartimentos separados por um anteparo feito do mesmo material da caixa d'água (não tóxico), torna-se desnecessária a aquisição de um reservatório térmico específico para o sistema, ou seja, este é construído dentro da caixa de água residencial, diminuindo consideravelmente o custo do projeto. A válvula fria, associada a um tubo seletor, força o consumo de água aquecida até que a mesma se esgote para depois utilizar água não aquecida. O consumo regular de água não aquecida (torneiras, cozinha, etc) é possibilitado pela presença de flanges na lateral do reservatório. O reservatório térmico mantém os componentes da caixa de água original, ou seja, bóia para controle de vazão de entrada, flanges de entrada de água da rua e saída de água fria. São acrescentados a esses componentes os seguintes itens: flange para saída de água fria para o coletor, flange para entrada de água quente no reservatório e flange de saída de água quente para consumo residencial.

9.1 COLETOR SOLAR

O coletor solar Fig. (9.1) é composto por 4 placas de 2m cada de forro de PVC pintadas com tinta preta fosca engastadas em um par de "flautas" (tubos de 1" de PVC com rasgos para introdução das placas). O recipiente anti-convectivo Fig. (9.2) é feito de madeira e plástico transparente de espessura 0,4 mm. É no coletor solar que estão as vedações de silicone termoplástico.

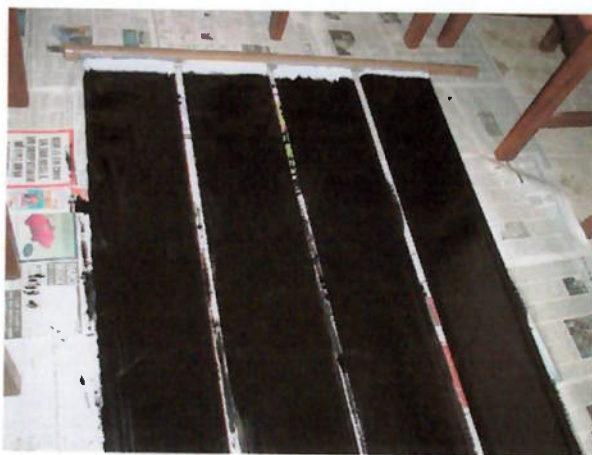


Figura 9.1 - Coletor solar de placas de PVC (com tinta preta fosca)



Figura 9.2 - Recipiente anti-convectivo (com plástico transparente de 0,4 mm)

9.2 RESERVATÓRIO QUENTE/FRIO

Dado aos problemas encontrados pelo sistema de coleta de água quente, tais como bolhas no sistema de coleta de água quente interrompendo o “efeito sifão” e grande perda de eficiência térmica na interface de água quente e fria, outro sistema de armazenamento de água foi adotado.

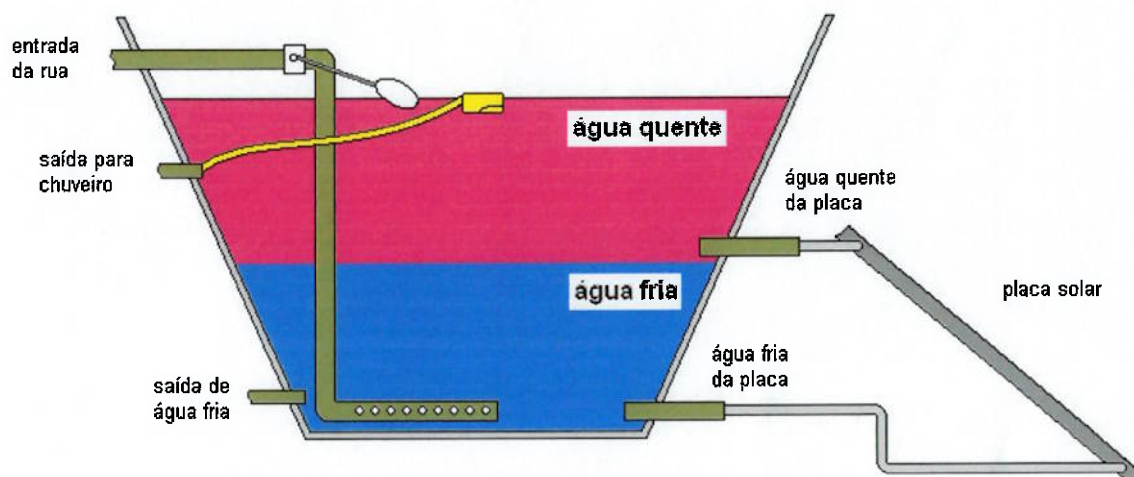


Figura 9.3 - Térmico proposto inicialmente, sem alterações

Como pode ser observada na Fig. (9.2.1), a saída de água quente (denominada saída para chuveiro) localiza-se no meio da ‘parte’ quente do reservatório. Inicialmente foi sugerido reposicionar a saída próxima à interface entre água quente e a água fria. Porém se o nível de água ultrapassar este limite, o coletor de água quente deixaria de funcionar, o que poderia provocar danos ao chuveiro uma vez que a tubulação secaria.

O problema de perda de eficiência devido à interface quente/fria foi solucionado com o emprego de um anteparo térmico. Este anteparo deveria ser de algum material que apresentasse um baixo coeficiente térmico, ao mesmo tempo em que teria de ter densidade superior ao da água e não se deteriorar quando imerso em água por um período prolongado. Por fim, decidimos pela utilização de outra tampa de caixa d’água, pois seu material apresenta um baixo coeficiente térmico e devido a sua aplicação, pode ser facilmente submerso em água, não sendo composto de materiais anti-higiênicos.

O coletor de água quente foi então integrado à saída de água fria pois com isso soluciona-se o problema de pane seca no encanamento. Para que não ocorra a mistura da água quente e fria, o coletor de água é dotado de um anteparo separador de temperaturas e uma válvula que se abre quando o nível da água atinge determinado nível. Esta válvula, denominada por válvula fria, era inicialmente a mesma utilizada na entrada de água fria, mas após o teste hidrostático, descobrimos que sua vazão para a pressão de coluna d’água do reservatório era muito pequena. Com isso foi necessário fabricar uma válvula equivalente, mas de proporções maiores para que pudesse proporcionar uma vazão maior, como mostrado na Fig. (9.2.2).

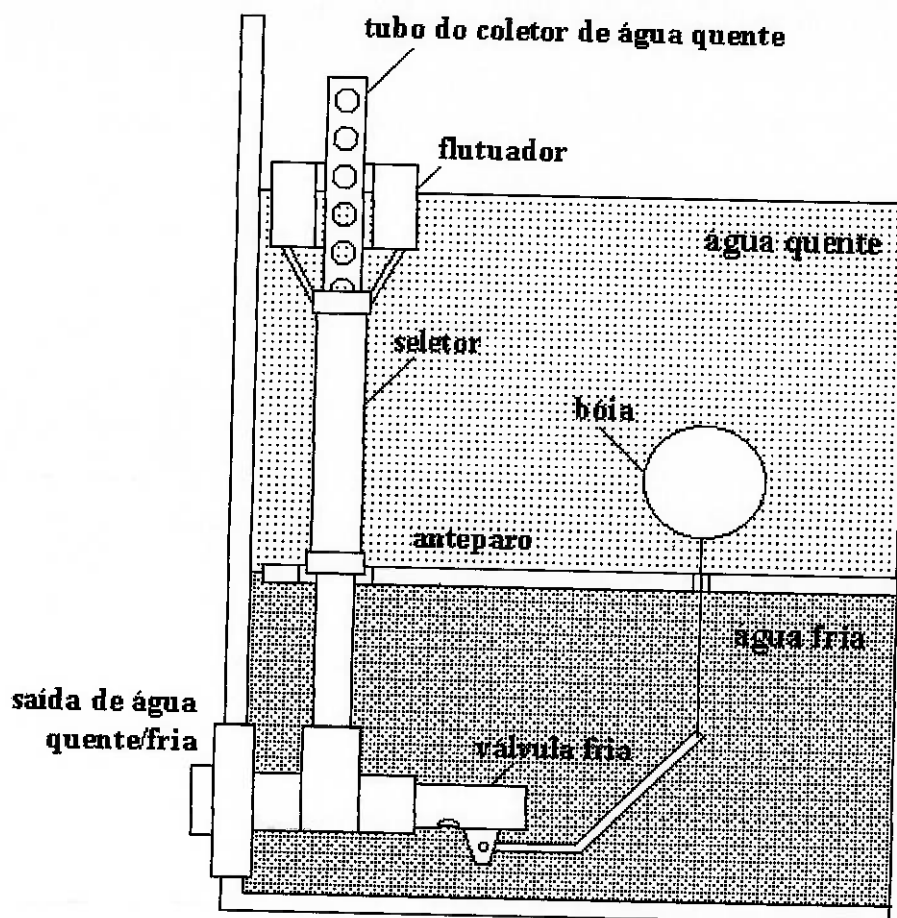


Figura 9.4 - Novo sistema coletor proposto

O coletor funciona por meio de um tubo furado e um seletor que acoplado a uma bóia, permite que somente os furos descobertos deixem entrar água quente no coletor, e conforme o nível da água abaixa, o seletor abaixa também devido à bóia. Quando o nível da água atinge o anteparo, a bóia da válvula fria abaixa, abrindo assim a válvula e evitando assim que o encanamento seque.

É importante lembrar que a caixa de água, bem como a maioria das conexões não fazem parte de planilha de custo do projeto, sendo partes integrantes do mesmo apenas as adaptações necessárias para o conjunto térmico (é pressuposto que toda residência já possua uma caixa de água e conexões).



Figura 9.5 - Reservatório térmico de 250 l de concreto (teste hidrostático)

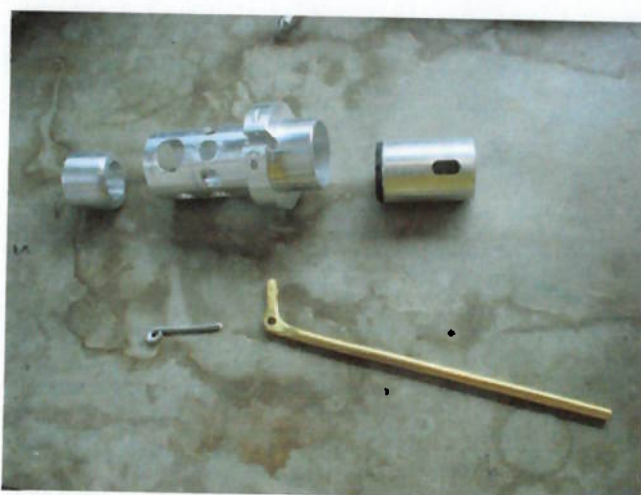


Figura 9.6 - Válvula Fria de alumínio com haste de latão



Figura 9.7 - Tubo seletor de temperaturas flutuante

10 PESQUISA E COMPRA DE MATERIAIS PARA CONSTRUÇÃO

A etapa de pesquisa e compra de materiais foi realizada juntamente à definição do coletor. Foram visitadas diversas lojas de Materiais de Construção (Leroy Merlin, Casa & Construção, Telha Norte, Center Castilho, etc.).

Apesar dos gastos efetuados ultrapassarem o valor de R\$ 400,00 o verdadeiro custo do projeto é de aproximadamente R\$ 140,00 (muitos elementos comprados não serão oferecidos no kit do projeto pois são elementos obrigatórios em qualquer residência sem aquecimento solar. Ex: caixa de água, flanges, bóia, tubulação, registros, etc.)

Tabela 10-1 - Custos de Materiais não pertencentes ao projeto

Descrição do produto	qtd.	v. unit. (R\$)	sub-total (R\$)
Adesivo a base de resina epóxi e polimercaptanas - Araldite 25g	7	10,00	70,00
Anel de vedação soldável PVC 3/4pol	2	4,60	9,20
Capa soldável PVC 3/4pol	2	0,50	1,00
Joelho 90 soldável PVC 1/2pol	4	0,25	1,00
Massa plástica cinza	1	4,15	4,15
Registro esfera soldável PVC 1/2pol	2	9,50	19,00
Registro esfera soldável PVC 3/4pol	2	11,00	22,00
Adesivo a base de resina epóxi e polimercaptanas - Araldite 25g	7	11,20	78,40
Placas de madeira e caibros			40
Caixa d'água Eternit 250L	1	76,38	76,38
			251,13

Tabela 10-2 - Custos de Materiais pertencentes ao projeto (adaptações necessárias)

Descrição do produto	qtd.	v. unit. (R\$)	sub-total (R\$)
Adesivo PVC - bisnaga 75g	1	2,60	2,60
Anel de vedação soldável PVC 1/2pol	2	4,30	8,60
Anel de vedação soldável PVC 3/4pol	1	4,60	4,60
Elumaflex - isolante 5mm 2m x 1/2pol	3	1,40	4,20
Plástico transparente 0,4 mm 4m x 2	1	4,50	4,50
Esmalte preto fosco	1/3	11,00	3,60
Forro PVC dualita 0,2 x 4m	2	20,00	40,00
Joelho 90 soldável PVC 1/2pol	4	0,25	1,00
Luva redutora soldável PVC 1 x 1/2pol	2	0,55	1,10
Tubo soldável PVC 3m x 1/2pol	2	4,80	9,60
Tubo soldável PVC 3m x 1pol	1	10,49	10,49
Tubo soldável PVC 3m x 3/4pol	1	3,80	3,80
Válvula fria de alumínio	1	29,00	29,00
Isopor 10mm 1m x 0,5m	4	1,50	6,00
Parafusos M 6 (latão)	40	0,08	3,20
Silicone termoplástico	6	0,90	5,40
Placas de madeira			12,00
Tampa para caixa d'água Eternit 250L	1	8,64	8,64
			158,33

O custo do projeto é, portanto, de R\$ 158,33 (próximo ao valor inicial estipulado).

11 COSTRUÇÃO

11.1 CONSTRUÇÃO DA CAIXA D'ÁGUA

11.1.1 FURAÇÃO DAS CAIXAS

A Caixa de Água tem 5 furos em sua lateral, todos eles feitos com uma furadeira (broca de 8 mm), uso de talhadeira e lixa.

- 2 furos de $\frac{1}{2}$ " para entrada e saída de água para a placa solar
- 1 furo de $\frac{3}{4}$ " para entrada de água de rua
- 1 furo de $\frac{3}{4}$ " para saída de água quente para o chuveiro
- 1 furo de $\frac{3}{4}$ " para saída de água fria para consumo

11.1.2 FIXAÇÃO DAS FLANGES

Na Fixação das Flanges houve um certo problema com vedação devido à grande curvatura da caixa e ausência de superfícies planas. Para garantir a estanqueidade das flanges foram usados silicone e massa de polimento "Iberê".

11.1.3 CONSTRUÇÃO DO ANTEPARO

A construção do anteparo se deu inicialmente pela redução do raio de uma tampa idêntica à utilizada para tampar a caixa d'água. Esta redução foi feita com o uma serra tico-tico, após ter sido determinado o novo raio da tampa.

Para posicionar o anteparo na altura desejada, utilizaram-se três calços que são na verdade flanges instalados na tampa nos quais se conectaram dutos de PVC de comprimento apropriado para que o anteparo se posiciona na altura adequadas.

Foi necessário também fazer um orifício por onde o tubo do coletor de água quente pudesse passar.



Figura 11.1 - Anteparo

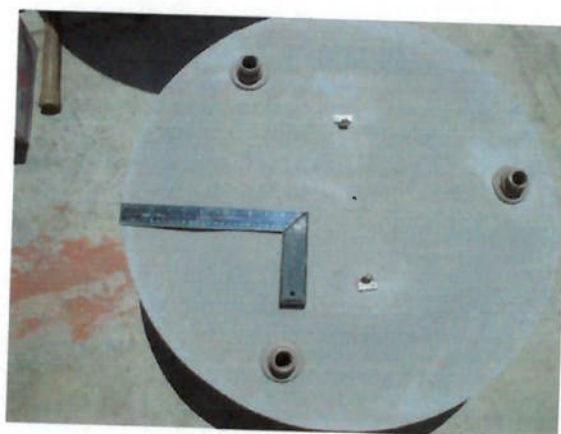


Figura 11.2 - Marcação da posição do tubo do coletor de água



Figura 11.3 - Furação inicial



Figura 11.4 - Alargamento do furo

11.2 CONSTRUÇÃO DO COLETOR DE ÁGUA QUENTE/FRIA



Figura 11.5 - Coletor de água



Figura 11.6 - Detalhe da válvula fria do coletor de água (protótipo)



Figura 11.7 - Marca do níveis da água

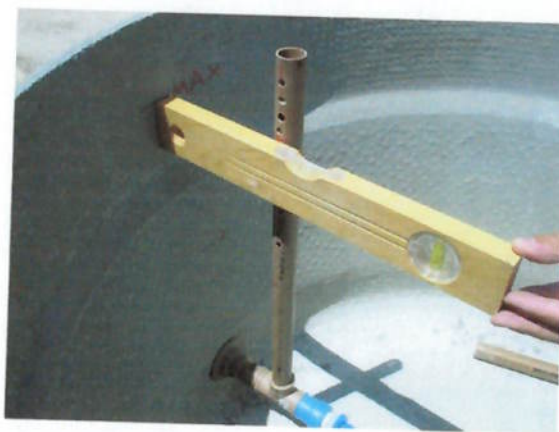


Figura 11.8 - Marcação do nível máximo de água no tubo do coletor de água quente



Figura 11.9 - Marcação da posição do anteparo no tubo do coletor de água quente



Figura 11.10 - Marcação dos furos



Figura 11.11 - Furos e marcas dos furos próximos ao anteparo



Figura 11.12 - Furação

11.2.1 CONSTRUÇÃO DO SELETOR



Figura 11.13 - Anéis de vedação



Figura 11.14 - Disposição dos anéis de vedação no tubo do coletor



Figura 11.15 - Corte do tubo de 1 polegada



Figura 11.16 - Esquadramento

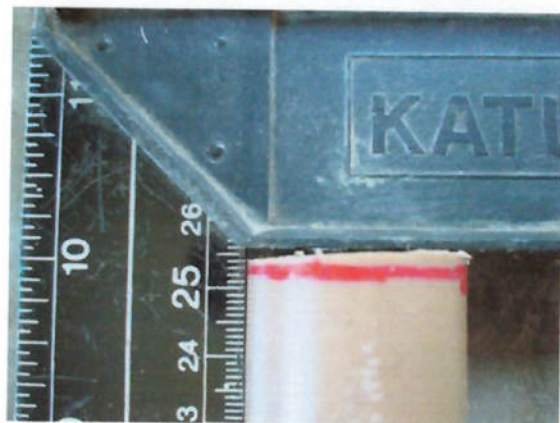


Figura 11.17 - Verificação da ortogonalidade da face



Figura 11.18 - Ajuste da face por abrasão (lixa)



Figura 11.19 - Face ortogonalizada



Figura 11.20 - Aquecimento do tubo para ajuste dos anéis



Figura 11.21 - Acerto da concentricidade dos anéis



Figura 11.22 - Seletor finalizado

A construção do seletor, devido ao fato de que ele deslizaria por um tubo, exigiu que os anéis de vedação fossem colocados de forma concêntrica, caso contrário o seletor travaria devido ao contato forçado dos anéis com o tubo por onde deslizariam, conforme realmente aconteceu no primeiro protótipo. Para obter a concentricidade, foi adotado este procedimento que utiliza o esquadro de luz para se poder obter o paralelismo das faces do tubo.

11.2.2 CONSTRUÇÃO DA VÁLVULA



Figura 11.23 - Válvula industrializada



Figura 11.24 - Protótipo da válvula



Figura 11.25 - Nova válvula fabricada

11.2.3 CONSTRUÇÃO DO FLUTUADOR



Figura 11.26 - Traçando molde em poliestireno expandido



Figura 11.27 - Montagem do flutuador com o seletor



Figura 11.28 - Flutuador montado

11.3 CONSTRUÇÃO DAS PLACAS SOLARES

11.3.1 PREPARAÇÃO DO EQUIPAMENTO PARA EFETUAR OS CORTES DOS RASGOS NO TUBO DO COLETOR SOLAR



Figura 11.29 - Makita



Figura 11.30 - Fixação na morsa



Figura 11.31 - Posicionamento da guia



Figura 11.32 - Fixação da guia



Figura 11.33 - Verificação da posição da guia

Um outro método de se efetuar os rasgos na flauta, é o uso de uma serra tico-tico. Neste caso, deve-se quebrar a serra ao meio para que ela não atinja a parede do tubo de 1".

11.3.2 CORTE DOS RASGOS NO TUBO DO COLETOR SOLAR



Figura 11.34 - Determinação da linha de centro com régua T



Figura 11.35 - Marcação da linha de centro



Figura 11.36 - Furação das extremidades dos rasgos



Figura 11.37 - Marcação dos rasgos



Figura 11.38 - Corte com makita



Figura 11.39 - Corte inicial



Figura 11.40 - Tubo cortado

Uma técnica importante é o acabamento da superfície, utilizando um rasquete ou estilete para chanfrar os rasgos, para que as placas entrem sem grandes dificuldades. Estes chanfros são também importantes no que se remete à vedação, já que o silicone entra nas fendas.

11.3.3 PREPARAÇÃO DO FORRO DE PVC



Figura 11.41 - Corte das extremidades das aletas com ferro de solda



Figura 11.42 - Extremidade recortada



Figura 11.43 - Marcação da linha de profundidade



Figura 11.44 - Tratamento da superfície do forro

Os cortes efetuados nas extremidades foram para se obter um melhor encaixe nos rasgos do tubo do coletor e ao mesmo tempo, economizar a cola epóxi durante a vedação.

A superfície do forro foi lixada para que quando aplicada, a tinta fosca tivesse uma melhor aderência aumentando assim a eficiência da superfície negra.

É importante preencher as fendas com silicone, a fim de facilitar a vedação depois de colocadas as placas.

11.3.4 MONTAGEM DO FORRO NO TUBO



Figura 11.45 - Encaixe



Figura 11.46 - Placas encaixadas

11.3.5 VEDAÇÃO POR MASSA EPÓXI ARALDITE

A vedação com Araldite não se mostrou viável, uma vez que seu custo é elevado e não possui boas características quanto a estanqueidade sob pressão e fadiga térmica. A Araldite é sem dúvida muito mais difícil de se aplicar que a vedação por silicone termoplástico (pistolas elétricas).



Figura 11.47 - Massa epoxi Araldite



Figura 11.48 - Mistura dos componentes



Figura 11.49 - Dosagem igual



Figura 11.50 - Mistura dos componentes



Figura 11.51 - Aplicação



Figura 11.52 - Acabamento final

Uma das dificuldades encontrada nesta etapa é a velocidade com que a cola seca, sendo que depois de misturados os componentes, a massa seca em 3 minutos o que dificulta o processo obrigando assim que as preparações sejam feitas em pequenas doses, e aplicadas logo em seguida.

11.3.6 VEDAÇÃO POR APLICAÇÃO DE SILICONE QUENTE

Esta etapa foi proposta devido a dois fatores:

- alto valor da cola epóxi Araldite;
- facilidade e rapidez na aplicação;



Figura 11.53 - Aplicação com pistola de silicone



Figura 11.54 - Vedação das extremidades



Figura 11.55 - Acabamento final

A silicone deve ser aplicada com as placas totalmente secas, sem impurezas. As placas devem estar inclinadas em um ângulo de 45° para que o cordão de solda entre dentro das frestas. Uma técnica importante é o uso de 2 pistolas elétricas de aplicação de silicone, para aplicar sobre uma placa simultaneamente, evitando juntas de silicone (possíveis focos de vazamento).

12 ENSAIO HIDROSTÁTICO

12.1 ENSAIO HIDROSTÁTICO DO COLETOR

Foram testadas a estanqueidade das flanges e válvulas e também fluviabilidade das bóias e flutuadores. Eventuais rachaduras e vazamento nos furos das flanges foram devidamente vedados com massa plástica.

Outro dado importante coletado nesta etapa foi a vazão de água fornecida na saída de água, o que nos obrigou a construir uma válvula de alta vazão de alumínio.



Figura 12.1 - Ensaio Hidrostático

12.2 ENSAIO HIDROSTÁTICO DO COLETOR

A grande dificuldade encontrada neste trabalho foi, sem dúvida alguma, superar os problemas encontrados no teste hidrostático. A vedação entre o forro de PVC e os tubos de PVC de 1" mostraram-se extremamente sensíveis à pressão e à fadiga térmica.

Após a proposta inicial, de vedação de Araldite Epóxi 24 h, não sendo bem sucedida, optou-se pela vedação de silicone termoplástico. O sucesso só pôde ser obtido após diversas tentativas frustradas, ora variando-se métodos de aplicação da vedação, ora mudando-se a construção do coletor.

As vedações de silicone só podem ser testadas após um tempo de cura de 24 h. Só após totalmente secos os coletores é que as juntas de silicone podem ser re-fundidas.

É notável a influência da pressão no quesito vedações, uma vez que os vazamentos são mais frequentes na parte inferior dos coletores (maior pressão hidrostática devido à altura de coluna de água).

Após a bateria de testes inicial o primeiro protótipo teve de ser inutilizado, mostrando serem ineficientes um conjunto de técnicas e materiais (silicone 24 h), forçando a construção de uma segunda placa.



Figura 12.2 – Vazamentos ocorridos durante o Ensaio (1)



Figura 12.3 - Vazamentos ocorridos durante o Ensaio (2)

Observa-se que os pontos críticos de vazamento ocorrem nas extremidades laterais da placa, onde as fendas entre o tubo de 1" e a placa de PVC são maiores. Para contornar este problema, faz-se um pré tratamento da placa antes de ser introduzida dentro do tubo de PVC. Preenche-se os interstícios da placa com silicone para depois introduzi-la no tubo.

Uma maneira de consertar vazamentos é re-fundir as juntas com ferro de solda a 240 ° C. Desta forma, obtém-se um cordão de solda mais uniforme e transparente, evitando-se a chamada "solda fria". Não se deve, em hipótese alguma encostar a extremidade do ferro de solda na placa de PVC, correndo risco de abrir buracos na mesma, provocando novos focos de vazamentos.

Outra técnica adotada na vedação das placas é o uso conjunto de duas pistolas elétricas para aplicação de silicone. Desta maneira, evita-se emendas desnecessárias (focos de vazamentos).

É primordial o acabamento da superfície das partes a serem coladas, devendo ser devidamente lixadas e desengorduradas antes do processo de colagem.



Figura 12.4 – Detalhe do vazamento sob o cordão de silicone

13 RESULTADOS

13.1 MEDIÇÕES ATMOSFÉRICAS

Tabela 13-1 - Medições do dia 01/11/2003

Sistema WebBee – Local de coleta de medições: USP	
Período	De 01-11-2003 00:00:00
	Até 01-11-2003 23:50:00

	DIA	HORA	TEMPERATURA AMBIENTE (°C)	RADIAÇÃO SOLAR (W/M ² .µM)	RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA (W/M ² .µM)	VELOCIDADE DO VENTO (KM/H)
1	1/11/2003	00:00	18.1	0	0	0
2	1/11/2003	00:10	18.1	0	0	0
3	1/11/2003	00:20	18.1	0	0	1.6
4	1/11/2003	00:30	18.2	0	0	1.6
5	1/11/2003	00:40	18.1	0	0	1.6
6	1/11/2003	00:50	18.1	0	0	1.6
7	1/11/2003	01:00	18.1	0	0	1.6
8	1/11/2003	01:10	18.1	0	0	1.6
9	1/11/2003	01:20	18	0	0	0
10	1/11/2003	01:30	18	0	0	0
11	1/11/2003	01:40	18.1	0	0	0
12	1/11/2003	01:50	18	0	0	0
13	1/11/2003	02:00	17.9	0	0	0
14	1/11/2003	02:10	17.8	0	0	0
15	1/11/2003	02:20	17.7	0	0	0
16	1/11/2003	02:30	17.6	0	0	0
17	1/11/2003	02:40	17.6	0	0	0
18	1/11/2003	02:50	17.6	0	0	0
19	1/11/2003	03:00	17.5	0	0	0
20	1/11/2003	03:10	17.5	0	0	0
21	1/11/2003	03:20	17.4	0	0	0
22	1/11/2003	03:30	17.4	0	0	0
23	1/11/2003	03:40	17.4	0	0	0
24	1/11/2003	03:50	17.3	0	0	0
25	1/11/2003	04:00	17.3	0	0	0
26	1/11/2003	04:10	17.3	0	0	0
27	1/11/2003	04:20	17.3	0	0	0
28	1/11/2003	04:30	17.3	0	0	0

29	1/11/2003	04:40	17.3	0	0	0
30	1/11/2003	04:50	17.3	0	0	0
31	1/11/2003	05:00	17.4	0	0	0
32	1/11/2003	05:10	17.5	0	0	0
33	1/11/2003	05:20	17.6	0	0	0
34	1/11/2003	05:30	17.6	0	0	0
35	1/11/2003	05:40	17.6	0	0	0
36	1/11/2003	05:50	17.7	0	0	1.6
37	1/11/2003	06:00	17.7	0	0	0
38	1/11/2003	06:10	17.7	0	0	0
39	1/11/2003	06:20	17.7	0	0	1.6
40	1/11/2003	06:30	17.7	0	0	0
41	1/11/2003	06:40	17.7	3	0	0
42	1/11/2003	06:50	17.8	37	0	0
43	1/11/2003	07:00	17.9	52	0	0
44	1/11/2003	07:10	18.1	73	0	0
45	1/11/2003	07:20	18.2	92	0	0
46	1/11/2003	07:30	18.5	115	0	0
47	1/11/2003	07:40	18.8	96	0	0
48	1/11/2003	07:50	19.1	134	0	0
49	1/11/2003	08:00	19.4	186	0.1	0
50	1/11/2003	08:10	19.8	163	0.3	1.6
51	1/11/2003	08:20	20	169	0.4	0
52	1/11/2003	08:30	20.4	221	0.4	0
53	1/11/2003	08:40	21.1	209	0.5	0
54	1/11/2003	08:50	21.6	283	0.7	1.6
55	1/11/2003	09:00	22	311	0.8	3.2
56	1/11/2003	09:10	22.4	335	0.9	6.4
57	1/11/2003	09:20	22.8	362	1	3.2
58	1/11/2003	09:30	23.4	389	1.2	4.8
59	1/11/2003	09:40	23.8	416	1.4	8
60	1/11/2003	09:50	23.9	439	1.6	8
61	1/11/2003	10:00	24.3	456	1.7	6.4
62	1/11/2003	10:10	24.7	478	1.9	6.4
63	1/11/2003	10:20	25.2	505	2	4.8
64	1/11/2003	10:30	25.5	538	2.2	6.4
65	1/11/2003	10:40	25.6	575	2.5	9.7
66	1/11/2003	10:50	25.7	584	2.6	11.3
67	1/11/2003	11:00	25.9	650	2.8	11.3
68	1/11/2003	11:10	26.4	622	2.9	9.7
69	1/11/2003	11:20	26.6	664	3	8

70	1/11/2003	11:30	26.8	695	3.2	11.3
71	1/11/2003	11:40	26.8	689	3.3	9.7
72	1/11/2003	11:50	26.8	551	2.9	12.9
73	1/11/2003	12:00	26.6	407	2.1	12.9
74	1/11/2003	12:10	26.3	275	1.7	11.3
75	1/11/2003	12:20	26.2	416	2.3	11.3
76	1/11/2003	12:30	25.9	286	1.7	12.9
77	1/11/2003	12:40	25.8	225	1.4	11.3
78	1/11/2003	12:50	25.5	225	1.4	11.3
79	1/11/2003	13:00	25.2	214	1.3	11.3
80	1/11/2003	13:10	24.9	184	1.2	12.9
81	1/11/2003	13:20	24.7	186	1.2	9.7
82	1/11/2003	13:30	24.6	244	1.5	9.7
83	1/11/2003	13:40	24.7	284	1.7	9.7
84	1/11/2003	13:50	24.9	242	1.5	6.4
85	1/11/2003	14:00	25.1	250	1.5	4.8
86	1/11/2003	14:10	25.2	290	1.8	8
87	1/11/2003	14:20	25.1	322	1.9	6.4
88	1/11/2003	14:30	25.3	354	2	8
89	1/11/2003	14:40	25.4	432	2.2	8
90	1/11/2003	14:50	25.8	349	1.9	6.4
91	1/11/2003	15:00	25.8	426	2.1	9.7
92	1/11/2003	15:10	25.9	173	1.2	9.7
93	1/11/2003	15:20	25.2	174	0.9	8
94	1/11/2003	15:30	24.8	184	1	9.7
95	1/11/2003	15:40	24.4	154	0.8	9.7
96	1/11/2003	15:50	24.3	111	0.5	8
97	1/11/2003	16:00	24.3	112	0.5	8
98	1/11/2003	16:10	24.3	107	0.5	3.2
99	1/11/2003	16:20	24.4	89	0.4	8
100	1/11/2003	16:30	24.5	118	0.5	8
101	1/11/2003	16:40	24.7	151	0.5	4.8
102	1/11/2003	16:50	24.8	99	0.4	9.7
103	1/11/2003	17:00	24.6	59	0	4.8
104	1/11/2003	17:10	24.6	66	0	3.2
105	1/11/2003	17:20	24.6	63	0	1.6
106	1/11/2003	17:30	24.6	6	0	1.6
107	1/11/2003	17:40	24.4	0	0	1.6
108	1/11/2003	17:50	24.3	0	0	1.6
109	1/11/2003	18:00	24.2	0	0	4.8
110	1/11/2003	18:10	23.2	0	0	9.7

111	1/11/2003	18:20	21.6	0	0	9.7
112	1/11/2003	18:30	20.7	0	0	8
113	1/11/2003	18:40	20.4	0	0	4.8
114	1/11/2003	18:50	20.2	0	0	4.8
115	1/11/2003	19:00	19.9	0	0	6.4
116	1/11/2003	19:10	19.6	0	0	6.4
117	1/11/2003	19:20	19.4	0	0	6.4
118	1/11/2003	19:30	19.3	0	0	6.4
119	1/11/2003	19:40	19.3	0	0	6.4
120	1/11/2003	19:50	19.3	0	0	6.4
121	1/11/2003	20:00	19.3	0	0	8
122	1/11/2003	20:10	19.1	0	0	11.3
123	1/11/2003	20:20	18.9	0	0	8
124	1/11/2003	20:30	18.8	0	0	6.4
125	1/11/2003	20:40	18.8	0	0	4.8
126	1/11/2003	20:50	18.8	0	0	4.8
127	1/11/2003	21:00	18.8	0	0	6.4
128	1/11/2003	21:10	18.7	0	0	4.8
129	1/11/2003	21:20	18.6	0	0	4.8
130	1/11/2003	21:30	18.6	0	0	6.4
131	1/11/2003	21:40	18.5	0	0	6.4
132	1/11/2003	21:50	18.5	0	0	4.8
133	1/11/2003	22:00	18.5	0	0	4.8
134	1/11/2003	22:10	18.5	0	0	6.4
135	1/11/2003	22:20	18.4	0	0	3.2
136	1/11/2003	22:30	18.2	0	0	8
137	1/11/2003	22:40	17.7	0	0	6.4
138	1/11/2003	22:50	17.2	0	0	4.8
139	1/11/2003	23:00	17.1	0	0	1.6
140	1/11/2003	23:10	17	0	0	4.8
141	1/11/2003	23:20	16.9	0	0	4.8
142	1/11/2003	23:30	16.9	0	0	1.6
143	1/11/2003	23:40	16.9	0	0	4.8
144	1/11/2003	23:50	17	0	0	1.6

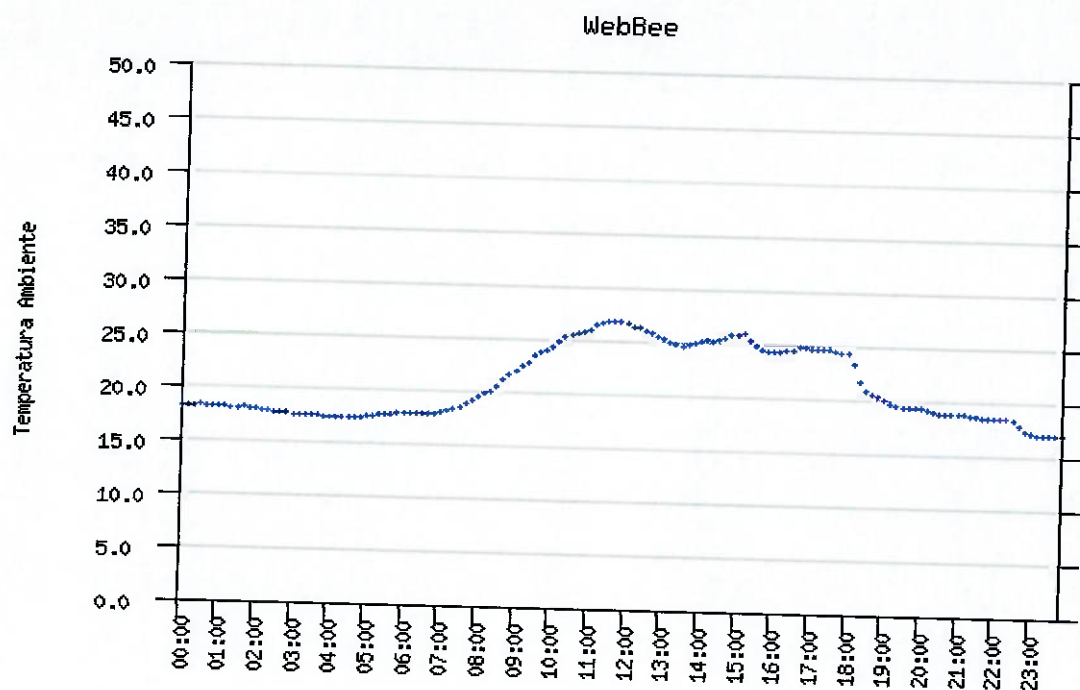


Figura 13.1- Gráfico da temperatura ambiente em °C do dia 01/11/2003

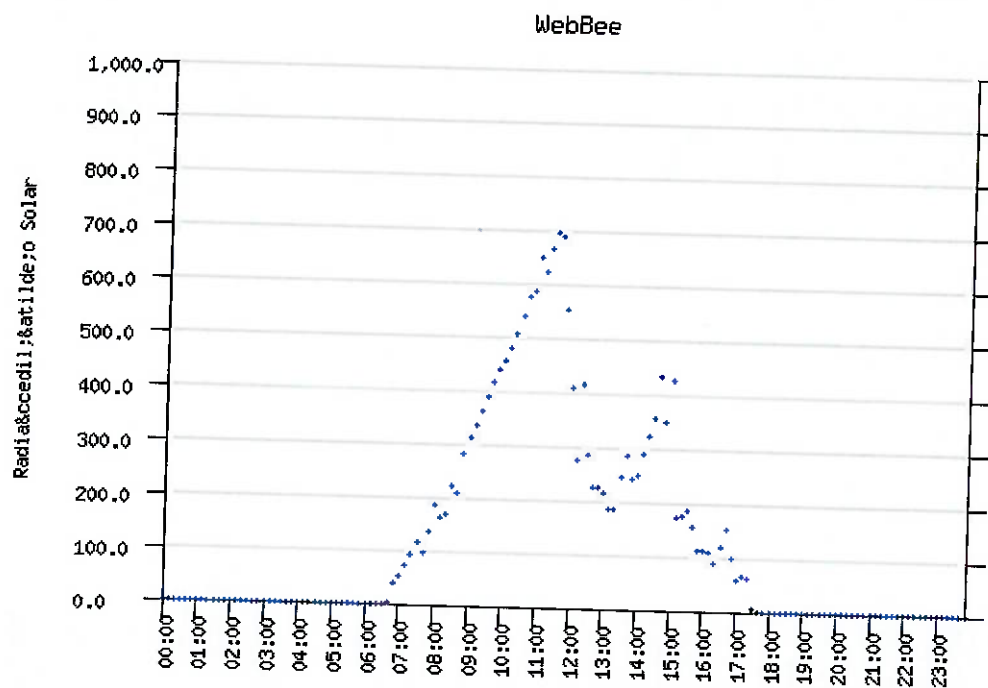


Figura 13.2 - Gráfico da radiação solar (em °C) do dia 01/11/2003

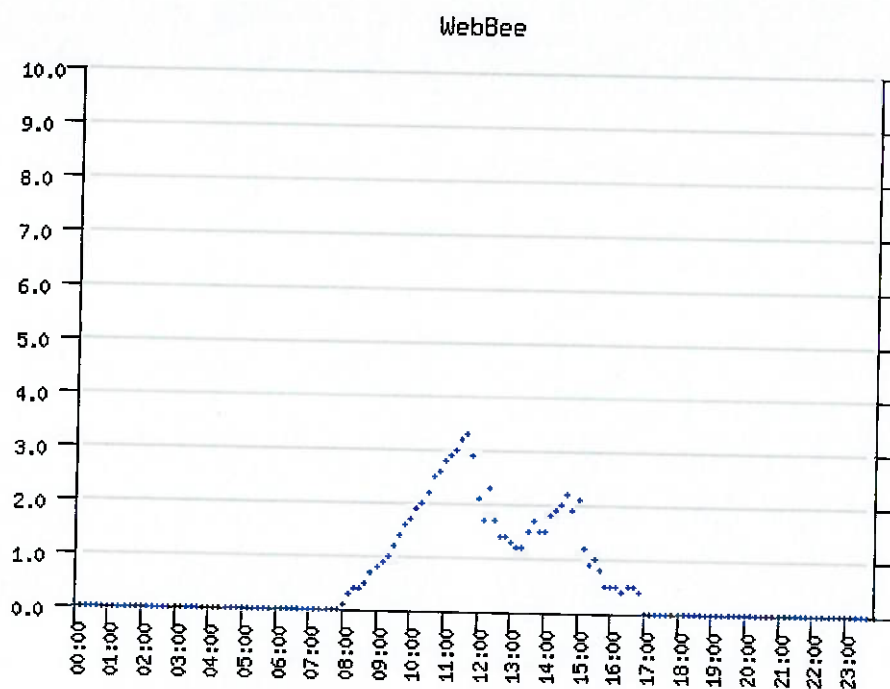


Figura 13.3 - Gráfico da radiação ultravioleta (W/m2.µM) do dia 01/11/2003

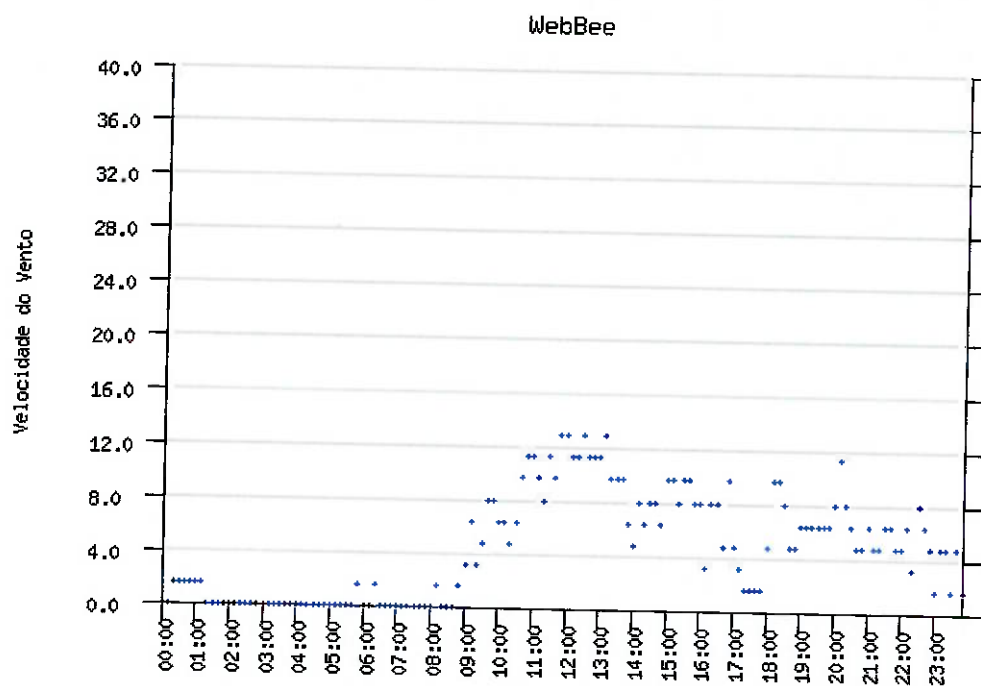


Figura 13.4 - Gráfico da velocidade do vento em km/h do dia 01/11/2003

Tabela 13-2 - Medições do dia 02/11/2003

Sistema WebBee – Local de coleta de medições: USP	
Período	De 02-11-2003 00:00:00
	Até 02-11-2003 23:50:00

	DIA	HORA	TEMPERATURA AMBIENTE (°C)	RADIAÇÃO SOLAR (W/M ² .µM)	RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA (W/M ² .µM)	VELOCIDADE DO VENTO (KM/H)
1	2/11/2003	00:00	17.1	0	0	1.6
2	2/11/2003	00:10	17.1	0	0	3.2
3	2/11/2003	00:20	17.1	0	0	6.4
4	2/11/2003	00:30	17	0	0	9.7
5	2/11/2003	00:40	16.9	0	0	9.7
6	2/11/2003	00:50	16.9	0	0	9.7
7	2/11/2003	01:00	17	0	0	8
8	2/11/2003	01:10	17	0	0	9.7
9	2/11/2003	01:20	17.1	0	0	8
10	2/11/2003	01:30	17.1	0	0	8
11	2/11/2003	01:40	17.1	0	0	9.7
12	2/11/2003	01:50	17.1	0	0	9.7
13	2/11/2003	02:00	17.1	0	0	6.4
14	2/11/2003	02:10	17.1	0	0	6.4
15	2/11/2003	02:20	17.1	0	0	3.2
16	2/11/2003	02:30	17	0	0	4.8
17	2/11/2003	02:40	17	0	0	4.8
18	2/11/2003	02:50	17	0	0	3.2
19	2/11/2003	03:00	16.9	0	0	4.8
20	2/11/2003	03:10	16.7	0	0	1.6
21	2/11/2003	03:20	16.6	0	0	3.2
22	2/11/2003	03:30	16.3	0	0	6.4
23	2/11/2003	03:40	16.1	0	0	4.8
24	2/11/2003	03:50	16.1	0	0	8
25	2/11/2003	04:00	15.9	0	0	9.7
26	2/11/2003	04:10	15.8	0	0	11.3
27	2/11/2003	04:20	15.7	0	0	11.3
28	2/11/2003	04:30	15.7	0	0	11.3
29	2/11/2003	04:40	15.8	0	0	9.7
30	2/11/2003	04:50	15.8	0	0	9.7
31	2/11/2003	05:00	15.8	0	0	9.7
32	2/11/2003	05:10	15.7	0	0	8
33	2/11/2003	05:20	15.7	0	0	14.5
34	2/11/2003	05:30	15.7	0	0	11.3
35	2/11/2003	05:40	15.7	0	0	14.5

36	2/11/2003	05:50	15.7	0	0	8
37	2/11/2003	06:00	15.7	0	0	9.7
38	2/11/2003	06:10	15.6	0	0	4.8
39	2/11/2003	06:20	15.6	0	0	6.4
40	2/11/2003	06:30	15.6	0	0	9.7
41	2/11/2003	06:40	15.6	0	0	8
42	2/11/2003	06:50	15.5	0	0	8
43	2/11/2003	07:00	15.4	0	0	9.7
44	2/11/2003	07:10	15.4	0	0	6.4
45	2/11/2003	07:20	15.3	0	0	6.4
46	2/11/2003	07:30	15.2	8	0	8
47	2/11/2003	07:40	15.1	36	0	4.8
48	2/11/2003	07:50	15	44	0	6.4
49	2/11/2003	08:00	15	53	0	6.4
50	2/11/2003	08:10	15	48	0	8
51	2/11/2003	08:20	15.1	77	0.1	9.7
52	2/11/2003	08:30	15.2	60	0	14.5
53	2/11/2003	08:40	15.2	92	0.3	4.8
54	2/11/2003	08:50	15.3	121	0.4	8
55	2/11/2003	09:00	15.5	135	0.5	4.8
56	2/11/2003	09:10	15.6	157	0.6	8
57	2/11/2003	09:20	15.6	115	0.5	8
58	2/11/2003	09:30	15.6	113	0.5	8
59	2/11/2003	09:40	15.6	82	0.4	6.4
60	2/11/2003	09:50	15.4	54	0.1	3.2
61	2/11/2003	10:00	15.4	51	0.1	4.8
62	2/11/2003	10:10	15.3	49	0.1	8
63	2/11/2003	10:20	15.3	117	0.6	6.4
64	2/11/2003	10:30	15.4	95	0.5	4.8
65	2/11/2003	10:40	15.6	93	0.5	8
66	2/11/2003	10:50	15.7	98	0.6	6.4
67	2/11/2003	11:00	15.7	139	0.9	8
68	2/11/2003	11:10	15.8	106	0.7	6.4
69	2/11/2003	11:20	15.9	121	0.9	9.7
70	2/11/2003	11:30	16.2	141	1	4.8
71	2/11/2003	11:40	16.3	154	1	6.4
72	2/11/2003	11:50	16.3	84	0.6	3.2
73	2/11/2003	12:00	16.3	116	0.8	9.7
74	2/11/2003	12:10	16.3	125	0.9	8
75	2/11/2003	12:20	16.2	122	0.9	8
76	2/11/2003	12:30	16.2	102	0.8	9.7
77	2/11/2003	12:40	16.1	137	1	8
78	2/11/2003	12:50	16.1	171	1.3	8
79	2/11/2003	13:00	16.3	166	1.2	8

80	2/11/2003	13:10	16.4	97	0.7	4.8
81	2/11/2003	13:20	16.5	105	0.8	6.4
82	2/11/2003	13:30	16.4	165	1.2	4.8
83	2/11/2003	13:40	16.6	138	1	3.2
84	2/11/2003	13:50	16.5	123	0.9	9.7
85	2/11/2003	14:00	16.1	149	1	4.8
86	2/11/2003	14:10	15.8	100	0.7	6.4
87	2/11/2003	14:20	15.6	124	0.8	6.4
88	2/11/2003	14:30	15.3	155	1	9.7
89	2/11/2003	14:40	15.2	159	1	11.3
90	2/11/2003	14:50	15.2	105	0.7	9.7
91	2/11/2003	15:00	15.1	65	0.4	8
92	2/11/2003	15:10	15	53	0.3	11.3
93	2/11/2003	15:20	15	81	0.5	8
94	2/11/2003	15:30	14.9	43	0.2	6.4
95	2/11/2003	15:40	14.8	60	0.3	6.4
96	2/11/2003	15:50	14.7	101	0.5	8
97	2/11/2003	16:00	14.7	50	0.2	6.4
98	2/11/2003	16:10	14.5	46	0.1	11.3
99	2/11/2003	16:20	14.2	74	0.2	9.7
100	2/11/2003	16:30	14.1	82	0.4	6.4
101	2/11/2003	16:40	14.1	72	0.3	8
102	2/11/2003	16:50	14.2	75	0.2	9.7
103	2/11/2003	17:00	14.2	56	0.1	8
104	2/11/2003	17:10	14.1	83	0.3	8
105	2/11/2003	17:20	14	78	0.1	8
106	2/11/2003	17:30	14	47	0	8
107	2/11/2003	17:40	13.9	31	0	11.3
108	2/11/2003	17:50	13.7	17	0	4.8
109	2/11/2003	18:00	13.6	4	0	9.7
110	2/11/2003	18:10	13.2	0	0	9.7
111	2/11/2003	18:20	12.9	0	0	11.3
112	2/11/2003	18:30	12.8	0	0	9.7
113	2/11/2003	18:40	12.7	0	0	8
114	2/11/2003	18:50	12.8	0	0	11.3
115	2/11/2003	19:00	12.8	0	0	8
116	2/11/2003	19:10	12.8	0	0	8
117	2/11/2003	19:20	12.7	0	0	6.4
118	2/11/2003	19:30	12.8	0	0	3.2
119	2/11/2003	19:40	12.8	0	0	6.4
120	2/11/2003	19:50	12.8	0	0	4.8
121	2/11/2003	20:00	12.8	0	0	8
122	2/11/2003	20:10	12.7	0	0	6.4
123	2/11/2003	20:20	12.7	0	0	6.4

124	2/11/2003	20:30	12.7	0	0	6.4
125	2/11/2003	20:40	12.7	0	0	4.8
126	2/11/2003	20:50	12.7	0	0	9.7
127	2/11/2003	21:00	12.7	0	0	6.4
128	2/11/2003	21:10	12.8	0	0	6.4
129	2/11/2003	21:20	12.9	0	0	6.4
130	2/11/2003	21:30	12.9	0	0	6.4
131	2/11/2003	21:40	12.9	0	0	8
132	2/11/2003	21:50	12.9	0	0	3.2
133	2/11/2003	22:00	13	0	0	3.2
134	2/11/2003	22:10	12.9	0	0	6.4
135	2/11/2003	22:20	12.9	0	0	9.7
136	2/11/2003	22:30	12.8	0	0	8
137	2/11/2003	22:40	12.6	0	0	8
138	2/11/2003	22:50	12.6	0	0	4.8
139	2/11/2003	23:00	12.6	0	0	4.8
140	2/11/2003	23:10	12.6	0	0	4.8
141	2/11/2003	23:20	12.4	0	0	8
142	2/11/2003	23:30	12.3	0	0	9.7
143	2/11/2003	23:40	12.3	0	0	9.7
144	2/11/2003	23:50	12.2	0	0	8

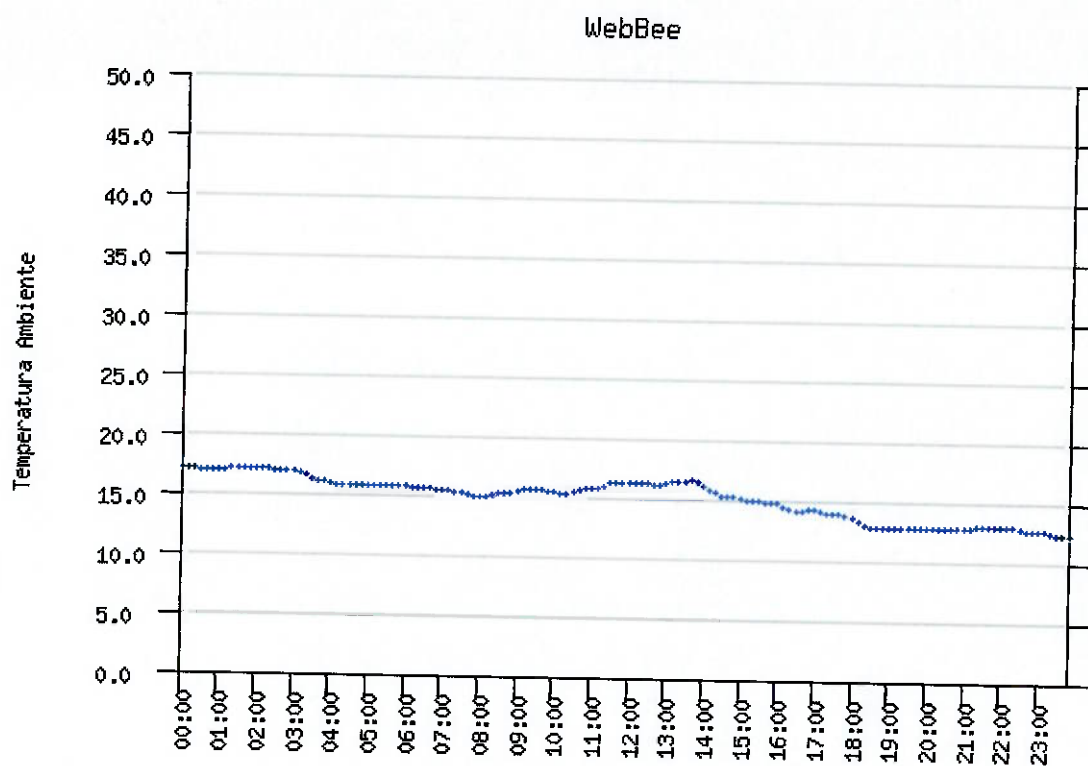


Figura 13.5 - Gráfico da temperatura ambiente em °C do dia 02/11/2003

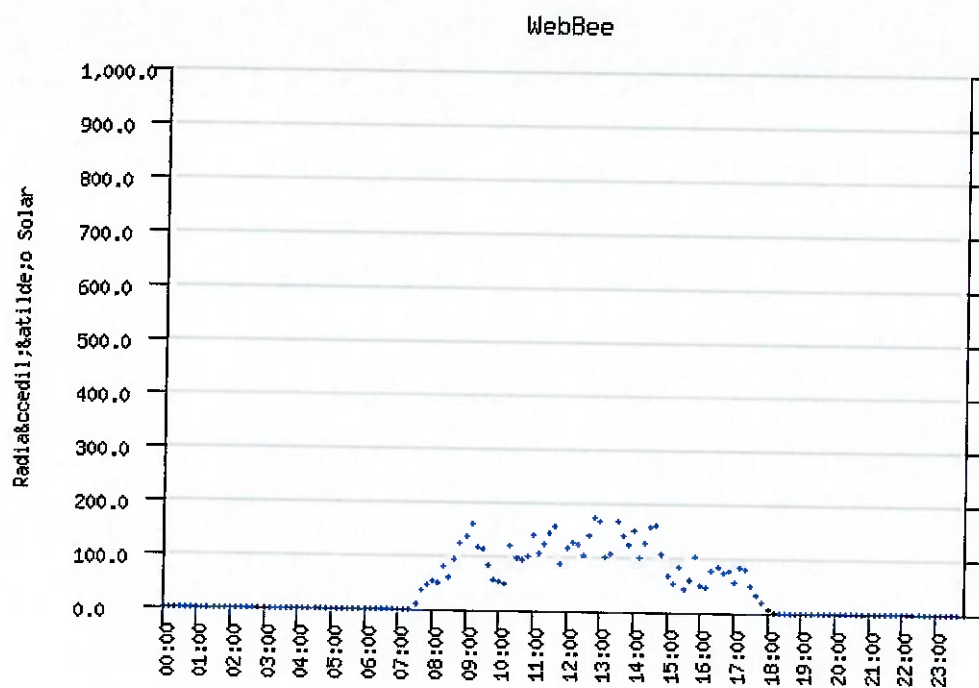


Figura 13.6 - Gráfico da radiação solar (W/m².µM) do dia 02/11/2003

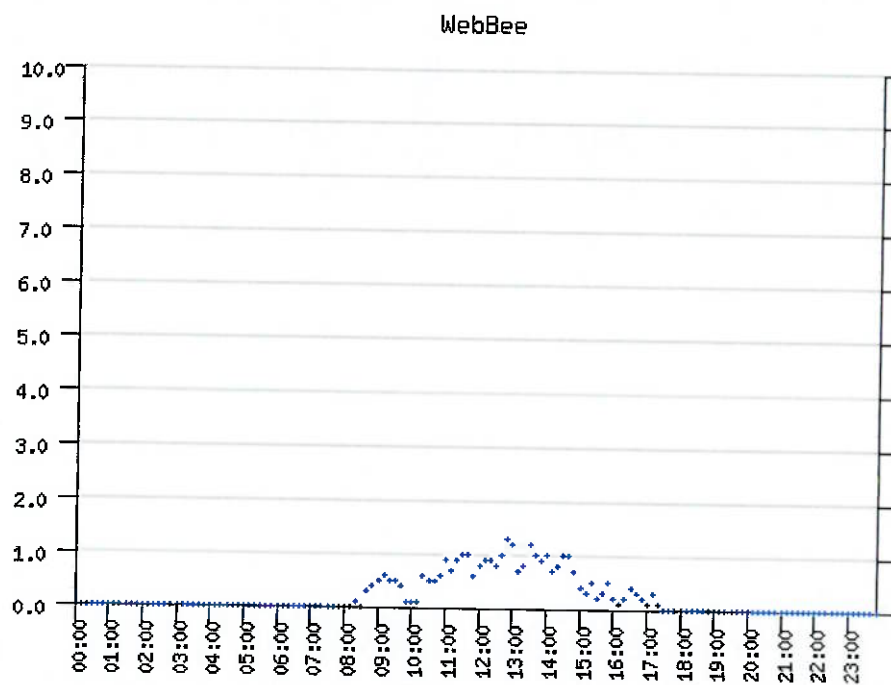


Figura 13.7 - Gráfico da radiação ultravioleta (W/m².µM) do dia 02/11/2003

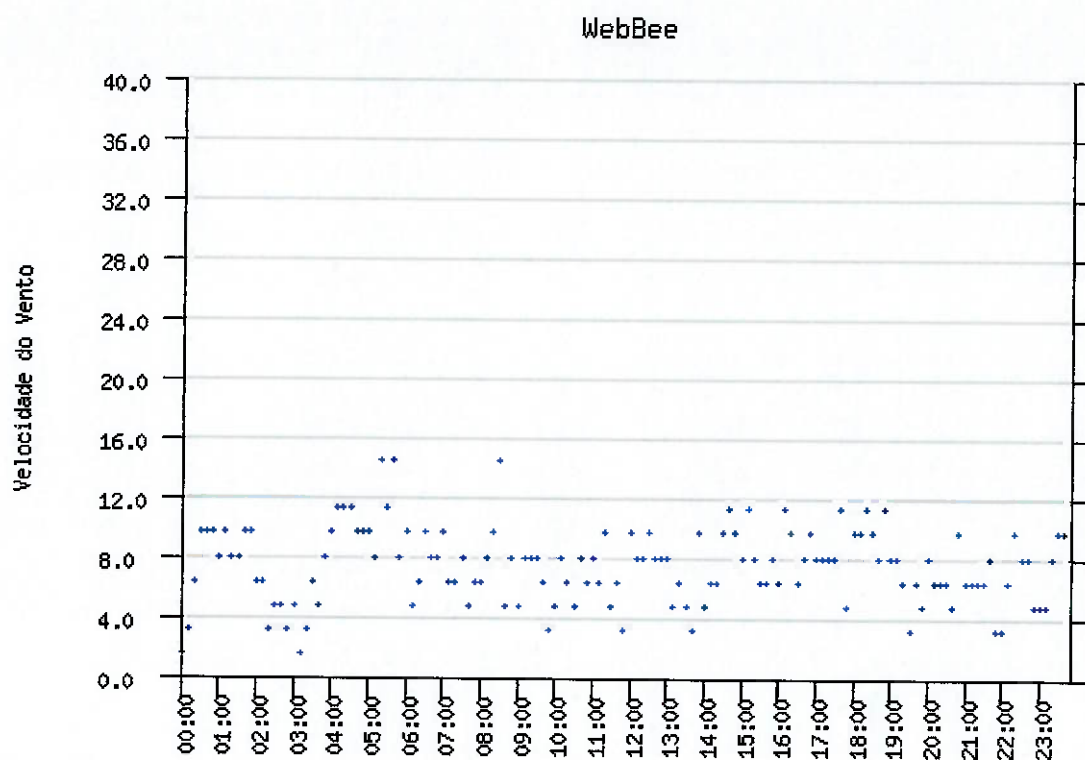


Figura 13.8 - Gráfico da velocidade do vento em km/h do dia 02/11/2003

Tabela 13-3 - Medições do dia 08/11/2003

Sistema WebBee – Local de coleta de medições: USP		
Período	De	08-11-2003 00:00:00
	Até	08-11-2003 23:50:00

	DIA	HORA	TEMPERATURA AMBIENTE (°C)	RADIAÇÃO SOLAR (W/M ² .µM)	RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA (W/M ² .µM)	VELOCIDADE DO VENTO (KM/H)
1	8/11/2003	00:00	15.7	0	0	0
2	8/11/2003	00:10	15.6	0	0	0
3	8/11/2003	00:20	15.5	0	0	0
4	8/11/2003	00:30	15.3	0	0	0
5	8/11/2003	00:40	15.1	0	0	0
6	8/11/2003	00:50	15.1	0	0	0
7	8/11/2003	01:00	15	0	0	0
8	8/11/2003	01:10	14.9	0	0	0
9	8/11/2003	01:20	14.9	0	0	0
10	8/11/2003	01:30	14.7	0	0	0
11	8/11/2003	01:40	14.7	0	0	0
12	8/11/2003	01:50	14.7	0	0	0
13	8/11/2003	02:00	14.8	0	0	0
14	8/11/2003	02:10	14.9	0	0	0
15	8/11/2003	02:20	14.9	0	0	0
16	8/11/2003	02:30	14.9	0	0	0
17	8/11/2003	02:40	15.1	0	0	0
18	8/11/2003	02:50	15	0	0	0
19	8/11/2003	03:00	14.8	0	0	0
20	8/11/2003	03:10	14.6	0	0	0
21	8/11/2003	03:20	14.6	0	0	0
22	8/11/2003	03:30	14.6	0	0	0
23	8/11/2003	03:40	14.7	0	0	0
24	8/11/2003	03:50	14.6	0	0	0
25	8/11/2003	04:00	14.4	0	0	0
26	8/11/2003	04:10	14.3	0	0	0
27	8/11/2003	04:20	14.3	0	0	0
28	8/11/2003	04:30	14.3	0	0	0
29	8/11/2003	04:40	14.3	0	0	0
30	8/11/2003	04:50	14.3	0	0	0
31	8/11/2003	05:00	14.3	0	0	0
32	8/11/2003	05:10	14.2	0	0	0
33	8/11/2003	05:20	14.2	0	0	0
34	8/11/2003	05:30	14.1	0	0	1.6
35	8/11/2003	05:40	14.1	0	0	0

36	8/11/2003	05:50	14	0	0	0
37	8/11/2003	06:00	13.9	0	0	0
38	8/11/2003	06:10	13.9	0	0	0
39	8/11/2003	06:20	14	0	0	0
40	8/11/2003	06:30	14	0	0	0
41	8/11/2003	06:40	14	0	0	0
42	8/11/2003	06:50	14	15	0	0
43	8/11/2003	07:00	14	38	0	0
44	8/11/2003	07:10	14.1	36	0	0
45	8/11/2003	07:20	14.2	34	0	0
46	8/11/2003	07:30	14.3	45	0	0
47	8/11/2003	07:40	14.3	49	0	0
48	8/11/2003	07:50	14.4	62	0	0
49	8/11/2003	08:00	14.4	93	0	0
50	8/11/2003	08:10	14.7	123	0	0
51	8/11/2003	08:20	14.8	159	0.2	0
52	8/11/2003	08:30	15.1	193	0.4	1.6
53	8/11/2003	08:40	15.2	188	0.4	0
54	8/11/2003	08:50	15.6	262	0.6	0
55	8/11/2003	09:00	16.3	240	0.6	0
56	8/11/2003	09:10	16.4	243	0.7	1.6
57	8/11/2003	09:20	16.6	259	0.8	1.6
58	8/11/2003	09:30	17.1	383	1	1.6
59	8/11/2003	09:40	18	411	1.1	1.6
60	8/11/2003	09:50	18.4	364	1.2	1.6
61	8/11/2003	10:00	18.6	462	1.4	1.6
62	8/11/2003	10:10	19.3	501	1.6	1.6
63	8/11/2003	10:20	19.6	532	1.7	1.6
64	8/11/2003	10:30	20.1	574	1.9	1.6
65	8/11/2003	10:40	20.4	555	1.9	0
66	8/11/2003	10:50	20.7	569	2	1.6
67	8/11/2003	11:00	20.9	602	2.2	1.6
68	8/11/2003	11:10	21.4	652	2.5	4.8
69	8/11/2003	11:20	21.6	676	2.6	1.6
70	8/11/2003	11:30	21.9	699	2.8	3.2
71	8/11/2003	11:40	22	723	2.9	3.2
72	8/11/2003	11:50	22.7	745	3.1	3.2
73	8/11/2003	12:00	23.4	761	3.2	3.2
74	8/11/2003	12:10	23.8	754	3.2	1.6
75	8/11/2003	12:20	24.1	774	3.4	3.2
76	8/11/2003	12:30	23.9	767	3.4	3.2
77	8/11/2003	12:40	24.3	773	3.4	4.8
78	8/11/2003	12:50	24.9	797	3.6	4.8
79	8/11/2003	13:00	24.8	555	2.9	6.4

80	8/11/2003	13:10	24.9	637	2.9	4.8
81	8/11/2003	13:20	25.2	267	1.7	6.4
82	8/11/2003	13:30	24.8	348	2	1.6
83	8/11/2003	13:40	25.1	558	2.8	6.4
84	8/11/2003	13:50	25.6	465	2.6	6.4
85	8/11/2003	14:00	25.8	721	3	4.8
86	8/11/2003	14:10	26.6	739	3.1	4.8
87	8/11/2003	14:20	26.8	686	2.9	8
88	8/11/2003	14:30	26.9	708	3	4.8
89	8/11/2003	14:40	27	408	2.2	8
90	8/11/2003	14:50	26.6	448	2.1	6.4
91	8/11/2003	15:00	26.8	485	2.1	6.4
92	8/11/2003	15:10	26.4	236	1.5	8
93	8/11/2003	15:20	26.2	175	1.2	4.8
94	8/11/2003	15:30	26.3	532	1.9	8
95	8/11/2003	15:40	26.8	303	1.5	8
96	8/11/2003	15:50	26.9	435	1.5	6.4
97	8/11/2003	16:00	27.6	467	1.5	6.4
98	8/11/2003	16:10	27.3	240	1.1	8
99	8/11/2003	16:20	26.5	140	0.7	4.8
100	8/11/2003	16:30	26.2	316	0.8	6.4
101	8/11/2003	16:40	24.7	245	0.7	4.8
102	8/11/2003	16:50	23.9	168	0.6	9.7
103	8/11/2003	17:00	22.7	157	0.5	9.7
104	8/11/2003	17:10	21.9	232	0.5	11.3
105	8/11/2003	17:20	21.5	180	0.4	11.3
106	8/11/2003	17:30	21	171	0.4	11.3
107	8/11/2003	17:40	20.6	124	0.3	9.7
108	8/11/2003	17:50	20.1	148	0.2	11.3
109	8/11/2003	18:00	19.8	119	0	12.9
110	8/11/2003	18:10	19.3	90	0	11.3
111	8/11/2003	18:20	18.9	73	0	8
112	8/11/2003	18:30	18.8	51	0	6.4
113	8/11/2003	18:40	18.4	20	0	9.7
114	8/11/2003	18:50	18.2	0	0	8
115	8/11/2003	19:00	17.9	0	0	6.4
116	8/11/2003	19:10	17.8	0	0	8
117	8/11/2003	19:20	17.7	0	0	4.8
118	8/11/2003	19:30	17.7	0	0	4.8
119	8/11/2003	19:40	17.7	0	0	4.8
120	8/11/2003	19:50	17.7	0	0	4.8
121	8/11/2003	20:00	17.7	0	0	3.2
122	8/11/2003	20:10	17.8	0	0	4.8
123	8/11/2003	20:20	17.8	0	0	3.2

124	8/11/2003	20:30	17.6	0	0	6.4
125	8/11/2003	20:40	17.4	0	0	6.4
126	8/11/2003	20:50	17.4	0	0	4.8
127	8/11/2003	21:00	17.3	0	0	4.8
128	8/11/2003	21:10	17.3	0	0	4.8
129	8/11/2003	21:20	17.2	0	0	4.8
130	8/11/2003	21:30	17.2	0	0	4.8
131	8/11/2003	21:40	17.2	0	0	1.6
132	8/11/2003	21:50	17.3	0	0	4.8
133	8/11/2003	22:00	17.3	0	0	4.8
134	8/11/2003	22:10	17.3	0	0	4.8
135	8/11/2003	22:20	17.3	0	0	3.2
136	8/11/2003	22:30	17.3	0	0	3.2
137	8/11/2003	22:40	17.3	0	0	3.2
138	8/11/2003	22:50	17.4	0	0	3.2
139	8/11/2003	23:00	17.4	0	0	1.6
140	8/11/2003	23:10	17.4	0	0	3.2
141	8/11/2003	23:20	17.4	0	0	1.6
142	8/11/2003	23:30	17.4	0	0	1.6
143	8/11/2003	23:40	17.5	0	0	0
144	8/11/2003	23:50	17.6	0	0	0

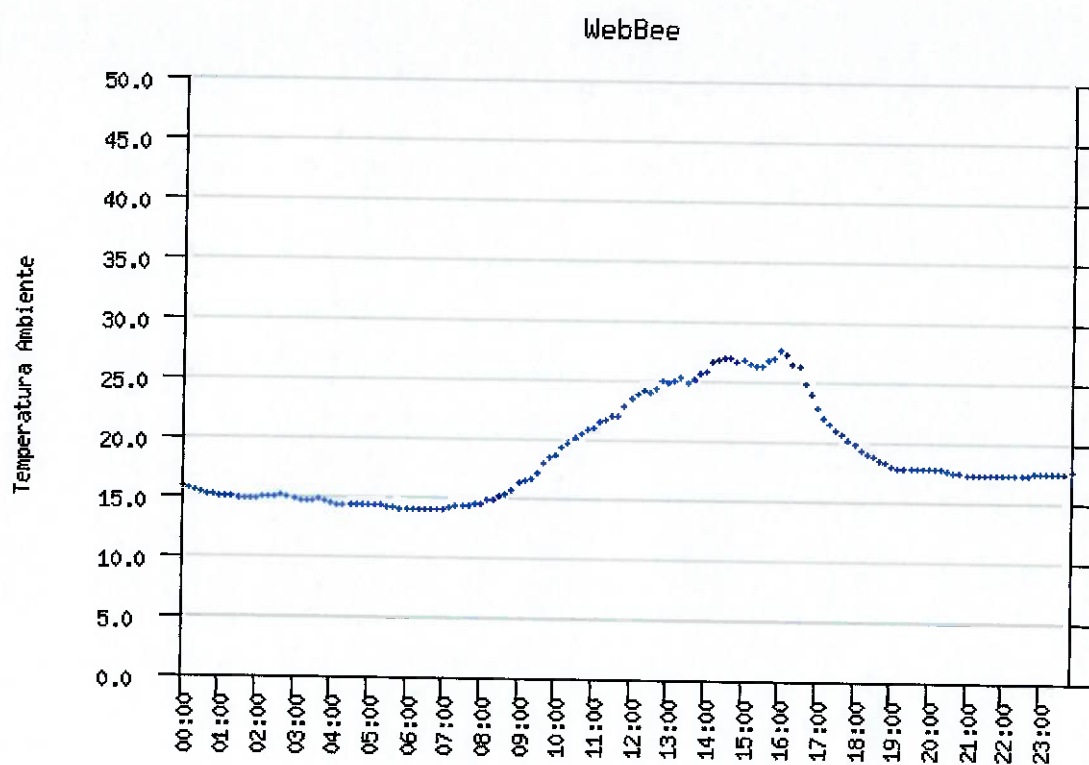


Figura 13.9 - Gráfico da temperatura ambiente (°C) do dia 08/11/2003

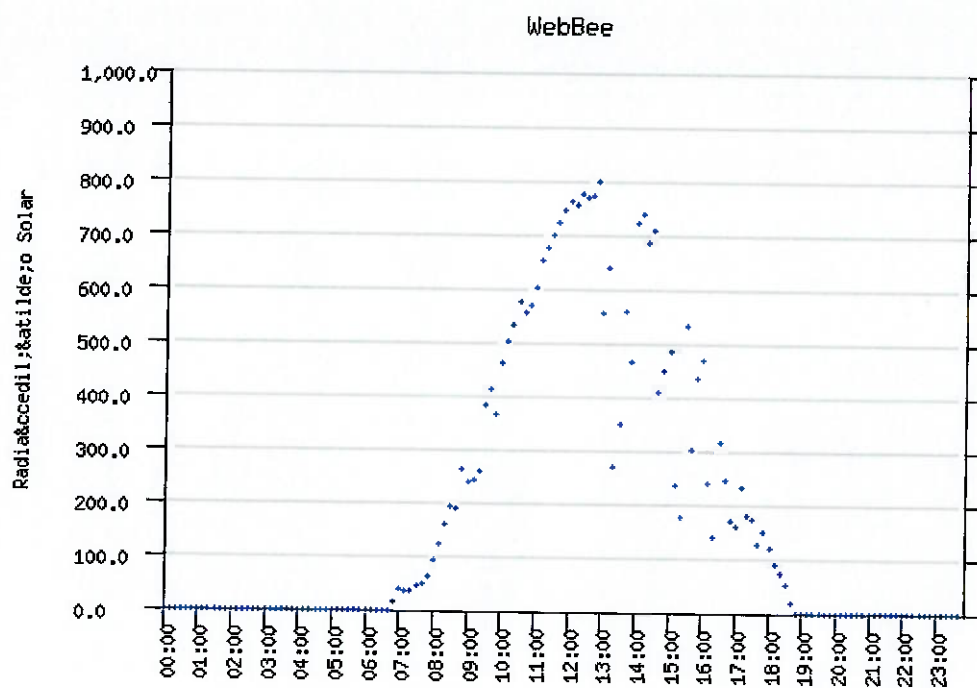


Figura 13.10 - Gráfico da radiação solar (W/m².µM) do dia 08/11/2003

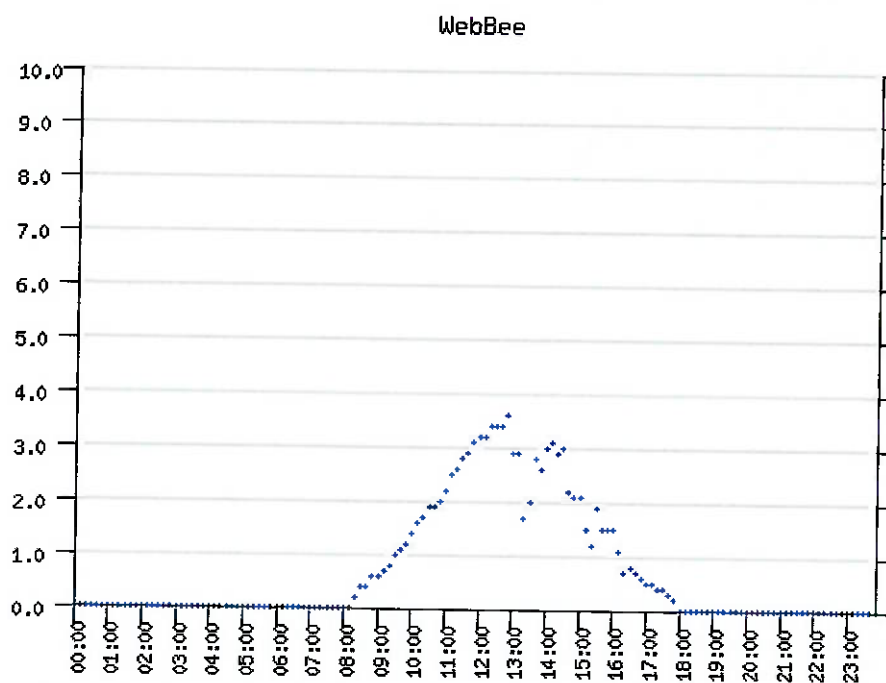


Figura 13.11 - Gráfico da radiação ultravioleta (W/m².µM) do dia 08/11/2003

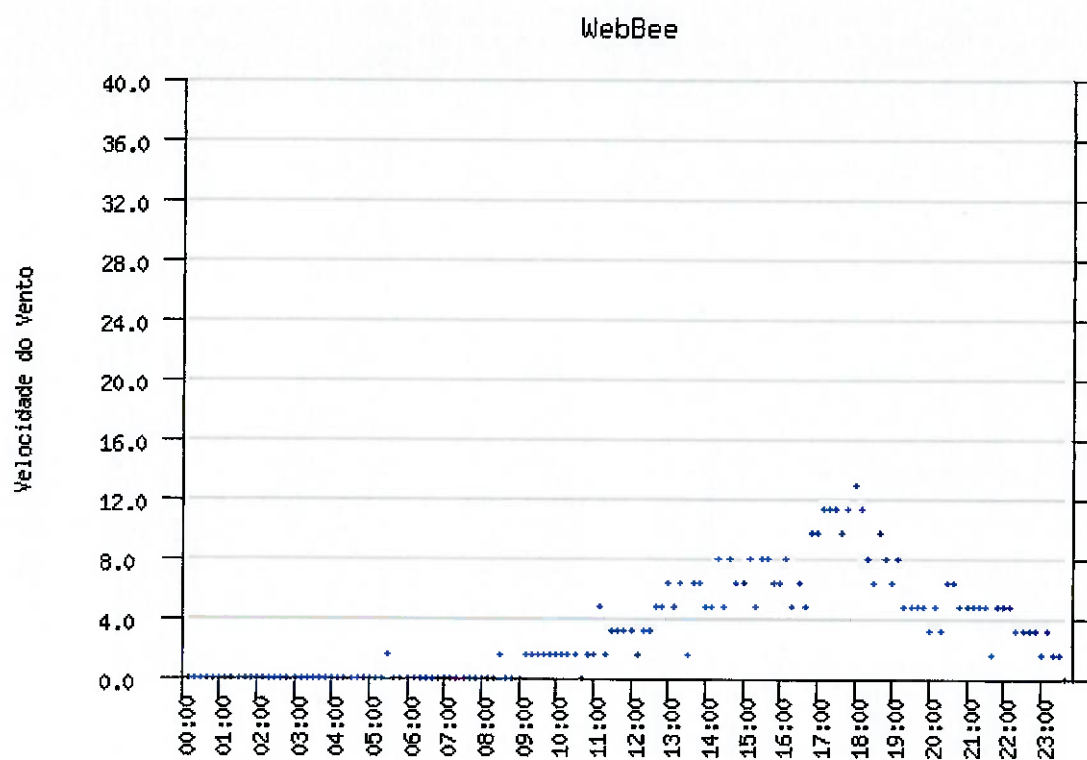


Figura 13.12 - Gráfico da velocidade do vento em km/h do dia 08/11/2003

Tabela 13-4 - Medições do dia 09/11/2003

Sistema WebBee – Local de coleta de medições: USP		
Período	De	09-11-2003 00:00:00
	Até	09-11-2003 23:50:00

	DIA	HORA	TEMPERATURA AMBIENTE (°C)	RADIAÇÃO SOLAR (W/M ² .µM)	RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA (W/M ² .µM)	VELOCIDADE DO VENTO (KM/H)
1	9/11/2003	00:00	17.6	0	0	1.6
2	9/11/2003	00:10	17.4	0	0	1.6
3	9/11/2003	00:20	17.5	0	0	1.6
4	9/11/2003	00:30	17.4	0	0	1.6
5	9/11/2003	00:40	17.4	0	0	0
6	9/11/2003	00:50	17.3	0	0	0
7	9/11/2003	01:00	17.2	0	0	0
8	9/11/2003	01:10	17.2	0	0	0
9	9/11/2003	01:20	17.2	0	0	0
10	9/11/2003	01:30	17.1	0	0	0
11	9/11/2003	01:40	16.9	0	0	0
12	9/11/2003	01:50	16.8	0	0	0
13	9/11/2003	02:00	16.7	0	0	0
14	9/11/2003	02:10	16.5	0	0	0
15	9/11/2003	02:20	16.4	0	0	0
16	9/11/2003	02:30	16.3	0	0	0
17	9/11/2003	02:40	16.4	0	0	0
18	9/11/2003	02:50	16.5	0	0	0
19	9/11/2003	03:00	16.5	0	0	0
20	9/11/2003	03:10	16.4	0	0	0
21	9/11/2003	03:20	16.4	0	0	0
22	9/11/2003	03:30	16.3	0	0	0
23	9/11/2003	03:40	16.3	0	0	0
24	9/11/2003	03:50	16.2	0	0	0
25	9/11/2003	04:00	16.1	0	0	0
26	9/11/2003	04:10	16.1	0	0	0
27	9/11/2003	04:20	16.1	0	0	0
28	9/11/2003	04:30	16.1	0	0	0
29	9/11/2003	04:40	16.2	0	0	0
30	9/11/2003	04:50	16.2	0	0	0
31	9/11/2003	05:00	16.1	0	0	0
32	9/11/2003	05:10	16.1	0	0	0
33	9/11/2003	05:20	16.1	0	0	0

34	9/11/2003	05:30	16.1	0	0	0
35	9/11/2003	05:40	16.1	0	0	0
36	9/11/2003	05:50	16	0	0	0
37	9/11/2003	06:00	15.9	0	0	0
38	9/11/2003	06:10	15.8	0	0	0
39	9/11/2003	06:20	15.7	0	0	0
40	9/11/2003	06:30	15.6	0	0	0
41	9/11/2003	06:40	15.6	0	0	0
42	9/11/2003	06:50	15.6	1	0	0
43	9/11/2003	07:00	15.7	29	0	0
44	9/11/2003	07:10	15.8	42	0	0
45	9/11/2003	07:20	16.1	58	0	0
46	9/11/2003	07:30	16.3	79	0	0
47	9/11/2003	07:40	16.7	86	0	0
48	9/11/2003	07:50	16.9	136	0	0
49	9/11/2003	08:00	17.2	97	0.1	0
50	9/11/2003	08:10	17.4	114	0.3	0
51	9/11/2003	08:20	17.7	131	0.4	0
52	9/11/2003	08:30	17.9	167	0.5	0
53	9/11/2003	08:40	18.4	291	0.6	0
54	9/11/2003	08:50	19.2	305	0.7	0
55	9/11/2003	09:00	19.8	338	0.9	0
56	9/11/2003	09:10	20.4	366	1	0
57	9/11/2003	09:20	20.7	386	1.1	0
58	9/11/2003	09:30	20.7	413	1.3	1.6
59	9/11/2003	09:40	21.2	440	1.5	0
60	9/11/2003	09:50	21.9	466	1.6	1.6
61	9/11/2003	10:00	22.1	496	1.8	0
62	9/11/2003	10:10	22.8	525	2	1.6
63	9/11/2003	10:20	23.1	551	2.2	0
64	9/11/2003	10:30	23.6	578	2.3	1.6
65	9/11/2003	10:40	23.9	607	2.5	1.6
66	9/11/2003	10:50	24.3	636	2.7	0
67	9/11/2003	11:00	24.7	666	2.9	1.6
68	9/11/2003	11:10	24.9	700	3.1	1.6
69	9/11/2003	11:20	25.3	723	3.2	0
70	9/11/2003	11:30	26.2	748	3.4	1.6
71	9/11/2003	11:40	26.4	766	3.5	1.6
72	9/11/2003	11:50	26.3	783	3.7	4.8
73	9/11/2003	12:00	26.2	793	3.8	3.2
74	9/11/2003	12:10	26.2	801	3.9	1.6
75	9/11/2003	12:20	26.8	800	3.9	4.8
76	9/11/2003	12:30	26.9	796	3.9	3.2
77	9/11/2003	12:40	27	791	3.9	1.6

78	9/11/2003	12:50	27.7	701	3.5	1.6
79	9/11/2003	13:00	28	714	3.5	1.6
80	9/11/2003	13:10	27.8	789	3.8	4.8
81	9/11/2003	13:20	27.6	553	3	4.8
82	9/11/2003	13:30	27.7	758	3.7	3.2
83	9/11/2003	13:40	28.4	748	3.7	4.8
84	9/11/2003	13:50	28.3	749	3.7	8
85	9/11/2003	14:00	28.4	723	3.5	6.4
86	9/11/2003	14:10	28.8	640	3	3.2
87	9/11/2003	14:20	29.5	675	3.1	3.2
88	9/11/2003	14:30	29.2	650	3	6.4
89	9/11/2003	14:40	29.2	641	2.9	4.8
90	9/11/2003	14:50	29.4	610	2.7	6.4
91	9/11/2003	15:00	29.1	548	2.4	9.7
92	9/11/2003	15:10	28.8	257	1.7	6.4
93	9/11/2003	15:20	28.7	398	1.9	6.4
94	9/11/2003	15:30	28.9	246	1.4	6.4
95	9/11/2003	15:40	28.7	371	1.5	3.2
96	9/11/2003	15:50	29.3	495	1.6	9.7
97	9/11/2003	16:00	29.7	432	1.5	4.8
98	9/11/2003	16:10	30.3	393	1.3	4.8
99	9/11/2003	16:20	29.9	356	1.1	3.2
100	9/11/2003	16:30	28.3	286	0.9	11.3
101	9/11/2003	16:40	27	312	0.8	8
102	9/11/2003	16:50	26.8	311	0.8	8
103	9/11/2003	17:00	26.6	270	0.7	8
104	9/11/2003	17:10	26.4	250	0.6	8
105	9/11/2003	17:20	26.1	219	0.5	9.7
106	9/11/2003	17:30	25.9	198	0.4	9.7
107	9/11/2003	17:40	25.7	161	0.3	11.3
108	9/11/2003	17:50	25.5	139	0.1	6.4
109	9/11/2003	18:00	25.4	120	0	6.4
110	9/11/2003	18:10	25.2	94	0	6.4
111	9/11/2003	18:20	25	73	0	8
112	9/11/2003	18:30	24.7	53	0	4.8
113	9/11/2003	18:40	24.6	35	0	4.8
114	9/11/2003	18:50	24.4	3	0	4.8
115	9/11/2003	19:00	24.1	0	0	4.8
116	9/11/2003	19:10	23.8	0	0	4.8
117	9/11/2003	19:20	23.4	0	0	4.8
118	9/11/2003	19:30	23.2	0	0	3.2
119	9/11/2003	19:40	23	0	0	4.8
120	9/11/2003	19:50	22.8	0	0	1.6
121	9/11/2003	20:00	22.5	0	0	1.6

122	9/11/2003	20:10	22.2	0	0	1.6
123	9/11/2003	20:20	21.9	0	0	0
124	9/11/2003	20:30	21.6	0	0	0
125	9/11/2003	20:40	21.3	0	0	0
126	9/11/2003	20:50	21.1	0	0	0
127	9/11/2003	21:00	20.9	0	0	1.6
128	9/11/2003	21:10	21.1	0	0	1.6
129	9/11/2003	21:20	21.2	0	0	0
130	9/11/2003	21:30	21.3	0	0	1.6
131	9/11/2003	21:40	21.3	0	0	0
132	9/11/2003	21:50	21.2	0	0	0
133	9/11/2003	22:00	21.1	0	0	1.6
134	9/11/2003	22:10	21.1	0	0	0
135	9/11/2003	22:20	21	0	0	1.6
136	9/11/2003	22:30	20.9	0	0	1.6
137	9/11/2003	22:40	20.8	0	0	1.6
138	9/11/2003	22:50	20.7	0	0	1.6
139	9/11/2003	23:00	20.6	0	0	1.6
140	9/11/2003	23:10	20.6	0	0	1.6
141	9/11/2003	23:20	20.4	0	0	0
142	9/11/2003	23:30	20.3	0	0	0
143	9/11/2003	23:40	20.2	0	0	0
144	9/11/2003	23:50	20.2	0	0	0

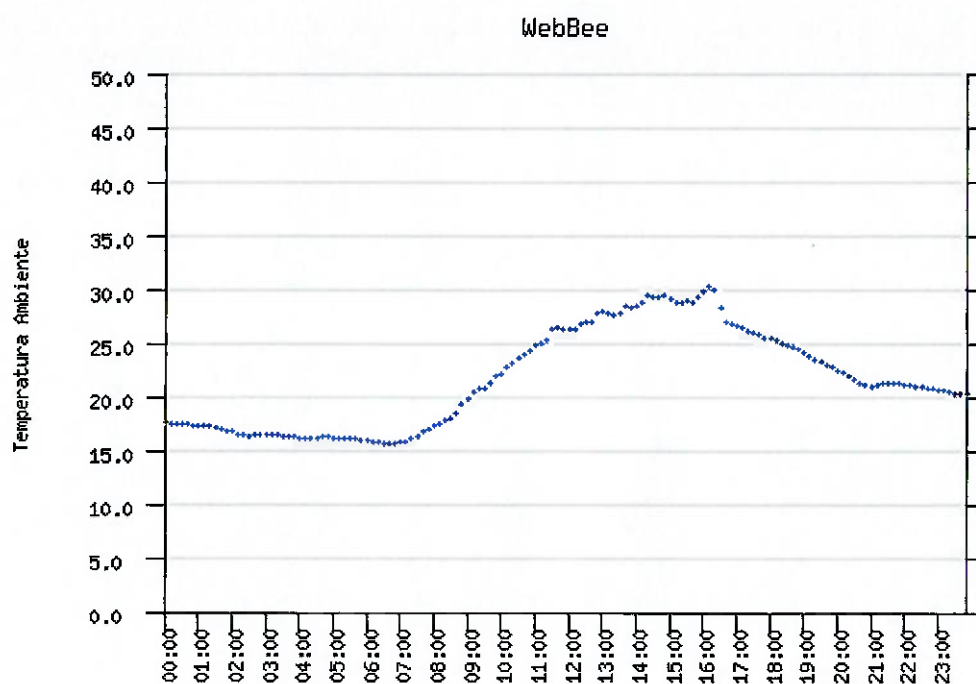


Figura 13.13 - Gráfico da temperatura ambiente °C do dia 09/11/2003

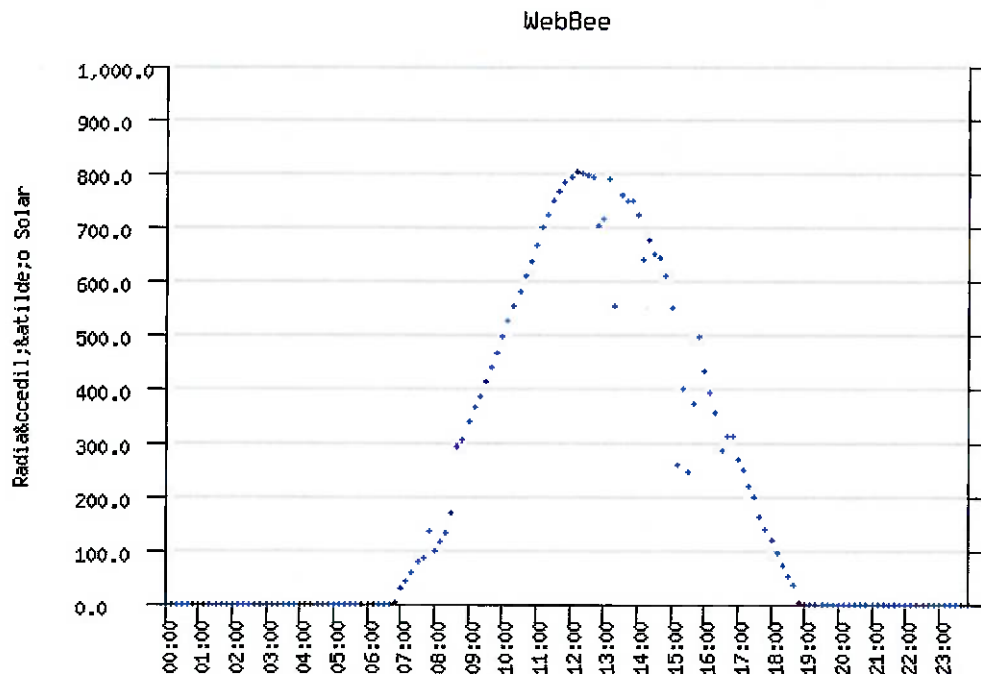


Figura 13.14 - Gráfico da radiação solar (W/m².μm) do dia 09/11/2003

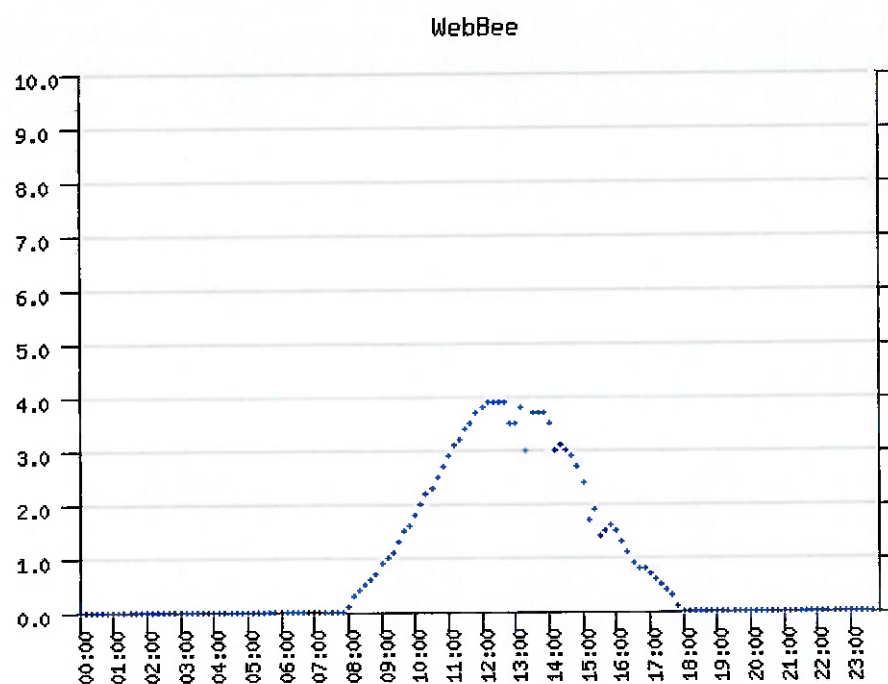


Figura 13.15 - Gráfico da radiação ultravioleta (W/m2.μM) do dia 09/11/2003

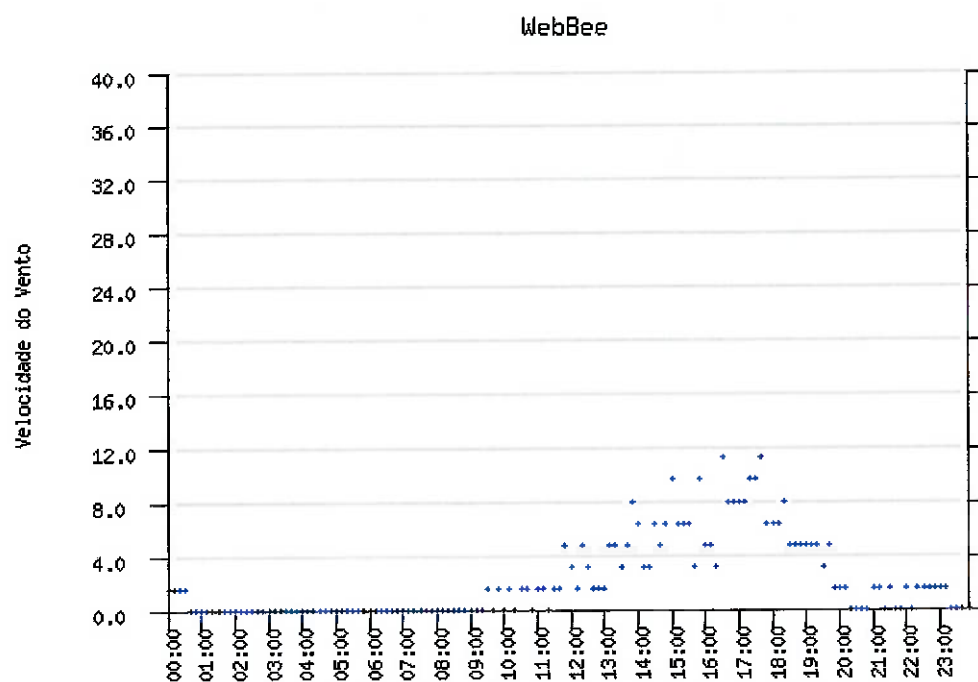


Figura 13.16 - Gráfico da velocidade do vento em km/h do dia 09/11/2003

13.2 TEMPERATURAS OBTIDAS

Tabela 13-5 - Temperaturas medidas no dia 01/11/03

hora	temperatura da água (°C)		Temperatura da superfície do coletor (°C)
	fria	quente	
8h00	18,3	24,5	28,2
8h30	20,1	28,2	35,5
9h00	21,4	32,6	47,1
9h30	22,8	35,8	54,1
710h00	24,3	38,4	60,4
10h30	25,1	41,7	69,8
11h00	26,8	46,1	73,8
11h30	27,6	47,5	76,0
12h00	27,5	45,0	68,4
12h30	27,2	41,3	61,4
13h00	26,8	38,4	58,5
13h30	26,4	39,6	58,8
14h00	26,3	40,3	60,2
14h30	26,3	42,9	60,8
15h00	26,2	42,7	61,6
15h30	26,0	41,8	58,2
16h00	25,9	42,3	54,3
16h30	25,8	42,1	49,7
17h00	25,5	38,1	44,3
17h30	25,4	35,4	38,3
18h00	23,1	34,0	29,5
18h30	21,8	32,5	28,8
19h00	20,7	31,2	26,9
19h30	19,4	29,4	24,4

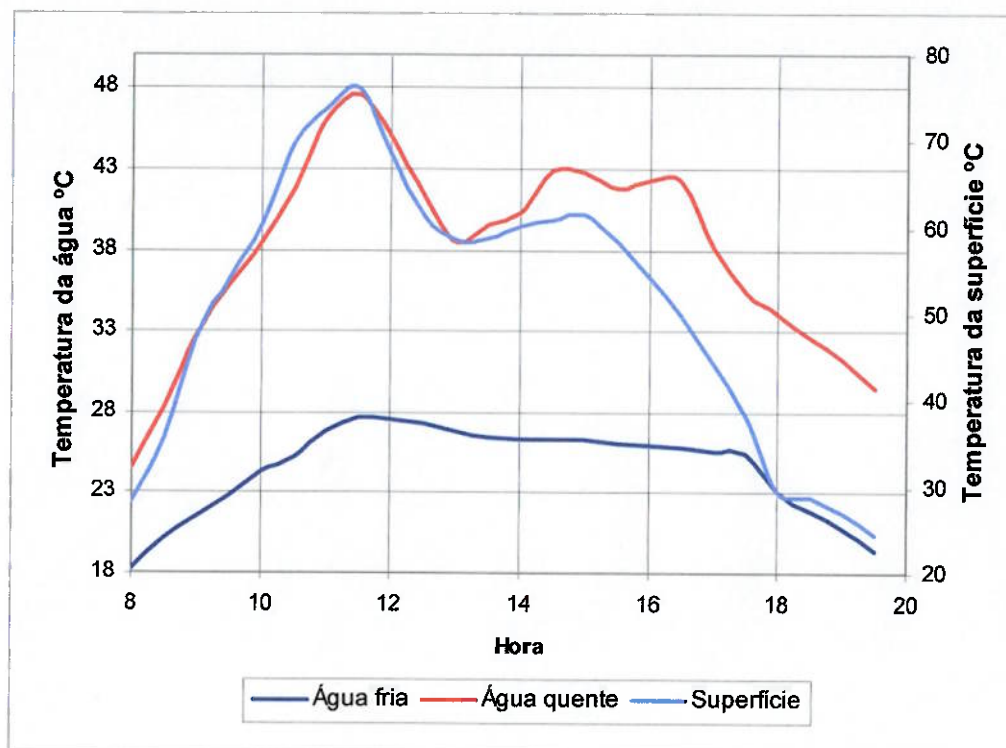


Figura 13.17 – Gráfico de temperaturas medidas no dia 01/11/03

Tabela 13-6 - Temperaturas medidas no dia 02/11/03

hora	temperatura da água		Temperatura da superfície do coletor
	fria	quente	
8h00	15,0	16,4	18,4
8h30	15,2	17,6	19,1
9h00	15,6	18,5	19,9
9h30	15,5	19,3	20,1
10h00	15,4	19,1	20,7
10h30	15,5	18,8	20,8
11h00	15,7	18,9	21,4
11h30	16,3	20,1	21,4
12h00	16,2	20,4	21,9
12h30	16,2	20,3	22,0
13h00	16,4	20,4	23,0
13h30	16,4	20,0	22,6
14h00	16,2	19,6	22,2
14h30	15,7	19,1	21,4
15h00	15,1	19,0	20,9
15h30	14,9	18,8	20,5
16h00	14,8	18,3	19,6
16h30	14,1	17,8	18,8
17h00	14,4	15,3	16,0

17h30	14,1	14,5	15,2
18h00	13,6	14,5	15
18h30	12,9	13,3	13,7
19h00	12,8	12,9	13,6
19h30	12,8	12,9	13,5

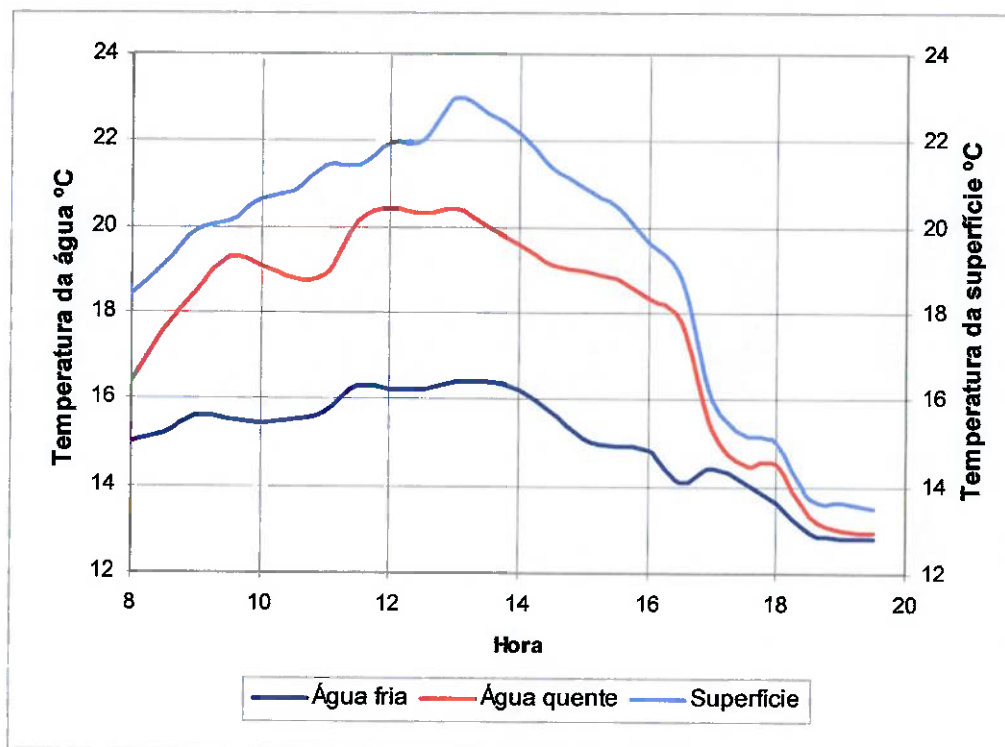


Figura 13.18 – Gráficos de temperaturas medidas no dia 02/11/03

Tabela 13-7 - Temperaturas medidas no dia 08/11/03

hora	temperatura da água		Temperatura da superfície do coletor
	fria	quente	
8h00	15,0	26,6	26,3
8h30	15,6	30,3	32,4
9h00	16,1	33,9	41,0
9h30	17,0	35,8	50,3
10h00	17,8	39,6	56,8
10h30	19,2	42,7	61,7
11h00	20,6	44,5	65,3
11h30	22,4	45,5	69,4
12h00	24,1	47,3	73,7
12h30	24,8	48,5	75,8
13h00	25,4	47,9	76,3
13h30	25,8	47,9	74,7
14h00	26,2	47,7	73,1

14h30	27,0	47,0	69,9
15h00	27,8	47,0	67,4
15h30	27,3	47,0	61,4
16h00	26,8	46,1	59,7
16h30	25,7	46,0	54,7
17h00	24,5	43,4	49,4
17h30	22,1	41,4	43,6
18h00	19,6	37,7	39,9
18h30	18,5	35,4	36,7
19h00	17,4	33,2	28,2
19h30	16,5	29,8	25,6

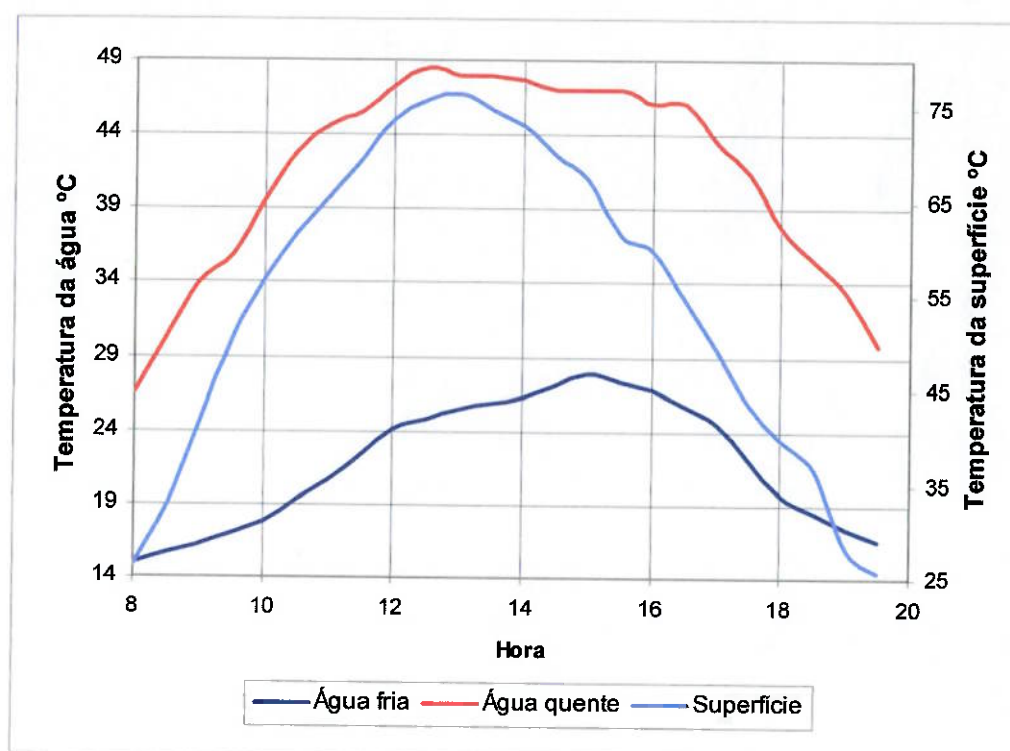


Figura 13.19 – Gráfico de temperaturas medidas no dia 08/11/03

Tabela 13-8 - Temperaturas medidas no dia 09/11/03

hora	temperatura da água		Temperatura da superfície do coletor
	fria	quente	
8h00	17,6	28,3	29,0
8h30	19,0	32,5	35,8
9h00	20,4	36,3	45,1
9h30	21,1	37,6	52,7
10h00	21,8	37,9	56,3
10h30	24,0	42,7	63,2
11h00	26,1	44,6	66,0

11h30	26,4	44,9	69,3
12h00	26,7	46,7	72,7
12h30	28,0	48,1	76,3
13h00	29,2	49,8	77,9
13h30	29,7	48,5	76,8
14h00	30,1	51,0	77,4
14h30	30,4	48,8	72,3
15h00	30,6	47,0	68,1
15h30	29,1	45,8	61,7
16h00	27,6	43,8	58,0
16h30	26,1	41,2	50,9
17h00	25,4	39,2	46,0
17h30	25,1	39,0	42,8
18h00	24,7	36,8	39,2
18h30	24,4	35,7	37,7
19h00	24,0	34,3	30,3
19h30	23,4	32,6	28,6

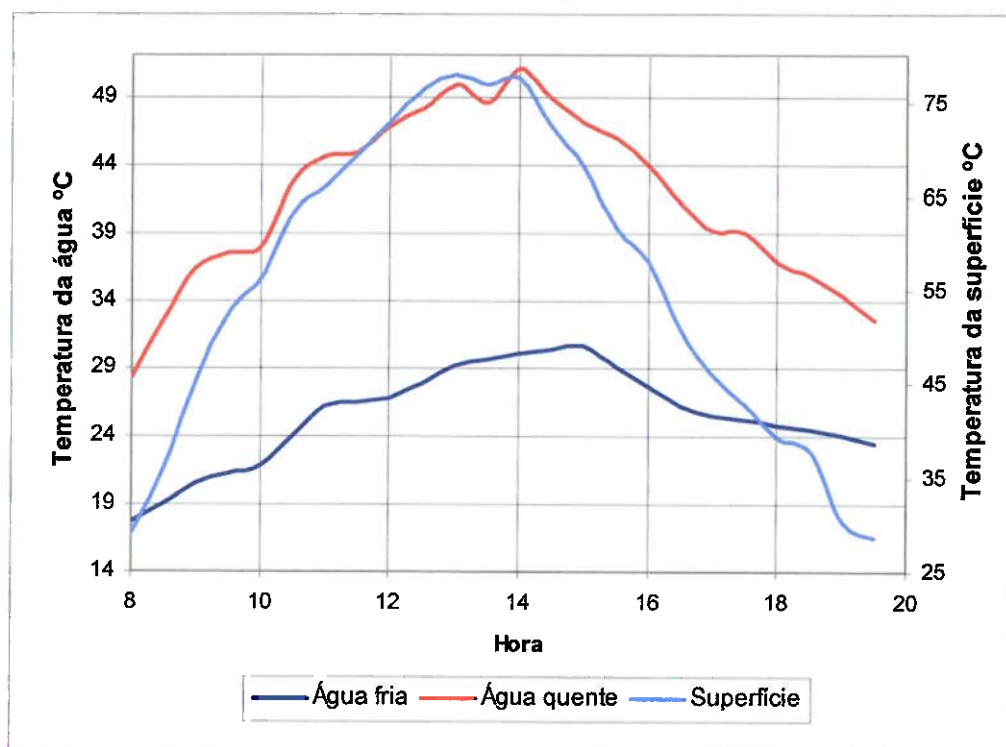


Figura 13.20 – Gráfico de temperaturas medidas no dia 09/11/03

13.3 ANÁLISE DE RESULTADOS

A temperatura inicial, ou temperatura da água fria no início do processo de aquecimento sempre se encontra em equilíbrio com a temperatura do meio ambiente, e durante o aquecimento a variação da temperatura da água fria se assemelha com a variação da temperatura da água quente, mas em proporções menores. Essa influência ocorre devido à interligação entre as duas partes do reservatório.

A variação da temperatura da superfície do coletor solar, quando há incidência de luz, sofre grande influência da radiação solar e ultravioleta, e uma pequena influência da temperatura ambiente. Para radiação solar acima de 400, a diferença de temperatura entre a água quente e fria atinge valores em torno de 20°C, mas com um pequeno atraso devido à inércia térmica da água.

Em dias bem ensolarados, como ocorrido no dia 9 de novembro, o coletor é capaz de aquecer água à 51°C sem apresentar nenhum problema de fadiga térmica, mesmo com a temperatura da superfície a 78°C, mas com o coletor a seco, ou seja, sem água é provável que a temperatura no coletor seja muito superior a ponto de provocar o escoamento do material. No entanto este ensaio não foi realizado, pois poderia causar danos irreparáveis às placas de PVC.

As temperaturas de água quente finais estão dentro da faixa estabelecida, ou seja, 6°C acima da água em temperatura ambiente mesmo quando não há mais incidência de luz. Note, porém que o reservatório não é capaz de manter a temperatura da água quente dentro dos padrões estabelecidos por muito tempo, apresentando um decaimento contínuo a partir do momento em que o sol se põe.

Outro dado importante foram os resultados obtidos no dia 2 de novembro. Neste dia praticamente não houve sol e conseqüentemente, o coletor solar foi incapaz de aquecer a água de modo eficiente. Observando o gráfico da fig.(13.2.2) pode-se observar que as temperaturas são influenciadas muito mais pela temperatura ambiente do que pela radiação solar incidente.

É importante lembrar que as curvas dos dados atmosféricos só puderam ser utilizados devido à proximidade da região de coleta de dados atmosféricos com a região de coleta de dados de temperaturas do experimento (cerca de 6 km).

14 CONCLUSÃO

Como esperado, o custo do sistema gira em torno de R\$ 150,00 (proposta inicial). A eficiência térmica do conjunto é suficiente para proporcionar o conforto térmico pré-estipulado (aumento de 6° C na temperatura final de consumo).

É importante lembrar que assim como no projeto “Placas solares de PVC de filme de água” (projeto Sociedade do Sol – IPEM – USP) este projeto não almeja altas eficiência térmicas, sendo inviável para usos em que se necessita de água quente a qualquer hora do dia (a viabilidade dos aquecedores solares a baixo custo é apoiada na idéia de que o uso de água ocorre apenas à noite, dando tempo para a água ser aquecida pelos coletores). Assim, possibilita-se o uso de materiais menos condutores (e muito mais baratos que o kg de cobre). A alta eficiência é somente almejada quando há a necessidade de água quente em regiões de pouca insolação. Considerando o Brasil como país tropical e juntando-se a isso a necessidade de um projeto com baixo custo, viabiliza-se a utilização de produtos pouco ortodoxos como placas de PVC, tubos de irrigação, plásticos transparentes não espessos, etc. Uma grande dificuldade é encontrar materiais seletivos a baixo custo. O uso de materiais deve ser fundamentado em sua eficiência térmica e, principalmente em seu custo (que é a proposta do projeto).

A grande dificuldade encontrada neste trabalho foi, sem dúvida alguma, superar os problemas encontrados no teste hidrostático. A vedação entre o forro de PVC e os tubos de PVC de 1” mostraram-se extremamente sensíveis à pressão e à fadiga térmica. Após a proposta inicial, de vedação de Araldite Epóxi 24 h, não sendo bem sucedida, optou-se pela vedação de silicone termoplástico. O sucesso só pôde ser obtido após diversas tentativas frustradas, ora variando-se métodos de aplicação da vedação, ora mudando-se a construção do coletor.

Um ponto positivo neste trabalho é o fato de não se tratar apenas de desenvolvimentos teóricos, possibilitando a utilização de técnicas e conceitos de manufatura. Um aspecto perceptível no decorrer da manufatura do coletor é a importância do *know-how* pois após a primeira tentativa as sucessivas se tornam muito mais rápidas devido ao conhecimento adquirido anteriormente, isso foi facilmente observado na construção do segundo coletor e principalmente na solução dos problemas enfrentados nos testes hidrostáticos.

15 BIBLIOGRAFIA

- BEZERRA, A.M.;** *Aplicações Térmicas da Energia Solar*; UFPB/Editora Universitária; João Pessoa; 1998.
- DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W.A.;** *Solar Engineering of Thermal Processes*; Wiley-Interscience Publication, New York; 1991.
- HOLMAN, J.P.;** *Transferência de Calor*; McGraw Hill; São Paulo; 1997.
- INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P.;** *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*; LTC Editora; Rio de Janeiro; 1998.
- KREIDER, J.F.; KREITH, F.;** *Solar Heating and Cooling*; McGraw Hill; Washington; 1996.
- ROBINSON, N.;** *Solar Radiation*; Elsevier Publishing Company; Amsterdam; 1970.
- SERWAY, R.A.;** *Física 4 para Cientistas e Engenheiros*; LTC Editora; Rio de Janeiro; 1996.
- WIEDER, S.;** *An Introduction to Solar Energy for Scientists and Engineers*; Krieger Publishing Company; Florida; 1992.
- <http://www.webbee.org.br>; *Tabelas e Gráficos de condições climáticas na região da USP*