

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**COLETOR SOLAR ALTERNATIVO DE CONCRETO PARA
AQUECIMENTO DE ÁGUA EM APLICAÇÕES AGRÍCOLAS E
AGROINDUSTRIAIS**

LUIZ CARLOS DALL’ANTONIA JUNIOR

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU - SP
NOVEMBRO DE 2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**COLETOR SOLAR ALTERNATIVO DE CONCRETO PARA
AQUECIMENTO DE ÁGUA EM APLICAÇÕES AGRÍCOLAS E
AGROINDUSTRIAIS**

LUIZ CARLOS DALL’ANTONIA JUNIOR

Orientador: Prof. Dr. João Francisco Escobedo

Dissertação de Mestrado apresentado à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU - SP
NOVEMBRO DE 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

D144c Dall'Antonia Junior, Luiz Carlos, 1966-
Coletor solar alternativo de concreto para aquecimento de água em aplicações agrícolas e agroindustriais / Luiz Carlos Dall'Antonia Junior. - Botucatu : [s.n.], 2011 vi, 50 f. : il. color., gráfs., tabs., fots.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2011

Orientador: João Francisco Escobedo
Inclui bibliografia

1. Água - Aquecimento. 2. Água na agricultura.
3. Aquecedores solares de água. 4. Coletores solares.
5. Reservatórios. I. Escobedo, João Francisco. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

Palavras-chave: aquecedor solar, reservatório térmico, aquecimento de água

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "COLETOR SOLAR ALTERNATIVO DE CONCRETO PARA AQUECIMENTO
DE ÁGUA EM APLICAÇÕES AGRÍCOLAS E AGROINDUSTRIAIS"

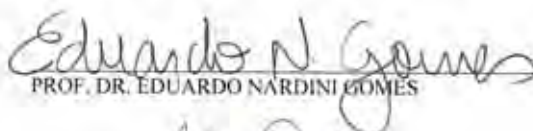
ALUNO: LUIZ CARLOS DALL'ANTONIA JÚNIOR

ORIENTADOR: PROF. DR. JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO

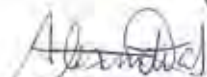
Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO



PROF. DR. EDUARDO NARDINI GOMES



PROF. DR. ALEXANDRE DAL PAI

Data da Realização: 29 de novembro de 2011.

Agradecimentos

A Deus por estar sempre ao meu lado todos os dias da minha vida.

A minha esposa Abenair, que me apóia e me dá forças.

A minha família, em especial ao meu pai Luiz Carlos e a minha mãe Silene Mitsue, que tanto me apoiaram para minha formação. Ao meu irmão Fabio Weidi e a minha irmã Lucilene Tamy, com muito carinho.

Agradeço aos amigos que tanto me ajudaram.

Aos amigos do grupo de Radiometria Solar.

Ao Professor Escobedo pela oportunidade de aperfeiçoar e engrandecer os meus conhecimentos.

*Bem aventurado o Homem que acha sabedoria,
e o homem que adquire conhecimento*
PV. 3.13

SUMÁRIO

	Página
1.RESUMO.....	1
2.SUMMARY.....	2
3.INTRODUÇÃO.....	3
4.REVISÃO DE ITERATURA.....	5
4.1 Mecanismos de troca de calor.....	5
4.2 - Processos de transferência de calor.....	5
4.3 - Balanço de energia no coletor.....	6
4.4 Coletores solares planos (Convencional ou industrial).....	7
4.5 Coletores solar Alternativo.....	8
4.6 Reservatório de água alternativo.....	14
4.7 Aplicações agrícolas com o uso de água aquecida.....	15
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	17
5.1 Descrições do coletor solar alternativo.....	17
5.2 Medidas.....	19
5.2.1- Temperatura.....	19
5.3 Eficiência instantânea do coletor.....	21
5.4 Reservatórios de água quente.....	22
5.4.1 Eficiência térmica do reservatório.....	22
5.4.2 Vazão volumétrica.....	23
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
6.1 Temperaturas do absorvedor no Verão e Inverno.....	24
6.2 Temperaturas do Fluido e Ganho Térmico.....	30
6.3 Rendimento do coletor solar alternativo de concreto.....	40
6.4 Desempenho do reservatório térmico alternativo.....	45
7. CONCLUSÕES.....	46
8. REFERÊNCIAS.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
1: Média dos rendimentos do coletor padrão e em estrutura de cimento amianto.....	10
2: Média das temperaturas de novembro a março com inclinação de 41 ⁰ e Horizontal.....	14
3: Valores das temperaturas do fluido no coletor em diferentes pontos; Entrada, P1, P2, P3, P4 Saída em condição de céu aberto para um dia da estação do verão.....	31
4: Valores das temperaturas do fluido no coletor em diferentes pontos; Entrada, P1, P2, P3, P4 e Saída em condição de céu parcialmente nublado para um dia da estação do verão.....	32
5: Valores das temperaturas do fluido no coletor em diferentes pontos; Entrada, P1, P2, P3, P4 e Saída em condição de céu nublado para um dia da estação do verão.....	32
6: Valore das variações de temperatura e ganho térmico nos pontos de coletas de dados.....	33
7: Valore das variações de temperatura e ganho térmico nos pontos de coletas de dados.....	34
8: Valore das variações de temperatura e ganho térmico nos pontos de coletas de dados.....	34
9: Valores da temperatura do fluido no coletor em diferentes pontos; Entrada, P1, P2, P3, P4 e Saída em condição de céu aberto para um dia da estação do inverno.....	35
10: Valores da temperatura do fluido no coletor em diferentes pontos; Entrada, P1, P2, P3, P4 e Saída em condição de céu parcialmente nublado para um dia da estação do inverno.....	36
11: Valores da temperatura do fluido no coletor em diferentes pontos; Entrada, P1, P2, P3, P4 e Saída em condição de céu nublado para um dia da estação do inverno.....	36
12: Valore das variações de temperatura e ganho térmico nos pontos de coletas de dados.....	37
13: Valore das variações de temperatura e ganho térmico nos pontos de coletas de dados.....	38
14: Valore das variações de temperatura e ganho térmico nos pontos de coletas de dados.....	38
15: Valores médios Entrada, P1, P2, P3, P4 e Saída do fluido no coletor, no período das 11 às 16 horas, para céu nublado, parcialmente nublado e aberto, no inverno e do verão.....	39
16: Calculo do Q Útil.....	41

LISTA DE FIGURAS

Figuras

	Página
1: Esquematização de um coletor solar Plano. Fonte: www.soletrol.com.br , acesso em 10/12/2010.....	7
2: Esquema do coletor solar de concreto desenvolvido no Indian Institute of Technology em Bombaim – Índia. Fonte: Nayak et al.(1989).....	9
3: Sistema de aquecimento solar de água com coletor solar inserido na estrutura da cobertura da casa. Fonte: Fantinelli (2002.).....	10
4: Telha coletora de amianto. Fonte: Alencar & Saglietti (1998).....	11
5: Detalhe das aletas na rede de tubos de PVC e início da concretagem do coletor, construído em uma residência, na cidade de Campinas/SP, em 2001. Fonte: Varella (2004).....	12
6: Esquema do coletor solar plano em argamassa, Santos, et. al (1991).....	12
7: Coletor Solar de Polietileno (SILVA, 1992).....	13
8: Aquecedor solar de água baseado em coletores de concreto, (Chaurasia,1999).....	13
9: Armazenador térmico alternativo construído em fibra de vidro.....	15
10: Planta baixa do coletor solar.....	18
11: Ripa de madeira, junta de dilatação.....	18
12: Vista parcial lateral do coletor solar alternativo.....	18
13: Sensor de Temperatura. Vaisala (Hmp45C).....	20
14: Sensor de radiação Global (Piranômetro) EPPLEY PSP.....	20
15: Datalogger modelo 21X.....	21
16: Reservatório de água quente.....	22
17: Evolução diurna para a) irradiância Global; b) Temperatura do ar; e a temperatura do absorvedor coletor nas profundidades 0,0 cm, 2,5 cm e 5,0 cm, dia Aberto (20/02/2011).....	25
18: Evolução diurna para a) irradiância Global; b) Temperatura do ar; e a temperatura do absorvedor coletor nas profundidades 0,0 cm, 2,5 cm e 5,0 cm, dia Parcialmente Nublado. (22/02/2011).....	26
19: Evolução diurna para a) irradiância Global; b) Temperatura do ar; e a temperatura do absorvedor coletor nas profundidades 0,0 cm, 2,5 cm e 5,0, cm, dia Nublado.(15/02/2011).....	26

20: Evolução diurna: a) irradiância Global; c) Temperatura do ar; e a temperatura do coletor nas profundidades: 0,0 cm, 2,5 cm e 5,0 cm, dia Aberto. (30/06/2010).....	28
21: Evolução diurna: a) irradiância Global; c) Temperatura do ar; e a temperatura do coletor nas profundidades: 0,0 cm, 2,5 cm e 5,0 cm, dia Parcialmente Nublado. (07/07/2010).....	29
22: Evolução diurna: a) irradiância Global; c) Temperatura do ar; e a temperatura do coletor nas profundidades: 0,0 cm, 2,5 cm e 5,0 cm, dia Nublado. (10/07/2010).....	29
23: Evolução diurna da temperatura do fluido no coletor nos 6 diferentes pontos no verão. a) céu aberto (20/02/2011); b) céu parcialmente nublado (22/02/2011) e c) nublado (15/02/2011).....	31
24: (a,b,c) Evolução temporal do gradiente de temperatura do fluido e do ganho térmico do fluido nas mesmas posições P_e , P_1 ; P_2 , P_3 ; P_4 e P_s	33
25: Evolução diurna da temperatura do fluido no coletor nos 6 diferentes pontos no inverno. a) céu aberto (30/06/2010); b) céu parcialmente nublado (07/07/2010) e c) nublado (10/06/2010).....	35
26: (a, b, c) Evolução temporal do gradiente de temperatura do fluido e do ganho térmico do fluido nas mesmas posições P_e , P_1 ; P_2 , P_3 ; P_4 e P_s	37
27: (a, b) Energia total incidente e energia útil em dia de céu aberto, no verão. (20/11/2011).....	40
28: (a, b) Energia total incidente e energia útil em dia de céu aberto, no verão. (22/02/2011).....	42
29: (a, b) Energia total incidente e energia útil em dia de céu nublado, no verão. (15/02/2011).....	42
30: (a, b) Energia total incidente e energia útil em dia de céu aberto, no inverno. (30/06/2010).....	43
31: (a, b) Energia total incidente e energia útil em dia de céu parcialmente nublado no inverno.(07/07/2010).....	43
32: (a, b) Energia total incidente e energia útil em dia de céu nublado no inverno.....	44
33: (a, b, c) Temperatura água aquecida do coletor no interior do reservatório de nos períodos de (a) 17/02/2011 a 18/02/2011, (b) 30/07/2010 a 31/07/2010 e (c) 05/08/2010 a 06/08/2010.....	45

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

SÍMBOLO OU SIGLA	DESCRIÇÃO
A.....	área do absorvedor
c.....	calor específico do fluido
H ₀	radiação extraterrestre
H _g	radiação global incidente
H.....	irradiação solar
K _t	índice de claridade
m.....	vazão mássica do fluido
P ₁	Ponto a 100 metros
P ₂	Ponto a 200 metros
P ₃	Ponto a 300 metros
P ₄	Ponto a 400 metros
P _E	Ponto de entrada
P _s	Ponto de saída
Q _i ^h	energia incidente horária
Q _u ^h	energia útil horária
η ^d	rendimento diário
T _{0,0}	Temperatura na superfície do absorvedor
T ₁	temperatura do fluido a 100 metros
T _{2,5}	Temperatura a 2,5 cm de profundidade no absorvedor
T ₂	temperatura do fluido a 200 metros
T ₃	temperatura do fluido a 300 metros
T ₄	temperatura do fluido a 400 metros
T _{5,0}	Temperatura a 5,0 cm de profundidade no absorvedor
T _E	temperatura de entrada do fluido
T _m	temperatura no interior do reservatório
ΔT(t).....	Varição de temperatura

1 - RESUMO

O presente trabalho descreve a construção de um coletor solar alternativo de concreto de tração simples (areia, cimento e pedra), para aplicações agrícolas e agroindustriais. o coletor é constituído de uma área de absorção 51 m² com 470m de mangueira de polietileno para o aquecimento da água, e o armazenador da água aquecida. O sistema coletor e armazenador foi submetido a testes experimentais onde foram determinados para as estações verão e inverno, e sob três coberturas de céu aberto, parcialmente nublada e nublada: as temperatura do absorvedor em três profundidades; ganho térmico do fluido; rendimento térmico do coletor, e desempenho do armazenador. Os resultados mostram que a temperatura do absorvedor foi maior na cobertura de céu aberto, decrescendo em seqüência de profundidade 55,74°C, 52,1⁰C e 49,3⁰C respectivamente, e foi menor na cobertura de céu nublado, 48,3⁰C, 46,2⁰C e 44,6⁰C respectivamente; o ganho térmico do fluido de trabalho no absorvedor foi decrescente em função do aumento comprimento do condutor: o ganho foi maior no verão e em dias de céu aberto, atingindo a temperatura máxima de 52,7⁰C, e foi menor no inverno, em dias céu nublado, atingindo a temperatura máxima de 28,5⁰C; o rendimento térmico do coletor foi maior em dia de céu aberto: no verão 71,4% e inverno 74%; o sistema armazenador térmico, mostrou ótimo desempenho na conservação da temperatura do fluido de trabalho. Nos dias estudados houve uma redução de 10% na temperatura final da água aquecida.

Palavras-chave: aquecedor solar, reservatório térmico, aquecimento de água.

ALTERNATIVE CONCRETE-MADE SOLAR COLLECTOR FOR WATER HEATING IN AGRICULTURAL AND AGROINDUSTRY APPLICATIONS.

Botucatu, 2011. 56.p. Dissertation (Master in Agronomy/ Energy in Agriculture) – Faculty of Agronomic Sciences, State University of São Paulo.

Author: **Luiz Carlos Dall’Antonia Junior**

Adviser: **João Francisco Escobedo**

2 - SUMMARY

This paper describes the construction of an alternative sidewalk-type solar collector made of concrete (sand, cement and stone), for agriculture and agribusiness uses. The collector consists of an absorption area of 51 m² with 470m polyethylene tubing for water heating, and a storage for warm water. The collector and storage systems were subjected to experimental tests which were determined for summer and winter, three sky conditions: open skies, partly cloudy and overcast; three depths temperature in the absorber; thermal gain of the fluid, thermal efficiency of the collector and performance of the water storage. The temperature of the absorber was higher in open sky conditions: 55,74°C above it, decreasing in depth sequence of 52,1°C and 49,3°C. This temperatures of the absorber were 48,3°C 46,2°C and 44,6°C respectively in a overcast days. The thermal gain of the working fluid in the absorber was decreasing with increasing length of the conductor: the gain was higher in summer and open sky days, reaching a maximum temperature of 52.7 °C, and lowest in winter cloudy days, reaching a maximum temperature of 28.5 °C. The collector thermal efficiency was higher in open sky days: 71.4% in summer and 74% in winter. The warm water storage system had excellent keeping temperature performance with 10% loss in the final water temperature.

Keywords: Solar Heater; Thermal reservoir; Water heating.

3. INTRODUÇÃO

No Brasil, cerca de 10 milhões de habitantes vivem em regiões isoladas e de difícil acesso, não sendo atendidas pelo sistema interligado de energia elétrica. As regiões norte e nordeste têm os maiores índices de exclusão. Sendo que o estado mais rico da união, São Paulo, ainda tem índice de exclusão elétrica que chega a 9% da população rural. Toda esta população é prejudicada pelos arranjos de distribuições energéticas convencionais, tendo em vista que a eletrificação rural não é considerada rentável economicamente. Muitas vezes pela alta dispersão geográfica, pelo baixo poder aquisitivo e baixo consumo.

Sendo um país em desenvolvimento, com grande dificuldade em atender a crescente demanda por energia elétrica, apresenta o chuveiro elétrico como principal meio de aquecimento de água destinado ao banho, é utilizado na maioria das residências de menor poder aquisitivo, tanto no meio urbano quanto no meio rural. Este é responsável por 23% do consumo de energia elétrica na residência.

Contudo, ainda é um país privilegiado por receber uma farta insolação anual, pois está situado entre a linha do equador e o trópico de capricórnio, o que o estimula a priori buscar um novo conceito de aquecedor aproveitando a energia solar para aquecimento de água.

Estudos têm sido realizados buscando principalmente o desenvolvimento de sistemas de aquecimento solar de água de baixo custo de aquisição e instalação, com ênfase aos coletores solares, para efeito de popularização junto às classes sociais brasileiras de menor poder aquisitivo, sem com isto reduzir significativamente a eficiência, a durabilidade e com economia de energia elétrica. Esta popularização aos coletores se justifica, pois os equipamentos industrializados ainda são caros e de difícil

instalação. Várias pesquisas vêm sendo realizadas com o intuito de baratear ou até mesmo o uso de material reciclado e conseqüentemente preservando o meio ambiente.

O objetivo deste trabalho é propor um sistema de aquecimento solar de água de baixo custo bem como um reservatório para armazenar a água aquecida, para aplicação em ranário, piscicultura, pasteurização de ovos entre outras aplicações agrícolas e agroindústria ou para um pré-aquecimento de água.

O coletor solar alternativo de concreto é versátil, pois emprega em sua construção materiais de fácil aquisição e pode ser realizado em regime de autoconstrução.

4 - REVISÃO DE LITERATURA

4.1 – Coletor solar plano para aquecimento de água.

Dentre as possibilidades de aproveitamento térmico que tem ganhado importância crescente na atualidade, a partir do conhecimento do recurso solar, está o aquecimento de água com um componente construtivo protagonizado pelos coletores planos, tecnologia com o melhor custo benefício no contexto brasileiro, em substituição dos populares chuveiros elétricos, principalmente nas regiões sul e sudeste do país (MENDONÇA, 2009).

Um coletor solar, basicamente, constitui-se de uma cobertura de vidro e de uma superfície enegrecida, que ao absorver radiação solar se aquece e transmite energia térmica (calor) ao fluido de trabalho. Essa energia recebida pelo fluido é chamada de energia útil. Parte da radiação absorvida, no entanto, será perdida pelo sistema através de processos de transferência de calor.

4.2 – Processos de transferência de calor

O calor é a nomenclatura atribuída à energia térmica sendo transferida de um sistema a outro exclusivamente em virtude da diferença de temperaturas entre eles. O calor é uma das duas formas disponíveis para se transferir energia de um sistema a outro e expressa à quantidade de energia transferida através da fronteira comum aos sistemas (MENDONÇA, 2009).

Os processos pelos quais ocorre transferência de calor (transferências de energia sob a forma de calor) são tradicionalmente divididos em:

- Condução
- Convecção
- Radiação

Conforme Tipler (2000) podemos definir estes processos da seguinte forma:

- Condução é feita devido às moléculas de maior energia transmitirem energia através de vibrações para as partículas menos energéticas, e isto acontece porque quanto mais quente as moléculas mais elas vibram.

- Convecção já não é a nível molecular como era o caso da condução. Esta já pode ser de duas formas, por convecção natural em que é devido à diferença de densidade do fluido devido ao aquecimento do fluido ou por convecção forçada em que existe um mecanismo externo ao sistema a forçar o movimento do fluido.

- Radiação: qualquer corpo ou superfície a uma temperatura superior ao zero absoluto emite radiação electromagnética por alteração na configuração electrónica de átomos e moléculas. A radiação térmica está restrita aos comprimentos de onda entre 0.1 e 100 μm do espectro electromagnético. A propagação de ondas electromagnéticas ocorre através de corpos ou fluidos não opacos, ou no vácuo, não precisando, portanto, da existência de matéria. A lei básica é a lei de Stefan-Boltzmann. Como se pode concluir, o transporte de energia associado a este mecanismo é qualitativamente diferente dos mecanismos referidos acima (condução e convecção). Contudo, uma vez que todas as superfícies emitem radiação térmica, e esta será tanto maior quanto mais elevada for a temperatura, se um corpo emitir mais energia do que aquela que recebe proveniente das superfícies envolventes, a temperatura desse corpo diminuirá.

4.3 - Balanço de energia no coletor

No balanço de energia de um coletor solar plano sempre se deve considerar as entradas de energia e as perdas (saídas) de energia.

A principal entrada de energia é a radiação solar. Ao incidir sobre a superfície do coletor (placa coletora) parte desta será absorvida pela placa coletora e parte será refletida (perda). Usualmente utiliza-se cores escuras nas placas coletoras para se amenizar os efeitos para as perdas causadas por reflexão.

A energia absorvida pela placa coletora é transferida por condução ao fluido de trabalho. Coletores geralmente são construídos com material isolante em volta da placa coletora para evitar perdas por condução, proporcionando um melhor direcionamento da energia para o fluido de trabalho.

No caso do coletor de concreto, a placa absorvedora é a superfície do concreto. Similarmente a outros coletores, esta tem a placa absorvedora pintada de cores escuras para amenizar perdas por reflexão. O concreto também é o condutor de calor por absorver a energia na superfície e transferi-la para as mangueiras em seu interior, mangueiras estas que transferem a energia para o fluido de trabalho, ou seja, a água.

4.4 - Coletores solares planos (Convencional ou industrial).

Coletores solares planos, exemplificado na Figura 1, são basicamente constituídos por cinco componentes: caixa externa, isolante térmico, serpentina condutora do fluido, placa absorvedora (também chamada de aleta) e uma cobertura transparente de vidro ou de determinados polímeros.

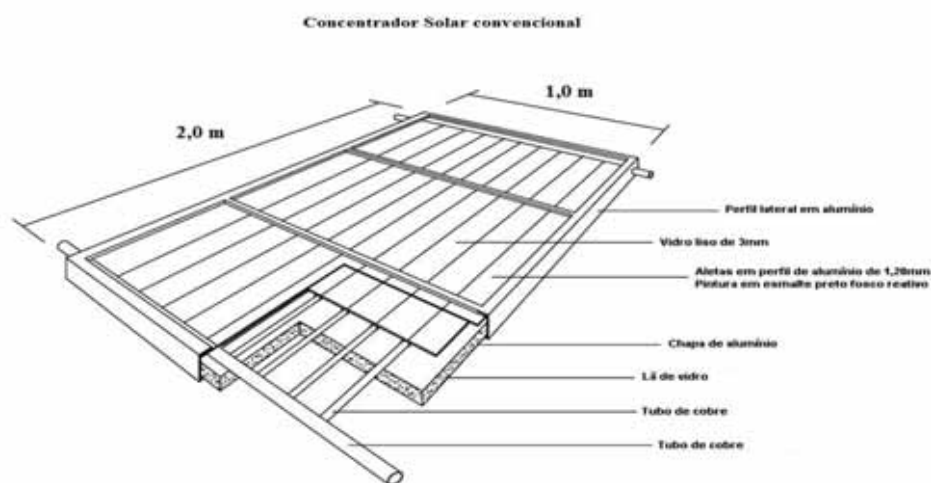


Figura 1: Esquematização de um coletor solar Plano. Fonte: www.soletrol.com.br, acesso em 10/12/2010.

Fantinelli (2006) relata que a caixa externa pode ser fabricada em aço inox, alumínio, material termoplástico ou galvalume (composição de alumínio e aço galvanizado) e para minimizar as perdas térmicas, um material isolante é colocado entre a caixa e a placa absorvedora com os tubos, geralmente lã de vidro, lã de rocha ou espuma de poliuretano.

A placa absorvedora é basicamente uma superfície enegrecida que, ao absorver radiação solar, se aquece e transmite calor por condução através da serpentina a um fluido de trabalho (água ou ar) e é feita normalmente feita de materiais com alta condutividade térmica (geralmente o cobre e o alumínio) (RISPOLI, 2008). Recebe pintura de esmalte preto fosco reativo, pois quando a energia na forma de radiação incide sobre uma superfície fosca preta, uma grande porcentagem dessa energia é absorvida, diferente de cores claras que refletem melhor a radiação e, portanto, absorvem menos energia que as cores escuras. Quanto à serpentina por onde circula o fluido, geralmente é utilizado o cobre em sua construção, devido à sua alta condutividade térmica e resistência à corrosão.

A função da superfície transparente é reduzir as perdas de calor por radiação e convecção. Reduz a perda por convecção por evitar a movimentação de massas de ar aquecidas adjacentes à placa absorvedora e, no caso da perda por radiação, por ser o vidro, ou determinados polímeros, altamente transparentes aos pequenos comprimentos de onda da radiação solar, mas virtualmente opaco para os comprimentos de onda da radiação infravermelha emitida pela placa abaixo de 100°C (RISPOLI, 2008).

4.5 - Coletores solares Alternativos.

Atualmente, inúmeros trabalhos são realizados no sentido de buscar materiais alternativos ao alumínio ou ao cobre para a construção de coletores solares visando à redução no preço de comercialização. Embora estes coletores apresentem baixo desempenho térmico, a redução no seu preço acaba tornando-os competitivos aos convencionais.

Neste sentido, verifica-se a potencialidade do concreto como material para a confecção de coletores, em função de seu baixo custo e facilidade de manipulação, onde a troca de energia térmica entre a água e o concreto se dá através de tubos feitos de metal ou de material plástico dispostos em serpentina ou malha. Como em

coletores solares “tradicionais”, os tubos metálicos, embora apresentem elevada condutividade térmica, tendem a elevar o custo do sistema, principalmente se feitos de cobre.

Na Índia, Bombaim, Nayak et al. (1989) desenvolveram um coletor solar com área de 90cm², ilustrado na Figura 2, feito com uma camada de concreto de 35 mm de espessura e traço de 1:3:0,6 (uma parte de cimento, três de areia e 0,6 de pedra britada), sendo inserido neste uma malha de tubos de PVC de diâmetro de 20 mm envolta por duas telas de aço galvanizado para dar reforço ao conjunto estrutural. A superfície exposta à radiação foi pintada com uma fina camada de tinta preta, para aumentar a absorção, e foi instalada uma janela de vidro de 3 mm, a uma distancia de 40 mm acima do concreto, para reduzir as perdas de energia por convecção e radiação. Os autores verificaram que o coletor solar de concreto estudado apresentou bom desempenho térmico para o aquecimento de água, chegando a uma temperatura de máximo de 62°C.

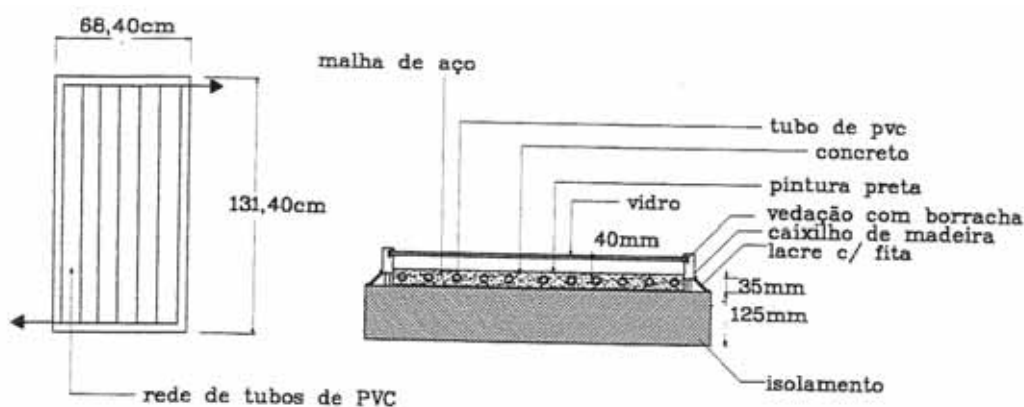


Figura 2: Esquema do coletor solar de concreto desenvolvido no Indian Institute of Technology em Bombaim, Índia. Fonte: Nayak et al. (1989)

Fantinelli (2002) testou com concreto como material absorvedor de radiação solar de baixo custo, buscando atribuir a função de aquecedor de água a uma estrutura da casa, propôs um sistema de aquecimento solar de água com a incorporação do coletor solar na estrutura da cobertura da casa, conforme ilustrado na Figura 3. Ao final de sua investigação, o autor verificou que tal medida mostrou-se de plena viabilidade tanto no aspecto construtivo como em matéria de eficiência térmica e baixos investimentos.

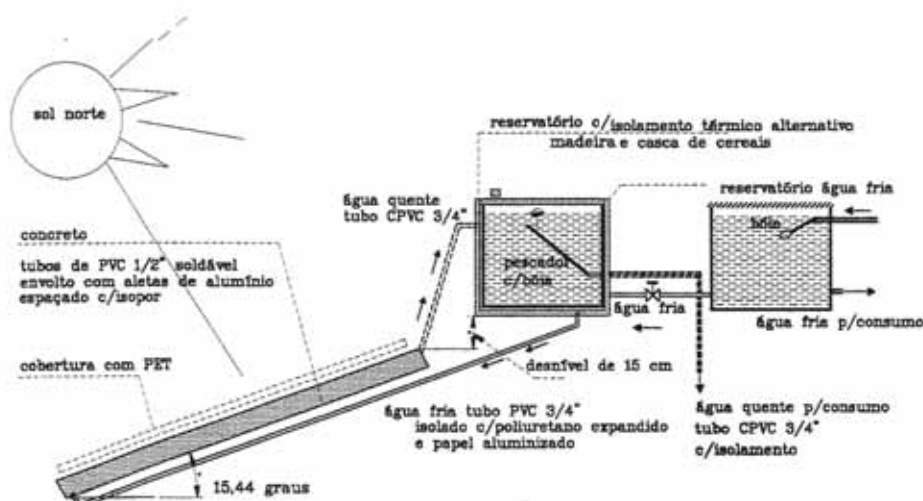


Figura 3: Sistema de aquecimento solar de água com coletor solar inserido na estrutura da cobertura da casa. Fonte: Fantinelli (2002.).

Alencar & Saglietti (1998) desenvolveram um coletor solar alternativo em forma de telha, o qual foi avaliado quanto à operacionalidade, rendimento térmico, adaptação aos telhados, e outros detalhes construtivos. Comparando o rendimento deste coletor com um coletor de alto rendimento disponível no mercado, encontrou os seguintes resultados apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Média dos rendimentos do coletor padrão e em estrutura de cimento amianto, (ALENCAR & SAGLIETTI, 1998).

Dia	Rendimento médio do coletor padrão (%)	Rendimento médio da telha coletora (%)
08/12/1998	46,36	37,95
09/12/1998	71,62	63,10
12/12/1998	69,39	59,13
Média	62,46	53,40
Custo/m ²	R\$ 215,00*	R\$ 90,00*

* Preços cotados em Dez/98. Dólar comercial Dez/98 = R\$ 1,20.



Figura 4: Telha coletora de amianto. Fonte: Alencar & Saglietti (1998).

Estes dois últimos trabalhos citados assinalam a possibilidade de atribuir à função de coletor solar a elementos e estruturas comuns às construções, buscando propostas viáveis do ponto de vista técnico e econômico. Estes permitem pensar em outros estudos que não se limitem apenas ao telhado (uma das estruturas da casa que intercepta mais radiação solar ao longo do dia), mas também a outras estruturas, que devidamente articuladas com os fatores arquitetônicos e técnicos da construção, prestem também ao aquecimento de água. Alguns esforços têm sido feitos com a intenção de torná-los parte integrante da estrutura de construções, como teto, telhado, parede ou outros, mas a literatura mostra que é mais freqüente a utilização da placa de metal para absorver a radiação solar, apesar dos estudos mostrarem a quantia significativa de energia requerida para a produção destes coletores, (NAYAK et al.,1989).

Varella (2004) construiu uma placa absorvedora formada por uma rede de tubos de PVC soldáveis por onde circula a água aquecida (figura 5). A placa é construída sobre uma laje de concreto, na laje já existente com a espessura de 4 cm e 5,10m x 2,45m com um total de 12,5 m² com inclinação de 15,3°. Após concretagem da placa, sua superfície foi pintada com tinta preta fosca, para aumentar a absorção. Com as medidas feitas na caixa d'água revestida por isopor no dia 04/02/2002 a temperatura do banho às 18 horas foi de 45⁰C, as 20 horas foi de 42⁰C, no dia 05/02/2002 a temperatura do banho foi 49⁰C para banho as 18 horas, para as 20 horas foi de 46⁰C, no dia 06/02/2002 para as 18 horas o banho foi de 46⁰C, para banho as 20 horas foi de 44⁰C.

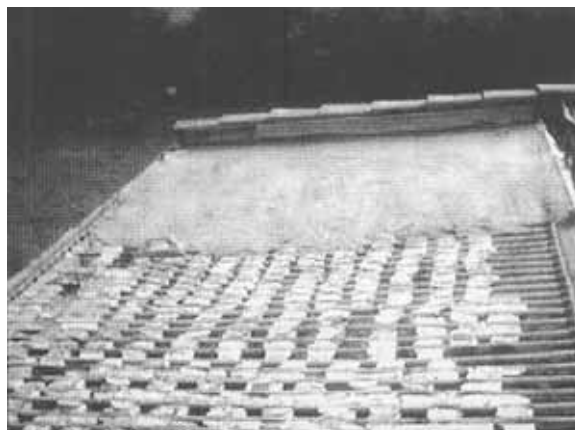


Figura 5: Detalhe das aletas na rede de tubos de PVC e início da concretagem do coletor, construído em uma residência, na cidade de Campinas/SP, em 2001. Fonte: Varella (2004).

Santos (1991) construiu um coletor solar plano apresentado na figura 6, que foi construído em argamassa de traço simples e de fácil construção podendo ser utilizado em propriedades rurais desprovidos de energia elétrica. O coletor é composto por uma placa plana horizontal construída em argamassa de traço simples, com 3,0 m x 2,0 m x 0,15 m num total de 6,0 m², no interior do coletor foi introduzido uma mangueira de polietileno com 40 metros em forma de serpentina. Todo coletor foi pintado de preto fosco para aumentar a absorção. A saída do fluido foi direcionado para o reservatório de cimento amianto de 150 l de capacidade, a qual foi inserido um material isolante entre a caixa e a alvenaria. No dia 06/06/90 o rendimento médio foi de 20,07%, qual teve um acréscimo no fluido de 13⁰C na temperatura inicial. No dia 22/05/1990 teve um rendimento médio de 11,15% e no dia 23/05/1990 o seu rendimento médio foi de 10,44%, relata Santos, et. al (1991).

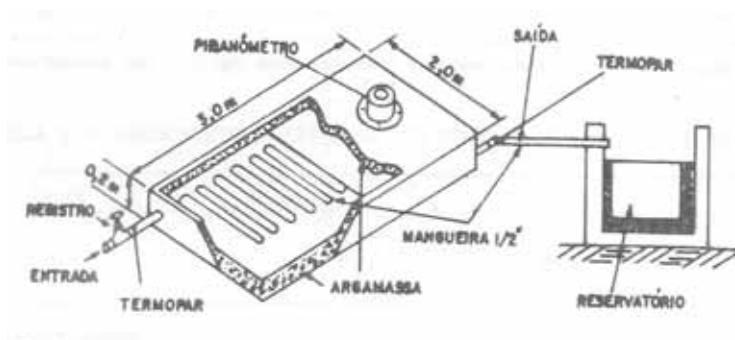


Figura.6: Esquema do coletor solar plano em argamassa. Fonte: Santos, et. al (1991).

Silva (1992) desenvolveu um coletor solar com canos de polietileno que foi constituído com seis unidades coletoras, totalizando uma área de absorção de $5,1 \text{ m}^2$. Cada módulo tem $0,85 \text{ m}^2$ de área de absorção, abrigando 50 metros de tubo de polietileno extrudado que foram dispostos na forma espiral. A figura 7 mostra a disposição do coletor. Para aumentar a capacidade de absorção do sistema, o mesmo foi inteiramente revestido com tinta preta fosca. No dia 22/04/1991 foram feitas mediadas variando o volume de entrada na qual a temperatura de entrada para todas as vazões foi de $25,0^\circ\text{C}$. Com um volume de trabalho de 620 (ml/mim.) após o ultimo nóculo a temperatura de saída foi de $46,5^\circ\text{C}$. Já com a vazão de 420 (ml/mim.) a temperatura de saída registrou $47,5^\circ\text{C}$ e com a vazão de 400 (ml/mim.) obteve uma temperatura de saída de 49°C .



Figura 7: Coletor Solar de Polietileno. Fonte: Silva (1992).

Chaurasia (2000) na Índia fez um experimento construindo um coletor solar plano de concreto apresentado na figura 8, com uma rede de tubos de alumínio de 19 mm de diâmetro, dos quais foram inseridos 70% do seu total, ficando 30% pra fora, expostas ao sol, para que não possam ser retirados facilmente e pintadas de preto fosco. Em sua superfície não foi colocado nenhum tipo de proteção extra, como vidro. Sua temperatura máxima chegou a 58°C .

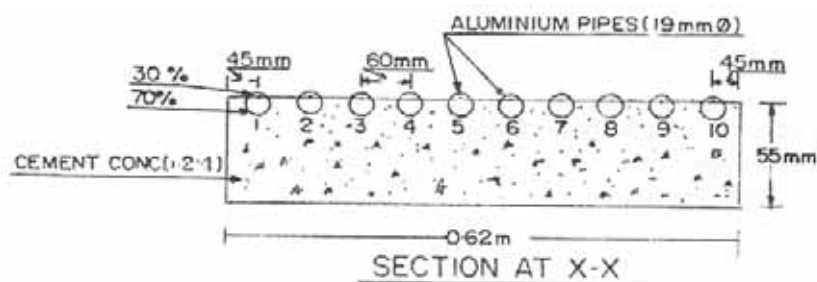


Figura 8: Aquecedor solar de água baseado em coletores de concreto. Fonte: Chaurasia (2000).

No final dos tubos foi conectado a uma caixa de armazenamento de água que serve para suprimento da pia e banheiro. O peso ficou em torno de 91 kg. O estudo realizado entre 10 da manhã e 4 da tarde, a água fria que fica preservada numa caixa acima do coletor mantinha a torneira de entrada ligada, e no final do coletor solar a saída era fechada e somente aberta para coleta de dados de hora em hora, permanecendo a água no coletor até a próxima verificação. Oito litros de água quente foram coletados a cada hora.

Os dados coletados foram efetuados de novembro a março, período de inverno na Índia, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Média das temperaturas de novembro a março com inclinação de 41° e na horizontal. (CHAURASIA, 2000).

Mês	41° de inclinação	Horizontal	Entrada da água
Novembro	51°C	45°C	15°C - 22°C
Dezembro	44°C	40,5°C	12,5°C - 21,5°C
Janeiro	43°C	40°C	11°C - 21°C
Fevereiro	53°C	48,5°C	19,5°C - 26°C
Março	58°C	54,5°C	20°C - 28°C

4.5 - Reservatório de água alternativo

Reservatórios alternativos estão muito pouco presente na literatura, principalmente com materiais que sejam fácil de serem encontrados em propriedade rural, Sendo os industriais geralmente confeccionados em aço inox, alumínio, material termoplástico ou galvalume, chegando a R\$ 1.000,00 por 200litros. Pesquisadores como Silva (1992) e Souza (2006) construíram e estudaram reservatórios térmicos alternativos.

Silva (1992) inseriu uma caixa de fibrocimento de 250 litros, no interior de outra com capacidade de 1000 litros, de mesmo material. O espaço entre as mesmas foi preenchido totalmente com serragem (pó de serra), elemento responsável pelo isolamento térmico entre as duas caixas. Do dia 25/05/91 para o dia 26/05/91 após 16 horas de armazenamento a perda de temperatura no interior do armazenador foi de 6,3°C.

Souza (2006) utilizou folhas de Eucatex formando os cilindros interno e externo, construiu e estudou um reservatório térmico alternativo para um sistema de aquecimento solar de água com as características de bom desempenho térmico, baixo

custo, boa estética e peso reduzido; madeirite de 15mm para o fundo e tampa; mantas de fibra de vidro e para recobrimento das superfícies interna e externa, como também do fundo e da tampa; isopor como isolante térmico colocado entre as superfícies interna e externa do tanque, com volume correspondente a 250litros. Após 15 horas de armazenamento a perda média de temperatura foi de 7,5°C. O armazenador construído encontra-se mostrado na Figura 9.




Figura 9: Armazenador térmico alternativo construído em fibra de vidro. (SOUZA, 2006)

4.7 – Aplicações agrícolas com o uso de água aquecida.

O estudo do aquecimento de fluidos guarda importância em diversas áreas do conhecimento tais como conforto térmico, arquitetura, máquinas térmicas, aplicações agroindustriais, dentre outras. Nesse sentido, o presente estudo foca no rendimento de um coletor solar alternativo plano de concreto de baixo custo, com aplicações diretas, granjas, tanques criadouros, e outras.

Braga & Lima (2001) com base nos dados diários de consumo de ração e de larva de mosca e ganho de peso, concluiu-se que a faixa de temperatura entre 25,1 e 30,4°C correspondeu ao melhor crescimento da rã-touro (*Rana catesbeiana*) entre 37 e 90 g. O desenvolvimento da rã touro está diretamente relacionado com a temperatura, pois este parâmetro influencia o consumo e a utilização do alimento pelos animais. A temperatura de 20,2°C ocorreu em razão da mudança de comportamento termorregulatório dos animais que permaneceram mais tempo sob os abrigos, diminuindo assim a frequência com que se alimentavam.

Souza et al. (2003) relatam que peixes tropicais como pacu, ao chegar no inverno, com baixas temperaturas, o metabolismo a ingestão de alimento a digestão e a resposta imune dos peixes diminuem. Já com o aumento de temperatura o consumo de ração também aumentou, ele considera ótima a temperatura entre 25 e 27°C.

O manual da ordenhadeira, , recomenda que após a lavagem externa, acoplar as unidades de ordenha (sem os pulsadores) no lavador de teteiras e enxaguá-las em água morna (35 a 40 °C) por 5 minutos. Fonte: <http://usinoxbatatais.com.br/images/Manual%20de%20Ordenha%20-%20Novo.pdf>

Em Viçosa/MG, (2010) na IV semana de atualização para técnicos agroflorestais indica para a esterilização de tubetes é utilizado água quente a 80°C por 30 minutos, para evitar nematóides, fungos e patógenos nas áreas de plantio. FONTAN, I (2010). Fonte: <http://www.sif.org.br/interna.php?area=eventos>

Stadellman et al.(1995) concluíram que o tratamento convencional de pasteurização com água aquecida de 60 a 62°C por 3,5 a 4 minutos é mais que suficiente para destruir carga antecipada de cepas de *Salmonella*.

5 - MATERIAIS E MÉTODOS

5.1- Descrições do coletor solar alternativo

O experimento foi instalado em área aberta da Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista (UNESP) de Botucatu, (Latitude 22,85°S, Longitude 48,45°W e altitude 786 m), ao lado do prédio correspondente ao segundo módulo do Departamento de Ciências Ambientais.

O sistema alternativo consiste de um absorvedor térmico de concreto com mangueira de polietileno distribuída uniformemente no seu interior. O princípio de funcionamento é similar ao coletor tradicional: o absorvedor do coletor absorve a luz solar aquecendo o concreto, o qual transfere a energia térmica para mangueira de polietileno, que por sua vez transfere o calor pra a água. A superfície absorvedora do coletor foi pintada com tinta comercial cinza escuro para aumentar o poder de absorção.

O coletor apresenta as seguintes dimensões: 1,5m de largura por 0,5m de altura, face maior de 11,20m e face menor de 9,23m, num total de 51m². Foi simulado no centro uma área livre de 4x6m. Antes da concretagem foi utilizado um plástico preto para impermeabilização, impedindo assim a passagem de umidade do solo para o coletor. O coletor é apresentado como uma calçada de concreto, construída de forma retangular, com uma serpentina de 470m de mangueira de polietileno de ½” e 1,5 mm, inserida no concreto. (Figura 10).

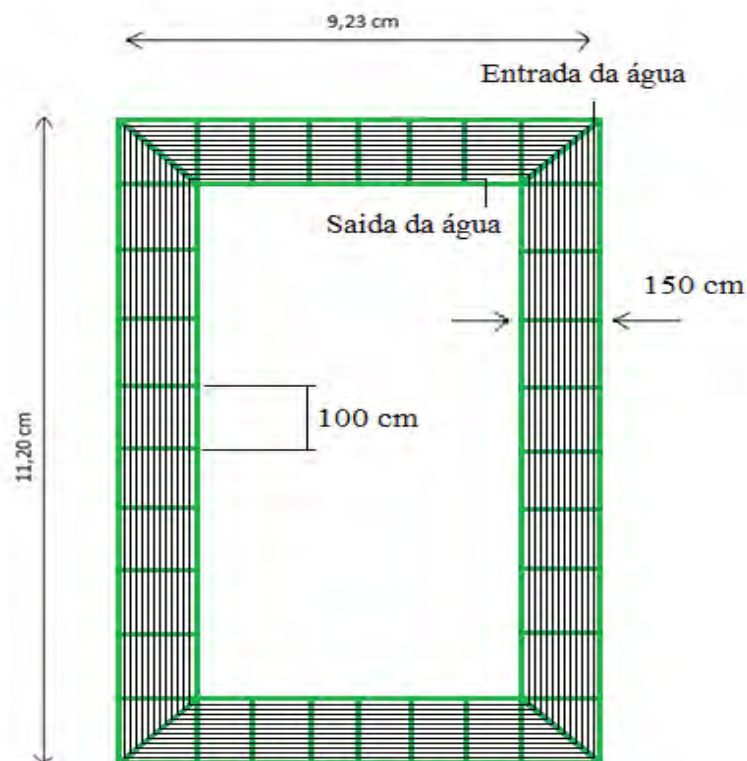


Figura 10: Planta baixa do coletor solar (com as mangueiras de polietileno).

Na construção foram inseridas ripas como junta de dilatação a cada 1 metro, as quais servem para acomodação e fixação dos canos de polietileno. Os furo de 2 cm de diâmetro foram feitos bem no centro da ripa para acomodar o cano de polietileno.

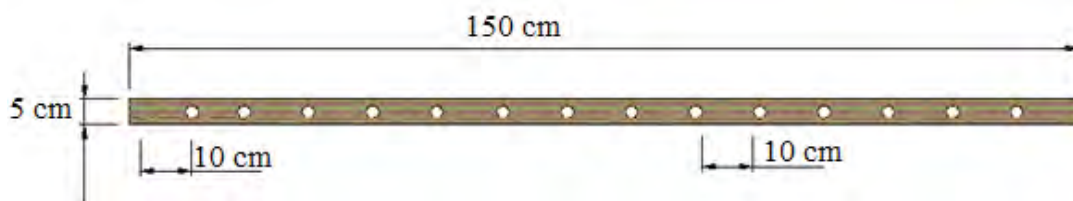


Figura 11: Ripa de madeira, junta de dilatação.

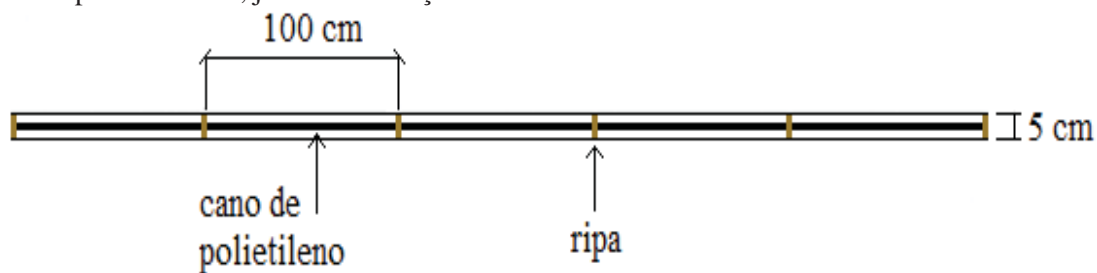


Figura 12: Vista parcial lateral do coletor solar alternativo.

Na construção do coletor solar de baixo custo foram utilizados os mesmos materiais convencionais da construção civil, normalmente empregados na construção de calçadas em casas populares, ou seja, areia, pedra e cimento.

5.2 - Medidas

5.2.1- Temperatura

As temperaturas medidas no trabalho ocorreram em três níveis: temperatura do absorvedor; temperatura do fluido de trabalho e temperatura ambiente. As temperaturas do absorvedor de concreto foram realizadas em três profundidades: na superfície ($T_{0,0}$), a 2,5cm ($T_{2,5}$), e a 5,0cm ($T_{5,0}$).

A temperatura do fluido de trabalho foi realizada com termopares a cada 100m por meio de um tubo inserido no concreto do coletor. Similarmente na entrada e saída no coletor dois termopares registram as temperaturas de entrada e na saída do fluido. Portanto, as temperaturas medidas ficaram assim distribuídas: temperatura de entrada (T_E), temperatura a 100 metros (T_1), a 200m (T_2), a 300m (T_3), a 400m (T_4) e a temperatura de saída (T_S), a 470m.

O termopar utilizado foi o de Ferro Constantan (tipo K). O termoelemento positivo é o Ferro (Fe 99,5%) e o termoelemento negativo é o Constantan (Cu55% Ni45%), operando na faixa de temperatura entre -210°C a 760°C .

Os dados de temperatura foram monitorados por um dispositivo eletrônico chamado probe da marca Vaisala modelo HMP45C. Faixa de medição: $-39,2^{\circ}$ a 60°C , Dependência da temperatura: $\text{RH} \pm 0,05\% / ^{\circ}\text{C}$, o equipamento faz medidas da temperatura com media a cada 5 minutos, monitorando todo período de coleta de dados. (Figura 13).



Figura 13: Sensor de Temperatura. Vaisala® (Hmp45C).

Simultaneamente às coletas das temperaturas, foram coletados dados de radiação global com Piranômetro EPPLEY® PSP, com fator de calibração $7,47\mu\text{V}/\text{Wm}^2$, intervalo espectral de 295-2800nm, tempo de resposta 1s, linearidade $\pm 0,5\%$ (de 0 a 2800 W/m^2), cosseno $\pm 1\%$ ($0 < Z < 70^\circ$) $\pm 3\%$ ($70^\circ \leq Z < 80^\circ$), e resposta a temperatura de $\pm 1\%$ de -20°C a 40°C , para a determinação da energia solar incidente, para cálculos de eficiência do coletor.



Figura 14: Sensor de radiação Global (Piranômetro) EPPLEY® PSP.

Na aquisição dos dados foi utilizado um datalogger da marca Campbell® modelo 21X operando na frequência de 1 Hz, armazenando médias instantâneas de 5 minutos (médias de 300 leituras instantâneas). Os dados armazenados no módulo de memória SM192 da Campbell foram transferidos para um computador utilizando-se uma interface SC532 e o software PC208w® da Campbell®. Fig. 15.



Figura 15: Datalogger modelo 21X da Campbell®.

5.3 - Eficiência Diária do coletor

A eficiência do coletor solar alternativo foi calculada por meio da razão entre o somatório horário da energia útil horária (Q_u^h) e o somatório horário da energia solar incidente horária (Q_i^h), conforme equação abaixo. A energia útil horária é a energia transferida do absorvedor para o fluido, enquanto que a energia solar incidente horária é aquela registrada no plano do sistema coletor.

$$\eta^d = \frac{\sum_{h=1}^{24} Q_u^h}{\sum_{h=1}^{24} Q_i^h} \text{ onde: } h \text{ representa as horas do dia} \quad [1]$$

onde: η^d é a eficiência diária do coletor (adimensional).

A energia útil é calculada a partir da equação

$$Q_u^h = m \times c \times (T_s - T_e) \quad [2]$$

onde: $Q_u^h = \text{Kg} / \text{hora} \times \text{KJ} / \text{Kg}^\circ\text{C} \times ^\circ\text{C} = \text{KJ/h} \div 1000 = \text{MJ/h}$

m = vazão mássica do fluido, em Kg/hora;

c = calor específico do fluido, em KJ/kg°C;

T_s = temperatura do fluido na saída do coletor, em °C;

T_e = temperatura do fluido na entrada do coletor, em °C.

A energia incidente é calculada a partir da equação

$$Q_i^h = H \times A \quad [3]$$

onde: $Q_i^h = \text{MJ} / \text{h} \times \text{m}^2 \times \text{m}^2 = \text{MJ/h}$

H = irradiação horária, em MJ/h x m²;

A = área do absorvedor, em m².

A intensidade I de radiação solar que atinge uma dada superfície e que pode ser registrada por um radiômetro, é definida em termos de potência por unidade de área, (ALLONSO & FINN ,1972):

As temperaturas de entrada e temperatura de saída, na realização do teste de rendimento, foram obtidas através de termopares, fixos em conexões do tipo T, instalados na entrada e na saída do coletor solar. Já a vazão foi determinada com o uso de uma proveta graduada e dois cronômetros. Os valores médios da radiação incidente no coletor foram obtidos na estação Radiometria do Departamento de Ciências Ambientais, localizada próxima à área experimental utilizada.

5.4 - Reservatórios de água quente

Como reservatório de água foi utilizado uma caixa de polietileno de 500 litros. Em volta foi construído um cilindro de alvenaria com tampa até a altura da caixa de polietileno, e foi utilizado serragem de madeira para preencher o espaço entre a alvenaria e a caixa, que serve como isolante térmico.

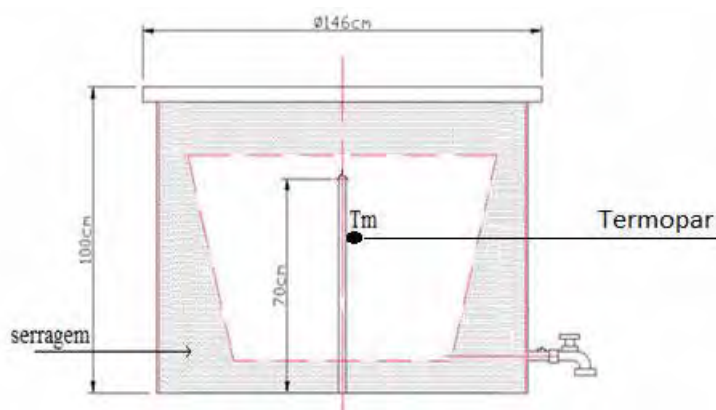


Figura 16: Vista lateral reservatório de água quente

5.4.1 - Eficiência térmica do reservatório

Para avaliar a eficiência térmica do reservatório de água aquecida, o mesmo foi ligado ao coletor e, coletando a água no período de eficiência, após um dia de funcionamento do sistema de aquecimento, foi medida a temperatura da água contida no reservatório durante todo o período noturno, monitorado a perda de temperatura neste período.

Foi instalado um termopar no interior do reservatório (T_m) para medir a temperatura da água quente, na parte mediana interna da caixa. O teste consistiu em medir essas temperaturas, a cada hora, durante toda a noite para quantificar a queda de temperatura na massa de água contida no reservatório.

5.4.2 - Vazão volumétrica.

No controle da vazão, foi utilizado um registro de gaveta de meia polegada inserido na entrada da tubulação, ajustado para aproveitamento da água aquecida no período de máxima de incidência e completando a caixa em 1 hora e meia.

Com o uso de uma proveta (fundo de escala de 500 ml e divisões de 5 ml) e um cronômetro digital foi determinado a vazão padrão de circulação de água no sistema. Foi utilizado como padrão 340 litros por hora na vazão volumétrica de trabalho. Contemplando as necessidades de aproveitamento máximo da incidência da radiação solar e concomitantemente completando a caixa de 500 L em uma hora e meia.

6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

A apresentação dos resultados obtidos neste trabalho está dividida em 4 seções:

Na primeira seção (6.1) é apresentado os valores da temperatura do absorvedor do coletor solar alternativo de concreto em três profundidades, bem como os valores de irradiância global e de temperatura do ar, para três coberturas de céu, aberto, parcialmente nublado e nublado, nas estações verão e inverno.

A segunda seção (6.2) apresenta os valores da temperatura do fluido circulante no interior do coletor para seis posições nas coberturas de céu aberto, parcialmente nublado e nublado, e nas estações do verão e inverno.

Na terceira seção (6.3) é discutido o rendimento térmico do coletor solar em função da energia incidente e a energia útil nas coberturas de céu aberto, parcialmente nublado e nublado, e nas estações do verão e inverno.

Na última seção (6.4) é analisada o sistema de armazenamento coletor. O desempenho do reservatório térmico é discutido em função da perda de temperatura do fluido no interior do reservatório.

6.1 - Temperaturas do absorvedor no Verão e Inverno.

As estações do ano, verão e inverno, foram selecionadas para análise sazonal da variação térmica do coletor, porque é no verão onde os valores da radiação solar, bem como da temperatura do ar, atingem os maiores valores do ano. O valor médio da radiação global no verão em Botucatu é da ordem de $(19,76 + 6,23) \text{ MJ/m}^2$, enquanto que a

temperatura média de $22,5^{\circ}\text{C}$. Em contraste, é no inverno onde os valores da radiação solar e temperatura do ar apresenta os menores valores no ano: o valor médio da radiação global no inverno é da ordem de $(15,66 + 4,61) \text{ MJ/m}^2$ enquanto que a temperatura média de $17,0^{\circ}\text{C}$ (ESCOBEDO et al., 2009).

O critério empregado neste trabalho para definir a cobertura do céu foi do índice de claridade diário sugerido por Iqbal (1983), o qual é definido pela relação entre a radiação global incidente (H_g) e a radiação extraterrestre (H_0): $K_t = H_g/H_0$. Se $K_t < 0,35$ o dia foi nublado; se $0,35 < K_t < 0,65$ o dia foi parcialmente nublado e se $K_t > 0,65$, o dia foi de céu aberto.

Para sistemas de aquecimento solar de água, em dias de céu nublado (com predominância de radiação solar difusa), faz-se necessário o uso de uma fonte de energia complementar à solar. Portanto, para uma projeção da redução no consumo de energia elétrica a partir da utilização da solar, é também necessário ter o conhecimento da frequência de dias de céu nublado (TERAMOTO & ESCOBEDO, 2010).

As Figuras 17, 18 e 19 mostram a evolução diurna da radiação solar, temperatura do ar e temperatura do absorvedor do coletor solar em diferentes profundidades no verão, nas coberturas de céu aberto, parcialmente nublado e nublado.

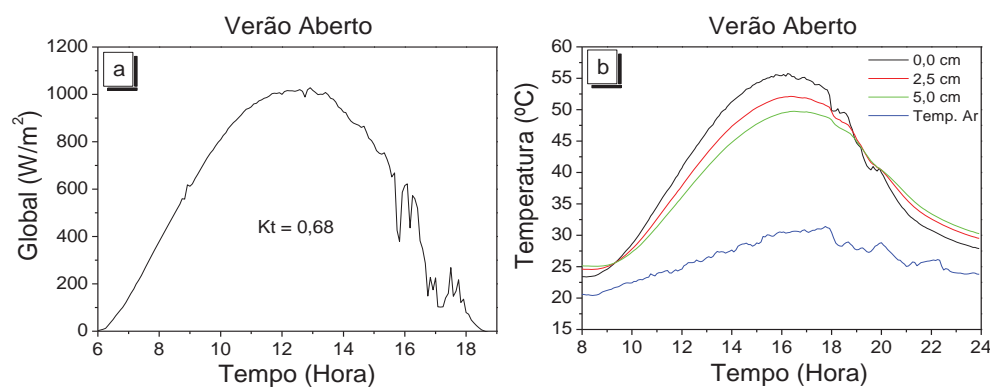


Figura 17: Evolução diurna para a) Irradiância Global; b) Temperatura do ar; e a temperatura do absorvedor coletor nas profundidades 0,0 cm, 2,5 cm e 5,0 cm; dia aberto (20/02/2011).

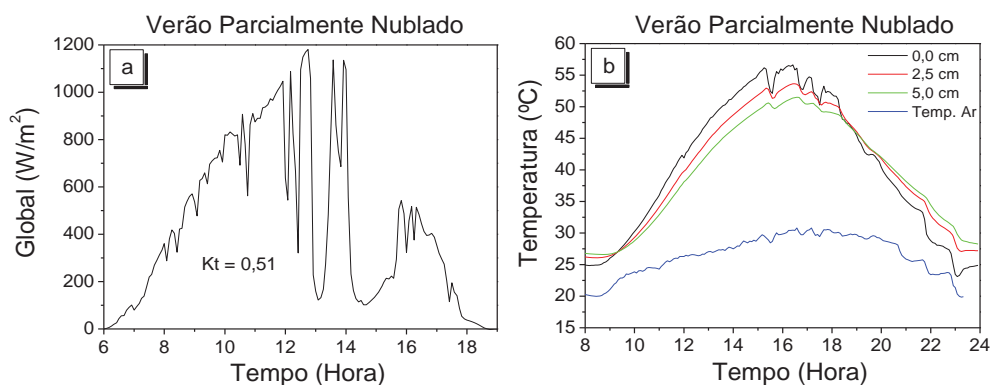


Figura 18: Evolução diurna para a) irradiância Global; b) Temperatura do ar; e a temperatura do absorvedor coletor nas profundidades 0,0 cm, 2,5 cm e 5,0 cm; dia parcialmente nublado. (22/02/2011).

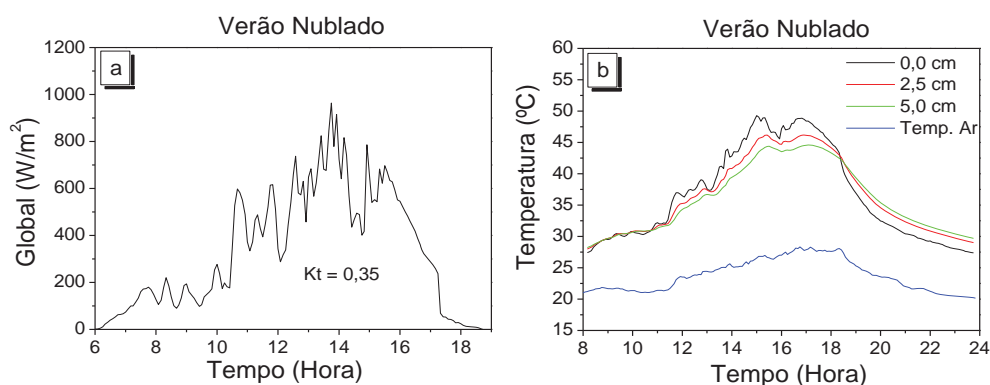


Figura 19: Evolução diurna para a) irradiância Global; b) Temperatura do ar; e a temperatura do absorvedor coletor nas profundidades 0,0 cm, 2,5 cm e 5,0 cm; dia nublado. (15/02/2011).

As curvas da radiação solar global e da temperatura do ar e absorvedor das Figuras (17, 18 e 19) mostram haver uma defasagem de 3:00h a 5:00h entre os valores máximos da radiação global e as temperaturas. Essa anomalia temporal, muito mais facilmente visível nos dias de céu aberto já que não sofre nenhuma interferência da atmosfera na evolução térmica do coletor, foi verificada por vários pesquisadores, e entre eles pode-se citar o trabalho de Alvarez & Parra (1998). A defasagem é atribuída à inércia térmica do ar atmosférico. Percebe-se uma defasagem do pico da curva de radiação em relação ao das de temperatura, ou seja, o máximo de calor transferido para a água ocorre com um determinado período de atraso em relação ao máximo de incidência de radiação solar, sendo este período de atraso chamado tecnicamente de tempo de reação (SILVA, 1992). Pois o concreto possui uma elevada massa térmica e requer maior tempo para responder a variação na energia incidente. Em função deste tempo de atraso, o concreto

continua a transferir calor para a água mesmo após o pôr-do-sol. Similarmente, a defasagem entre os valores máximos da radiação global e temperatura do absorvedor, como mostra o trabalho de Nayak et al. (1989), é devido à inércia térmica do concreto. Quanto maior a profundidade do coletor, maior é o tempo de defasagem: no dia de céu aberto (Figura 17), a temperatura máxima na superfície do coletor ocorreu as 16h00min, na profundidade de 2,5 cm às 16h20min e na profundidade de 5 cm às 16h:30min.

Em relação às profundidades as três coberturas apresentam um ponto de inversão em torno das 19 horas, ou seja, do início do dia até este horário os valores da temperatura do coletor são maiores nas camadas mais superficiais. No entanto após as 19 horas este comportamento se inverte. Enquanto houver disponibilidade de radiação solar as camadas mais superficiais respondem mais rapidamente as variações de irradiância em relação às camadas mais profundas. No entanto quando o sol se põe este comportamento se inverte. Portanto verifica-se que a amplitude térmica é inversamente proporcional a profundidade, ou seja, quanto maior a profundidade menor é a amplitude térmica.

A temperatura diária do absorvedor dependeu de vários fatores climáticos como o da radiação solar global incidente, nuvens e vento. A radiação solar global em cada estação do ano variou em cada tipo de cobertura de céu (aberto, parcialmente nublado e nublado) em função da variabilidade de vapor de água na atmosfera que interferiu consideravelmente nos valores de radiações diárias por meio da absorção do infravermelho. Em Botucatu a parcela anual do Infravermelho dentro do espectro total é de 46,0% (Escobedo et al., 2009). As nuvens em cada estação do ano podem interferir na temperatura do absorvedor, principalmente na cobertura parcialmente nublada, por meio da frequência dos resfriamentos causadas pela ausência da radiação direta e também quanto ao tempo de duração. Similarmente, o vento pode interferir na temperatura do absorvedor, principalmente na cobertura de céu aberta e parcialmente nublada, por meio da extração de calor na superfície absorvedora. A interferência das nuvens e do vento nos processos condutivo e convectivo no absorvedor do coletor permite mudança da dinâmica dos fluxos de calor determinados pelas leis básicas da termodinâmica. No projeto deste coletor solar não houve nenhuma preocupação em controlar as perdas térmicas convectivas causadas pela variação do vento, pois a opção do ganho térmico foi pelo aumento da área de captação. A análise da temperatura do absorvedor do coletor nas três profundidades ficou limitado em função do pequeno número

de dias apresentados neste trabalho. Porém os resultados mostram a possibilidade do sistema térmico ser usado nas aplicações agrárias.

A evolução diurna da temperatura do absorvedor em função das três profundidades nas três coberturas de céu no verão mostra que: o valor da temperatura do absorvedor decresceu em função do aumento da profundidade. A temperatura do absorvedor é maior na superfície de 0,0 cm e menor na profundidade de 5 cm. Assim, a amplitude de variação da temperatura do absorvedor decresceu no sentido das coberturas de céu aberto (20/02/2011), parcialmente nublado (22/02/2011) e nublado (15/02/2011). Na cobertura de céu aberto, a temperatura máxima decresceu em seqüência de profundidade $55,74^{\circ}\text{C}$, $52,1^{\circ}\text{C}$ e $49,3^{\circ}\text{C}$, com variação de amplitude de $3,64^{\circ}\text{C}$ e $2,8^{\circ}\text{C}$ respectivamente. Similarmente, na cobertura de céu parcialmente nublado, a temperatura máxima decresceu em seqüência de profundidade $56,6^{\circ}\text{C}$, $53,6^{\circ}\text{C}$ e $51,5^{\circ}\text{C}$ com variação de amplitude de $3,0^{\circ}\text{C}$ e $2,1^{\circ}\text{C}$ respectivamente. Na cobertura de céu nublado, a temperatura máxima decresceu em seqüência de profundidade $48,3^{\circ}\text{C}$, $46,2^{\circ}\text{C}$ e $44,6^{\circ}\text{C}$ com variação de amplitude de $2,1^{\circ}\text{C}$ e $1,6^{\circ}\text{C}$ respectivamente.

Similarmente a análise do verão, as Figuras 20, 21 e 22 mostram a evolução diurna da radiação solar, temperatura do ar e temperaturas do absorvedor do coletor solar em diferentes profundidades no inverno, nas coberturas de céu aberto (30/06/2010), parcialmente nublado (07/07/2010) e nublado (10/06/2010). Os valores da radiação global e temperatura do absorvedor e do ar, para as condições de céu nublado, parcialmente nublado e aberto, respectivamente foram inferiores aos valores obtidos no verão.

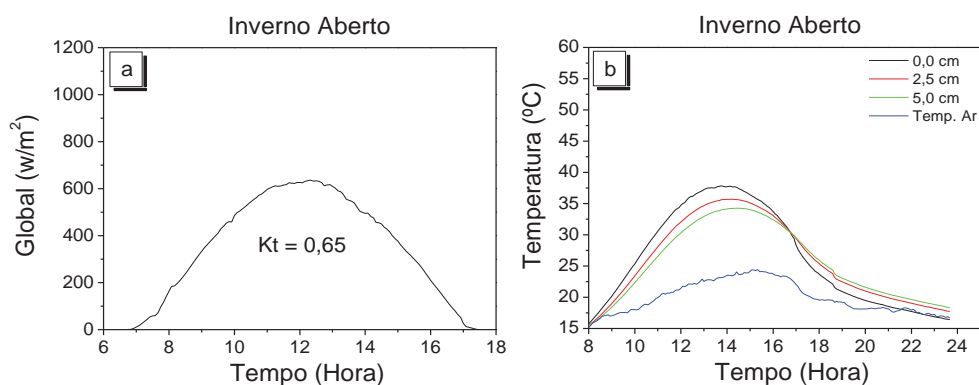


Figura 20: Evolução diurna: a) irradiância Global; c) Temperatura do ar; e a temperatura do coletor nas profundidades: 0,0 cm, 2,5 cm e 5,0 cm. (30/06/2010).

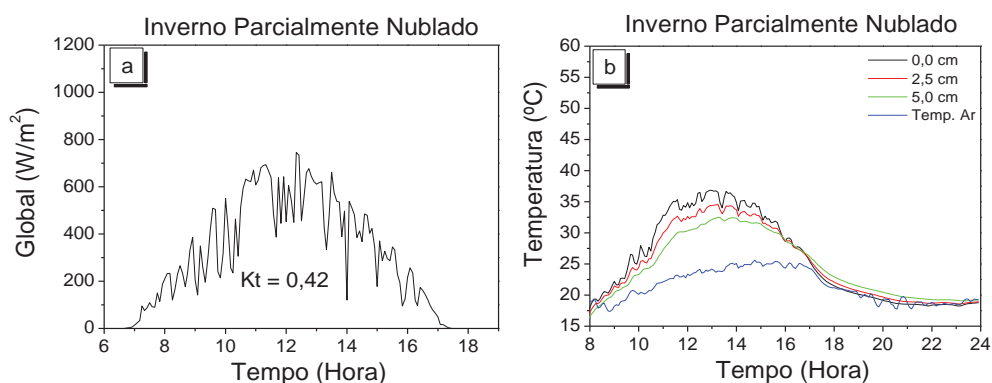


Figura 21: Evolução diurna: a) irradiância Global; c) Temperatura do ar; e a temperatura do coletor nas profundidades: 0,0 cm, 2,5 cm e 5,0 cm. (07/07/2010).

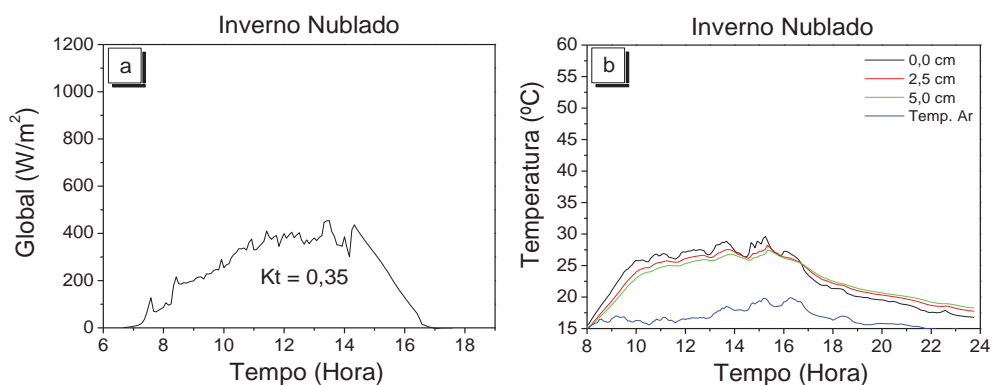


Figura 22: Evolução diurna: a) irradiância Global; c) Temperatura do ar; e a temperatura do coletor nas profundidades: 0,0 cm, 2,5 cm e 5,0 cm. (10/07/2010).

Diferentemente do verão, a defasagem entre os valores máximos da radiação global e temperaturas mostradas nas Figuras 20, 21 e 22, foi menor no inverno. Similarmente ao verão, quanto maior a profundidade do coletor maior foi o tempo de defasagem: no dia de céu aberto (Figura 20), a temperatura máxima de na superfície do coletor ocorreu às 13h50min, na profundidade de 2,5cm às 14h25min e na profundidade de 5 cm às 15h20min.

A evolução diurna da temperatura do absorvedor em função das três profundidades nas três coberturas de céu no inverno mostra que: o valor da temperatura do absorvedor também decresceu em função do aumento da profundidade. E a temperatura do absorvedor foi maior na superfície de 0,0 cm e menor na profundidade de 5 cm. A amplitude de variação da temperatura do absorvedor também decresceu no sentido das coberturas de céu aberto, parcialmente nublado e nublado. Na cobertura de céu aberto, a temperatura máxima decresceu em seqüência de profundidade 37,85⁰C, 35,7⁰C e 34,3⁰C,

com variação de amplitude de 2,15°C e 1,4°C respectivamente. Na cobertura de céu parcialmente nublado, a temperatura máxima decresceu em seqüência de profundidade 36,8°C, 34,5°C e 32,5°C com variação de amplitude de 2,3°C e 2,0°C respectivamente. Na cobertura de céu nublado, a temperatura máxima decresceu em seqüência de profundidade 29,6°C, 28,2°C e 27,4°C com variação de amplitude de 1,4°C e 1,2°C respectivamente.

A partir das 17 horas, horário próximo ao pôr-do-sol, com o menor nível de radiação solar, o comportamento das curvas do absorvedor se inverte sendo que as temperaturas das camadas mais superficiais tornam-se inferiores á aquelas das camadas mais profundas. Este comportamento explica-se pelo fato de as trocas energéticas mostram uma defasagem à medida que se aumenta a profundidade resultando numa amplitude térmica mais elevada nas camadas mais superficiais.

6.2 - Temperaturas do Fluido e Ganho Térmico

As Figuras 23 (a, b, c) mostra a evolução da temperatura do fluido circulante em seis posições no absorvedor do coletor em dias do verão para as três coberturas de céu. A evolução das Figuras 23 (a, b, c), mostra também uma defasagem de 3:00h a 5:00h entre o valor máximo da radiação global e temperatura do fluido. A defasagem é devido à inércia térmica do absorvedor de concreto e ao sistema condutor do fluido (mangueira de polietileno) que não é um bom condutor térmico. A Figura 23a (dia de céu aberto) mostra que a defasagem temporal no valor máximo da temperatura é independente do comprimento do percurso. As defasagens temporais ocorrem sempre no mesmo intervalo de tempo. A temperatura máxima na posição P₁, T₁= 37,5⁰C, ocorreu às 16h45min; na P₂, T₂= 43,5⁰C, às 16h45min; na P₃, T₃= 48,0⁰C, às 16h45min; na P₄, T₄= 51,2⁰C, às 16h45min, e na P_s, T_s= 52,74⁰C, às 16h45min.

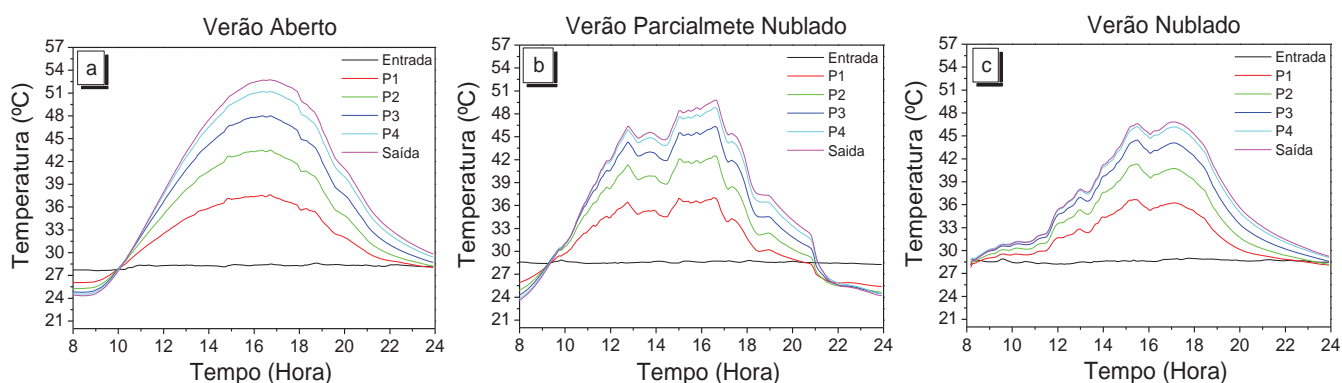


Figura 23: Evolução diurna da temperatura do fluido no coletor nos 6 diferentes pontos no verão. a) céu aberto (20/02/2011); b) céu parcialmente nublado (22/02/2011) e c) nublado (15/02/2011).

A evolução diurna da temperatura do fluido circulante em função do comprimento do percurso (mangueira) nas seis posições do coletor no verão mostra que o valor da temperatura do fluido aumentou em função do aumento do comprimento do percurso, nas três coberturas de céu, sendo maior em seqüência: aberto, parcialmente nublado e nublado. Na cobertura de céu aberto na estação do verão (Figura 23 a), as temperaturas máximas do fluido ocorreram às 16h:45min.

Tabela 3: Valores das temperaturas do fluido no coletor em diferentes pontos; Entrada, P1, P2, P3, P4 e Saída em condição de céu aberto para um dia da estação do verão.

Verão Aberto	
Ponto	Temperatura
P _e	28,1 ⁰ C
P ₁	37,5 ⁰ C
P ₂	43,51 ⁰ C
P ₃	48,0 ⁰ C
P ₄	51,2 ⁰ C
P _s	52,7 ⁰ C

Na cobertura de céu parcialmente nublado na estação do verão (Figura 23 b), as temperaturas máximas do fluido foram registradas às 16h:30min.

Tabela 4: Valores das temperaturas do fluido no coletor em diferentes pontos; Entrada, P1, P2, P3, P4 e Saída em condição de céu parcialmente nublado para um dia da estação do verão.

Verão Parcialmente Nublado	
Ponto	Temperatura
P _e	28,5 ⁰ C
P ₁	37,0 ⁰ C
P ₂	42,5 ⁰ C
P ₃	46,4 ⁰ C
P ₄	48,8 ⁰ C
P _s	49,8 ⁰ C

Na cobertura de céu nublado na estação do verão (Figura 24 c), as temperaturas do fluido máximas obtidas às 15h:30min.

Tabela 5: Valores das temperaturas do fluido no coletor em diferentes pontos; Entrada, P1, P2, P3, P4 e Saída em condição de céu nublado para um dia da estação do verão.

Verão Nublado	
Ponto	Temperatura
P _e	28,6 ⁰ C
P ₁	36,6 ⁰ C
P ₂	41,3 ⁰ C
P ₃	44,4 ⁰ C
P ₄	46,2 ⁰ C
P _s	46,85 ⁰ C

Na Figura 24 (a, b, c) as curvas em vermelho mostram a variação de temperatura do fluido entre os pontos (P₁- P_e); (P₂- P_e); (P₃- P_e); (P₄- P_e) e (P_s - P_e) no absorvedor do coletor no intervalo horário de temperatura máxima diária, para as três coberturas de céu no verão. As curvas na cor verde representam o decréscimo do ganho térmico do fluido (P₁- P_e); (P₂- P₁); (P₃- P₂); (P₄- P₃) e (P_s - P₄) nas posições P₁; P₂; P₃; P₄ e P_s no intervalo horário de temperatura máxima diária no verão.

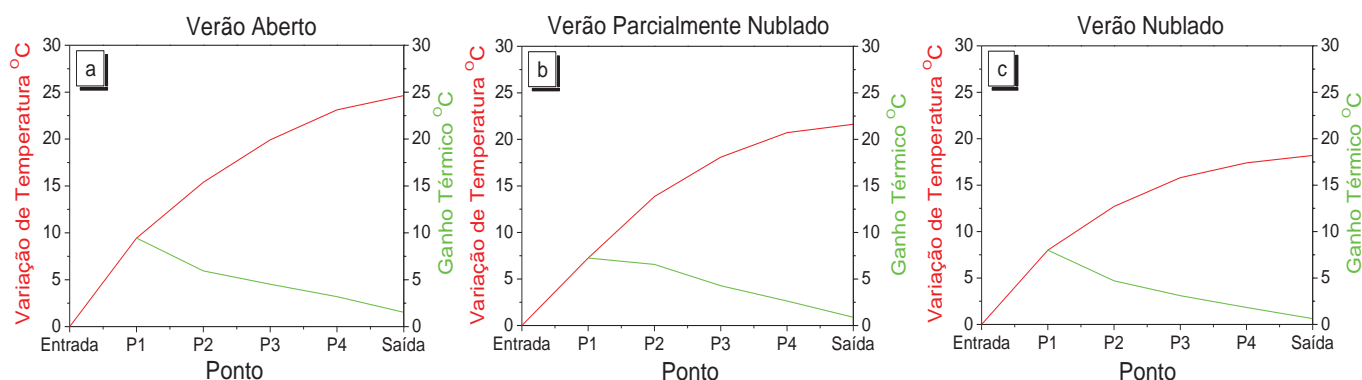


Figura 24: (a,b,c) Evolução temporal do variação de temperatura do fluido e do ganho térmico do fluido nas mesmas posições P_e ; P_1 ; P_2 ; P_3 ; P_4 ; e P_s .

Para o dia de céu aberto na estação do verão (Figura 24 a), (20/02/2011), evolução da variação de temperatura do fluido (curva vermelha) cresceu em função comprimento do condutor. Por outro lado, o ganho térmico do fluido decresceu em função do comprimento do condutor (curva verde), valores apresentado na tabela 6.

Tabela 6: Valore das variações de temperatura e ganho térmico nos pontos de coletas de dados.

Verão Aberto		
Ponto	Variação de Temperatura	Ganho Térmico
Entrada	0 °C	
P1	9,44 °C	9,45 °C
P2	15,39 °C	5,94 °C
P3	19,91 °C	4,52 °C
P4	23,11 °C	3,2 °C
Saída	24,64 °C	1,53 °C

Para o dia de céu parcialmente nublado na estação do verão (Figura 24 b), (22/02/2011), o ganho térmico cresceu (curva vermelha). Já, o ganho térmico do fluido decresceu em função do comprimento do condutor (curva verde), os valores são apresentados na tabela 7.

Tabela 7: Valore das variações de temperatura e ganho térmico nos pontos de coletas de dados.

Verão Parcialmente Nublado		
Ponto	Variação de Temperatura	Ganho Térmico
Entrada	0 °C	
P1	7,25 °C	7,25 °C
P2	13,85 °C	6,57 °C
P3	18,09 °C	4,28 °C
P4	20,72 °C	2,63 °C
Saída	21,62 °C	0,89 °C

Similarmente, para o dia de céu nublado na estação do verão (Figura 24 c), (15/02/2011), a evolução da variação de temperatura do fluido cresceu (curva vermelha). E, o ganho térmico do fluido decresceu em função do comprimento do condutor (curva verde), os valores são apresentados na tabela 8.

Tabela 8: Valore das variações de temperatura e ganho térmico nos pontos de coletas de dados.

Verão Parcialmente Nublado		
Ponto	Variação de Temperatura	Ganho Térmico
Entrada	0 °C	
P1	8 °C	8 °C
P2	12,7 °C	4,7 °C
P3	15,8 °C	3,1 °C
P4	17,4 °C	1,83 °C
Saída	18,2 °C	0,62 °C

As Figuras 25 (a, b, c) mostra a evolução da temperatura do fluido circulante em seis posições no absorvedor do coletor em dias do inverno para as três coberturas de céu. Similarmente as evoluções das temperaturas do ar mostradas nas evoluções das figuras 20 (b), 21 (b) e 22 (b), e das figuras 20 (a), 21 (a) e 21 (a) mostra também uma defasagem entre o valor máximo da radiação global e temperatura do fluido, porem menor que no verão. A defasagem foi da ordem de duas para as três coberturas de céu, e como já mencionado anteriormente, a defasagem é devido à inércia térmica do absorvedor de concreto e ao sistema condutor do fluido (mangueira de polietileno) que não é um bom condutor térmico. No inverno a inércia térmica do coletor é menor que no verão.

Essa particularidade deve ser atribuída à diferença temperatura do ar, absorvedor do coletor e fluido de trabalho entre as duas estações.

A Figura 25 (a), dia de céu aberto, mostra que a defasagem temporal no valor máximo da temperatura é independente do comprimento do percurso. A defasagem temporal ocorre sempre no mesmo intervalo horário.

A evolução diurna da temperatura do fluido em função do comprimento do percurso (mangueira) nas seis posições do coletor no inverno foi também inferior a do verão. Similarmente, o valor da temperatura do fluido também aumenta em função do aumento do comprimento do percurso nas três coberturas de céu: aberto, parcialmente nublado e nublado.

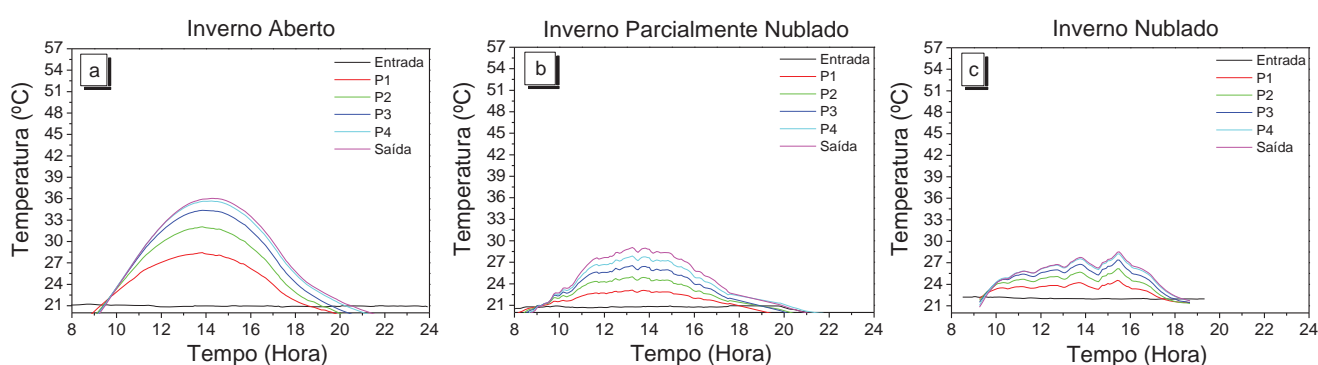


Figura 25: Evolução diurna da temperatura do fluido no coletor nos 6 diferentes pontos no inverno: a) céu aberto (30/06/2010); b) céu parcialmente nublado (07/07/2010) e c) nublado (10/06/2010).

Na cobertura de céu aberto da estação do inverno (Figura 25 a) as temperaturas máximas do fluido foram obtidas às 13h:50min em todas as pontos.

Tabela 9: Valores da temperatura do fluido no coletor em diferentes pontos; Entrada, P1, P2, P3, P4 e Saída em condição de céu aberto para um dia da estação do inverno.

Inverno Aberto	
Ponto	Temperatura
P _e	21,0 ⁰ C
P ₁	28,4 ⁰ C
P ₂	32,0 ⁰ C
P ₃	34,4 ⁰ C
P ₄	35,7 ⁰ C
P _s	36,0 ⁰ C

Na cobertura de céu parcialmente nublado na estação do inverno (Figura 25 b), as temperaturas do fluido máximas obtidas às 13h:15min.

Tabela 10: Valores da temperatura do fluido no coletor em diferentes pontos; Entrada, P1, P2, P3, P4 e Saída em condição de céu parcialmente nublado para um dia da estação do inverno.

Inverno Parcialmente Nublado	
Ponto	Temperatura
P _e	21,9 °C
P ₁	23,1 °C
P ₂	25,0 °C
P ₃	26,5 °C
P ₄	27,9 °C
P _s	29,1 °C

Na cobertura de céu nublado na estação do inverno (Figura 25 c), as temperaturas do fluido máximas obtidas às 15h:30min.

Tabela 11: Valores da temperatura do fluido no coletor em diferentes pontos; Entrada, P1, P2, P3, P4 e Saída em condição de céu nublado para um dia da estação do inverno.

Inverno Nublado	
Ponto	Temperatura
P _e	22,0 °C
P ₁	24,5 °C
P ₂	26,2 °C
P ₃	27,3 °C
P ₄	28,3 °C
P _s	28,5 °C

Similarmente, na Figura 26 (a, b, c) as curvas em vermelho mostram a variação de temperatura do fluido entre os pontos (P₁ - P_e); (P₂ - P_e); (P₃ - P_e); (P₄ - P_e) e (P_s - P_e) no absorvedor do coletor no intervalo horário de temperatura máxima diária, para as três coberturas de céu, no inverno. As curvas na cor verde representam o

decréscimo do ganho térmico do fluido ($P_1 - P_e$); ($P_2 - P_1$); ($P_3 - P_2$); ($P_4 - P_3$) e ($P_s - P_4$) nas posições P_1 ; P_2 ; P_3 ; P_4 e P_s no intervalo horário de temperatura máxima diária, no inverno.

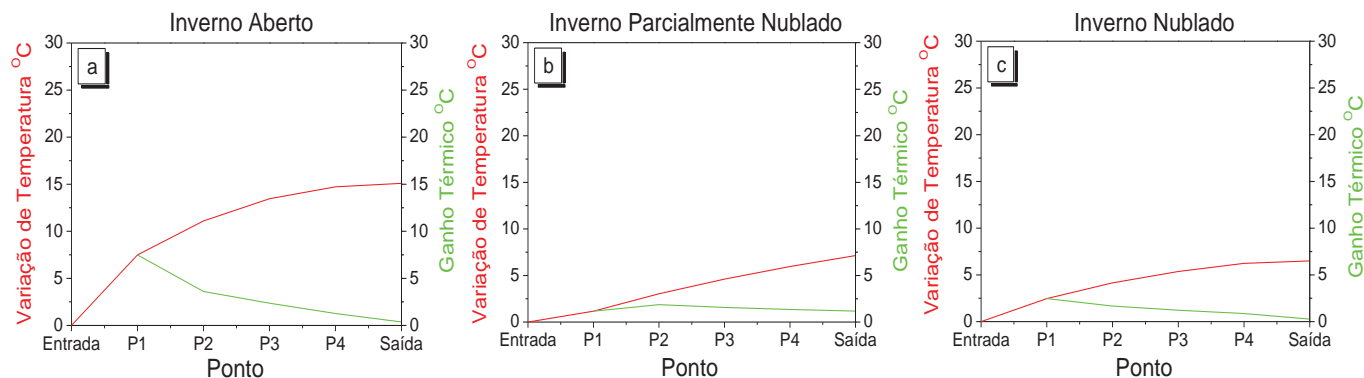


Figura 26: (a, b, c) Evolução temporal da variação de temperatura do fluido e do ganho térmico do fluido nas mesmas posições P_e , P_1 ; P_2 , P_3 ; P_4 e P_s .

Para o dia de céu aberto na estação do inverno (Figura 26 a), (30/06/2010), a evolução da variação de temperatura do fluido cresceu (curva vermelha) em função comprimento do condutor. Já a curva verde que apresenta o ganho térmico do fluido (curva verde) decresceu em função do comprimento do condutor, valores apresentado na tabela 12.

Tabela 12: Valore das variações de temperatura e ganho térmico nos pontos de coletas de dados.

Inverno Aberto		
Ponto	Varição de Temperatura	Ganho Térmico
Entrada	0 °C	
P1	7,49 °C	7,49 °C
P2	11,1 °C	3,61 °C
P3	13,46 °C	2,36 °C
P4	14,72 °C	1,26 °C
Saída	15,09 °C	0,37 °C

Para o dia de céu parcialmente nublado na estação do inverno (Figura 26 b), (07/07/2010), a evolução da variação de temperatura do fluido cresceu (curva vermelha) em função comprimento do condutor. Por outro lado, o ganho térmico do

fluido (curva verde) decresceu em função do comprimento do condutor, valores apresentado na tabela 13.

Tabela 13: Valore das variações de temperatura e ganho térmico nos pontos de coletas de dados.

Inverno Parcialmente Nublado		
Ponto	Variação de Temperatura	Ganho Térmico
Entrada	0 °C	
P1	1,17 °C	1,17 °C
P2	3,04 °C	1,87 °C
P3	4,61 °C	1,57 °C
P4	5,96 °C	1,35 °C
Saída	7,14 °C	1,18 °C

No dia de céu nublado na estação do inverno (Figura 26 c), (10/06/2010), a variação de temperatura cresceu (curva vermelha). E neste caso, o ganho térmico do fluido decresceu em função do comprimento do condutor, valores apresentado na tabela 14.

Tabela 14: Valore das variações de temperatura e ganho térmico nos pontos de coletas de dados.

Inverno Nublado		
Ponto	Variação de Temperatura	Ganho Térmico
Entrada	0 °C	
P1	2,47 °C	2,47 °C
P2	4,14 °C	1,67 °C
P3	5,36 °C	1,22 °C
P4	6,23 °C	0,87 °C
Saída	6,5 °C	0,27 °C

Os valores obtidos para as variações térmicas nas Figuras 25 (a, b, c) e figura 26 (a, b, c) positivos e maiores que zero nas três coberturas de céu, mostra que o coletor solar forneceu calor ao fluido de trabalho ao longo de todo o comprimento do condutor. Ou seja, a temperatura do fluido não se estabilizou no coletor. O resultado mostra que a relação entre a área de captação e o comprimento do condutor do fluido,

usado no projeto do coletor foi o ideal para o fluxo mássico (L/h) usado nos ensaios experimentais.

Em comparação com o experimento de Silva, (1992) (22/04/1991) (Início do inverno com cobertura de céu parcialmente nublado) em que a temperatura de entrada foi de 25,0^oC, para todos os módulos, com um volume de trabalho de 620 (ml/mim.) no módulo 1 foi de 38^oC, no módulo 2 foi registrada 42,5^oC, no módulo 3 45,5^oC, já no módulo 4 a temperatura foi de 46,5^oC e no módulo 5 46,5^oC após o último módulo a temperatura máxima de saída foi de 46,5^oC, já com a vazão de 420 (ml/mim.) a temperatura máxima de saída registrou 47,5^oC e com a vazão de 400 (ml/mim.) obteve uma temperatura máxima de saída de 49^oC, para configuração em série.

Os resultados das pesquisas acima demonstram que o ganho térmico do fluido foi maior em relação ao do coletor solar alternativo de concreto, pois no inverno o comportamento do coletor de polietileno apresentou ganhos similares ao ganho do coletor solar alternativo de concreto no verão.

Para as possíveis aplicações agrícolas calculou-se valores médios de temperaturas nos 6 diferentes pontos entre os horários das 11 às 16 horas nas estações verão e inverno e para as coberturas de céu nublado, parcialmente nublado e aberto. Os resultados estão apresentados na tabela 15.

Tabela 15: Valores médios Entrada, P1, P2, P3, P4 e Saída do fluido no coletor, no período das 11 às 16 horas, para céu nublado, parcialmente nublado e aberto, no inverno e do verão.

Estação	Cobertura	Média					
		Entrada (^o C)	P1 (^o C)	P2 (^o C)	P3 (^o C)	P4 (^o C)	Saída (^o C)
Verão	A	28,33	35,02	39,60	42,80	44,89	45,79
	PN	28,53	28,54	39,68	42,39	43,19	43,74
	N	28,51	33,69	36,72	38,82	40,03	40,32
Inverno	A	20,94	27,07	30,16	32,22	33,33	33,64
	PN	20,77	22,58	24,05	25,32	26,44	27,45
	N	20,99	22,69	23,87	24,82	25,51	25,67

Os resultados obtidos para a temperatura média diária no coletor na estação do verão superior a $40,0^{\circ}\text{C}$ atende os interesses de aplicações agrônômicas em qualquer condição de cobertura de céu. Os valores da temperatura média foram maiores em seqüência nas coberturas de céu aberto, parcialmente nublada e nublada. O ganho térmico no verão foi da ordem de $15,5^{\circ}\text{C}$.

As temperaturas médias de saída do coletor no inverno foram inferiores as do verão nas três coberturas de céu. É evidente que os resultados já eram esperados porque no inverno são baixas as temperaturas de entrada do fluido e do ar e tem menor radiação. O melhor resultado foi para a condição de céu aberto ($33,6^{\circ}\text{C}$) e o menos favorável no nublado ($25,7^{\circ}\text{C}$). O ganho térmico no inverno para dia de céu aberto foi da ordem de $13,3^{\circ}\text{C}$, enquanto que para o nublado de $5,0^{\circ}\text{C}$. Para aplicações agrárias, onde a temperatura necessária é da ordem 30°C a 40°C na estação do inverno é preciso aumentar a área de captação do coletor.

6.3. - Rendimento do coletor solar alternativo de concreto.

A Figura 27 (a, b) mostra a evolução diurna da energia total da radiação global incidente no coletor e a energia útil em um dia de céu aberto para a estação do verão.

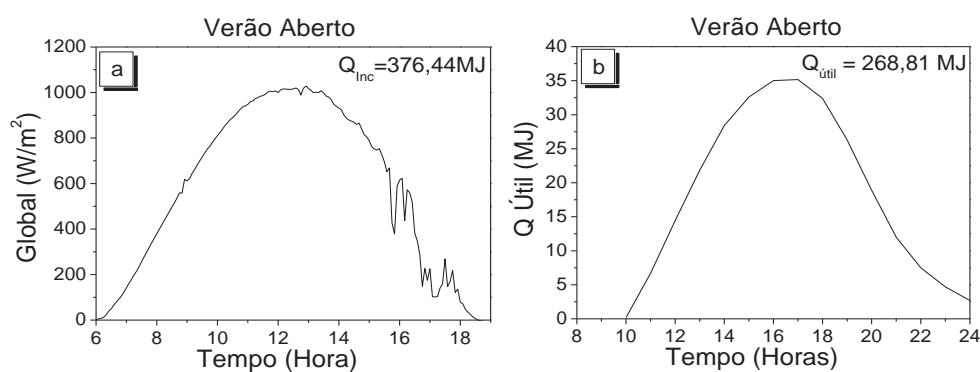


Figura 27: (a, b) Energia total incidente e energia útil em dia de céu aberto, no verão. (20-11-2011).

A energia total incidente (Q_{inc}) foi calculada por meio do produto da energia diária Q_d e a área do absorvedor do coletor A_{abs} pela equação: $Q_{inc} = Q_d \cdot A_{abs}$.

Para o dia 20-11-2011 mostrado na Figura 31 (a):

$$Q_{\text{inc}} = Q_d A_{\text{abs}} = 7,44 \text{ MJ/h} \times 51 \text{ m}^2 = 376,44 \text{ MJ}$$

A energia útil foi calculada calorimetricamente para o mesmo dia, por meio da integração hora à hora.

Tabela 16: Cálculo do Q útil

Hora	Q útil = m x c x Δt	Q útil
10	Q útil ₁₀₋₁₁ = 340 x 4,18 x (28,32 - 28,30)	0,03MJ
11	Q útil ₁₁₋₁₂ = 340 x 4,18 x (32,51 - 28,30)	5,99MJ
12	Q útil ₁₂₋₁₃ = 340 x 4,18 x (37,96 - 28,30)	13,73MJ
13	Q útil ₁₃₋₁₄ = 340 x 4,18 x (43,16 - 28,30)	21,11MJ
14	Q útil ₁₄₋₁₅ = 340 x 4,18 x (47,78 - 28,30)	27,68MJ
15	Q útil ₁₅₋₁₆ = 340 x 4,18 x (50,74 - 28,30)	31,89MJ
16	Q útil ₁₆₋₁₇ = 340 x 4,18 x (52,43 - 28,30)	34,30MJ
17	Q útil ₁₇₋₁₈ = 340 x 4,18 x (52,54 - 28,30)	34,44MJ
18	Q útil ₁₈₋₁₉ = 340 x 4,18 x (50,59 - 28,30)	31,67MJ
19	Q útil ₁₉₋₂₀ = 340 x 4,18 x (46,29 - 28,30)	25,57MJ
20	Q útil ₂₀₋₂₁ = 340 x 4,18 x (41,09 - 28,30)	18,18MJ
21	Q útil ₂₁₋₂₂ = 340 x 4,18 x (36,33 - 28,30)	11,41MJ
22	Q útil ₂₂₋₂₃ = 340 x 4,18 x (33,08 - 28,30)	6,79MJ
23	Q útil ₂₃₋₂₄ = 340 x 4,18 x (31,12 - 28,30)	4,00 MJ
24	Q útil ₂₄₋₀₁ = 340 x 4,18 x (29,72 - 28,30)	2,01 MJ
01	Q útil ₀₁₋₀₂ = 340 x 4,18 x (28,31 - 28,30)	0,014 MJ
Total	Q útil total	268,81MJ

Assim o rendimento térmico diário do coletor definido pela relação entre Q_{inc} e Q_{util} para um dia de céu claro no verão é:

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_i} = \frac{268,81 \text{ MJ/h}}{376,44 \text{ MJ/h}} = 0,714 \times 100 = 71,4\%$$

Similarmente, a Figura 28 (a, b) mostra a evolução diurna da energia total da radiação global incidente no coletor e a energia útil em um dia de céu

parcialmente nublado para a estação do verão.

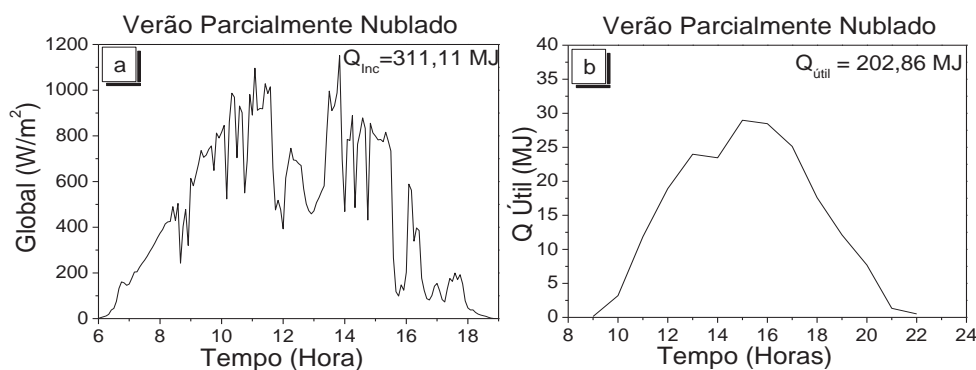


Figura 28: (a, b) Energia total incidente e energia útil em dia de céu parcialmente nublado, no verão. (22/02/2011).

O rendimento térmico diário para um dia de céu parcialmente nublado no verão foi 65%.

A Figura 29 (a, b) mostra a evolução diurna da energia total da radiação global incidente no coletor e a energia útil em um dia céu nublado para a estação do verão.



Figura 29: (a, b) Energia total incidente e energia útil em dia de céu nublado, no verão. (15/02/2011).

O rendimento térmico diário do coletor para um dia de céu nublado no verão foi 63%.

Os resultados da eficiência obtidos entre 63,0% a 71,4% para o coletor solar no verão nas três coberturas de céu: aberto, parcialmente nublado e nublado, já eram esperados e foram considerados normais termicamente, considerando a faixa de temperatura operacional do absorvedor, que é relativamente baixa. Os coletores planos

comerciais de metal, bem como os coletores planos desenvolvidos para pesquisas acadêmicas, apresentam rendimentos térmicos entre 60% a 70,0% na mesma faixa de temperatura de trabalho do coletor.

A Figura 30 (a, b) mostra a evolução diurna da energia total da radiação global incidente no coletor e a energia útil em um dia de céu aberto para a estação do inverno.

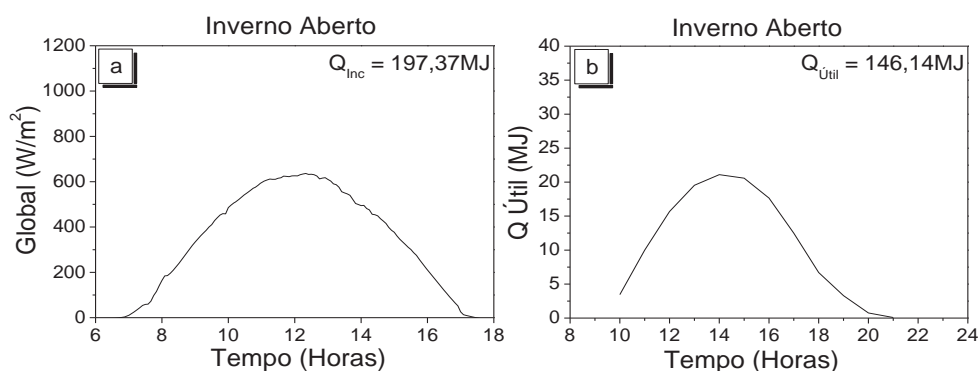


Figura 30: (a, b) Energia total incidente e energia útil em dia de céu aberto, no inverno. (30/06/2010).

O rendimento térmico diário do coletor para um dia de céu aberto no inverno, calculado similarmente ao da estação do verão o rendimento foi de 74%.

A Figura 31 (a, b) mostra a evolução diurna da energia total da radiação global incidente no coletor e a energia útil em um dia de céu parcialmente nublado para a estação do inverno.

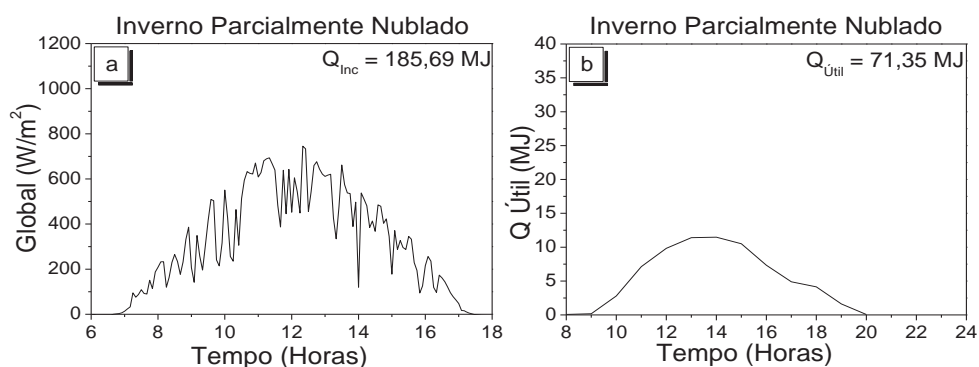


Figura 31: (a, b) Energia total incidente e energia útil em dia de céu parcialmente nublado no inverno. (07/07/2010).

O rendimento térmico diário do coletor para um dia de céu parcialmente nublado no inverno foi 38%.

A Figura 32 (a, b) mostra a evolução diurna da energia total da radiação global incidente no coletor e a energia útil em um dia de céu nublado para a estação do inverno.

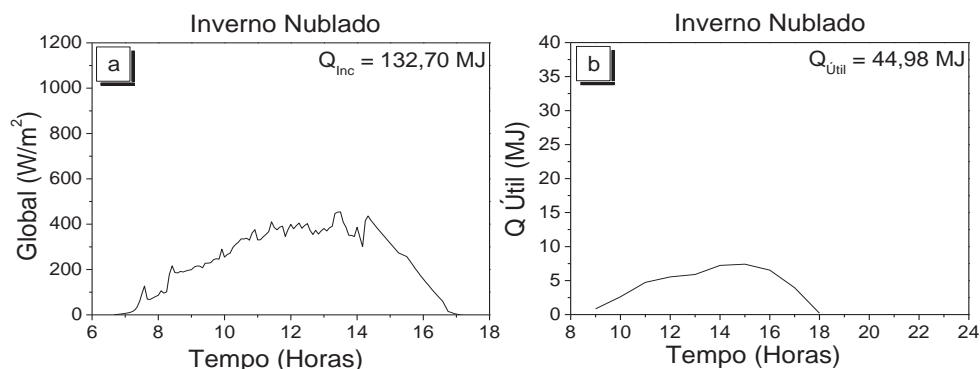


Figura 32: (a, b) Energia total incidente e energia útil em dia de céu nublado no inverno. (10/06/2010).

O rendimento térmico diário do coletor para um dia de céu nublado no inverno foi de 34%.

O rendimento térmico do coletor obtido de 74,0% para dia de céu aberto no inverno foi da mesma ordem de grandeza ao no verão, no entanto o rendimento de 38,0% na cobertura de céu nublada e 34,0% na nublada foi muito inferior aos obtidos nas coberturas parcialmente nublada e nublada no verão. É evidente que os resultados já eram esperados porque no inverno além do absorvedor do coletor não possuir nenhuma proteção térmica, a radiação global diária incidente, bem como as temperaturas de entrada do fluido e do ar e o coletor, nestas duas coberturas de céu são muito baixa.

Comportamento similar ao coletor solar alternativo de concreto aqui apresentado foi registrado por Santos et. al (1991), relata que o rendimento do coletor testado obteve um rendimento nas primeiras 5 horas de 7,0% á 22,0% e na última hora de operação, o rendimento atingiu um valor da ordem de 50,0%.

6.4 - Desempenho do reservatório térmico.

Na Figura 33 (a, b, c) são apresentadas as curvas de temperaturas do fluido no interior da caixa térmica em função do tempo nos dias de 17/02/2011 à 18/02/2011 tendo a mínima temperatura do ar registrada de 18,4^oC; 30/07/2010 à 31/07/2010 a temperatura mínima do ar foi de 11,8^oC e 05/08/2010 à 06/08/2010 em que a temperatura mínima do ar registrada foi de 8,3^oC.

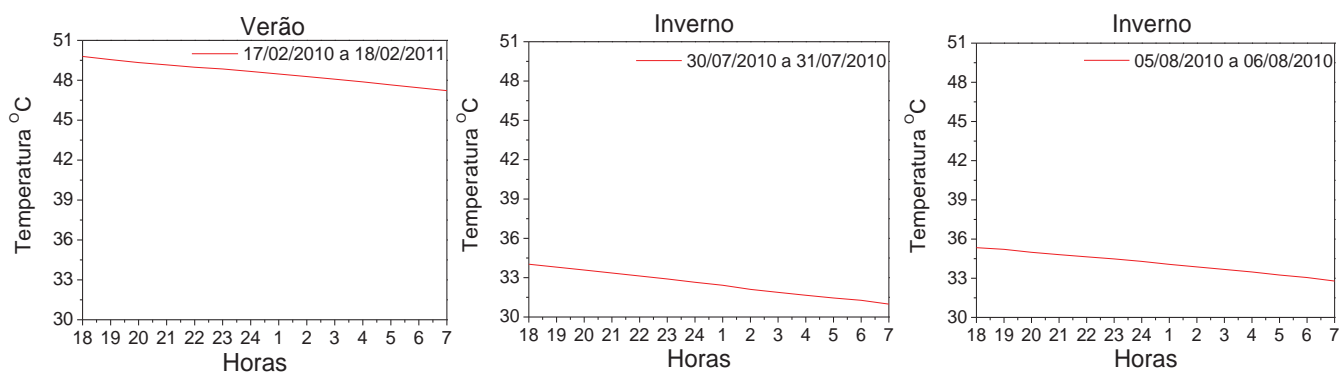


Figura 33: (a, b, c) Temperatura água aquecida do coletor no interior do reservatório nos períodos de (a) 17/02/2011 a 18/02/2011, (b) 30/07/2010 a 31/07/2010 e (c) 05/08/2010 a 06/08/2010.

Para o período de 17/02 a 18/02/2011 a temperatura inicial de armazenamento da água medida às 18 horas, era de 49,8^oC e na manhã do dia 18/02/2011 foi registrado a temperatura de 47,2^oC. O decréscimo de temperatura foi de apenas 2,6^oC, que representa uma perda apenas de 5,22%. Já para o período de 30/07 a 31/07/2010 a temperatura da água dentro do reservatório decresceu de 34,02^oC para 30,98^oC, com uma temperatura mínima do ar de 11,8^oC. A redução foi de 3,04^oC, o que representa 8,93% de perda total da temperatura do fluido armazenado. E para o período do dia 05/08/2010 a 06/08/2010 a temperatura da água dentro do reservatório decresceu de 35,3^oC para 32,8^oC, com uma temperatura mínima do ar de 8,3^oC. A redução foi de 2,6^oC, o que representa 7,2% de perda total da temperatura do fluido armazenado.

Estes resultados mostram que o isolamento do reservatório alternativo, construído com matérias simples, foi eficiente já que houve apenas uma redução na temperatura da água armazenada inferior a 10,0%.

Em comparação ao reservatório alternativo de Souza (2006), que apresentou uma perda de 10% em 15 horas de armazenamento. Os resultados apresentados foram comparativamente idênticos ao reservatório alternativo e com perdas similares.

7 - CONCLUSÕES.

Dos resultados apresentados e discutidos neste trabalho concluímos que:

- 1- O coletor solar alternativo de concreto proposto e desenvolvido neste projeto para aquecimento de água apresentou desempenho térmico compatível com as aplicações agropecuárias em termos de simplicidade, custos e temperatura do fluido.
- 2- A temperatura máxima do fluido circulante no absorvedor (água) na saída do coletor a partir da entrada ($L=0$) ocorre em largo intervalo de tempo: 13:00 horas as 17:00 horas devido à inércia do absorvedor de concreto.
- 3- Para o fluxo mássico usado no trabalho ($m=340L$ por hora) a temperatura do fluido não atingiu o estagio estacionário: houve ganho térmico em toda extensão do comprimento do condutor de fluido
- 4- O ganho térmico do fluido no absorvedor é decrescente em função do aumento comprimento do condutor e é dependente da cobertura de céu e da sazonalidade da radiação solar (estações do ano): o ganho térmico é maior no verão e em dias de céu aberto, e é menor no inverno e em dias céu nublado.
- 5- Os resultados obtidos da eficiência térmica do coletor entre 63,0% a 71,4% no verão nas três coberturas de céu: aberto, parcialmente nublado e nublado, foi considerado termicamente elevado pela faixa de temperatura operacional do absorvedor.
- 6- O rendimento térmico do coletor no inverno foi inferior a do verão nas coberturas de parcialmente nublada e nublada, enquanto que no verão foi da mesma ordem de grandeza.

- 7- O armazenador desenvolvido neste projeto para conservação da água aquecida no coletor de concreto para fins agronômicos apresentou bom desempenho térmico. Na pior situação térmica diária, no inverno, o armazenador manteve uma redução na temperatura final (depois de 14 horas) inferior a 10,0% da temperatura inicial de armazenamento.

8. REFERÊNCIAS

- ALENCAR, F.; SAGLIETTI, J. R. C. Análise de viabilidade de uma telha coletora de energia solar de cimento amianto. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 14, n. 2, p. 37-47, 1998.
- ALLONSO, M.; FINN, E. J. Solids. In: ALLONSO, M.; FINN, E. J. **Fundamental university physics**. Readings: Addison-Wesley, 1972. v. 3, ccap. 6, p. 231-281.
- ALVAREZ, D. J. R.; PARRA, J. P. **Tecnologia de invernaderos II**. Madrid: Mundi Prensa, 1998. 512 p.
- BRAGA, L. G. T.; LIMA, S. L. Influência da temperatura ambiente no desempenho da rã-touro, *Rana catesbeiana* (Shaw, 1802) na fase de recria. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, MG, v. 30, n. 6, p. 1659-1663, nov./dez. 2001.
- CHAURASIA, P. B. L. Solar water heaters based on concrete collectors. **Energy**, Jodhpur, v. 25, p. 703-716, 2000.
- ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; OLIVEIRA, A.; SOARES, J. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. **Applied Energy**, Amsterdam, v. 86, p. 299-309, 2009.
- FANTINELLI, J. T. **Tecnologia solar de interesse social e baixo custo para aquecimento de água na moradia**. 2002. 179 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos)-Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.
- FANTINELLI, J. T. **Análise da evolução de ações na difusão do aquecimento solar de água para habitações populares Estudo de caso em Contagem – MG**. 2006. 316 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica/Planejamento de Sistemas Energéticos)-Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.
- FONTAN, I. Produção de mudas florestais. In: SEMANA DE ATUALIZAÇÃO PARA TÉCNICOS AGROFLORESTAIS, 4., Viçosa, MG. **Resumos...** Viçosa, MG: UFV, Departamento de Engenharia Florestal; Sociedade de Investigações Florestais, 2010.

Disponível em:

<http://www.sif.org.br/arquivos_internos/downloads/IVAN+FONTAN.pdf>. Acesso em: 10 set. 2010.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. New York: Academic Press, 1983. 390 p.

MENDONÇA, V. B. **Estudo da problemática da aplicação de coletores solares para aquecimento de água, no segmento residencial de alto padrão, com base em escalas de projeto arquitetônico e dimensões de planejamento**. 2009. 192 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)-Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

NAYAK, J. K. et al. Performance studies on solar concrete collectors. **Solar Energy**, Bombaim, v. 42, n. 1, p. 45-56, 1989.

RISPOLI, I. A.G. **O aquecedor solar brasileiro- Teoria e prática em prol de uma transferência de tecnologia sustentável**. 2008. 245 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil/Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais)-Faculdade de Engenharia Civil Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

SANTOS, J. G. et al. Avaliação de um coletor solar plano em argamassa de traço simples para aplicações rurais e urbanas periféricas. In: REUNIÃO ANUAL DA SBPC, 13., 1991, Rio de Janeiro. **Ciência e Sobrevivência: anais...** Rio de Janeiro: SBPC, 1991, p. 95-96.

SILVA, L. A. **Coletor de polietileno: uma alternativa de aproveitamento de energia solar de baixo custo**. 1992. 54 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1992.

SOUZA, L. G. M.; MENDES, J. U. L.; SANTOS, R. D.; LIMA, H. J.; MELO, A. V.; RANDEMBERG, N. Reservatório térmico alternativo para uso em sistemas solares de aquecimento de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17., 2006, Foz do Iguaçu. **Anais...** São Paulo: IPEN, 2006. p. 9696-9706.

SOUZA, L. V. ; URBINATI, E. C.; MARTINS M. I. E. G.; SILVA P. C. Avaliação do crescimento e do custo da alimentação do pacu (*Piaractus mesopotamicus* Holmberg, 1887) submetido a ciclos alternados de restrição alimentar e realimentação. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 19-28, 2003.

STADELMAN, W. J.; COTTERILL, O. J. **Egg science and technology**. 4th. Ed. Binghamtom: Haworth, 1995. 563 p.

TERAMOTO, E. T.; ESCOBEDO, J. F. Distribuição de frequência das coberturas de céu em Botucatu/SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 3., 2010, Belém. **Anais...** Belém: ABENS, 2009. Sem paginação.

TIPLER, P. A. **Física: mecânica, oscilações e ondas, termodinâmica**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 651 p.

VARELLA, F. K. M. **Tecnologia solar residencial: inserção de aquecedores solares de água no Distrito de Barão Geraldo – Campinas**. 2004. 136 f. Tese (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos)-Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.