



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**INFLUÊNCIA DO MATERIAL, TIPO DE ESCOAMENTO E  
PROTEÇÃO TRANSPARENTE SOBRE O DESEMPENHO DO  
COLETOR DE UM AQUECEDOR SOLAR DE BAIXO CUSTO**

Aline Marques Moraes Arouca

**Uberlândia - MG - Brasil**  
**2010**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**INFLUÊNCIA DO MATERIAL, TIPO DE ESCOAMENTO E  
PROTEÇÃO TRANSPARENTE SOBRE O DESEMPENHO DO  
COLETOR DE UM AQUECEDOR SOLAR DE BAIXO CUSTO**

Aline Marques Moraes Arouca

Dissertação de mestrado apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Química da Universidade Federal de  
Uberlândia como parte dos requisitos  
necessários à obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Química, área de concentração em  
Pesquisa e Desenvolvimento de Processos  
Químicos.

Uberlândia - MG - Brasil  
2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG - Brasil

---

A771i Arouca, Aline Marques Moraes, 1982-

Influência do material, tipo de escoamento e proteção transparente sobre o desempenho do coletor de um aquecedor solar de baixo custo [manuscrito] / Aline Marques Moraes. - 2010.

110 f. : il.

Orientador: João Jorge Ribeiro Damasceno.

Co-orientador: Luiz Gustavo Martins Vieira.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Inclui bibliografia.

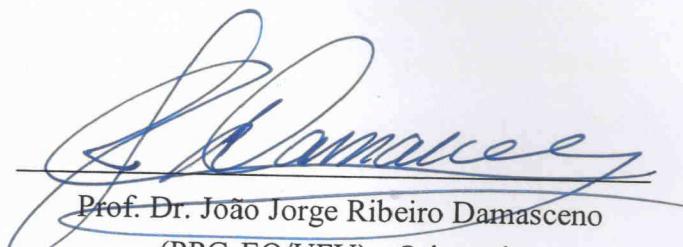
1. Aquecedores solares de água - Teses. I. Damasceno, João Jorge Ribeiro. II. Vieira, Luiz Gustavo Martins. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

---

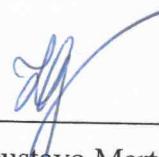
CDU: 620.9

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 26 DE AGOSTO DE 2010.

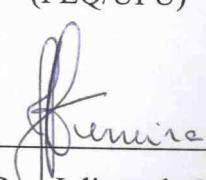
BANCA EXAMINADORA:



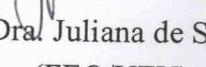
Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno  
(PPG-EQ/UFU) - Orientador



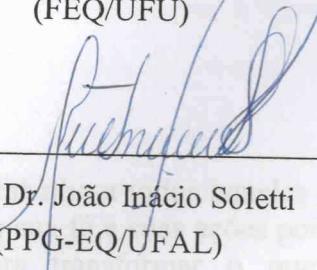
Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira  
(PPG-EQ/UFU) – Co-orientador



Prof<sup>a</sup>. Dra. Érika Otta Watanabe  
(FEQ/UFU)



Prof<sup>a</sup>. Dra. Juliana de Souza Ferreira  
(FEQ/UFU)



Prof. Dr. João Inácio Soletti  
(PPG-EQ/UFAL)

Dedico este trabalho a todos aqueles que acreditam que sua fé e suas ações podem contribuir para transformar o mundo, renovando as idéias e formando melhores cidadãos.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, por ser a razão da minha vida e o alvo da minha vocação, por me indicar o caminho a seguir e me guiar por ele, estando ao meu lado por todos os meus dias.

Ao meu esposo, Fábio de Oliveira Arouca, pelo amor, carinho, cuidado, apoio, companheirismo e por fazer tudo o que está ao seu alcance para suprir mais que apenas minhas necessidades.

Aos meus pais, Elias S. Moraes e Liliana M. Moraes, por todo amor, carinho, apoio e constantes orações pela minha felicidade e por meu sucesso. Aos meus irmãos, Thaís, David e Daniel, pela compreensão, amor, carinho e confiança com que se relacionam comigo, em todas as áreas das nossas vidas.

Aos amigos tão chegados quanto irmãos, Léa Anny (cunhada), Everton, Valéria, Janayna, Danielle, Luciana e Fredson, pela felicidade que nossa amizade me proporciona e pelas orações para que sempre aconteçam coisas boas em minha vida.

Aos meus sogros, Edson Peres Arouca e Maria Valéria O. Arouca, e cunhado, Thales O. Arouca, por todo amor, carinho e por torcerem pelas minhas conquistas.

Ao Prof. João Jorge Ribeiro Damasceno pelo incentivo, respeito, carinho e confiança com que conduz nossa convivência. Ao Prof. Luiz Gustavo Martins Vieira, pela dedicação, paciência, polidez, respeito e por todo o tempo dispensado para propiciar uma boa qualidade a este trabalho.

Às colegas Ana Cláudia F. Mendes e Natália Maira B. Oliveira, pelo interesse, capricho e dedicação com que realizaram cada atividade proposta, se tornando indispensáveis para a realização deste trabalho. Aos colegas de turma Daniela Leles, Janaina Fischer, Bruno Arantes, Letícia Castejon, Cíntia Ferreira e Wayler Santos e à amiga Kássia Graciele, pelo companheirismo e apoio, sempre que necessário. Aos técnicos e funcionários Silvino, José Henrique, Anísio, Rodrigo, Zuleide, Roberta, Cléo e D. Ione, por toda prontidão, ajuda e paciência para resolver pequenos e freqüentes imprevistos.

À Débora Abrahão Siqueira, pelas sugestões e colaboração para que este trabalho fosse realizado. Ao Sr. Joselias Cabral de Oliveira pelo apoio para que obtivéssemos todo o equipamento e conhecimento necessários à execução deste trabalho.

Agradeço à Banca Examinadora pelas indispensáveis contribuições e, enfim, a todos os que colaboraram direta ou indiretamente para realização deste trabalho.

*“Não vos conformeis com este mundo, mas transformai-vos pela renovação da vossa mente, para que experimenteis qual seja a boa, agradável e perfeita vontade de Deus.” (Rm 12.2)*

## SUMÁRIO

Listas de Tabelas	i
Listas de Figuras	ii
Simbologia	viii
Resumo	xi
Abstract	xii
<b>1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1 – Estudo da Radiação Solar .....	6
2.1.1 – A Constante Solar .....	8
2.2 – Relações Angulares Sol-Terra .....	8
2.3 – Radiação Extraterrestre na Superfície Horizontal .....	13
2.4 – Índice de Claridade Atmosférica .....	14
2.5 – Radiação Solar Incidente no Plano Inclinado .....	15
2.6 – Estudo Teórico dos Coletores .....	19
2.7 – Os Sistemas de Aquecimento Solar de Água.....	21
2.7.1 – Sistema Convencional de Aquecimento de Água.....	23
2.7.2 – Sistema ASBC.....	24
2.7.3 – Estudos para o Desenvolvimento dos Sistemas de Energia Térmica Solar.....	26
<b>3 – MATERIAL E METODOLOGIA .....</b>	<b>33</b>
3.1 – Unidade Experimental .....	33
3.1.1 – Aquecedor Solar Convencional .....	35
3.1.2 – Aquecedores Solares Alternativos .....	35
3.1.3 – Sistema De Aquisição de Dados .....	37
3.1.4 – Bombas .....	38
3.1.5 – Termopares .....	38
3.2 – Metodologia .....	39

3.2.1 – Ensaios Passivos em Regime Batelada .....	40
3.2.2 – Ensaios Ativos em Regime Batelada .....	40
3.2.3 – Ensaios com Presença de Placa de Proteção Transparente, em Regime Batelada .....	41
3.2.4 – Ensaios Contínuos .....	42
<b>4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>43</b>
4.1 – Sistema Termossifão .....	44
4.2 – Sistemas Ativos .....	49
4.2.1 – Bombeamento a 20 L/h .....	49
4.2.2 – Bombeamento a 40 L/h .....	52
4.2.3 – Bombeamento a 60 L/h .....	55
4.3 – Presença de Placa de Proteção Transparente .....	59
4.3.1 – Termossifão com Presença de Placa de Proteção Transparente em Regime Batelada..	60
4.3.2 – Ensaios Ativos com Presença de Placa de Proteção Transparente em Regime Batelada.....	62
4.3.2.1 – Vazão de 20 L/h .....	62
4.3.2.2 – Vazão de 40 L/h .....	64
4.3.2.3 – Vazão de 60 L/h .....	65
4.4 – Ensaios Regime Contínuo .....	68
4.4.1 – Sistema Termossifão .....	68
4.4.2 – Sistemas Ativos .....	71
4.4.2.1 – Vazão de 20 L/h .....	71
4.4.2.2 – Vazão de 40 L/h .....	74
4.4.2.3 – Vazão de 60 L/h .....	77
<b>5 – CONCLUSÃO .....</b>	<b>82</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>85</b>
<b>ANEXO A - RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS TERMOSSIFÃO REALIZADOS NO AQUECEDOR SOLAR CONVENCIONAL.....</b>	<b>89</b>

<b>APÊNDICE A – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA PARA OS DEMAIS EXPERIMENTOS .....</b>	<b>90</b>
A.1 – Experimentos Termossifão .....	90
A.2 – Experimentos Ativos .....	96
A.2.1 – Bombeados a 20 L/h .....	96
A.2.2 – Bombeados a 40 L/h .....	100
A.2.3 – Bombeados a 60 L/h .....	102
<b>APÊNDICE B – CURVAS DE CALIBRAÇÃO .....</b>	<b>105</b>
<b>APÊNDICE C – METODOLOGIA TEÓRICA PARA A REALIZAÇÃO DO CÁLCULO DO TEMPO DE RESIDÊNCIA PARA O SISTEMA TERMOSSIFÃO.....</b>	<b>107</b>
<b>APÊNDICE D – CARACTERÍSTICAS OBSERVADAS NOS DIAS DOS ENSAIOS.</b>	<b>108</b>
<b>APÊNDICE E – TEMPERATURA AMBIENTE.....</b>	<b>110</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Valores do albedo para diferentes tipos de superfície.....	7
Tabela 2.2 -	Conversão de data para um número ordinal compreendido entre 1 e 365, tomado por base o dia médio de cada mês.....	9
Tabela 3.1 -	Características dos coletores solares alternativos.....	36
Tabela 4.1 -	Valores do somatório da radiação total sobre o plano inclinado.....	47
Tabela 4.2 -	Calor útil e eficiência diária para ensaios em sistema termossifão.....	48
Tabela 4.3 -	Temperatura máxima obtida em cada ensaio ativo (20 L/h).....	51
Tabela 4.4 -	Radiação total, calor útil absorvido e eficiência diária (20 L/h).....	51
Tabela 4.5 -	Radiação total, calor útil absorvido e eficiência diária (40 L/h).....	54
Tabela 4.6 -	Temperatura máxima obtida em cada ensaio ativo (40 L/h).....	55
Tabela 4.7 -	Radiação total, calor útil absorvido e eficiência diária (60 L/h).....	57
Tabela 4.8 -	Temperatura máxima obtida em cada ensaio ativo (60 L/h).....	58
Tabela 4.9 -	Valores calculados de radiação incidente sobre coletores inclinados para experimentos batelada com presença de placa de proteção transparente.....	60
Tabela 4.10 -	Temperatura máxima e eficiência diária para ensaios com e sem proteção transparente.....	67
Tabela 4.11 -	Tempo de Residência para cada configuração.....	68
Tabela 4.12 -	Síntese dos resultados do experimento contínuo.....	80
Tabela A.1 -	Eficiência e Temperatura dos Reservatórios.....	89
Tabela D.1 -	Características Climáticas dos Dias de Ensaio.....	108
Tabela E.1 -	Valores Horários da Temperatura Ambiente.....	110

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -	Esquema da Utilização da Energia Solar.....	5
Figura 2.2 -	Componentes da radiação solar incidente na superfície terrestre.....	6
Figura 2.3 -	Esquema da relação geométrica sol-terra.....	7
Figura 2.4 -	Posição aparente do sol em torno da Terra.....	10
Figura 2.5 -	Ângulo zenital, altura solar, inclinação e azimute do coletor solar.....	10
Figura 2.6 -	Ângulo zenital para uma superfície horizontal e ângulo de incidência para um plano inclinado.....	11
Figura 2.7 -	Radiação nas superfícies horizontal e inclinada.....	12
Figura 2.8 -	Um exemplo da freqüência de ocorrência de dias com vários índices de claridade e a freqüência acumulada desses dias.....	15
Figura 2.9 -	Esquema de um Aquecedor Solar Convencional (imagem disponibilizada no site da sociedade do sol).....	24
Figura 2.10 -	Sistema ASBC (imagem disponibilizada no site da sociedade do sol).....	25
Figura 2.11 -	Caixa quente construída por Saussure ( <i>site solarcooking.org</i> ).....	26
Figura 3.1 -	Unidade Experimental.....	34
Figura 3.2 -	Esquema representativo do Coletor Convencional de Cobre.....	35
Figura 3.3 -	Desenho Esquemático dos Coletores Alternativos.....	36
Figura 3.4 -	Forros comerciais de: (a) PVC e (b) PP.....	36
Figura 3.5 -	Posição dos termopares na Unidade Experimental.....	37
Figura 3.6 -	Esquema do Sistema de Aquisição de Dados.....	38
Figura 3.7 -	Desenho representativo de um termopar de isolamento mineral.....	39
Figura 3.8 -	Esquema da sobreposição da placa de proteção transparente ao coletor solar alternativo.....	41
Figura 4.1 -	Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 06/07/2009, no coletor alternativo de PP.....	44
Figura 4.2 -	Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 06/07/2009, no coletor alternativo de PVC.....	45
Figura 4.3 -	Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 29/07/2009, no coletor alternativo de PP.....	46
Figura 4.4 -	Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 29/07/2009, no coletor alternativo de PVC.....	47
Figura 4.5 -	Experimento bombeado a 20 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 11/08/2009, no coletor alternativo de PP.....	50
Figura 4.6 -	Experimento bombeado a 20 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 11/08/2009, no coletor alternativo de PVC.....	50
Figura 4.7 -	Experimento bombeado a 40 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 11/09/2009, no coletor alternativo de PP.....	53
Figura 4.8 -	Experimento bombeado a 40 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 11/09/2009, no coletor alternativo de PVC.....	53
Figura 4.9 -	Experimento bombeado a 60 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 16/11/2009, no coletor alternativo de PP.....	56
Figura 4.10 -	Experimento bombeado a 60 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 16/11/2009, no coletor alternativo de PVC.....	56
Figura 4.11 -	Experimento termossifão, em regime batelada e com proteção transparente, realizado no dia 04/02/2010, no coletor alternativo de PP.....	60
Figura 4.12 -	Experimento termossifão, em regime batelada e com proteção transparente, realizado no dia 04/02/2010, no coletor alternativo de PVC.....	61

Figura 4.13 -	Experimento ativo bombeado a 20 L/h, em regime batelada e com proteção transparente, realizado no dia 19/01/2010, no coletor alternativo de PP.....	62
Figura 4.14 -	Experimento ativo bombeado a 20 L/h, em regime batelada e com proteção transparente, realizado no dia 19/01/2010, no coletor alternativo de PVC... ..	63
Figura 4.15 -	Experimento ativo bombeado a 40 L/h, em regime batelada e com proteção transparente, realizado no dia 01/02/2010, no coletor alternativo de PP.....	64
Figura 4.16 -	- Experimento ativo bombeado a 40 L/h, em regime batelada e com proteção transparente, realizado no dia 01/02/2010, no coletor alternativo de PVC... ..	65
Figura 4.17 -	Experimento ativo bombeado a 60 L/h, em regime batelada e com proteção transparente, realizado no dia 20/01/2010, no coletor alternativo de PP.....	66
Figura 4.18 -	Experimento ativo bombeado a 60 L/h, em regime batelada e com proteção transparente, realizado no dia 20/01/2010, no coletor alternativo de PVC... ..	66
Figura 4.19 -	Experimento termossifão, em regime contínuo e sem proteção transparente, realizado no dia 07/04/2010, no coletor alternativo de PP.....	69
Figura 4.20 -	Experimento termossifão, em regime contínuo e sem proteção transparente, realizado no dia 07/04/2010, no coletor alternativo de PVC.....	70
Figura 4.21 -	Experimento termossifão, em regime contínuo e com proteção transparente, realizado no dia 17/04/2010, no coletor alternativo de PP.....	70
Figura 4.22 -	Experimento termossifão, em regime contínuo e com proteção transparente, realizado no dia 17/04/2010, no coletor alternativo de PVC.....	71
Figura 4.23 -	Experimento ativo bombeado a 20 L/h, em regime contínuo e sem proteção transparente, realizado no dia 19/03/2010, no coletor alternativo de PP.....	72
Figura 4.24 -	Experimento ativo bombeado a 20 L/h, em regime contínuo e sem proteção transparente, realizado no dia 19/03/2010, no coletor alternativo de PVC... ..	72
Figura 4.25 -	Experimento ativo bombeado a 20 L/h, em regime contínuo e com proteção transparente, realizado no dia 15/04/2010, no coletor alternativo de PP.....	73
Figura 4.26 -	Experimento ativo bombeado a 20 L/h, em regime contínuo e com proteção transparente, realizado no dia 15/04/2010, no coletor alternativo de PVC... ..	74
Figura 4.27 -	Experimento ativo bombeado a 40 L/h, em regime contínuo e sem proteção transparente, realizado no dia 09/03/2010, no coletor alternativo de PP.....	74
Figura 4.28 -	Experimento ativo bombeado a 40 L/h, em regime contínuo e sem proteção transparente, realizado no dia 09/03/2010, no coletor alternativo de PVC... ..	75
Figura 4.29 -	Experimento ativo bombeado a 40 L/h, em regime contínuo e com proteção transparente, realizado no dia 19/04/2010, no coletor alternativo de PP.....	76
Figura 4.30 -	Experimento ativo bombeado a 40 L/h, em regime contínuo e com proteção transparente, realizado no dia 19/04/2010, no coletor alternativo de PVC... ..	76
Figura 4.31 -	Experimento ativo bombeado a 60 L/h, em regime contínuo e sem proteção transparente, realizado no dia 10/03/2010, no coletor alternativo de PP.....	77
Figura 4.32 -	Experimento ativo bombeado a 60 L/h, em regime contínuo e sem proteção transparente, realizado no dia 10/03/2010, no coletor alternativo de PVC... ..	78
Figura 4.33 -	Experimento ativo bombeado a 60 L/h, em regime contínuo e com proteção transparente, realizado no dia 27/04/2010, no coletor alternativo de PP.....	78
Figura 4.34 -	Experimento ativo bombeado a 60 L/h, em regime contínuo e com proteção transparente, realizado no dia 27/04/2010, no coletor alternativo de PVC... ..	79
Figura A.1 -	Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 01/07/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	90
Figura A.2 -	Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 02/07/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	91
Figura A.3 -	Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 04/07/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	91

Figura A.4 -	Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 10/07/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	92
Figura A.5 -	Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 11/07/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	92
Figura A.6 -	Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 13/07/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	93
Figura A.7 -	Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 14/07/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	93
Figura A.8 -	Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 28/07/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	94
Figura A.9 -	Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 30/07/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	94
Figura A.10 -	Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 31/07/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	95
Figura A.11 -	Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 04/08/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	95
Figura A.12 -	Experimento ativo, bombeado a 20 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 15/07/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	96
Figura A.13 -	Experimento ativo, bombeado a 20 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 16/07/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	96
Figura A.14 -	Experimento ativo, bombeado a 20 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 17/07/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	97
Figura A.15 -	Experimento ativo, bombeado a 20 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 06/08/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	97
Figura A.16 -	Experimento ativo, bombeado a 20 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 10/08/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	98
Figura A.17 -	Experimento ativo, bombeado a 20 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 12/08/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	98
Figura A.18 -	Experimento ativo, bombeado a 20 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 13/08/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	99
Figura A.19 -	Experimento ativo, bombeado a 20 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 12/03/2010, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	99
Figura A.20 -	Experimento ativo, bombeado a 40 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 15/08/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	100
Figura A.21 -	Experimento ativo, bombeado a 40 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 31/08/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	100
Figura A.22 -	Experimento ativo, bombeado a 40 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 08/09/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	101

Figura A.23 -	Experimento ativo, bombeado a 40 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 14/09/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	101
Figura A.24 -	Experimento ativo, bombeado a 40 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 12/11/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	102
Figura A.25 -	Experimento ativo, bombeado a 60 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 15/09/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	102
Figura A.26 -	Experimento ativo, bombeado a 60 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 16/09/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	103
Figura A.27 -	Experimento ativo, bombeado a 60 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 17/09/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	103
Figura A.28 -	Experimento ativo, bombeado a 60 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 10/11/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	104
Figura A.29 -	Experimento ativo, bombeado a 60 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 18/11/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.....	104
Figura B.1 -	Fotografia da bomba peristáltica com inversor de freqüência.....	105
Figura B.2 -	Curva de Calibração da Bomba acoplada ao coletor de forro de PVC.....	105
Figura B.3 -	Curva de Calibração da Bomba acoplada ao coletor de Polipropileno.....	106

## SIMBOLOGIA [SI]

$A_c$  – Área Útil do Coletor [ $m^2$ ]

$cp$  – Calor Específico [ $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ ]

$d_c$  – Diâmetro do Canal [m]

$G$  – Fluxo de Radiação na Superfície Horizontal [ $W \cdot m^{-2}$ ]

$G_0$  – Radiação Extraterrestre Instantânea [ $W \cdot m^{-2}$ ]

$G_n$  – Radiação Normal [ $W \cdot m^{-2}$ ]

$G_T$  – Radiação na Superfície Inclinada [ $W \cdot m^{-2}$ ]

$G_{sc}$  – Constante Solar [ $W \cdot m^{-2}$ ]

$H$  – Radiação Diária [ $J \cdot m^{-2}$ ]

$H_0$  – Radiação Extraterrestre Diária na Superfície Horizontal [ $J \cdot m^{-2}$ ]

$H_d$  – Radiação Difusa Horária no Plano Horizontal [ $J \cdot m^{-2}$ ]

$h_c$  – Altura do Canal [m]

$I$  – Radiação Horária Total no Plano Horizontal [ $kJ \cdot m^{-2}$ ]

$I_0$  – Radiação Horária Extraterrestre na Superfície Horizontal [ $kJ \cdot m^{-2}$ ]

$I_b$  – Radiação Direta no Plano Horizontal [ $kJ \cdot m^{-2}$ ]

$I_d$  – Radiação Difusa no Plano Horizontal [ $kJ \cdot m^{-2}$ ]

$I_T$  – Radiação Total na Superfície Inclinada [ $kJ \cdot m^{-2}$ ]

$I_{bT}$  – Radiação Direta na Superfície Inclinada [ $kJ \cdot m^{-2}$ ]

$I_{dT}$  – Radiação Difusa na Superfície Inclinada [ $kJ \cdot m^{-2}$ ]

$k$  – Condutividade Térmica [ $W \cdot m^{-1} \cdot C^{-1}$ ]

$k_T$  – Índice de Claridade [-]

$K_T$  – Índice de Claridade Diário [-]

$\dot{m}$  - Vazão Mássica [ $kg \cdot s^{-1}$ ]

n – Número de um Determinado Dia no Ano [-]

$P_t$  – Coeficiente Global de Perdas [-]

Q – Calor Líquido [J]

$Q_a$  – Calor Absorvido pelo Coletor [J]

$Q_p$  – Calor Perdido pelo Coletor [J]

$Q_u$  – Calor útil [J/s]

$R_b$  – Fator Geométrico: Razão entre  $I_{bT}$  e  $I_b$  [-]

$R_d$  – Razão entre  $I_{dT}$  e  $I_d$  [-]

T – Temperatura [°C]

$T_a$  ,  $t_a$  – Temperatura Ambiente [°C]

$t_p$  – Temperatura da Placa Coletora [°C]

$t_e$  – Temperatura da Água na Entrada do Coletor [°C]

$t_s$  – Temperatura da Água na Saída do Coletor [°C]

t – Tempo [s]

u – Umidade [%]

V – Volume [L]

X – Largura [m]

Y – Comprimento [m]

Z – Espessura [m]

### Letras gregas

$\tau$  - Transmissividade

$\rho$  - Refletividade (albedo)

$\alpha$  - Absortividade

$\phi$  - Latitude

$\beta$  - Inclinação da placa

$\gamma$  - Ângulo Azimutal da Superfície

$\delta$  - Declinação

$\omega$  - Ângulo horário

$\omega_s$  - Ângulo horário do pôr-do-sol

$\theta$  - Ângulo de incidência

$\theta_z$  - Ângulo zenital

$\varphi$  - Ângulo de altitude solar

$\eta$  - Eficiência térmica Instantânea [%]

$\eta_t$  – Eficiência Térmica Horária [%]

$\eta_d$  - Eficiência Térmica Diária [%]

## RESUMO

A civilização moderna caracteriza-se por um grande e desordenado consumo de energia. Sendo o sol uma fonte de energia renovável, não poluente e inesgotável, a exploração de sua luz e calor se torna, sem dúvida, uma das alternativas energéticas mais promissoras da atualidade. Recentemente, estudos têm contribuído no sentido de incentivar o uso domiciliar da energia solar, dentre outros, a fim de substituir o uso da energia convencional. A indústria dos coletores solares vem se aperfeiçoando, com o intuito de obter uma menor perda térmica e, consequentemente, um melhor aproveitamento da energia solar. O uso de material alternativo para a construção das placas coletoras vem sendo amplamente pesquisado. O presente trabalho tem como objetivo avaliar e comparar o desempenho de dois Aquecedores Solares de Baixo Custo (ASBC) que utilizam PVC e Polipropileno como matéria-prima da placa coletora. Foram realizados ensaios passivos (circulação natural) e ativos (circulação forçada por bombas peristálticas), associados a algumas mudanças de configuração na unidade experimental. Tais ensaios foram realizados no principal período de insolação do dia, sendo os valores de temperatura obtidos por um sistema de monitoramento e aquisição de dados em tempo real. As informações obtidas, aliadas ao conhecimento dos valores da radiação solar fornecidos por um centro de pesquisas meteorológicas, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), possibilitaram o cálculo da eficiência dos coletores, sendo esta definida pela razão entre o calor absorvido pelas placas e a radiação total incidente sobre as mesmas. Uma análise das temperaturas máximas atingidas pelos sistemas ‘placa+boiler’, dos gradientes de temperatura alcançados em cada configuração, bem como o conhecimento do tempo e da temperatura obtidos na simulação de banhos que utilizam água proveniente do reservatório de cada coletor alternativo, levam à conclusão de que o uso do coletor de PP, aliado à configuração mais simples estudada (termossifão sem proteção transparente), proporciona água a uma temperatura agradável para uso doméstico. Tal configuração para o ASBC apresenta como vantagens, além do custo acessível à parte da população que ainda não dispõe dessa tecnologia, a facilidade de manuseio e uma contribuição favorável para a ecoeficiência e conservação do meio ambiente.

**PALAVRAS-CHAVES:** polipropileno; radiação solar; energia solar; ASBC; PVC; aquecimento solar.

## ABSTRACT

Modern civilization is characterized by a large and disorganized energy consumption. As the sun is a renewable energy source, clean and inexhaustible, the operation of its light and heat becomes one of the most promising energy alternatives. Recent studies have encouraged the domestic use of solar energy replacing the use of conventional energy. The industry of solar collectors has been improved, in order to get a lower heat loss and thus a better utilization of solar energy. The use of alternative materials for the construction of collecting plates has been widely researched. This study aims to evaluate and compare the performance of two Low Cost Solar Heaters (LCSH) using PVC and polypropylene as raw material of the collector plate. Assays were performed passive (natural circulation) and active (forced circulation by peristaltic pumps) and with some setup changes in the experimental unit. These tests were performed in the main period of sunshine of the day, with the temperature values obtained by a monitoring system and data acquisition in real time. The information obtained, together with the knowledge of the values of solar radiation provided by a meteorological research center, the National Institute of Meteorology (*INMET – Instituto Nacional de Meteorologia*), allowed the calculation of the efficiency of the collectors, the latter being defined by the ratio of heat absorbed by the plates and radiation total incident on them. Analysis of maximum temperatures attained by the systems 'boiler+plate', the temperature gradients achieved in each setting, as well as knowledge of time and temperature obtained in the simulation of baths that use water from the reservoir of each backup catcher, lead to conclusion that the use of collector PP, together with the simplest configuration studied (thermosyphon without protection cover), provides water at a temperature for domestic use. This configuration for the LCSH has the advantages, in addition to the affordability of the population that does not yet have this technology, ease of handling and a positive contribution to eco-efficiency and environmental conservation.

KEYWORDS: polypropylene; solar radiation; solar energy; LCSH; PVC; solar heating.

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

A civilização moderna caracteriza-se por um grande e desordenado consumo de energia (SOUZA, 1994), o que nos leva a concluir que o abastecimento energético mundial é um dos grandes desafios da atualidade.

Para suprir tal necessidade energética, o estudo de alternativas energéticas provenientes dos recursos naturais renováveis vem sendo desenvolvido. Entre essas fontes alternativas de energia, podem-se destacar o estudo das energias: solar, eólica, biomassa e de ondas e marés. Sendo o sol uma fonte de energia renovável, não poluente e inesgotável, a utilização de sua luz e calor se torna, sem dúvida, uma das alternativas energéticas mais promissoras da atualidade. Levando-se em consideração a localização privilegiada do Brasil (entre a linha do Equador e o trópico de Capricórnio), são realizadas pesquisas para o desenvolvimento e aprimoramento de equipamentos que buscam uma maior eficiência na utilização da energia solar. Seu uso proporciona a economia de fontes mais caras de energia e baixo custo financeiro dos equipamentos, dentre outros benefícios.

O objetivo do uso da energia solar, no Brasil, é apenas auxiliar na redução dos gastos provenientes da utilização da energia convencional. A tecnologia do aquecedor solar já vem sendo utilizada no país desde a década de 60, ficando mais ‘conhecida’ nos anos 70, por causa da crise de petróleo. Nos anos 80 houve uma melhora na qualidade dos produtos devida aos primeiros testes de equipamentos e ao surgimento das primeiras normas da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – específicas para o setor. Na década de 90 surgiram, além das novas normas da ABNT, laboratórios especializados e criou-se a ABRAVA – Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionada, Ventilação e Aquecimento (*site Soletrol*).

No entanto, mesmo considerando as inúmeras vantagens do uso de tal tecnologia, de acordo com Departamento Nacional de Aquecimento Solar (DASOL), o Brasil ainda ocupa uma posição fraca no mercado internacional quando comparado com países europeus e asiáticos (AZEVEDO; BESTETI, 2007). Alguns fatores contribuem para a dificuldade de disseminação da tecnologia térmica solar no país (RODRIGUES; MATAJS, 2004):

- Apesar da tecnologia ser vista no país como uma fonte de energia renovável, ela apresenta altos custos iniciais aos consumidores (~ US\$ 100/m<sup>2</sup>), se comparado com o chuveiro elétrico (maior competidor da tecnologia de aquecimento solar de água);
- Os ASA – Aquecedores Solares de Água – precisam ganhar a confiança dos consumidores, que por sua vez ainda vêem os chuveiros como uma tecnologia mais acessível (preços entre R\$ 20,00 a R\$ 300,00) e provada para o aquecimento de água, apesar do alto consumo de energia do equipamento;
- Existência de tubulações e infra-estrutura elétrica limitada à instalação de chuveiros na maioria das residências brasileiras, sem a dupla tubulação necessária à distribuição de água quente gerada pelos ASA, padrão que tem sido reforçado por códigos de obras municipais adaptados aos chuveiros;
- Pelo fato dos ASA serem considerados caros e difíceis de manejá-los, os arquitetos não estabeleceram um repertório de possibilidades estéticas de incorporação dos coletores, os projetistas têm dificuldades em acessar as informações corretas sobre a insolação, os encanadores cometem erros de instalação, etc.

No Brasil tem sido realizados estudos, como os de LIMA; PRADO (2003), ARRUDA (2004), RÍSPOLI (2008) e SIQUEIRA (2009), cujos objetivos são, basicamente, avaliar projetos de aquecedores solares alternativos (seja na mudança da configuração de montagem, no uso de material de baixo custo na fabricação do sistema e na adequação do sistema às condições locais durante a instalação, por exemplo) que apresentem desempenhos térmicos semelhantes aos dos aquecedores solares convencionais, porém com um custo reduzido para o consumidor.

Em 2007, o custo para aquisição do aquecedor solar variava entre R\$ 1,5 mil e R\$ 3 mil para uma família com quatro pessoas. Para contornar o problema do alto custo, alguns bancos, como a Caixa Econômica Federal, passaram a oferecer linhas de crédito com condições especiais para facilitar as vendas de aquecedores.

Atualmente, segundo dados da ABRAVA, o Brasil conta com uma área total acumulada de 5.245.085 m<sup>2</sup> de coletores solares, o que equivale a uma capacidade instalada

de 3.671,5 MW de energia solar térmica. De 2001 a 2009, quase 4 milhões de m<sup>2</sup> de coletores foram acrescidos ao parque nacional.

O interesse em se realizar estudos nesta área tem como justificativas:

- A produção de calor com menor impacto ambiental desde a fabricação até a operação do sistema, sendo observadas para isso a conservação dos recursos hídricos, a redução da emissão de CO<sub>2</sub> e a consideração de aplicação de matérias-primas recicláveis;
- Sistema mais econômico (menor custo de fabricação e facilidade de aquisição), porém durável e com pouca expectativa de falha durante a operação;
- Utilização da luz solar como fonte de energia renovável, segura e gratuita;
- Aproveitamento das condições adequadas de insolação no Brasil (mais especificamente, no Município de Uberlândia);
- Possibilidade da utilização de materiais alternativos e reciclados na construção da placa coletora, *boiler* e acessórios;
- Redução do consumo de energia elétrica e direcionamento deste capital para outras despesas do orçamento familiar;
- Colaboração com os programas de divulgação já existentes sobre aquecedores de baixo custo;
- Conscientização das pessoas acerca dos benefícios trazidos pelos aquecedores solares a fim de gerar novos agentes multiplicadores no Estado de Minas Gerais;
- Desenvolvimento de tecnologia dentro da cidade e treinamento de pessoas (professores, graduandos, mestrandos, técnicos, etc.).

## **Objetivos**

O objetivo deste trabalho é avaliar a eficiência de materiais alternativos (a saber: PVC e Polipropileno) na construção da placa coletora de energia solar, que viabilize economicamente o uso do aquecimento solar da água pela parte da população brasileira que ainda não dispõe desta tecnologia.

Para isso, alguns pontos de estudo são ressaltados:

- i. Estudo da dinâmica de um aquecedor solar de baixo custo (eficiência, gradiente de temperatura, taxas de escoamento pelo coletor, perturbações causadas pela entrada de fluido frio no *boiler*; perturbações causadas pela retirada de fluido quente do *boiler*);
- ii. Estudo da dinâmica do aquecedor solar de baixo custo em função da utilização de materiais alternativos para a placa coletora, tais como PVC e polipropileno;
- iii. Estudo da dinâmica do aquecedor solar de baixo custo em função da inserção de uma proteção de material transparente sobre a placa coletora;
- iv. Estudo da dinâmica do aquecedor solar de baixo custo em função da circulação de fluido de maneira natural (termossifão) e forçada;
- v. Estudo da dinâmica do aquecedor solar de baixo custo na forma batelada e contínua;
- vi. Aplicação da metodologia do tratamento geoestatístico referente às taxas de irradiação e velocidade dos ventos disponíveis para a cidade de Uberlândia, necessários à execução experimental e estudos teóricos dos aquecedores solares de baixo custo;
- vii. Cálculo do tempo de residência do fluido nos coletores a fim de comparar os efeitos da radiação solar, uma vez que as placas coletoras possuem volumes distintos;
- viii. Aprimoramento dos coletores de energia solar de baixo custo, tornando-os mais eficientes e acessíveis às famílias de menor renda.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A energia proveniente do sol tem sido a fonte de praticamente toda energia consumida pelo homem. (SOUZA, 1994). Pode-se citar como exemplo de energia que não têm como fonte a energia solar, os combustíveis utilizados em fissão e fusão nucleares, e também parte das energias provenientes das marés.

Sabe-se que desde os primórdios da humanidade, o homem derivava seus recursos energéticos, direta ou indiretamente, quase que exclusivamente do sol. Podemos citar como exemplo o uso geral da madeira para aquecimento e o uso de animais para transporte, sendo estas duas espécies de energia proporcionadas (a primeira diretamente e a segunda, indiretamente) pela fotossíntese (PALZ, 2002).

As biomassas, o ciclo hidrológico, a circulação atmosférica têm como principal fonte motora a energia solar, assim como o petróleo, o carvão de pedra, o xisto betuminoso, a turfa, a linhita e o gás natural são constituídos de resíduos de plantas e animais fossilizados anaerobicamente, sendo que estes, originariamente, usaram a energia solar (fotossíntese) antes de serem acumulados sob a presente forma. A Figura 2.1 esquematiza as diversas formas de utilização da energia solar pelo homem.

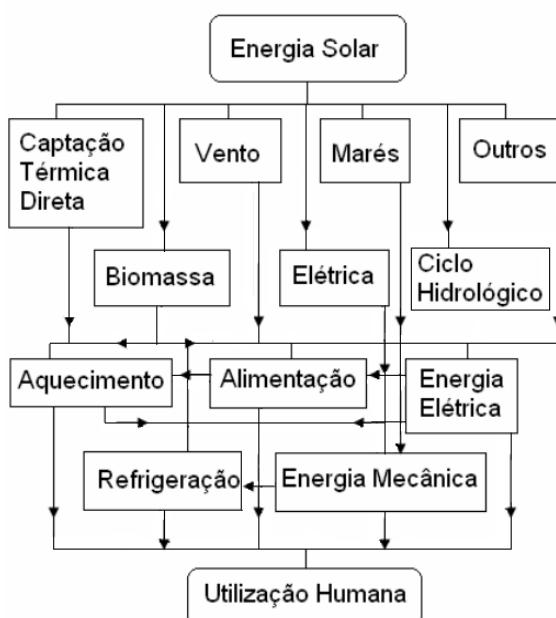


Figura 2.1 – Esquema da Utilização da Energia Solar (fonte: SOUZA, 1994).

A energia do sol anualmente captada pela terra representa cinco a dez vezes todas as reservas de combustíveis conhecidas, inclusive o urânio. A energia solar é uma energia limpa com propriedade bactericida em virtude da presença dos raios ultravioletas (BEZERRA, 1998).

O presente trabalho analisa diferentes sistemas de coleta de energia solar. Nos tópicos a seguir serão apresentados os fundamentos teóricos utilizados para a análise da radiação recebida, bem como as equações utilizadas para avaliação e abordagem dos sistemas de energia solar propriamente ditos.

## 2.1 ESTUDO DA RADIAÇÃO SOLAR

A estrutura e as características do sol determinam a natureza da energia que irradia pelo espaço (DUFFIE; BECKMAN, 1980).

A radiação solar é de natureza direta (proveniente do disco solar para os respectivos dias de insolação e que não sofre interação com a atmosfera terrestre), difusa (oriunda da atmosfera) e refletida. A soma destas parcelas de radiação é a radiação global. A Figura 2.2 mostra o esquema da decomposição da radiação solar pela atmosfera.

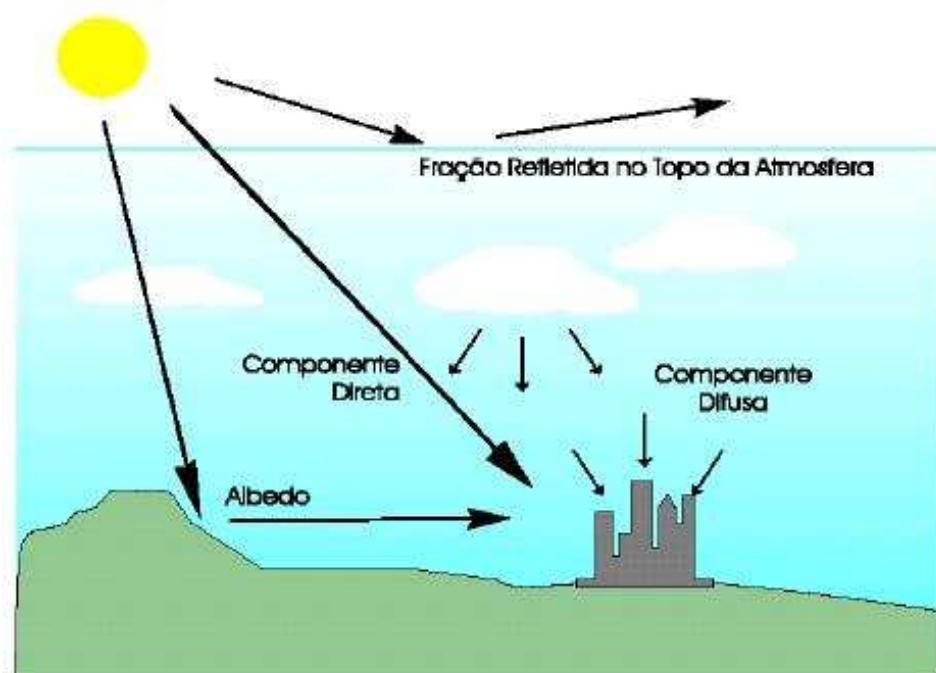


Figura 2.2 – Componentes da radiação solar incidente na superfície terrestre (fonte: OLIVEIRA, 1997; apud RÍSPOLI, 2008).

OLIVEIRA (1997) apud RÍSPOLI (2008) define a componente refletida, ou albedo, como constituída pela parcela de radiação que é refletida ao atingir o solo. LIU; JORDAN (1960), apud SIQUEIRA (2009) sugeriram um valor de 0,2 para o albedo quando não há neve no meio circundante. RÍSPOLI (2008) disponibilizou alguns valores para a refletividade do solo (ou albedo), que podem ser vistos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Valores do Albedo para Diferentes Tipos de Superfície (fonte: RÍSPOLI, 2008).

Tipos de Superfície	Albedo (%)
Solo negro e seco	14
Solo nú	7 a 20
Areia	15 a 25
Florestas	3 a 10
Campos naturais	3 a 15
Campos de cultivo seco	20 a 25
Gramados	15 a 30
Neve recém caída	80
Neve caída há semanas	50 a 70
Água com altura solar > 40°	2 a 4
Água com altura solar < 30°	6 a 40
Cidades	4 a 18

A Figura 2.3 mostra o esquema da relação geométrica sol-terra. Observa-se que a distância entre o Sol e a Terra varia de 1,7% por causa da excentricidade da órbita da Terra. À distância média entre sol-terra de uma unidade astronômica ( $1,495 \times 10^{11}$ m), o sol subtende um ângulo de 32' (DUFFIE; BECKMAN, 1980).

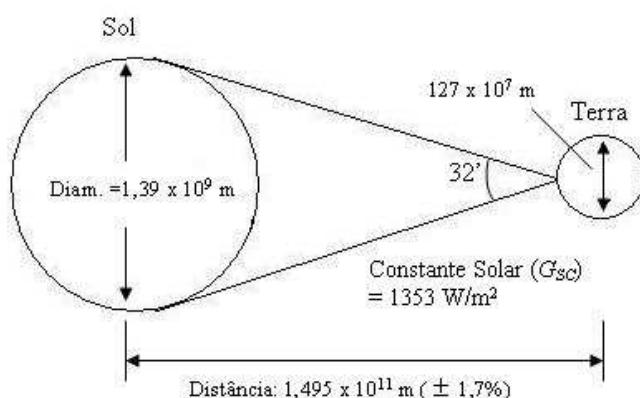


Figura 2.3 – Esquema da relação geométrica sol-terra (fonte: DUFFIE; BECKMAN, 1980).

Sabe-se que o fluxo de energia solar que chega até a atmosfera terrestre varia com o inverso do quadrado da distância até o centro do sol (analisando-se a partir da fotosfera), sendo, portanto, bem menor que sua intensidade nas proximidades do sol (RÍSPOLI, 2008).

### 2.1.1 A CONSTANTE SOLAR

A constante solar ( $G_{SC}$ ) pode ser definida como o fluxo de radiação solar que chega ao topo da atmosfera terrestre e é recebido em uma superfície perpendicular à direção do sol. Ou seja, é a quantidade de energia radiante do sol que incide perpendicularmente a uma unidade de superfície na ausência de partículas (topo da atmosfera) a uma distância média Terra-sol. Vários valores já foram sugeridos para a constante solar ( $G_{SC}$ ), sendo que, para sua determinação, medições foram feitas na superfície da Terra e seus valores foram extrapolados para fora da atmosfera. De acordo com SIQUEIRA (2009), o valor de  $G_{SC}$  é em média 1353 W/m<sup>2</sup>, conforme NBR 10.184 ('Coletores Solares Planos para Líquidos' - Determinação do Rendimento Térmico, 1983). Com o avanço da tecnologia, o uso de balões meteorológicos e de satélites permite a proposta de valores mais precisos para  $G_{SC}$ , sendo considerado por DUFFIE; BECKMAN (1991) apud RÍSPOLI (2008) o valor mais específico de 1367 W/m<sup>2</sup> (RÍSPOLI, 2008).

## 2.2 RELAÇÕES ANGULARES SOL-TERRA

As relações geométricas para se determinar a posição de um ‘ponto’ na superfície da terra em relação aos raios solares serão apresentadas a seguir. Para melhor entendê-las, torna-se necessário o conhecimento de algumas definições importantes. De acordo com SIQUEIRA (2009), tem-se que:

- Latitude ( $\phi$ ) – localização angular norte ou sul do Equador, hemisfério norte positivo ( $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ ).
- Inclinação do coletor solar ( $\beta$ ) – ângulo entre a horizontal e o plano da superfície em questão ( $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ ).
- Ângulo de Incidência ( $\theta$ ) – ângulo entre a normal à superfície inclinada e a radiação direta.
- Ângulo Horário ( $\omega$ ) – deslocamento angular do sol para leste ou oeste do meridiano local, devido à rotação da Terra no seu eixo em  $15^\circ$  por hora; de

manhã é negativo e à tarde, positivo. Os ângulos horários limites que compreendem o período de integração são:  $\omega_1$  e  $\omega_2$ .

- Ângulo Zenital ( $\theta_z$ ) – ângulo formado entre os raios solares e a vertical.
- Altura Solar ( $\phi$ ) – ângulo formado entre os raios solares e sua projeção no plano horizontal.
- Azimute do Plano Inclinado ( $\gamma$ ) – desvio da projeção no plano horizontal da normal à superfície em relação ao meridiano local; no sul é zero; para leste é negativo e para oeste é positivo ( $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ ).
- Declinação ( $\delta$ ) – posição angular do sol no meio dia solar em relação ao plano do Equador, sendo seu valor positivo para o hemisfério norte ( $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$ ). De acordo com DUFFIE; BECKMAN (1980), através da Equação de Cooper (1969) encontra-se o valor da declinação.

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left( 360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (2.1)$$

na qual ‘n’ representa o dia do ano e pode ser convenientemente obtido através da Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Conversão de Data para um Número Ordinal Compreendido entre 1 e 365, Tomando por Base o Dia Médio de Cada Mês (fonte: DUFFIE E BECKMAN, 1980).

Mês	<i>Dia Específico do Mês</i>	Data	‘n’ (dia do ano)	Declinação ( $\delta$ )
Janeiro	$i$	17	17	-20,9
Fevereiro	$31 + i$	16	47	-13,0
Março	$59 + i$	16	75	-2,4
Abril	$90 + i$	15	105	9,4
Maio	$120 + i$	15	135	18,8
Junho	$151 + i$	11	162	23,1
Julho	$181 + i$	17	198	21,2
Agosto	$212 + i$	16	228	13,5
Setembro	$243 + i$	15	258	2,2
Outubro	$273 + i$	15	288	-9,6
Novembro	$304 + i$	14	318	-18,9
Dezembro	$334 + i$	10	344	-23,0

A Figura 2.4 mostra a abóbada celeste e o movimento aparente do sol em torno da Terra, ilustrando os valores extremos para a declinação, calculados através da Equação de Cooper.

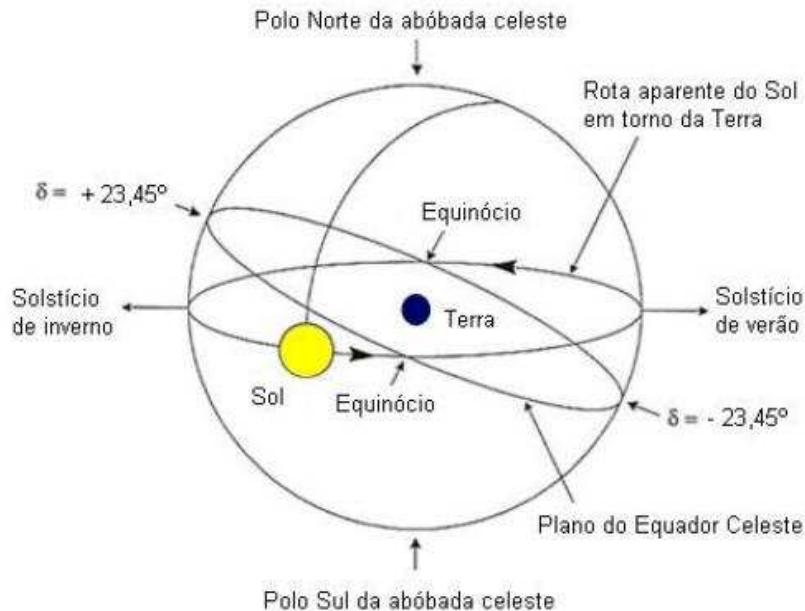


Figura 2.4 – Posição aparente do sol em torno da Terra (fonte: RÍSPOLI, 2008).

A altura solar, o azimute da superfície, o ângulo zenital e a inclinação são mostrados na Figura 2.5.

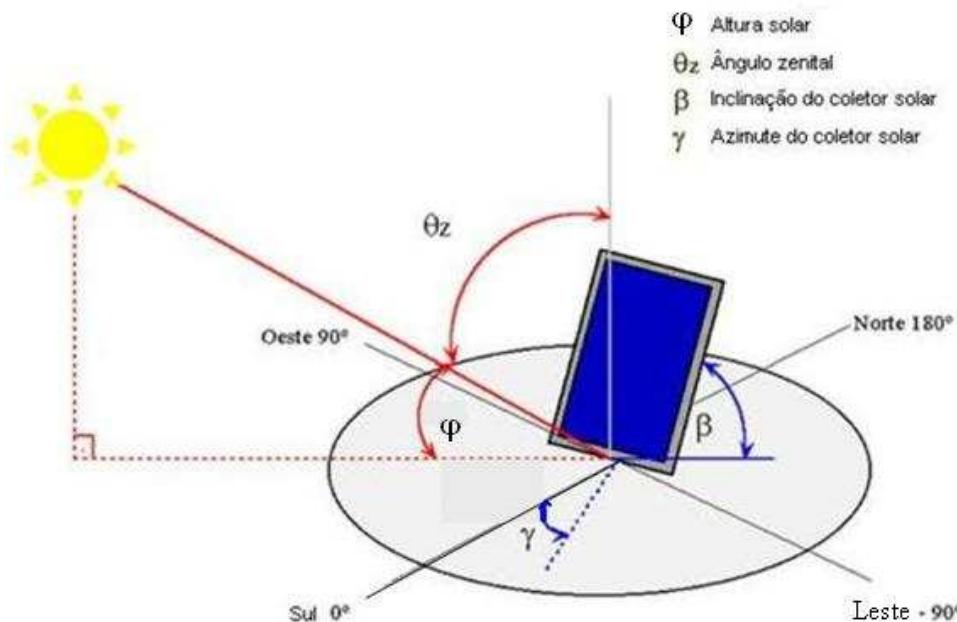


Figura 2.5 – Ângulo zenital, altura solar, inclinação e azimute do coletor solar (fonte: RÍSPOLI, 2008).

A Figura 2.6 mostra o ângulo zenital para uma superfície horizontal e o ângulo de incidência para um plano inclinado.

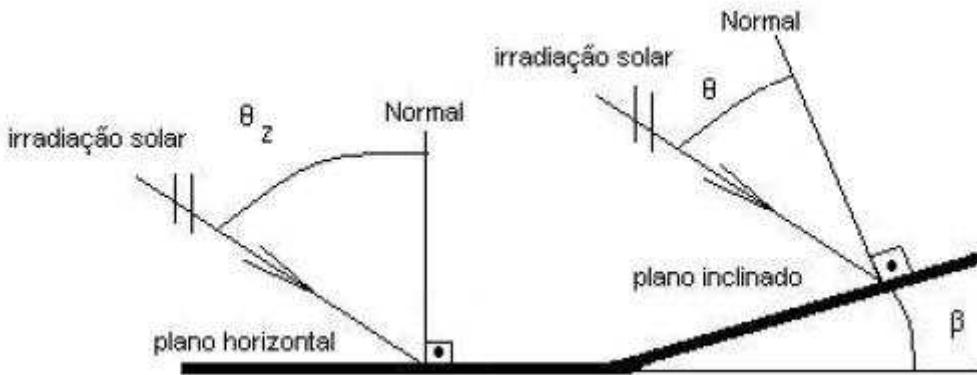


Figura 2.6 – Ângulo zenital para uma superfície horizontal e ângulo de incidência para um plano inclinado (fonte: RÍSPOLI, 2008).

De acordo com as definições feitas no início desta seção e com a Figura 2.5, pode-se observar que a soma entre o ângulo zenital solar e o ângulo de altitude solar retorna um valor de 90°, como se vê na Equação 2.2.

$$\varphi = 90^\circ - \theta_z \quad (2.2)$$

As relações entre os ângulos que compõem a geometria ‘SOL-TERRA’, apresentadas nesta seção, foram propostas por DUFFIE; BECKMAN (1980) e levam ao cálculo da radiação incidente no plano inclinado.

Visto que os valores medidos e disponibilizados pelos centros de pesquisas meteorológicas dizem respeito à radiação solar incidente num plano horizontal, o equacionamento a seguir permite a conversão desses valores para análise em um plano disposto a uma inclinação  $\beta$ .

O ângulo de incidência da radiação solar direta está relacionado aos outros ângulos da geometria solar de acordo com a Equação 2.3.

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \phi \cos \beta - \operatorname{sen} \delta \cos \phi \operatorname{sen} \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \\ & \cos \delta \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \operatorname{sen} \beta \operatorname{sen} \gamma \operatorname{sen} \omega \end{aligned} \quad (2.3)$$

A orientação ótima em relação ao norte ou sul para coletores planos inclinados implica em valores de 0° ou 180° para o ângulo azimutal da superfície inclinada ( $\gamma$ ), sendo, portanto, nulo o último termo da Equação 2.3 para esta situação. Para o caso do coletor

disposto em superfície horizontal ( $\beta = 0^\circ$ ), tem-se que o ângulo de incidência ( $\theta$ ) torna-se o ângulo zenital solar ( $\theta_z$ ), simplificando a Equação 2.3 conforme está disposto na Equação 2.4.

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi \quad (2.4)$$

A Equação 2.4 pode ser resolvida para o ângulo horário do pôr-do-sol,  $\omega_s$ , quando o ângulo zenital solar ( $\theta_z$ ) é nulo, conforme mostram as Equações 2.5 e 2.6.

$$\cos \omega_s = -\frac{\sin \phi \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta} \quad (2.5)$$

$$\cos \omega_s = -\tan \phi \tan \delta \quad (2.6)$$

Para efeitos de *design* de processos solares e cálculos de desempenho, frequentemente é necessário calcular a radiação horária sobre uma superfície inclinada de um coletor usando medições ou estimativas de radiação solar na superfície horizontal.

A Figura 2.7 indica o ângulo de radiação incidente na superfície inclinada e no plano horizontal.

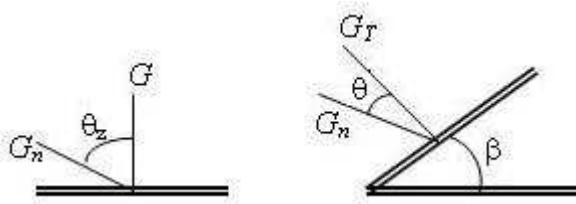


Figura 2.7 – Radiação nas superfícies horizontal e inclinada (fonte: DUFFIE; BECKMAN, 1980).

O fator geométrico  $R_b$  é a razão entre a radiação na superfície inclinada pela radiação na superfície horizontal, a qualquer momento, conforme mostra a Equação 2.7, na qual  $G_n$  indica a radiação normal, conforme visto na Figura 2.7.

$$R_b = \frac{G_T}{G} = \frac{G_n \cos \theta}{G_n \cos \theta_z} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} = \frac{I_T}{I} \quad (2.7)$$

O símbolo ‘ $G$ ’ é usado para denotar a radiação em  $W/m^2$ , enquanto que o símbolo ‘ $I$ ’ é usado para indicar uma quantidade de energia para períodos maiores ou iguais a uma hora, podendo também ser considerado como taxa média horária de radiação, sendo expressado em  $J/m^2$ .

Algumas relações úteis para o ângulo de incidência em superfícies inclinadas, para o norte ou sul, podem ser derivadas do fato de que as superfícies com inclinação  $\beta$ , para o norte ou sul, têm a mesma relação angular de radiação que uma superfície horizontal a uma latitude ‘genérica’ de  $(\phi - \beta)$ . Nesse caso, a Equação 2.4 pode ser reescrita como se vê na Equação 2.8 abaixo.

$$\cos \theta = \cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta \quad (2.8)$$

O ângulo azimutal comum para coletores planos é de  $0^\circ$  (no Hemisfério Norte) ou  $180^\circ$  no (Hemisfério Sul). Nesse caso, a Equação 2.7 pode ser reescrita da maneira como se pode observar na Equação 2.9 (considerando-se  $\gamma = 0^\circ$ ) e na Equação 2.10 (para  $\gamma = 180^\circ$ ).

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta} \quad (2.9)$$

$$R_b = \frac{\cos(\phi + \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi + \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta} \quad (2.10)$$

### 2.3 RADIAÇÃO EXTRATERRESTRE NA SUPERFÍCIE HORIZONTAL

A maioria dos cálculos de radiação é feita usando níveis de radiação normalizados, ou seja, níveis teóricos de uma possível radiação avaliada para o caso da inexistência de atmosfera. Para isso, é necessário o uso de métodos para se calcular a radiação extraterrestre.

DUFFIE; BECKMAN (1980) afirmam que em algum ponto, em algum instante, a radiação solar incidente fora da atmosfera, num plano horizontal, é dada pela Equação 2.11.

$$G_0 = G_{SC} \left[ 1 + 0,033 \cos \left( \frac{360n}{365} \right) \right] \cos \theta_z \quad (2.11)$$

Combinando-se a Equação 2.11 com a Equação 2.4,  $G_0$  (radiação extraterrestre incidente no plano horizontal, dada em  $W/m^2$ ) para uma superfície horizontal, em qualquer instante entre o nascer e o pôr do sol é dada pela Equação 2.12.

$$G_0 = G_{SC} \left[ 1 + 0,033 \cos \left( \frac{360n}{365} \right) \right] (\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega) \quad (2.12)$$

A radiação solar extraterrestre diária na superfície horizontal,  $H_0$ , é obtida a partir da integração da Equação 2.12 para o período de insolação de um dia (desde o nascer até o pôr

do sol), como se vê na Equação 2.13, na qual  $\omega_s$  é o ângulo horário do pôr do sol (de acordo com a Equação 2.5).  $H_0$  é dado em  $J/m^2$ .

$$H_0 = \frac{24 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left[ 1 + 0,033 \cos\left(\frac{360 n}{365}\right) \right] \times \\ \left[ \cos \phi \cos \delta \operatorname{sen} \omega_s + \frac{2\pi\omega_s}{360} \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \delta \right] \quad (2.13)$$

Também é de interesse o cálculo da radiação solar extraterrestre no plano horizontal para o período de uma hora,  $I_0$ , dado em  $MJ/m^2$  ou  $kJ/m^2$ , de acordo com a Equação 2.14, na qual  $\omega_1$  e  $\omega_2$  são os ângulos limites que definem o período de uma hora.

$$I_0 = \frac{12 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left[ 1 + 0,033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right] \times \\ \left[ \cos \phi \cos \delta (\operatorname{sen} \omega_2 - \operatorname{sen} \omega_1) + \frac{2\pi(\omega_2 - \omega_1)}{360} \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \delta \right] \quad (2.14)$$

## 2.4 ÍNDICE DE CLARIDADE ATMOSFÉRICA

A relação entre a radiação total horária no plano horizontal ( $I$ ) e a radiação extraterrestre horária no plano horizontal ( $I_0$ ) determina o valor do índice de claridade atmosférica (ou transparência) horário ( $k_T$ ), conforme mostra a Equação 2.15.

$$k_T = \frac{I}{I_0} \quad (2.15)$$

O índice de claridade diário ( $K_T$ ) é dado pela Equação 2.16, na qual  $H$  representa a medida total de radiação solar na superfície inclinada em um dia e  $H_0$  é a radiação solar extraterrestre na superfície inclinada no mesmo dia.

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (2.16)$$

A Figura 2.8 mostra um exemplo da freqüência de ocorrência de dias com vários índices de claridade e a freqüência acumulada de ocorrência para esses dias.

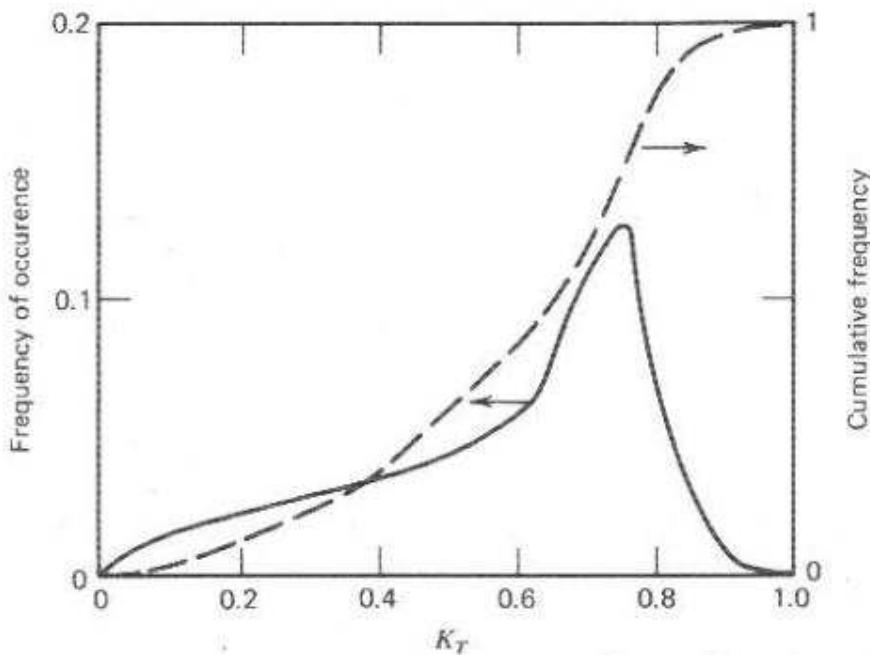


Figura 2.8 – Um exemplo da freqüência de ocorrência de dias com vários índices de claridade e a freqüência acumulada desses dias (fonte: DUFFIE; BECKMAN, 1980).

## 2.5 RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE NO PLANO INCLINADO

Para estimar a radiação incidente no plano inclinado, é necessário primeiramente dimensionar a componente difusa da radiação.

As inequações de Orgill e Hollands têm sido largamente empregadas para o cálculo da radiação difusa horária instantânea, de acordo com as Equações 2.17, 2.18 e 2.19 (DUFFIE; BECKMAN, 1980), na qual  $I_d$  [ $\text{kJ}/\text{m}^2$ ] representa a parcela difusa da radiação solar em uma superfície horizontal,  $I$  [ $\text{kJ}/\text{m}^2$ ] é a radiação solar instantânea na superfície horizontal num dia e horário solar específico e  $k_T$  é o índice de claridade atmosférica instantânea.

- Para  $k_T < 0,35$  tem-se:

$$\frac{I_d}{I} = 1,0 - 0,249k_T \quad (2.17)$$

- Para  $0,35 < k_T < 0,75$  tem-se:

$$\frac{I_d}{I} = 1,557 - 1,84k_T \quad (2.18)$$

- Para  $k_T > 0,75$  tem-se:

$$\frac{I_d}{I} = 0,177 \quad (2.19)$$

Outra forma de relacionar a claridade atmosférica e a radiação difusa é apresentada através das correlações de Collares, Pereira e Rabl, conforme as Equações 2.20, 2.21, 2.22 e 2.23, nas quais  $H_d$  [ $J/m^2$ ] é a radiação solar difusa diária incidente na superfície horizontal,  $H$  [ $J/m^2$ ] é a radiação solar diária no plano horizontal da superfície terrestre e  $K_T$  é o índice de transparência atmosférica (claridade) médio de um dia.

- Para  $K_T \leq 0,17$  tem-se:

$$\frac{H_d}{H} = 0,99 \quad (2.20)$$

- Para  $0,17 < K_T < 0,75$  tem-se:

$$\frac{H_d}{H} = 1,188 - 2,272K_T + 9,473K_T^2 - 21,865K_T^3 + 14,648K_T^4 \quad (2.21)$$

- Para  $0,75 < K_T < 0,80$  tem-se:

$$\frac{H_d}{H} = -0,54K_T + 0,632 \quad (2.22)$$

- Para  $K_T \geq 0,80$  tem-se:

$$\frac{H_d}{H} = 0,2 \quad (2.23)$$

REINDL et al. (1990) apud SIQUEIRA (2009) desenvolveram um método para estimar a fração de radiação horária no plano horizontal da superfície terrestre que relaciona o ângulo de altitude solar ( $\phi$ ), a umidade relativa do ar ( $u$ ) e a temperatura ambiente ( $T_a$ ) com o índice de claridade horário ( $k_T$ ), como se vê nas Equações 2.24, 2.25 e 2.26 a seguir, nas quais  $I_d$  é a radiação difusa horária incidente na superfície horizontal e  $I$  é a radiação horária total incidente no plano horizontal da superfície terrestre.

- Para  $0 < k_T < 0,3$ ; sendo respeitado o intervalo de  $I_d/I < 1$ :

$$\frac{I_d}{I} = 1,0 - 0,232k_T + 0,0239\operatorname{sen}(\phi) - 0,000682T_a + 0,0195\left(\frac{u}{100}\right) \quad (2.24)$$

- Para  $0,3 < k_T < 0,78$ ; sendo respeitado o intervalo de  $0,1 < I_d/I < 0,97$ :

$$\frac{I_d}{I} = 1,329 - 1,716k_T + 0,267\operatorname{sen}(\phi) - 0,00357T_a + 0,106\left(\frac{u}{100}\right) \quad (2.25)$$

- Para  $k_T > 0,78$ ; sendo respeita do intervalo de  $I_d/I < 0,1$ :

$$\frac{I_d}{I} = 0,426k_T - 0,256\operatorname{sen}(\varphi) - 0,00349T_a + 0,0734\left(\frac{u}{100}\right) \quad (2.26)$$

Os coletores solares planos absorvem as duas componentes (direta e difusa) da radiação solar. Para usar os dados de radiação total no plano horizontal para estimar a radiação incidente num coletor solar fixo, disposto a uma inclinação  $\beta$  em relação a horizontal, é necessário se conhecer o valor de  $R$ , que é definido como a razão entre a radiação total na superfície inclinada ( $I_T$ ) e a radiação total no plano horizontal ( $I$ ), como se pode observar através das Equações 2.27 e 2.28.

$$R = \frac{I_T}{I} \quad (2.27)$$

$$R = \frac{I_b}{I} R_b + \frac{I_d}{I} R_d \quad (2.28)$$

O valor de  $R$  pode também ser expresso em termos das contribuições das radiações direta e difusa, como se vê, respectivamente, nas Equações 2.29 e 2.30, nas quais  $R_b$  é a razão entre a radiação direta na superfície inclinada ( $I_{bT}$ ) e a radiação direta no plano horizontal ( $I_b$ ) e,  $R_d$  é a razão entre a radiação difusa na superfície inclinada ( $I_{dT}$ ) e a radiação difusa incidente no plano horizontal da superfície ( $I_d$ ).

$$R_b = \frac{I_{bT}}{I_b} \quad (2.29)$$

$$R_d = \frac{I_{dT}}{I_d} \quad (2.30)$$

A correção angular para a componente direta da radiação pode ser calculada pela Equação 2.7, através da qual  $R_b$  é expresso em função do ângulo de incidência e do ângulo zenital solar, como se pode observar na Equação 2.31 a seguir.

$$R_b = \frac{I_{bT}}{I_b} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (2.31)$$

A correção para a componente difusa da radiação solar depende de sua distribuição por todo o céu, que, geralmente, não é bem conhecida. Essa distribuição depende do tipo,

extensão e localização das nuvens e, também, da distribuição espacial e montante de outros componentes atmosféricos que dispersam a radiação solar. Além disso, parte da radiação solar pode ser refletida pela superfície. Então, geralmente, assumem-se duas simplificações como uma base para a correção angular da radiação difusa (DUFFIE; BECKMAN, 1980).

Primeiramente, pode-se assumir que a maior parte da radiação difusa vem aparentemente de perto do sol, ou seja, o ‘espalhamento’ da radiação solar ocorre principal e diretamente na direção da superfície da Terra, sendo que, nesse caso, o fator de correção angular aplicado para a componente difusa é o mesmo usado para a componente direta. Assim, toda a radiação incidente na superfície horizontal é tratada como se fosse radiação direta, o que se vê pela Equação 2.32. Essa aproximação é adequada para dias bastante claros.

$$R = R_b \quad (2.32)$$

Em seguida, pode-se assumir que a componente difusa é uniformemente distribuída em todo o céu. Se for assumido que o solo ou outras superfícies refletem a radiação para uma superfície inclinada, sendo consideradas fontes de radiação solar difusa, equivalentes ao céu, então a superfície irá receber a mesma radiação difusa, não importando qual a sua orientação. Partindo deste pressuposto,  $R_d$  será sempre unitária, sendo a radiação horária total incidente sobre a superfície inclinada dada pela Equação 2.33. Esta é uma aproximação razoável para o caso de uma cobertura uniforme de nuvens no céu, ou quando este está nebuloso.

$$I_T = I_b R_b + I_d \quad (2.33)$$

Considerando-se dias nos quais as aproximações apresentadas não são válidas, a razão entre a radiação total na superfície inclinada e a radiação total no plano horizontal da superfície terrestre é dada pela Equação 2.34.

$$R = \frac{I_b}{I} R_b + \frac{I_d}{I} \left( \frac{1+\cos\beta}{2} \right) + \rho \left( \frac{1-\cos\beta}{2} \right) \quad (2.34)$$

Conseqüentemente, a radiação total horária incidente sobre a superfície inclinada é calculada de acordo com a Equação 2.35, na qual  $[(1+\cos\beta)/2]$  é o fator de forma do coletor de inclinação  $\beta$  com o céu e  $[(1-\cos\beta)/2]$  é o fator de forma do coletor com a superfície circundante. Para o caso particular deste trabalho,  $\beta$  corresponde ao valor de 30°.

$$I_T = I_b R_b + I_d \left( \frac{1+\cos\beta}{2} \right) + (I_b + I_d) \rho \left( \frac{1-\cos\beta}{2} \right) \quad (2.35)$$

A Equação 2.35 mostra que a radiação solar horária total sobre a superfície inclinada é a contribuição da radiação direta ( $I_b$ ), da radiação solar difusa do céu ( $I_d$ ) e da radiação solar difusamente refletida pelo solo, o albedo ou refletividade do solo, indicado por  $\rho$ .

## 2.6 ESTUDO TEÓRICO DOS COLETORES

O balanço térmico de um coletor mostra a relação da energia por ele absorvida com a energia perdida, de acordo com a Equação 2.36.

$$Q = Q_a - Q_p \quad (2.36)$$

na qual,  $Q$  é o calor líquido entregue pelo coletor ao fluido de trabalho;  $Q_a$  é o calor absorvido pelo coletor e  $Q_p$  é o calor perdido pelo coletor.

O calor  $Q_a$  é função da energia incidente ( $I_T$ ), da área útil do coletor ( $A_c$ ) e do fator ( $\lambda\alpha$ ), chamado de ‘eficiência ótica’, que representa o produto transmissividade-absortividade da cobertura transparente e placa absorvedora (superfície preto fosco). A Equação 2.37 mostra tal relação:

$$Q_a = I_T A_c \lambda\alpha \quad (2.37)$$

O calor  $Q_p$  é representado por um coeficiente global de perdas ( $P_t$ ), como mostra a Equação 2.38, na qual  $t_p$  e  $t_a$  são, respectivamente, a temperatura da placa coletora e a temperatura ambiente.

$$Q_p = P_t A_c (t_p - t_a) \quad (2.38)$$

Substituindo as Equações 2.37 e 2.38 na equação 2.36, tem-se:

$$Q = I_T A_c \lambda\alpha - P_t A_c (t_p - t_a) \quad (2.39)$$

Expressando na Equação 2.39, o calor por unidade de área, tem-se a Equação 2.40, também chamada de Equação de *Hottel Whillier*.

$$q = I_T \lambda\alpha - P_t (t_p - t_a) \quad (2.40)$$

O calor sensível transferido à água será:

$$\Delta T = t_s - t_e \quad (2.41)$$

A quantidade de calor necessária para transferir à água uma temperatura correspondente a  $\Delta T$ , será dada pela Equação 2.42, na qual  $t_e$  é a temperatura da água na entrada do coletor,  $t_s$  é a temperatura da água na saída do coletor,  $\dot{m}$  é a vazão mássica [ $kg/h$ ] e  $c_p$  é o calor específico da água [ $J/kg^{\circ}C$ ].

$$Q_u = \dot{m}c_p\Delta T = \dot{m}c_p(t_s - t_e) \quad (2.42)$$

A eficiência térmica de um coletor é definida como:

$$\eta = \frac{Q_u}{I_T} \quad (2.43)$$

Porém, as condições atmosféricas e a posição do sol no horizonte em virtude de seu movimento aparente, azimutal e declinatório são fatores que submetem a radiação solar a variações, e, consequentemente, exercem influência sobre o coletor solar. Por esse motivo, a eficiência de um coletor pode ser instantânea, horária ou diária, como é possível observar através das Equações 2.44, 2.45 e 2.46, a seguir, nas quais  $Q_u$  é a energia total útil transferida ao fluido de trabalho,  $I_T$  é toda a incidência solar que chega ao absorvedor e  $A_c$  é a área útil do coletor exposta à radiação (BEZERRA, 1998).

- Eficiência instantânea:

$$\eta = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \frac{(Q_u)dt}{A_c}}{\int_{t_1}^{t_2} I_T dt} \quad (2.44)$$

- Eficiência para um determinado tempo  $t$ :

$$\eta_t = \frac{Q_u}{A_c I_T} \quad (2.45)$$

- Eficiência no decorrer de um dia:

$$\eta_d = \frac{\sum Q_u}{A_c \sum I_T} \quad (2.46)$$

Substituindo-se o valor de ‘ $q$ ’, dado pela Equação 2.40, na Equação 2.43, temos, na Equação 2.47, o valor da eficiência em função do fator ( $\lambda\alpha$ ) e do coeficiente global de perdas.

$$\eta = \lambda\alpha - \frac{P_t(t_p - t_a)}{I_T} \quad (2.47)$$

Para se obter o desempenho efetivo do coletor é necessário se levar em consideração o total de radiação incidente no coletor durante o tempo  $T$  mais longo de operação, no qual se observem as variações na intensidade da radiação, temperatura ambiente, temperatura do coletor, etc (BEZERRA, 1998). Sendo assim, a Equação 2.40 pode ser reescrita da maneira exposta na Equação 2.48, na qual  $\bar{I}_T$  é a média da radiação incidente no coletor durante o tempo ( $T$ ) considerado e,  $\bar{t}_a$  é a média da temperatura ambiente durante o tempo ( $T$ ).

$$qT = \bar{I}_T \lambda\alpha - P_t(t_p - \bar{t}_a)T \quad (2.48)$$

A Equação 2.48 permite calcular o calor realmente coletado pelo sistema e, consequentemente, o desempenho do coletor.

## 2.7 OS SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA

Existem inúmeras vantagens decorrentes do uso de energia térmica solar que, além de contribuir, comprovadamente, para a conservação do meio ambiente, contribuem, de diversas maneiras, para o desenvolvimento econômico. RODRIGUES, MILTON e KAUFMAN (pesquisadores da *Vitae Civilis*) esclarecem tão bem tais aspectos que têm, abaixo, seu texto representado na íntegra.

*“O aquecimento de água em geral representa uma alta porcentagem do consumo de energia, tanto nos lares quanto em vários setores do comércio e da indústria, chegando em alguns casos a 30% ou mais. Quando sistemas de Aquecedores Solares de Água são aplicados na suplementação ou na substituição de processos convencionais de aquecimento de água, evita-se a queima de grande parte do combustível que seria usado nestes sistemas, o que, consequentemente, reduz as emissões de gases estufa e outros poluentes. Isso melhora a qualidade do ar das cidades e, até, a qualidade do ar interno às edificações. Os Aquecedores Solares de Água contribuem também para o desenvolvimento econômico de diversas maneiras, como, por exemplo, podendo ser produzidos por empresas de pequeno e médio porte (reconhecidamente*

*importantes geradoras de empregos), pois não demandam investimentos de capital elevados para sua produção. A descentralização intrínseca nesta tecnologia também é responsável por importante geração de empregos em revendas, empresas de projeto e de instalação. Adicionalmente, efeitos econômicos benéficos também são induzidos por meio de economias significativas de combustível, de maneira que o investimento em Aquecedores Solares de Água se paga em períodos de aproximadamente três anos.” (RODRIGUES, MILTON e KAUFMAN – Vitae Civilis).*

Mesmo apresentando tantas vantagens, o sistema convencional de aquecimento solar ainda é inacessível às famílias de baixa renda. Com o intuito de democratizar o uso da tecnologia solar, surgiram pesquisas a fim de utilizar materiais alternativos na construção dos Aquecedores Solares. Então, a partir de 1999, a ONG Sociedade do Sol desenvolveu um sistema de Aquecimento Solar de Baixo Custo, denominado ASBC.

Os sistemas de aquecimento solar de água podem ser ditos ativos ou passivos, sendo esta denominação dada de acordo com o tipo de circulação que ocorre no sistema (forçada ou natural).

Um sistema de circulação forçada, ou ativo, requer o uso de bombas elétricas, válvulas e controladores para circular água através dos coletores. Eles são mais fáceis de instalar e manter do que os sistemas passivos, pois seu tanque armazenador não precisa ser instalado acima ou perto do coletor. No entanto, eles dependem da eletricidade para funcionar (JURADO, 2004).

Já no sistema de circulação natural, ou passivo, a circulação acontece pelo fenômeno da convecção natural. À medida que a água no coletor é aquecida, torna-se mais leve e sobe naturalmente para o tanque acima, enquanto a água fria do tanque desce para a parte inferior do coletor. A circulação ocorre devido a diferença de densidade causada pelo gradiente de temperatura existente no fluido. Neste tipo de instalação é necessário que o tanque esteja acima do coletor, pois o desnível é necessário para garantir a circulação da água no coletor. O sistema passivo também é conhecido como Sistema Termossifão.

Os aquecedores de água são classificados como circuito aberto (*open loop*, também chamados “diretos”) ou circuito fechado (*closed loop* ou “indiretos”). O circuito é dito aberto quando a água utilizada no consumo circula no interior da grade de tubos do coletor. Um

sistema é dito fechado quando faz uso da introdução de um tocador de calor e de um fluido “*heat transfer fluid*” (água ou solução anticongelante, por exemplo) no circuito do coletor, no interior do reservatório de água quente, para coletar o calor e transferi-lo à água de consumo.

### 2.7.1 SISTEMA CONVENCIONAL DE AQUECIMENTO DE ÁGUA

O aquecedor convencional é composto por dois itens básicos: o reservatório térmico (*boiler*) e o coletor solar (placas). Seu funcionamento é baseado na transmissão de calor através dos materiais que compõem o sistema. A circulação do sistema se inicia quando os raios do sol incidem sobre a superfície preto-fosca dos coletores. A energia absorvida transforma-se em calor e aquece a água que está no interior dos coletores. Inicia-se, então, o processo de circulação natural da água chamado de termossifão. O sistema continua funcionando enquanto houver uma boa irradiação solar ou até quando houver gradiente de temperatura no circuito (JURADO, 2004). A água que foi aquecida durante o processo fica armazenada num reservatório termicamente isolado a fim de evitar a perda de calor para o ambiente.

O coletor solar tem a função de receber a radiação, transformá-la em calor e transmiti-lo ao fluido. Ele é composto por: vidro (impede a entrada de material do meio no coletor e provoca o efeito estufa), tubo de cobre (por onde circula a água que capta o calor do sol), chapa de alumínio enegrecido (auxilia no aquecimento do coletor) e isolante térmico (impede que o calor captado pelo fluido retorne à vizinhança).

A eficiência do coletor é dada pela proporção das energias absorvida, transmitida e refletida em relação à quantidade total de energia incidente. Dessa forma, quanto maior for a quantidade de energia transmitida para a água, maior será a eficiência (JURADO, 2004). A transmissão de calor no coletor solar ocorre por condução, convecção e radiação. A energia solar que incide por radiação é absorvida pelas placas coletores. Estas transmitem, por condução, uma parcela desta energia absorvida para a água (que circula no interior de suas tubulações de cobre), sendo que uma pequena parte é refletida para o ar que envolve a chapa. No fluido, observa-se o fenômeno da convecção natural que, por sua vez, é a força motriz da circulação no sistema.

O *boiler*, isolado internamente com poliuretano expandido, armazena a água quente para consumo. É construído com alumínio, por fora e, com cobre ou aço inox por dentro. Possui uma resistência elétrica que, comandada por um termostato, aquece a água em dias em

que não há luz solar suficiente. A Figura 2.9, a seguir, mostra o esquema de um Aquecedor Convencional de Água adequado para uso doméstico.

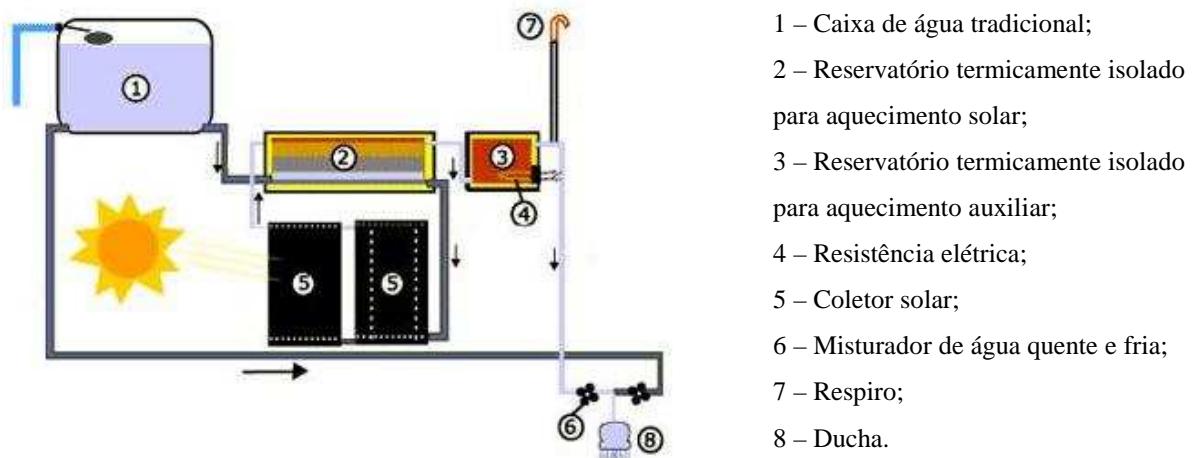


Figura 2.9 – Esquema de um Aquecedor Solar Convencional (imagem disponibilizada no site: [www.sociedadedosol.org.br](http://www.sociedadedosol.org.br)).

### 2.7.2 SISTEMA ASBC

O ASBC tem o mesmo princípio de funcionamento do sistema convencional de aquecimento de água, porém, utilizam-se materiais alternativos, de menor custo, para a construção dos seus componentes.

O projeto de um aquecedor solar de custo mais baixo, que reduza a emissão de gás carbônico e, que retorne ao usuário economias financeiras, ampliando sua cidadania, vale o esforço para superar as dificuldades que são encontradas para possibilitar seu desenvolvimento.

Pode-se destacar alguns fatores que, no Brasil, facilitam o desenvolvimento da tecnologia do ASBC e seu uso pela população em geral (*Sociedade do Sol*):

- Temperatura – o Brasil é um país de altas temperaturas médias diárias, mesmo no inverno.
- Iluminação solar – o Brasil recebe uma grande parcela de radiação solar, que por sua vez é bem distribuída durante o período de um ano.

- Pressão da água – a presença de caixa da água nas residências brasileiras implica em baixa pressão, o que é um fator importante para a operação econômica do ASBC.
- Dutos de PVC – o PVC é um complemento importante do ASBC e, o baixo custo desse material torna a tecnologia do ASBC mais acessível à população.
- Chuveiro elétrico – serve como resistência auxiliar ao aquecimento para os dias nublados ou chuvosos e, como já está presente na maioria das casas brasileiras, não aumentaria o custo o projeto de aquecimento solar.

O fenômeno da estratificação é de extrema importância para o bom funcionamento do ASBC, uma vez que possibilita o uso da própria caixa de água da residência como reservatório. Isso porque a camada de água quente, menos densa que a camada de água fria, ‘flutua’ na parte superior da caixa, excluindo a necessidade de outro reservatório para a água aquecida. Sabe-se, no entanto, que mesmo quando não ocorre turbulência no reservatório, a estratificação deixa de existir com o passar do tempo, por causa do fenômeno da difusão.

A Figura 2.10 mostra o esquema de um ASBC, que pode ser fabricado com placa coletora construída com forro alveolar de PVC modular ou polímero correlato, com tubos de PVC acoplados nas extremidades. O coletor do ASBC se difere dos outros por não utilizar a cobertura de vidro. O reservatório do sistema alternativo pode ser a caixa d’água da residência, ou também, construído com material plástico mais rígido, fibra de vidro ou caixa de isopor (EPS), isolados termicamente nas laterais e na tampa superior.

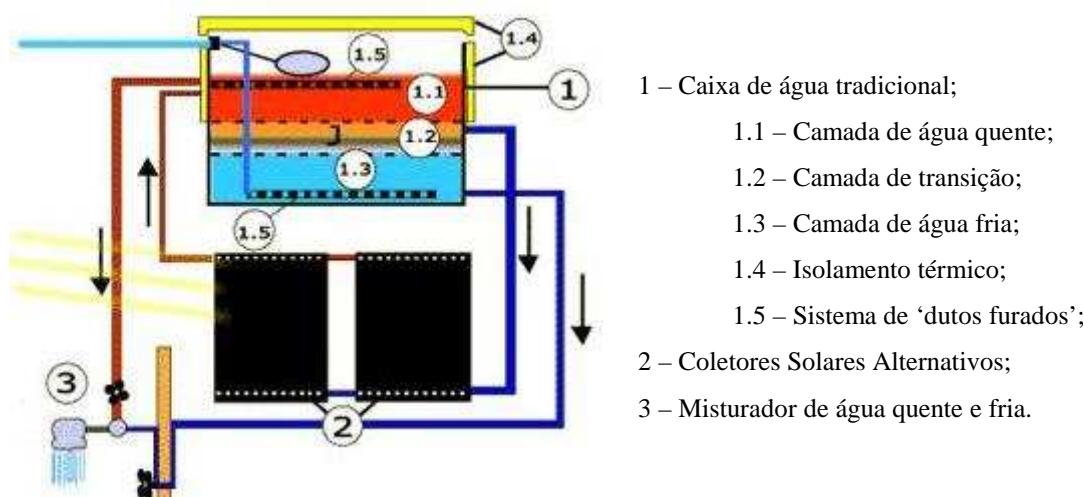


Figura 2.10 – Sistema ASBC (imagem disponibilizada no site: [www.sociedadedosol.org.br](http://www.sociedadedosol.org.br)).

No esquema da Figura 2.10, a caixa de água tradicional é subdividida em três camadas de água, de acordo com as suas densidades, sendo a camada inferior composta por água fria e a superior por água quente, sendo essas duas separadas por uma estreita camada intermediária (de transição). Observa-se que há uma cobertura de isolamento térmico na região preenchida pela água quente, o que evita a perda de calor para o ambiente no decorrer do período, dia e noite.

Os dutos perfurados têm a função de distribuir a água dos coletores solares e da bóia na caixa d’água, de modo a evitar turbulências ou movimentos que, porventura, pudessem ocasionar a perda da estratificação.

Os coletores solares de baixo custo não esquentam a água tanto quanto o coletor tradicional, o que oferece três vantagens ao uso doméstico daquele em detrimento deste: as perdas térmicas em todo circuito de circulação da água são reduzidas, há um menor risco de acidentes envolvendo o contato humano com água quente e o projeto permite a utilização dos dutos de PVC (já tradicionais nas casas brasileiras) para a água quente.

### 2.7.3 ESTUDOS PARA O DESENVOLVIMENTO DOS SISTEMAS DE ENERGIA TÉRMICA SOLAR

Os primeiros registros de experimentos com aquecimento solar são datados de 1767, quando Horace de Saussure, na Suíça, despertou o interesse de estudar o assunto após ter observado que os ambientes ficavam mais quentes quando raios de sol passavam através do vidro.

SAUSSURE (1767) construiu a primeira ‘estufa’ em miniatura, com cinco caixas de vidro expostas uma dentro da outra, em cima de uma mesa de madeira escura, conforme a Figura 2.11.

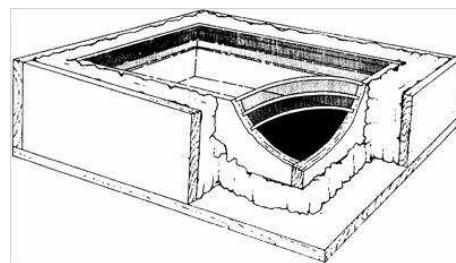


Figura 2.11 – Caixa quente construída por Saussure (*site solarcooking.org*).

Foi observada uma temperatura de 189,5° F no interior da caixa do centro. Em experimentos posteriores, a temperatura atingida foi de 228° F. (*site solarcooking.org*).

HERSCHEL (1830) construiu uma “caixa quente” para cozinhar, durante uma expedição ao Cabo da Boa Esperança na África do Sul, conseguindo temperaturas até 240° F. (*Segundo o site solarcooking.org*).

Tais experimentos podem ser considerados como os primeiros protótipos dos coletores solares.

KEMP (1891) obteve a primeira patente para um coletor solar, o Clímax, que possuía vários tanques cilíndricos de aço galvanizado, pintados de preto. Conseguiu-se um aumento no rendimento ao isolar esses tanques com papel de feltro e colocá-los em uma caixa de madeira com cobertura de vidro, além de conseguir, assim, conservar a água quente (NIEMEYER, 2006).

BAILEY (1909) patenteou um coletor que funcionava por termossifonagem. (*Segundo o site Pense Indústria*). Esse modelo é muito parecido com os que são usados atualmente.

No decorrer do tempo, a indústria dos coletores solares vem se aperfeiçoando. Sabe-se que a substituição do uso da energia convencional pela energia solar vem sendo amplamente pesquisada e incentivada, tanto no âmbito doméstico quanto industrial, pois possibilita uma melhor economia de recursos financeiros, além de minimizar os impactos ambientais.

REDDY (1995) publicou um estudo cuja comparação econômica entre os sistemas elétrico e solar de aquecimento de água, levou à conclusão de que o aquecedor solar de água é a melhor proposta para os consumidores. Isso porque, além da viabilidade econômica, trata-se de uma fonte de natureza renovável e que promove qualidade ambiental.

NIEUWOUDT; MATHEWS (2005), considerando a dificuldade da população rural da África do Sul na obtenção e transporte de água para uso doméstico, estudaram e desenvolveram um dispositivo acessível que suprisse tal necessidade. Os protótipos foram concebidos, fabricados e testados, e mostraram uma média de temperatura de 60°C à tarde, sendo que água a 40°C ainda estava disponível às 20h.

BAPTISTA (2006), ao analisar o desempenho e a relação custo benefício de se trocar o sistema elétrico de aquecimento de água por um sistema de aquecimento solar em

Resorts na região Nordeste do país, concluiu que essa substituição é bastante viável. Verificou-se que tal substituição gerou uma notável economia de recursos financeiros para o empreendimento.

Com o intuito de obter uma menor perda térmica e, consequentemente, um melhor aproveitamento da energia solar, a indústria dos aquecedores solares vem se aprimorando.

MORRISON et al. (1998) apud THIRUGNANASAMBANDAM et al (2010) investigaram as características da aplicação do manto em trocadores de calor horizontais em sistemas termossifão de aquecimento solar de água e descobriu que tal configuração degrada a estratificação térmica no reservatório interno.

MICHAELIDES et al. (1999) simularam um sistema termossifão de aquecimento solar de água, sob diferentes modos de monitoramento (configuração tradicional com a superfície do coletor fixo a uma inclinação de 40° em relação à horizontal, eixo único com inclinação fixa e variável azimute, modo de rastreamento de temporadas em que a inclinação do coletor é alterada duas vezes por ano, dentre outras configurações), usando o programa de simulação TRNSYS para comparar o seu desempenho térmico e econômico, nas cidades de Nicósia (Chipre) e Atenas (Grécia). Os resultados das simulações mostraram que, do ponto de vista do desempenho térmico, os melhores resultados são obtidos com o monitoramento de eixo único.

CHANG et al. (2002), utilizando um fator de distribuição R, definido como a taxa de irradiação total de manhã pela taxa de irradiação total à tarde, verificou que a utilização do critério R nos testes apresentou coeficientes de correlação muito melhores, com um aumento significativo na eficiência característica do sistema.

CHANG et al. (2004) fizeram uma modificação na avaliação do desempenho global de um sistema termossifão de aquecimento de água, cujo cálculo da eficiência levasse em consideração também a remoção de calor durante a fase de aplicação do sistema em questão. Foi proposto um coeficiente de eficiência ( $\eta_0$ ) definido como o produto entre a síntese do desempenho térmico característico ( $\eta_S$ ) e a eficiência de remoção característica ( $\eta_R$ ). Estudou-se o desempenho térmico e a eficiência de remoção de calor de doze sistemas termossifão de aquecimento de água e concluiu-se que o coeficiente de eficiência ( $\eta_0$ ) fornece uma medida mais representativa do desempenho de tais sistemas, em detrimento do desempenho térmico característico ( $\eta_S$ ), valor considerado pelo governo de Taiwan para a concessão de subsídios.

ARRUDA (2004) fez um estudo experimental sobre o efeito de controle de vazões em sistemas de aquecimento solar de água em instalações com grande número de coletores, onde o gradiente de temperatura não é suficiente para circular a água por termossifonagem. ARRUDA concluiu que, nos sistemas onde necessariamente a circulação da água pelos coletores tem de ser forçada, quer seja devido aos comprimentos das tubulações, incluindo os tubos internos ao coletor, quer seja por não haver desnível suficiente entre o reservatório e o coletor, a vazão ideal para cada momento se aproxima da vazão que ocorreria se o sistema estivesse funcionando em condições favoráveis de desnível e com número de coletores reduzido.

DHARUMAN et al. (2006) avaliaram o desempenho de um aquecedor de água integrado a um sistema de conservação de energia. Concluiu-se que os níveis de temperatura alcançados no início da manhã eram adequados para banho e limpeza no setor doméstico e, as altas temperaturas observadas no decorrer do dia poderiam ser exploradas nos setores industriais e hospitalares.

KOFFI et al. (2008) fizeram um estudo teórico experimental de um sistema termossifão de aquecimento solar de água com a presença de um trocador de calor interno. Verificou-se, para o período de maior insolação, que houve concordância satisfatória entre os resultados teóricos e experimentais, tanto qualitativa quanto quantitativamente. O modelo teórico proposto apresentou-se como uma ferramenta eficiente de prever e projetar sistemas termossifão de aquecimento solar de água nas condições do experimento. Além disso, um estudo comparativo da eficácia dos demais sistemas apresentados em outros trabalhos da literatura mostrou que a configuração montada e analisada por KOFFI et al (2008) foi a que obteve melhores resultados.

SOO TOO et al. (2008) também estudaram um sistema de aquecimento de água acoplado a uma manta vertical trocadora de calor, verificando que, para as condições do estudo e do clima na Austrália, esse sistema apresentou uma perda de desempenho, quando comparado a outros.

Estudos mais recentes comprovam que a eficiência de um sistema de aquecimento solar depende de vários outros fatores além do material da placa coletora, como por exemplo, das características locais, da disposição do sistema, do tipo de circulação da água no sistema e da posição das placas coletoras.

LIMA; PRADO (2003) estudaram um sistema de aquecimento solar da água por termossifão com placas coletoras planas, concluindo que o dimensionamento tradicional baseado nas especificações recomendadas pelos fabricantes é demasiadamente simplista e conduz a custos elevados para o consumidor e que é possível fazer um dimensionamento mais próximo da realidade, levando em consideração as características locais e do sistema.

RISPOLÍ (2008) estudou a redução do custo fabril de um aquecedor solar de linha industrializada que possa apresentar um adequado desempenho na época fria do ano. Comprovou-se que o melhor ângulo médio mensal para a inclinação dos coletores solares planos corresponde à diferença de 90º com a distância do sol ao meio dia solar.

SHUKLA et al. (2009) investigaram e analisaram o armazenamento de energia térmica com e sem a incorporação de ‘materiais de mudança de fase’ (*Phase Change Materials* – PCM) para uso em aquecedores solares de água. Baseados nas evidências de que o calor latente de armazenamento de energia térmica é uma das maneiras mais eficientes para armazenar a energia térmica para aquecimento solar de água, tal estudo possibilita a criação de um mecanismo adequado de troca de calor com o calor latente de armazenamento de energia térmica para aquecedores solares de água. Esta análise pode ser uma alternativa para construção de aquecedores solares de água com *design* menos complicado e de maior rentabilidade.

CHEN et al. (2009) analisaram experimentalmente o desempenho térmico a longo prazo de um sistema termossifão bifásico de aquecimento solar de água. Utilizando mecanismos diferentes de troca de calor (convecção natural, gêiser em ebulação, núcleos de ebulação e condensação película), foram realizados estudos para obter as eficiências térmicas horárias e diárias do sistema. Os resultados revelam que a eficiência característica do sistema proposto é 18% maior que a de sistemas convencionais e que tal sistema não só reduz a perda de calor entre o coletor e os arredores, mas também aumenta a densidade de armazenamento térmico.

Os estudos hoje abrangem muito mais do que apenas o aumento da eficiência dos coletores já existentes. O uso de material alternativo para a construção das placas coletoras vem sendo amplamente pesquisado, ao passo que na indústria moderna se priorizam processos que minimizam os impactos ambientais.

Destaca-se, nessa linha de estudos, o trabalho de TABORIANSKI; PRADO (2003), que usaram uma metodologia para análise da contribuição para o efeito estufa dos sistemas de

aquecimento de água baseada na Análise de Ciclo de Vida (ACV). Foram avaliadas todas as formas de energia gasta ou liberada desde a mineração, do material em questão, até a sua disposição final. A emissão de CO<sub>2</sub> foi comparada entre os diferentes sistemas de aquecimento de água. Verificou-se que o sistema de aquecimento solar da água emite menos de 60% do CO<sub>2</sub> e do CH<sub>4</sub> emitidos pelos chuveiros elétricos.

HUSSAIN; URMEE (1996) projetaram, para o uso comum da população pobre das aldeias do Bangladesh, dois aquecedores solares de água, de baixo custo, sendo um constituído de plástico e o outro, de barro.

NAHAR (2002), na Índia, estudou o desempenho de materiais alternativos na construção da placa coletora. Foi comparado o desempenho do Cobre (Cu), Alumínio (Al) e Aço Galvanizado (A.G.) em três configurações ‘tubos-placa’: A.G.-Al, Cu-Al e Cu-Cu, constatando-se que os três aquecedores apresentaram desempenhos semelhantes.

Destaca-se, também, o trabalho de KUDISH et al (2002) apud AZEVEDO; BESTETI (2007), que desenvolveram um modelo de simulação de um coletor solar polimérico e placa absorvedora com canais de fluxo paralelos.

A influência de diferentes parâmetros em um coletor de placa plana feito de copolímero foi analisada por CRISTOFARI et al. (2002) apud AZEVEDO; BESTETI (2007).

Experimentos para verificar a eficiência de coletores de placas planas de PVC são muito usuais. Um exemplo é o trabalho de SOUZA (2002), que verificou que o desgaste térmico do PVC se acentua com níveis de temperatura acima de 60° na sua superfície.

SIQUEIRA (2009) estudou o desempenho do Aquecedor Solar de Baixo Custo (ASBC), comparando-o ao sistema solar convencional de aquecimento de água. Sua pesquisa abrangeu desde a comparação entre o coletor convencional (feito de cobre) e coletores construídos com material de baixo custo, a saber, polipropileno (PP) e PVC, até a comparação entre reservatório convencional com o reservatório de baixo custo, feito de polietileno e isolado termicamente por isopor. Concluiu-se que os dois coletores solares de baixo custo analisados foram sensíveis às mudanças climáticas e, que quanto menor a temperatura da água na entrada do coletor, maior é a sua eficiência. O reservatório de baixo custo apresentou desempenho térmico satisfatório, quando comparado ao reservatório convencional, tanto em relação às perdas térmicas quanto aos valores alcançados de temperatura e eficiência.

O presente trabalho dá continuidade à pesquisa de SIQUEIRA (2009), analisando, porém, os efeitos de algumas mudanças na configuração da unidade experimental (tais como: inserção de proteção transparente e ensaios em regime contínuo), nos valores alcançados de temperatura máxima e eficiência diária, com o intuito de comparar os materiais alternativos (PP X PVC) entre si, para cada configuração estudada, o que será descrito detalhadamente nos capítulos posteriores.

THIRUGNANASAMBANDAM et al. (2010) realizaram uma pesquisa bibliográfica detalhada sobre as principais tecnologias térmicas solares atuais, composta por aquecedores solares de água, fogões solares, secadores solares, tanques solares, arquitetura solar, condicionadores solares de ar, chaminés solares, usinas de energia solar e foto-solares. O documento aponta explicitamente as áreas de tecnologias térmicas solares, onde há espaço para pesquisas futuras.

## CAPÍTULO III

### MATERIAL E METODOLOGIA

O estudo proposto no presente trabalho é de natureza experimental e qualitativa.

Foram colhidos dados de temperatura da água na unidade experimental, na entrada e saída de cada placa coletora alternativa, bem como no interior do reservatório (*boiler*) de cada coletor.

Os valores de radiação solar no plano horizontal, para cada período de uma hora durante todo o dia de experimento, utilizados para a realização dos cálculos, foram retirados do site INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), que também disponibiliza outros dados, como: temperatura ambiente, umidade e velocidade e direção dos ventos. Essas medidas são registradas a cerca de 200 m do local de instalação da unidade experimental. Tais valores são necessários para se prosseguir com a realização dos cálculos de radiação solar sobre o plano inclinado e analisar o desempenho de cada coletor alternativo.

Os experimentos foram divididos em quatro categorias de ensaios, a saber:

1. Ensaios passivos em regime batelada;
2. Ensaios ativos em regime batelada;
3. Ensaios ativos e passivos com a utilização de uma proteção transparente sobre a placa coletora em regime batelada;
4. Ensaios ativos e passivos, com e sem a presença da placa de proteção transparente, em regime contínuo.

#### 3.1 UNIDADE EXPERIMENTAL

A unidade experimental, conforme mostra a Figura 3.1, devidamente instalada nas dependências da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, consistia em:

- Três coletores solares, sendo: (1) coletor de PVC; (2) coletor solar de cobre ou convencional e (3) coletor solar polipropileno (PP);

- Três reservatórios termicamente isolados, sendo: (5) e (7) reservatórios feito de material de baixo custo (polietileno) isolados com 30 mm de isopor (EPS), e (6) reservatório convencional;
- Uma caixa de distribuição de água ou caixa fria: (4)
- 15 termopares (sensores de temperatura) acoplados a um sistema de monitoramento e aquisição de dados em tempo real, interligados a um computador que operava o *Labview* (*software* específico para registrar, monitorar e processar dados).
- Tubulações para o escoamento da água;
- Duas bombas peristálticas.

As letras (a) e (b), (c) e (d), (e) e (f) mostradas na Figura 3.1 indicam, respectivamente, as entradas e saídas de água nos coletores de PVC, cobre e polipropileno.



Figura 3.1 – Unidade Experimental (fonte: SIQUEIRA, 2009).

A caixa d’água de distribuição (ou caixa fria) era constituída de fibra de vidro e possuía volume de 310 L.

### 3.1.1 AQUECEDOR SOLAR CONVENCIONAL

O reservatório térmico convencional era construído em aço inoxidável AISI 304, com acabamento de alumínio, sendo seu volume de 100 L e pressão de trabalho de 5 m.c.a.

O coletor convencional de cobre, como pode ser visto através da Figura 3.2, era constituído por 7 (sete) tubos de cobre, de 22 mm de diâmetro cada, cobertos por uma lâmina de vidro de 4 mm de espessura.

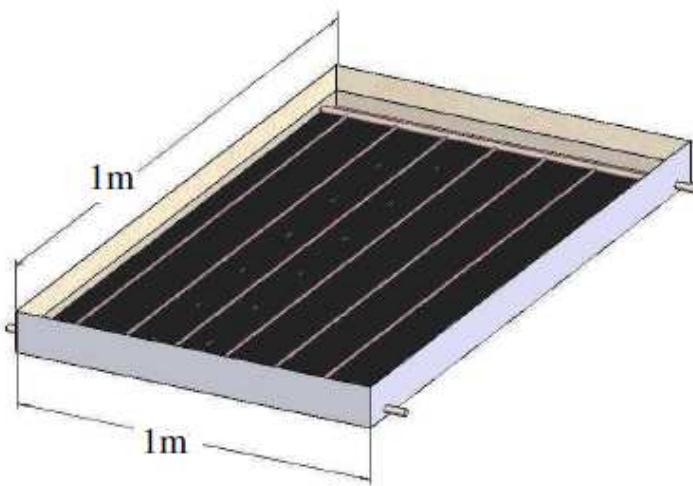


Figura 3.2 – Esquema representativo do Coletor Convencional de Cobre (fonte: SIQUEIRA, 2009).

As características do coletor convencional são listadas a seguir:

- Volume – 4,3 L
- Massa Cheia – 16,7 kg
- Massa Vazio – 12,4 kg
- Classificação INMETRO – B (Eficiência de 53,5%)
- Área – 1 m<sup>2</sup>

### 3.1.2 AQUECEDORES SOLARES ALTERNATIVOS

Os coletores solares de baixo custo, representados esquematicamente através da Figura 3.3, eram constituídos de material alternativo, a saber:

- Um coletor de forro de PVC;
- Um coletor de Polipropileno (PP).

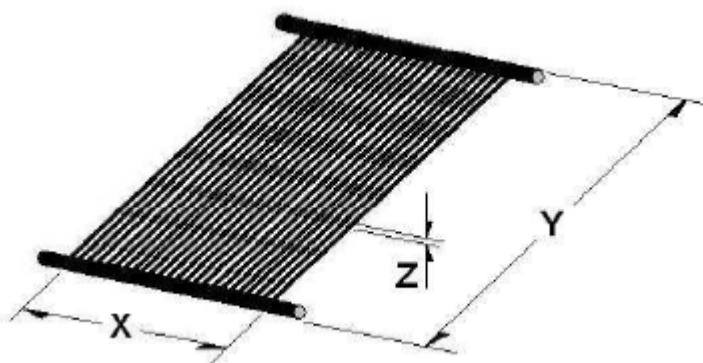


Figura 3.3 – Desenho Esquemático dos Coletores Alternativos (fonte: SIQUEIRA, 2009).

Os coletores alternativos planos utilizados neste trabalho foram adaptados a partir de placas para forros residenciais e comerciais, com volume, espessura e disposição dos tubos internos previamente estabelecidos pelo fabricante. Foi utilizada tinta ‘preto-fosco’ para pintura dos coletores.

As características dos coletores solares alternativos estão listadas na Tabela 3.1 a seguir.

Tabela 3.1 – Características dos Coletores Solares Alternativos (fonte: SIQUEIRA, 2009).

Característica	PVC	PP
<b>Volume de água (L)</b>	10	4
<b>Comprimento (m)</b>	1,62	1,58
<b>Largura (m)</b>	0,62	0,64
$A_c (m^2)$	1	1
$k_p (W/m°C)$	0,16	0,22
$d_c (m)$	0,009	0,005
$h_c (m)$	0,017	0,005

A Figura 3.4, a seguir, mostra algumas placas de forros comerciais de PVC e polipropileno (PP), dando uma idéia da disposição interna dos coletores alternativos.

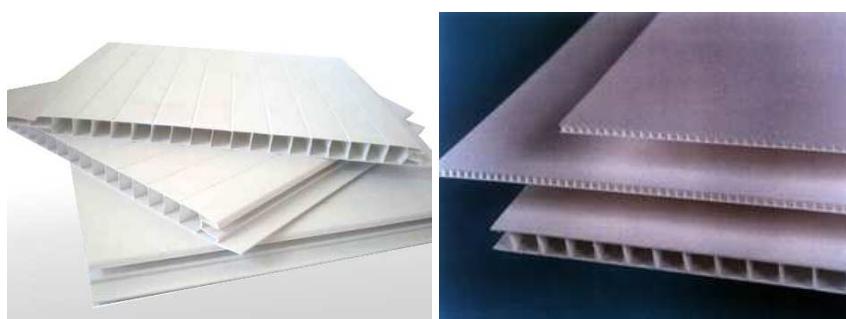


Figura 3.4 – Forros comerciais de: (a) PVC e (b) PP.

Os reservatórios dos Aquecedores Solares de Baixo Custo (ou alternativos) apresentam as seguintes características:

- Volume – 90 L
- Diâmetro Externo – 0,45 m
- Diâmetro Interno – 0,43 m
- Altura – 0,70 m
- Altura da Coluna d'Água – 0,57 m.

### 3.1.3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Os 15 (quinze) termopares (sensores de temperatura) utilizados para a medição da temperatura da água na Unidade Experimental eram do tipo T, com isolamento mineral. Cada termopar possuía dois fios inseridos no circuito em uma conexão T com tampa rosqueada e estava acoplado a um transmissor de sinal.

Os termopares foram instalados nas entradas e saídas de cada coletor, bem como nas seções inferior (a 5 cm do fundo), intermediária (a 29 cm do fundo) e superior (a 49 cm do fundo) de cada reservatório, de acordo com a Figura 3.5 abaixo.

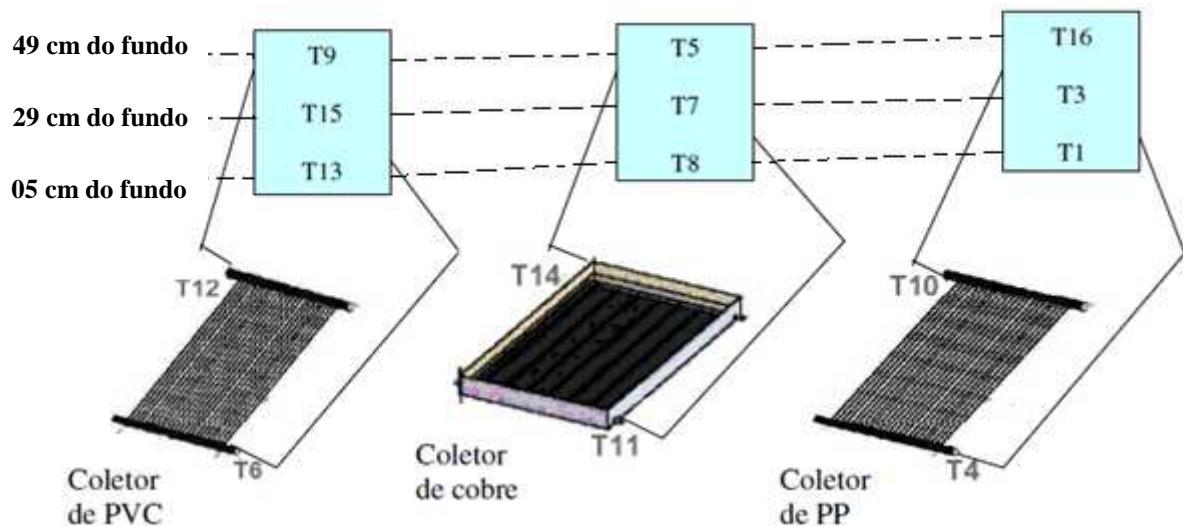


Figura 3.5 – Posição dos termopares na Unidade Experimental (fonte: SIQUEIRA, 2009).

Os termopares foram acoplados a um computador que recebia e interpretava os sinais, através de um *software* específico para registrar, monitorar e processar dados, conhecido pelo nome de Labview. Tais recursos permitiram o monitoramento e aquisição dos

dados de temperatura em tempo real. A Figura 3.6, a seguir, mostra um esquema do sistema de aquisição de dados.

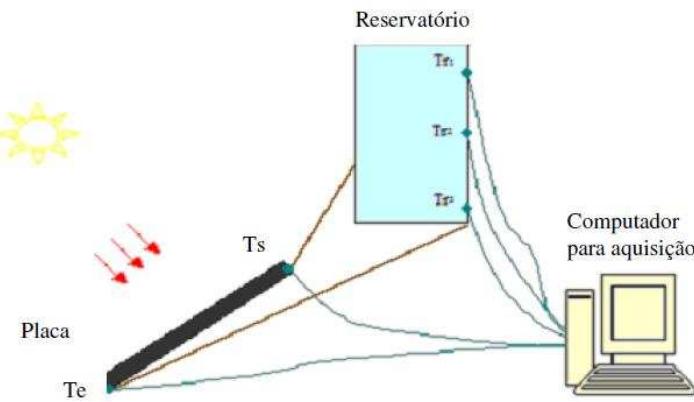


Figura 3.6 – Esquema do Sistema de Aquisição de Dados (fonte: SIQUEIRA, 2009).

### 3.1.4 BOMBAS

Foram utilizadas duas bombas peristálticas, com vazão máxima de 70 L/h, para possibilitar a circulação forçada de água em alguns experimentos. As bombas tinham roletes em aço inox e inversor de freqüência.

As curvas de calibração das duas bombas são mostradas no Apêndice B.

### 3.1.5 TERMOPARES

Os termopares utilizados na realização dos ensaios, conforme as especificações de SIQUEIRA (2009), têm as seguintes características:

- 3 unidades MS13 – diâmetro de 3 mm e comprimento de 120 mm e sem rosca: MS13/T-S-00/316-30-S-120/KNE-21/00/25M BT-1,0-F-330/TIC (0-100).
- 4 unidades MS13 – diâmetro de 6 mm e comprimento de 165 mm e com rosca 1/4" NPT: MS13/T-S-00/316-60-S-165/KNE-21/14/25M BT-1,0-F-330/TIC (0-100).
- 8 unidades MS13 – diâmetro de 3 mm e comprimento de 100 mm e com rosca 1/8" NPT: MS13/T-S-00/316-30-S-100/KNE-21/10/25M BT-1,0-F-330/TIC (0-100).

O desenho representativo de um termopar pode ser visto na Figura 3.7.

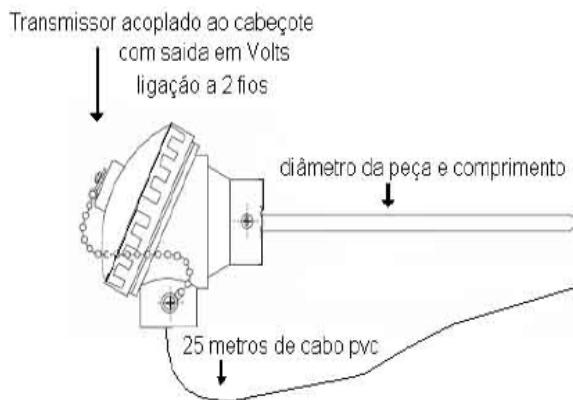


Figura 3.7 – Desenho representativo de um termopar de isolamento mineral (fonte: SIQUEIRA, 2009).

### 3.2 METODOLOGIA

A metodologia descrita neste tópico foi utilizada para a coleta dos dados de temperatura nos coletores solares alternativos, a fim de comparar o desempenho do sistema que utiliza PVC como material de construção da placa coletora, com o sistema que utiliza PP como material de construção da placa coletora.

Os experimentos foram divididos em quatro categorias, conforme exposto no início deste capítulo. Para uma melhor compreensão sobre as configurações da unidade experimental, utilizadas para a aquisição dos dados durante os ensaios, é necessário o conhecimento de algumas definições, a saber:

- Regime Batelada – Não há entrada nem saída de água no sistema operacional durante o ensaio. A água que circula na unidade experimental foi previamente disponibilizada, de maneira que a partir do momento em que se iniciou o experimento, o sistema pode ser considerado ‘fechado’.
- Regime Contínuo – Há entrada e saída de água, simultaneamente, da unidade experimental, durante o ensaio. Durante esse tipo de experimento, num determinado período do dia, abria-se uma válvula para permitir a entrada de água fria da caixa d’água para o *boiler* do coletor, enquanto ocorria a retirada de água quente do *boiler* por meio de uma torneira, com vazão conhecida para o meio externo.
- Sistema Passivo – Também chamado de Sistema Termossifão, o sistema passivo consiste numa configuração na qual a circulação de água na unidade

experimental ocorre por meio da convecção natural. A água aquecida, por possuir menor densidade que a água fria, sobe pelos tubos da placa coletora e chega ao *boiler*, onde forma a camada superior deste. Enquanto isso, a água fria, por possuir densidade maior, desce para as seções inferiores do *boiler* e da placa coletora, promovendo, assim, a circulação natural do fluido pela unidade experimental.

- Sistema Ativo – O sistema ativo, também chamado de Sistema Bombeado, faz o uso de bombas peristálticas para promover uma circulação forçada do fluido pela unidade experimental.

As configurações utilizadas para a aquisição dos dados de temperatura nos dias dos ensaios serão detalhadamente explicadas nas seções seguintes.

### **3.2.1 ENSAIOS PASSIVOS EM REGIME BATELADA**

Nesta configuração os *boilers* foram totalmente preenchidos com água fria (à temperatura ambiente) no início do dia. Quando a luz do sol começava a se incidir sobre os coletores, as válvulas que ligavam os *boilers* às placas coletoras eram abertas, dando início à circulação natural de água, o que caracteriza o ensaio passivo ou termossifão em regime batelada, pois a partir do início do experimento, cessava-se a entrada de água na unidade experimental (*boiler*, coletor e tubulações).

O sistema de aquisição de dados era ligado, sendo programado para salvar os dados de temperatura a cada 15 (quinze) minutos, ou seja, eram conhecidos 4 (quatro) valores de temperatura para o período de uma hora.

O experimento prosseguia durante todo o período de maior insolação do dia, ou seja, geralmente entre as 9 h e 16 h, sendo que esse intervalo sofria pequenas modificações, dependendo da estação do ano. Ao final do dia de ensaio, a unidade experimental era esgotada (esvaziada), assim como ocorria para todas as configurações estudadas.

### **3.2.2 ENSAIOS ATIVOS EM REGIME BATELADA**

Assim como na configuração anterior, neste tipo de experimento os *boilers* eram previamente preenchidos com água fria no início do dia, a fim de evitar a necessidade de entrada de água (e/ou saída) na unidade durante o ensaio, caracterizando o regime batelada.

Quando a luz do sol começava a se incidir sobre as placas coletoras, as bombas peristálticas eram ligadas para permitir a circulação da água pela unidade experimental. Foram realizados experimentos utilizando três vazões distintas, a saber: 20, 40 e 60 L/h, sendo necessário um dia de ensaio para cada vazão utilizada.

O sistema de aquisição de dados era acionado, de maneira a obter-se dados de temperatura a cada quinze minutos, durante o período de maior insolação do dia.

### **3.2.3 ENSAIOS COM PRESENÇA DE PLACA DE PROTEÇÃO TRANSPARENTE, EM REGIME BATELADA**

Nesse tipo de ensaio, os *boilers* eram preenchidos com água no início da manhã, assim como nos experimentos anteriores, para caracterizar o regime batelada.

Logo em seguida, era sobreposta a cada coletor alternativo, uma placa de proteção transparente, construída sob medida para cada coletor, com o intuito de promover o efeito estufa. As placas de proteção transparente eram basicamente uma armação de madeira coberta com plástico transparente Vulcan de 0,40 mm de espessura, escolhido por apresentar um custo financeiro mais baixo que outras opções de materiais transparentes. Foram utilizadas duas camadas do material plástico na construção de cada placa de proteção transparente. A Figura 3.8 mostra um esquema da placa de proteção transparente construída.

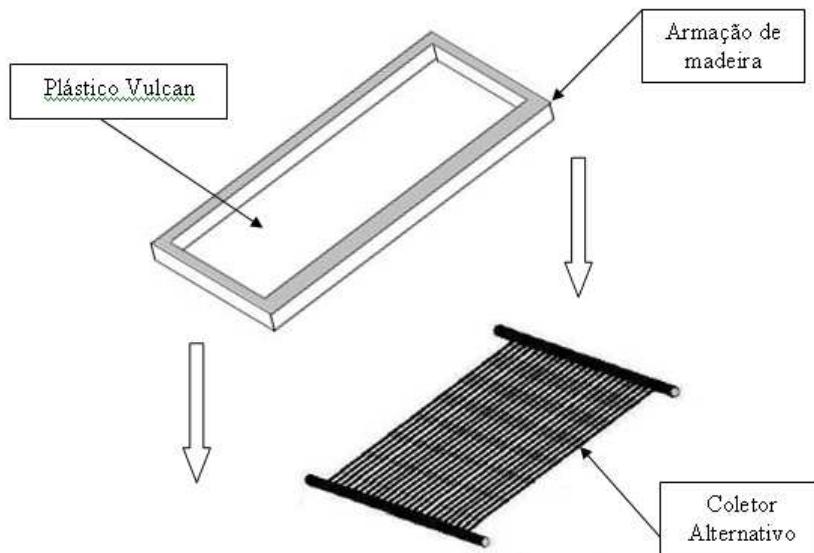


Figura 3.8 – Esquema da sobreposição da placa de proteção transparente ao coletor solar alternativo.

Foram realizados experimentos passivos e ativos, nas três vazões de circulação distintas utilizadas, sendo a aquisição de dados de temperatura feita a cada quinze minutos durante o principal período de insolação do dia.

### 3.2.4 ENSAIOS CONTÍNUOS

Os ensaios contínuos foram realizados com o propósito de observar as variações ocorridas no sistema quando ocorriam, simultaneamente, entrada e saída de água na unidade experimental. Tais ensaios são também chamados de ‘simulação de banhos’.

Para proceder com os experimentos, mediu-se a vazão das torneiras que permitiam a saída de água quente de cada um dos dois *boilers* (reservatório de cada coletor alternativo), a fim de compará-la à vazão de um chuveiro elétrico comum.

A vazão de saída foi medida em três posições diferentes da válvula de abertura, sendo escolhida a vazão intermediária das duas torneiras, que indicavam, respectivamente, 101,98 L/h e 115,38 L/h para as torneiras que permitiam saída de fluido quente dos reservatórios acoplados ao coletor de PVC e de PP. A vazão de entrada de água fria nos *boilers* era controlada por uma bóia presente nos reservatórios. Observa-se que a vazão de saída de água quente do *boiler* acoplado ao coletor de PVC equivale a aproximadamente 57% da vazão de um chuveiro elétrico comum, utilizado nas residências brasileiras. Já a vazão de saída de água quente do reservatório ligado ao coletor de PP representa aproximadamente 65% da vazão de um chuveiro elétrico simples, presente nas residências brasileiras.

O procedimento experimental nesta etapa consistia em aquecer a água em regime batelada até o período da tarde no qual se observava uma maior insolação. Nesse instante, abriam-se as torneiras (para a retirada de água quente dos *boilers*) e as válvulas (para a entrada de água fria no sistema), dando-se início ao processo contínuo. A simulação dos banhos era feita por um período de quarenta minutos para o *boiler* do coletor de PVC e uma hora para o *boiler* do coletor de PP.

Foram simulados banhos em processo termossifão, bem como em processos ativos (bombeados a 20, 40 e 60 L/h). Também foram realizados experimentos com ausência e presença de placa de proteção transparente.

Os resultados obtidos em cada configuração serão apresentados e discutidos no capítulo a seguir.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por se tratar de um estudo experimental e qualitativo, dada a impossibilidade de se reproduzir as mesmas condições de um dia de ensaio em outro dia, os resultados aqui expostos têm como intuito a realização de uma análise do comportamento dos dados de temperatura registrados.

Foi analisada a temperatura máxima de saída de água aquecida em cada coletor alternativo, bem como a distribuição de temperaturas durante todo o período do ensaio, para cada configuração estudada, a saber:

- sistema termossifão em regime batelada e ausência de placa de proteção transparente;
- sistemas ativos (nas vazões de bombeamento de 20, 40 e 60 L/h) em regime batelada e ausência de placa de proteção transparente;
- experimentos ativos e termossifão com presença de placa de proteção transparente e em regime batelada;
- experimentos ativos e termossifão, com ausência e presença de placa de proteção transparente e em regime contínuo;

Em todos os ensaios, foi calculado o valor da radiação solar incidente sobre o plano a uma inclinação ( $\beta$ ) de 30°, latitude da cidade de Uberlândia-MG ( $\phi$ ) de -18,91° e azimute do plano inclinado ( $\gamma$ ) de 180°, de acordo com a Equação 2.35. Os valores de radiação incidente sobre o plano horizontal, temperatura ambiente e umidade relativa do ar, requeridos para dar prosseguimento à realização de tais cálculos, foram retirados do site INMET.

Para os sistemas ativos (bombeados a 20, 40 e 60 L/h) e termossifão, calculou-se a eficiência diária obtida em cada experimento, através da Equação 2.46. O calor útil foi calculado utilizando o valor de 4183 J/kg°C para o calor específico e densidade de 1000 kg/m<sup>3</sup>, através da Equação 2.42.

As características observadas para cada dia de ensaio, tais como: dia ensolarado ou nublado, por exemplo, encontram-se no Apêndice D.

#### 4.1 SISTEMA TERMOSSIFÃO

Todos os experimentos nos quais a circulação ocorria por convecção natural, o que caracterizava o sistema termossifão, apresentaram o mesmo comportamento de distribuição de temperatura e faixa de temperatura máxima atingida na saída do coletor, para os ensaios em regime batelada e com ausência de placa de proteção transparente. Os ensaios dos dias 06/07/2009 e 29/07/2009 representam bem esses resultados.

As Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 mostram a distribuição de temperatura nos coletores alternativos nos ensaios dos dias 06/07/2009 e 29/07/2009, as temperaturas máximas atingidas na saída de cada coletor, bem como o tempo que a superfície do material alternativo (PVC ou PP) levou para elevar a temperatura da água de seu valor inicial ao valor máximo registrado.

Observa-se, pela Figura 4.1, que a temperatura máxima atingida no coletor de PP, no experimento do dia 06/07/2009, foi de 43,36 °C, obtida no intervalo entre as 14 h e 15 h, tendo o coletor de polipropileno levado um tempo de 6 h para acrescentar 28 °C à temperatura inicial de entrada da água no coletor. O gradiente de temperatura no período de maior insolação do dia foi de aproximadamente 12 °C, conforme Figura 4.1.

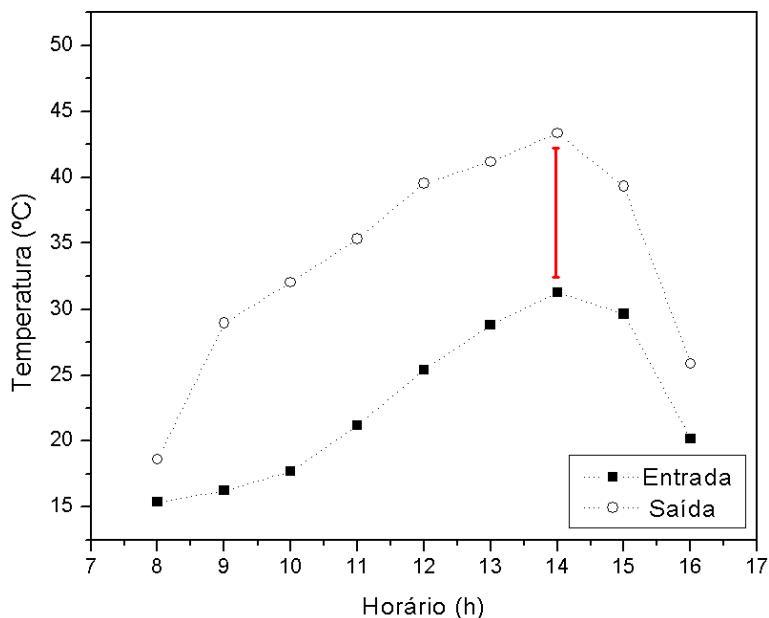


Figura 4.1 – Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 06/07/2009, no coletor alternativo de PP.

Já para o coletor de PVC, observa-se um gradiente de temperatura de 5,0 °C no principal período de insolação do dia, sendo, no mesmo período, que a temperatura máxima

alcançada foi de 34,5 °C, conforme mostra a Figura 4.2. Nota-se que o coletor de PVC levou um tempo de aproximadamente 6 h para acrescentar aproximadamente 25,6 °C à temperatura inicial de entrada da água no sistema.

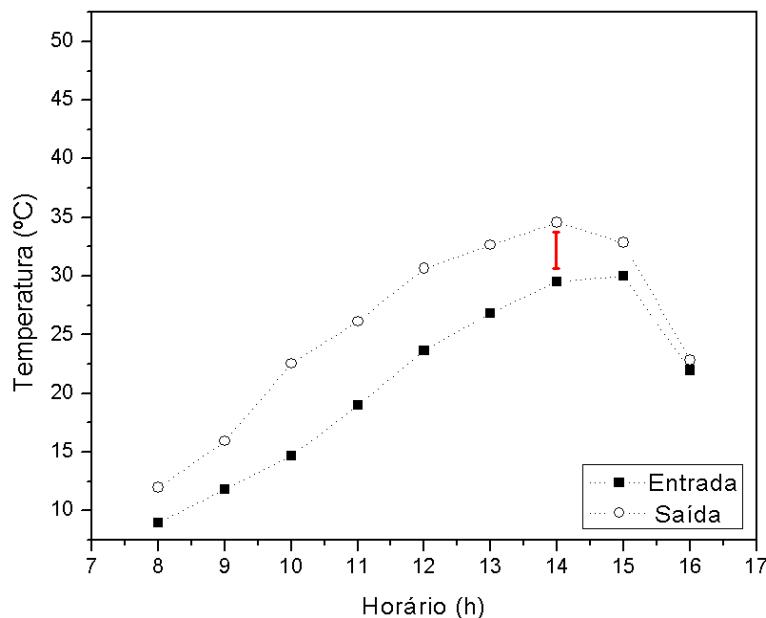


Figura 4.2 – Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 06/07/2009, no coletor alternativo de PVC.

Observa-se, para ambos os coletores, que à medida que a água vai se aquecendo, há uma transferência de calor no fluido presente no interior do reservatório, o que é evidente pelo aumento da temperatura de entrada da água no coletor. Nota-se também que, durante todo o período do ensaio, o gradiente de temperatura manteve-se praticamente constante em cada coletor, sofrendo uma queda brusca após o período de maior insolação do dia.

Os valores de temperatura máxima alcançados em ambos os coletores, bem como o horário em que ocorrem podem ser mais bem compreendidos levando-se em consideração a temperatura ambiente do ar, registrada para cada hora de ensaio, conforme se vê no Apêndice E.

Nota-se, também, que a temperatura inicial de entrada da água nos coletores é mais baixa que a temperatura ambiente registrada. Isso porque o fato de os coletores estarem numa posição inclinada em relação à horizontal, impossibilita o completo esgotamento da unidade no início do dia de experimento, ‘sobrando’ água na parte inferior dos coletores que, durante a noite, passam por um período de resfriamento. A diferença entre as temperaturas iniciais de

entrada do fluido no coletor de PVC em relação ao coletor de PP provavelmente se deva ao volume útil de cada coletor.

O ensaio do dia 29/07/2009 revela resultados semelhantes ao ensaio do dia 06/07/2009, como se pode observar através das Figuras 4.3, para o coletor de PP e Figura 4.4, para o coletor de PVC.

Na Figura 4.3, para ensaio termossifão em regime batelada, sem placa de proteção transparente, nota-se um gradiente de temperatura no período de maior insolação do dia, de 13,35 °C, sendo a temperatura máxima alcançada de 49,22 °C. Observa-se que o coletor de PP levou aproximadamente 5 h para elevar 30 °C à temperatura inicial de entrada de água na unidade.

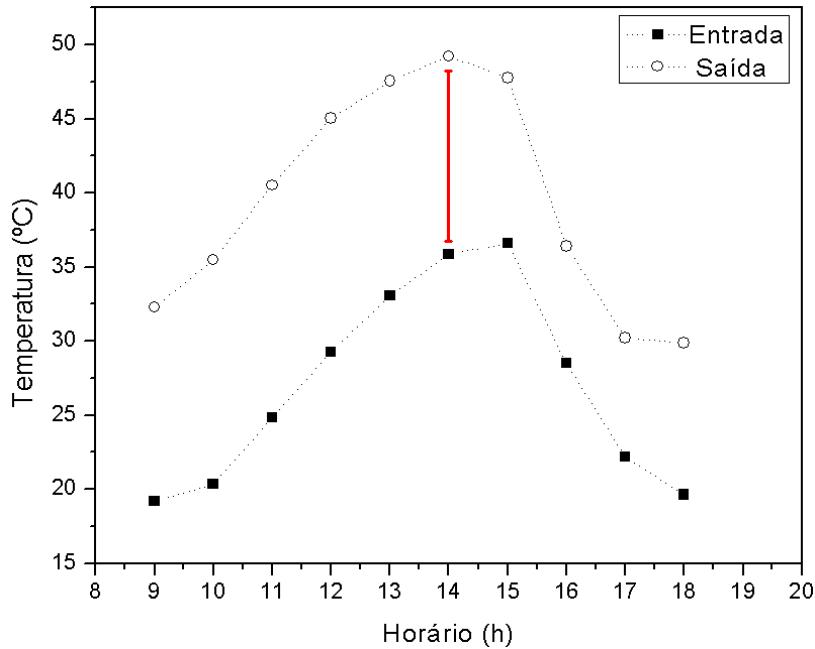


Figura 4.3 – Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 29/07/2009, no coletor alternativo de PP.

Já no coletor de PVC, pode-se observar um gradiente de temperatura de 3,2 °C no período de maior insolação do dia, sendo a temperatura máxima atingida de 39,2 °C, observada no intervalo entre as 14 h e 15 h. Nota-se, de acordo com Figura 4.4, que o coletor de PVC levou 5 h para acrescentar 23,5 °C à temperatura inicial de entrada de água no sistema.

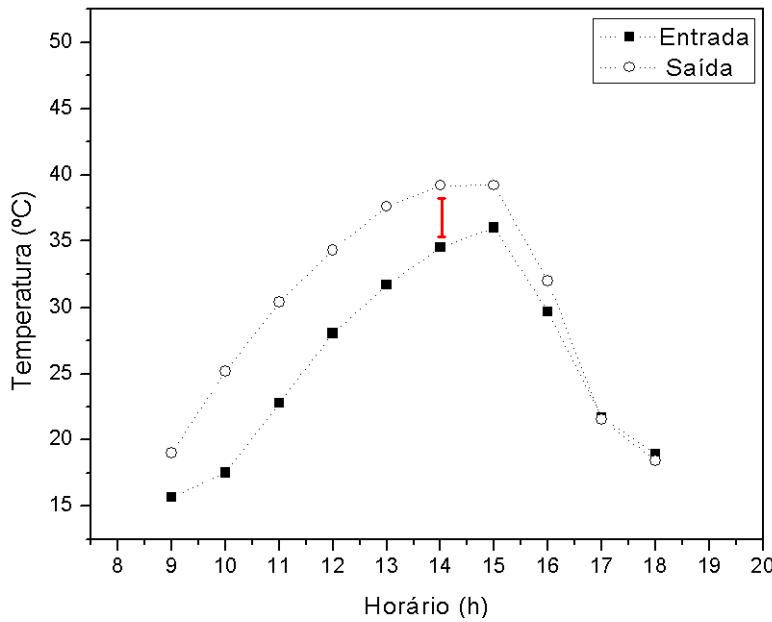


Figura 4.4 – Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 29/07/2009, no coletor alternativo de PVC.

Os valores calculados de radiação incidente sobre o plano inclinado para os dias de ensaio, calculados através da Equação 2.35, bem como o somatório dos valores de radiação solar incidente sobre a superfície horizontal, obtidos no *site* do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores do Somatório da Radiação Total sobre o Plano Inclinado.

Data	Dia do ano (n)	Declinação ( $\delta$ )	$\Sigma I$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$\Sigma I_T$ (kJ/m <sup>2</sup> )	T <sub>MAX</sub> (°C)		$\Delta T$ (°C)	
					PP	PVC	PP	PVC
01/07/2009	182	-23,12	12846	11602	39,8	30,7	14,1	2,9
02/07/2009	183	-23,05	15896	14223	44,0	35,9	13,9	4,8
04/07/2009	185	-22,88	13818	12707	42,5	32,4	14,6	6,8
06/07/2009	187	-22,69	16534	14901	43,4	34,6	12,1	5,0
10/07/2009	191	-22,24	15871	14508	43,4	33,9	11,6	4,1
11/07/2009	192	-22,11	14877	13636	41,7	32,8	13,5	5,8
13/07/2009	194	-21,82	16417	14766	44,8	34,6	12,8	5,1
14/07/2009	195	-21,67	16483	14803	44,7	34,9	13,5	5,1
28/07/2009	209	-18,91	16602	15084	45,2	35,9	13,6	3,4
29/07/2009	210	-18,67	18343	16558	49,2	39,2	13,3	3,2
30/07/2009	211	-18,42	16284	14942	46,8	36,6	12,0	4,5
31/07/2009	212	-18,17	18801	16908	48,1	38,1	13,7	4,4
04/08/2009	216	-17,11	14719	13570	51,8	33,9	20,5	3,6

A Tabela 4.2, a seguir, mostra os valores de eficiência diária calculados para cada dia de ensaio, em cada coletor alternativo, bem como o calor recebido pelas placas coletoras durante o ensaio.

A metodologia utilizada para a realização do cálculo da taxa mássica nos coletores alternativos funcionando em sistema termossifão, baseou-se num balanço de energia feito no *boiler* a partir dos valores de temperatura disponíveis ao longo do experimento. Os valores calculados para a vazão mássica circulante nos coletores de PVC e PP foram, respectivamente, 0,658 kg/min e 0,347 kg/min. O procedimento para esses cálculos encontra-se no Apêndice C.

Os gráficos de distribuição de temperatura dos demais experimentos termossifão em regime batelada e com ausência de placa de proteção transparente, realizados nos dias 01/07/2009, 02/07/2009, 04/07/2009, 10/07/2009, 11/07/2009, 13/07/2009, 14/07/2009, 28/07/2009, 30/07/2009, 31/07/2009 e 04/08/2009, estão expostos no Apêndice A.

Tabela 4.2 – Calor Útil e Eficiência Diária para Ensaios em Sistema Termossifão.

Ensaio	$Q_u$ (J/s)		$\eta$ (%)	
	PVC	PP	PVC	PP
01/07/2009	1521,2	2219,5	47,2	68,8
02/07/2009	2285,6	2683,6	57,8	67,9
04/07/2009	1671,4	2441,5	47,3	69,2
06/07/2009	2192,4	2594,0	52,9	62,6
10/07/2009	1985,8	2541,8	49,3	63,1
11/07/2009	1873,4	2448,9	49,4	64,6
13/07/2009	2232,6	2868,3	54,4	69,9
14/07/2009	2327,3	3055,6	56,6	74,3
28/07/2009	2094,2	2900,9	49,9	69,2
29/07/2009	2050,1	3021,5	44,6	65,7
30/07/2009	1805,5	2698,2	43,4	65,0
31/07/2009	1944,7	3033,9	41,4	64,6
04/08/2009	1755,2	2912,8	46,5	77,3

Nota-se que, nas mesmas condições operacionais e geométricas, o coletor de PP mostrou-se mais viável, pois para uma mesma área de coleta em relação ao coletor de PVC,

alcançaram-se temperaturas máximas entre 40 °C e 52 °C, contra valores de temperatura de 30 °C a 40 °C no coletor de PVC.

Neste trabalho não foram realizados ensaios no sistema convencional de aquecimento de água, que usa placa coletora de cobre. Tais experimentos foram realizados por SIQUEIRA (2009). Tem-se que, para um ensaio termossifão realizado no coletor de cobre, foi encontrado um valor de 46,5 °C de temperatura máxima atingida no *boiler* convencional, ao passo que, no mesmo dia e nas mesmas condições operacionais, foram encontrados valores de 45,6 °C e 41,8 °C de temperatura máxima registrados nos reservatórios alternativos de PVC e PP, respectivamente.

Os demais resultados obtidos nos ensaios realizados por SIQUEIRA (2009) no sistema convencional de aquecimento solar de água estão expostos no Anexo A.

## 4.2 SISTEMAS ATIVOS

Os ensaios utilizando circulação forçada, em regime batelada e sem a placa de proteção transparente, foram realizados usando-se uma bomba peristáltica em três vazões distintas, a saber, 20 L/h, 40 L/h e 60 L/h.

Os resultados são mostrados na forma de distribuição de temperatura, gradiente de temperatura no principal período de insolação do dia e temperatura máxima alcançada com o experimento, para cada vazão experimentada.

### 4.2.1 BOMBEAMENTO A 20 L/h

Os experimentos ativos bombeados a 20 L/h, sem proteção transparente e em regime batelada tiveram seu comportamento representado para o coletor de PP e de PVC, respectivamente, através das Figuras 4.5 e 4.6.

Nota-se que, para o PP, o gradiente de temperatura observado no período do dia de maior insolação foi de 22,16 °C, conforme Figura 4.5. Pode-se observar também que a temperatura máxima alcançada na saída de água do coletor de PP foi de 48,88 °C, observada às 13 h, e que esse material levou um tempo de aproximadamente 4 h para elevar 31,66 °C à temperatura inicial de temperatura de entrada de água no coletor.

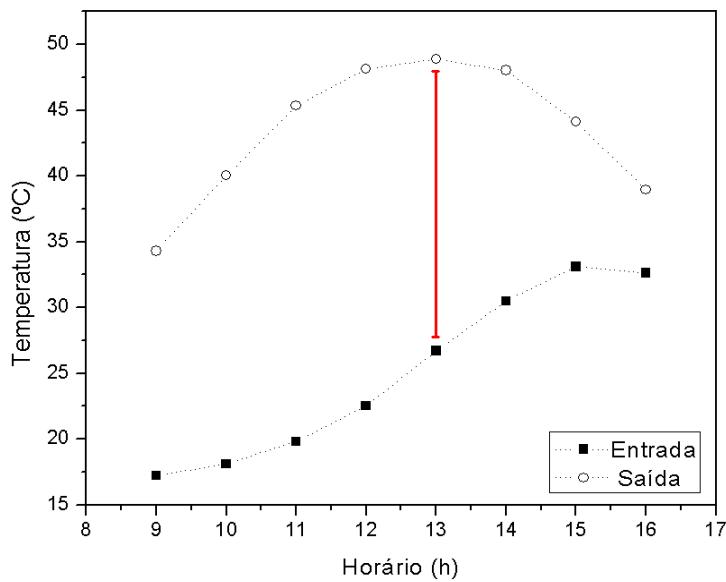


Figura 4.5 – Experimento bombeado a 20 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 11/08/2009, no coletor alternativo de PP.

Já para o coletor de PVC, conforme Figura 4.6, pode-se observar um gradiente de temperatura no principal período de insolação do dia de 20,50 °C, sendo que a temperatura máxima atingida, nesse mesmo período, foi de 38,8 °C. Nota-se que o coletor de PVC levou um tempo aproximado de 3 h para acrescentar 24,67 °C à temperatura inicial de entrada de água na placa coletora.

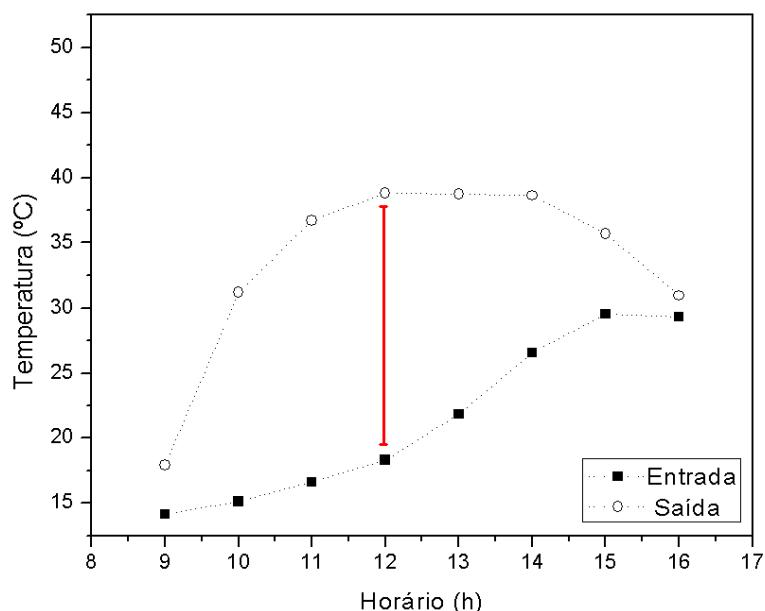


Figura 4.6 – Experimento bombeado a 20 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 11/08/2009, no coletor alternativo de PVC.

A Tabela 4.3, a seguir, mostra os valores de temperatura máxima alcançados em cada ensaio feito utilizando-se vazão de escoamento de 20 L/h, em regime batelada e sem a placa de proteção transparente.

Tabela 4.3 – Temperatura Máxima Obtida em Cada Ensaio Ativo (20 L/h).

Data do Experimento	Temperatura Máxima (°C)	
	PP	PVC
15/07/2009	46,85	35,74
16/07/2009	43,00	33,19
17/07/2009	46,20	33,99
06/08/2009	49,79	41,35
10/08/2009	48,38	40,34
11/08/2009	48,88	38,82
12/08/2009	49,46	39,23
13/08/2009	47,58	36,83
12/03/2010	41,1	43,80

Os valores totais da radiação incidente sobre os coletores inclinados durante os dias de ensaio, bem como a eficiência diária obtida em cada experimento, para cada um dos coletores alternativos, são mostrados na Tabela 4.4, a seguir.

Tabela 4.4 – Radiação Total, Calor Útil Absorvido e Eficiência Diária (20 L/h).

Data	Dia do ano (n)	Declinação ( $\delta$ )	$\Sigma I$	$\Sigma I_T$	$Q_u$ (J/s)		$\eta$ (%)	
			(kJ/m <sup>2</sup> )	(kJ/m <sup>2</sup> )	PVC	PP	PVC	PP
11/08/2009	223	-15,05	18652	17144	2235	3385	46,9	71,1
15/07/2009	196	-21,51	16764	15084	1925	2957	50,2	77,2
16/07/2009	197	-21,35	14374	13153	1488	2484	40,7	67,9
17/07/2009	198	-21,18	17186	15517	1821	3147	42,2	73,0
06/08/2009	218	-16,54	18755	17080	2268	3321	47,8	69,9
10/08/2009	222	-15,36	18934	17329	1893	3123	39,3	64,8
12/08/2009	224	-14,74	19436	17777	2051	3147	41,5	63,7
13/08/2009	225	-14,43	18289	16903	1748	2906	37,2	61,9
12/03/2010	71	4,02	16711	16746	4046	2859	86,9	61,4

Nas Tabelas 4.2 e 4.4, ao se analisar os valores das eficiências diárias calculados para a placa coletora de polipropileno, observa-se que, para os ensaios termossifão e bombeado a 20 L/h, a média de eficiência diária é de 67,8%. Tal ‘coincidência’ é explicada pelo fato de que o fluido em circulação natural no coletor de PP possui um tempo de residência de 11,5 minutos, valor muito próximo ao tempo de residência no coletor de PP para o fluido circulando a uma vazão de 20 L/h, que é de 12 minutos, ou seja, o sistema termossifão e o sistema bombeado a 20 L/h proporcionam uma vazão mássica praticamente idêntica no equipamento. Já para o PVC, o tempo de residência para o fluido circulando a uma vazão de 20L/h é de 30 minutos, contra 15,2 minutos de tempo de residência do sistema termossifão. Os tempos de residência para cada configuração estão expostos na Tabela 4.11 (p. 68).

Observa-se que nas mesmas condições operacionais e geométricas, para o sistema batelada com vazão de 20 L/h, o coletor de PP apresentou valores de temperatura entre 41 °C e 49 °C, ao passo que o coletor de PVC apresentou temperaturas máximas no intervalo de 34 °C a 44 °C.

Os demais experimentos realizados nas mesmas condições de regime batelada, ausência de placa protetora transparente e vazão de bombeamento de 20 L/h, executados nos dias 15/07/2009, 16/07/2009, 17/07/2009, 06/08/2009, 10/08/2009, 12/08/2009, 13/08/2009 e 12/03/2010, apresentaram comportamento análogo ao revelado pelo ensaio do dia 11/08/2009 (mostrado através das Figuras 4.5 e 4.6) e têm seus gráficos de distribuição de temperatura expostos no Apêndice A.

#### **4.2.2 BOMBEAMENTO A 40 L/h**

Foram realizados seis ensaios utilizando escoamento ativo com vazão de 40 L/h, em regime batelada e com ausência de placa de proteção transparente. Os resultados dos seis experimentos apresentaram o mesmo comportamento de distribuição de temperatura e temperatura máxima atingida. Tais resultados são bem representados pelas Figuras 4.7 e 4.8, que mostram a distribuição de temperatura e temperatura máxima alcançada em cada coletor alternativo para o ensaio do dia 11/09/2009.

Nota-se, pela Figura 4.7, que a temperatura máxima alcançada na saída do coletor de PP foi de 45,44 °C, observada no período das 13 h, e que o gradiente de temperatura nesse

mesmo período foi de 12,14 °C. Verifica-se que o coletor de PP levou aproximadamente 5 h para acrescentar 27,22 °C à temperatura inicial de entrada de água na placa coletora.

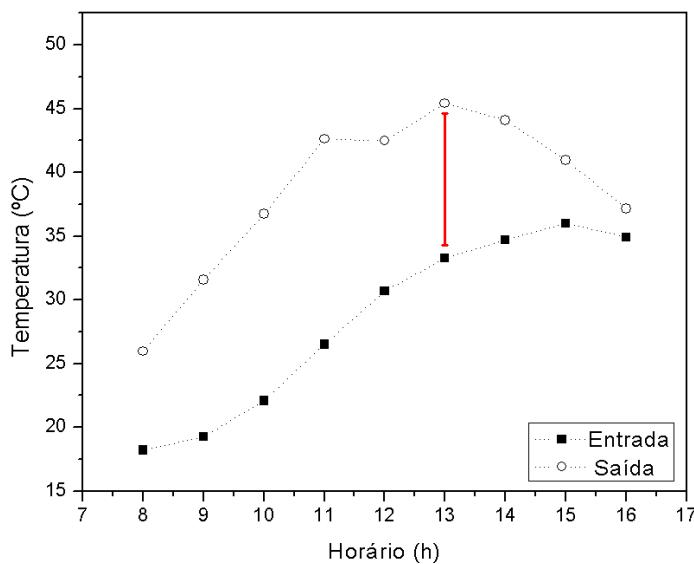


Figura 4.7 – Experimento bombeado a 40 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 11/09/2009, no coletor alternativo de PP.

A temperatura máxima registrada na saída de água do coletor de PVC foi de 30,14 °C, observada no período das 14 h, sendo nesse mesmo período, observado um gradiente de temperatura de 3,27 °C. Nota-se que o coletor de PVC levou um tempo aproximado de 6 h para elevar 15,83 °C à temperatura inicial de entrada de água na placa coletora, conforme mostra a Figura 4.8.

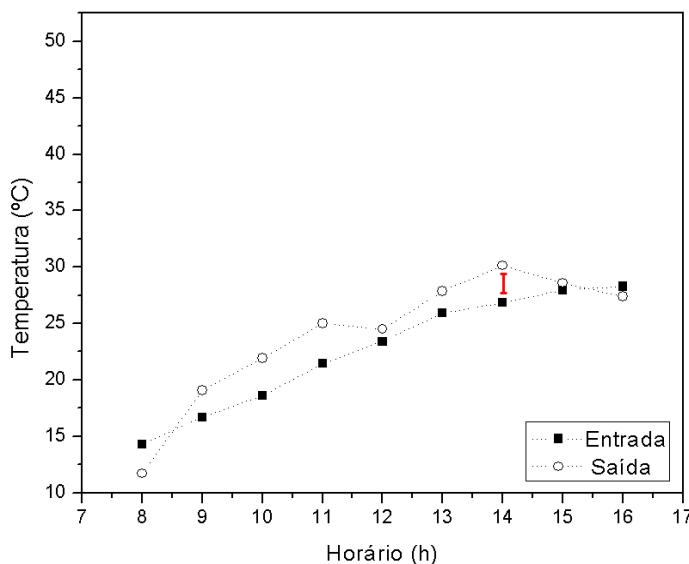


Figura 4.8 – Experimento bombeado a 40 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 11/09/2009, no coletor alternativo de PVC.

Pode-se notar, em ambos os coletores, que tanto o PP quanto o PVC foram bastante sensíveis às variações climáticas, fato observado pelo repentino decréscimo na temperatura de saída dos coletores no período das 12 h. Observa-se, porém, que o coletor de PVC mostrou-se bem mais sensível que o de PP, pois tanto no início quanto no final do ensaio, a placa coletora de PVC registrou temperaturas de saída menores que suas respectivas temperaturas de entrada. Visto que os coletores encontram-se expostos ao tempo, sofrendo tanto a incidência de raios solares quanto a exposição ao vento e à chuva, a ocorrência de pontos nos quais a temperatura de saída é menor que a temperatura de entrada da água no coletor se deve, provavelmente, à média de velocidade dos ventos no período de ensaio e, também, à ocorrência de nuvens mais carregadas durante algum período do dia de ensaio (Apêndice D).

Ao se comparar a Figura 4.8 com as Figuras 4.4 e 4.2, observa-se o mesmo comportamento do líquido no coletor de PVC para o sistema termossifão e o sistema ativo bombeado a 40 L/h. Notam-se gradientes de temperatura praticamente constantes durante os dias de ensaio, na faixa de 3,8 °C para o sistema ativo e 4,5 °C para o sistema termossifão. Além disso, observa-se também que os níveis de temperatura máxima alcançados em ambas as configurações são da ordem de 35,0 °C para o sistema termossifão e da ordem de 30,0 °C para o sistema bombeado com vazão de 40 L/h. O tempo de residência do fluido no interior do coletor de PVC explica a semelhança de comportamento entre essas configurações, pois para o sistema passivo encontra-se um tempo de residência de 15,2 minutos, ao passo que para o sistema ativo com vazão de 40 L/h o tempo de residência é de 15 minutos.

Para os ensaios ativos com vazão de 40 L/h, em regime batelada e sem a proteção transparente sobre os coletores, os valores registrados de radiação solar incidente no plano inclinado, bem como a eficiência de cada coletor, em cada experimento, são mostrados através da Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Radiação Total, Calor Útil Absorvido e Eficiência Diária (40 L/h).

Data	Dia do ano (n)	Declinação ( $\delta$ )	$\Sigma I$	$\Sigma I_T$	$Q_u (J/s)$		$\eta (\%)$	
			(kJ/m <sup>2</sup> )	(kJ/m <sup>2</sup> )	PVC	PP	PVC	PP
11/09/2009	254	-3,81	21074	20685	583	4201	10,1	73,1
15/08/2009	227	-13,78	17033	15801	938	3593	21,4	81,8
31/08/2009	243	-8,10	18871	18016	594	4139	11,8	82,7
08/09/2009	251	-5,01	18685	18159	198	3866	3,93	76,6
14/09/2009	257	-2,62	21081	20982	938	4400	16,1	75,5
12/11/2009	316	18,42	16220	19387	-6,44	3057	...	56,7

Ressalta-se que foram observadas condições de tempo nublado durante algumas tardes dos dias dos ensaios ativos com vazão de 40 L/h, o que explica, por exemplo, conforme o Apêndice D, a perda de calor do dia 12/11/2009, mais evidente para o coletor de PVC.

Os gráficos de distribuição de temperatura (nos quais se observam dados como: temperatura máxima atingida, gradiente de temperatura e tempo gasto para alcançar a temperatura máxima) para os ensaios realizados nos dias 15/08/2009, 31/08/2009, 08/09/2009, 14/09/2009 e 12/11/2009 são mostrados no Apêndice A.

A Tabela 4.6, a seguir, mostra os valores de temperatura máxima alcançados em cada ensaio realizado utilizando-se vazão de escoamento de 40 L/h, em regime batelada e sem a placa de proteção transparente.

Tabela 4.6 – Temperatura Máxima Obtida em Cada Ensaio Ativo (40 L/h).

Data do Experimento	Temperatura Máxima (°C)	
	PP	PVC
15/08/2009	39,73	26,76
31/08/2009	43,07	27,00
08/09/2009	45,67	28,66
11/09/2009	45,43	30,14
14/09/2009	46,93	31,69
12/11/2009	43,51	34,97

Nota-se que o coletor de PP, nas mesmas condições operacionais e geométricas que o coletor de PVC, apresentou valores entre 39,8 °C e 46,9 °C para temperatura máxima alcançada, contra valores entre 26,7 °C e 34,9 °C registrados para o coletor de PVC.

#### 4.2.3 BOMBEAMENTO A 60 L/h

Os experimentos realizados utilizando-se uma vazão de bombeamento de 60 L/h, em regime batelada e sem a presença de placa protetora transparente, obtiveram resultados com comportamentos semelhantes. O ensaio do dia 16/11/2009 representa bem esse comportamento, que pode ser visto através das Figuras 4.9 e 4.10, nas quais se observam as distribuições de temperatura para ambos os coletores, os gradientes de temperatura para o período de maior insolação do dia, bem como as temperaturas máximas alcançadas em cada coletor e o tempo gasto para se chegar a essas temperaturas.

A Figura 4.9 mostra a distribuição de temperatura obtida no ensaio realizado no coletor de polipropileno. Pode-se observar que a temperatura máxima alcançada nesse ensaio foi de 49,12 °C, observada no período das 15 h e que, para atingir essa temperatura, o coletor de PP levou um tempo aproximado de 7 h, acrescentando 29,25 °C à temperatura inicial de entrada da água na placa coletora. Nota-se que o gradiente de temperatura no principal período de insolação do dia foi de aproximadamente 9,0 °C.

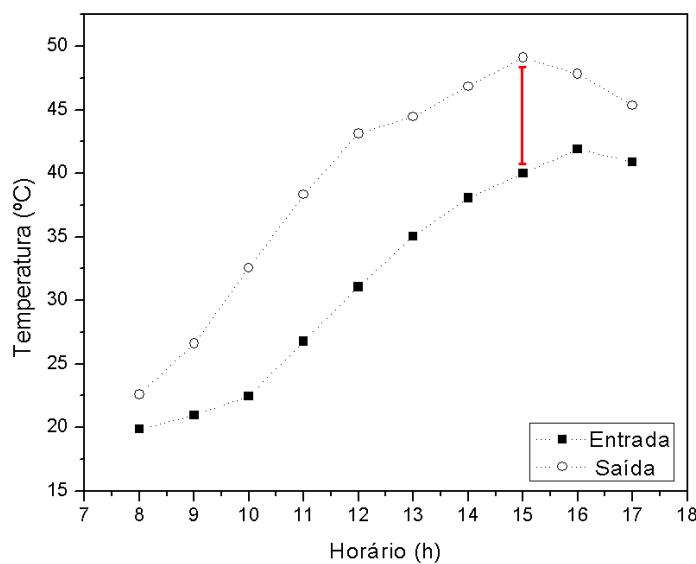


Figura 4.9 – Experimento bombeado a 60 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 16/11/2009, no coletor alternativo de PP.

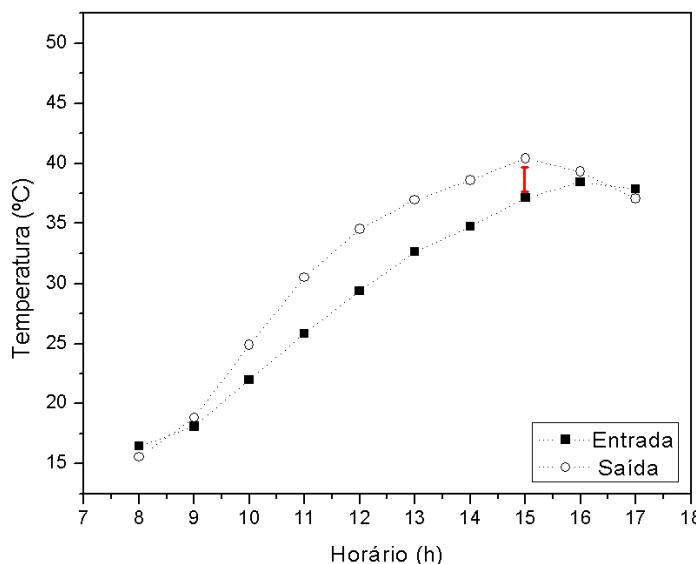


Figura 4.10 – Experimento bombeado a 60 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 16/11/2009, no coletor alternativo de PVC.

Já para a placa coletora de PVC, com vazão de bombeamento de 60 L/h, pode-se observar, conforme Figura 4.10, que o gradiente de temperatura registrado no momento em que se marcava um valor de 40,43 °C para temperatura (valor máximo alcançado), foi de 3,3 °C. Nota-se também que o material PVC levou um tempo aproximado de 7 h para elevar 23,9 °C à temperatura inicial de entrada de água na unidade.

Nota-se, para ambos os coletores alternativos, que à medida que água vai se aquecendo e circulando na unidade, a temperatura de entrada da água no coletor vai aumentando gradativamente até atingir 38,4 °C no coletor de PVC e 41,8 °C no coletor de PP, níveis de temperatura não observados em outras condições de operação. Isso certamente se deve ao fato de que a vazão de 60 L/h provoca turbulência no *boiler*, ocasionando a perda da estratificação e, consequentemente, a entrada de água já aquecida na placa coletora.

Os valores calculados de radiação total sobre a superfície inclinada, o calor útil absorvido por cada coletor alternativo e a eficiência atingida pelos coletores, são mostrados na Tabela 4.7, na qual também está registrado o somatório da radiação incidente sobre a superfície horizontal, valor disponibilizado pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para os dias dos ensaios.

Tabela 4.7 – Radiação Total, Calor Útil Absorvido e Eficiência Diária (60 L/h).

Data	Dia do ano (n)	Declinação ( $\delta$ )	$\Sigma I$	$\Sigma I_T$	$Q_u(J/s)$		$\eta(\%)$	
			(kJ/m <sup>2</sup> )	(kJ/m <sup>2</sup> )	PVC	PP	PVC	PP
16/11/2009	320	19,38	26053	33887	1613	5341	17,1	56,7
15/09/2009	258	-2,21	18270	18258	371	3014	7,3	59,4
16/09/2009	259	-1,81	22852	22935	616	5190	9,6	81,5
17/09/2009	260	-1,41	21475	21671	998	4733	16,6	78,6
10/11/2009	314	17,91	11389	14036	269	3289	6,9	84,3
18/11/2009	322	19,82	25409	31993	1333	4575	15,0	51,8

Os gráficos de distribuição de temperatura para os demais experimentos realizados nos dias 15/09/2009, 16/09/2009, 17/09/2009, 10/11/2009 e 18/11/2009 estão expostos no Apêndice A.

A Tabela 4.8, a seguir, mostra os valores de temperatura máxima alcançados em cada ensaio realizado utilizando-se vazão de escoamento de 60 L/h, em regime batelada e sem a placa de proteção transparente.

Tabela 4.8 – Temperatura Máxima Obtida em Cada Ensaio Ativo (60 L/h).

Data do Experimento	Temperatura Máxima (°C)	
	PP	PVC
15/09/2009	45,75	29,74
16/09/2009	50,39	34,37
17/09/2009	47,73	33,37
10/11/2009	38,64	31,15
16/11/2009	49,12	40,43
18/11/2009	46,84	36,22

Assim como constatado para as outras vazões de bombeamento, para os ensaios batelada bombeados a 60 L/h o coletor de PP também mostrou-se mais viável que o coletor de PVC, levando-se em consideração os níveis de temperatura máxima alcançados, de acordo com a Tabela 4.8.

A explicação para o fato de o coletor de PP proporcionar, em regra, maiores temperaturas do que as verificadas para o PVC, encontra-se no volume útil que cada coletor mantém dentro de si durante a operação. No caso do coletor de PP, o volume útil é de 4 L, ao passo que no coletor de PVC o volume útil é de 10 L. Conseqüentemente, para as mesmas condições meteorológicas e idêntica área de coleta de energia solar, o coletor de PP terá uma menor massa de água para sofrer determinada variação térmica quando comparado ao PVC. Os volumes dos coletores utilizados neste trabalho foram diferentes porque foram adaptados a partir de placas para forros residenciais e comerciais, previamente estabelecidas pelo fabricante.

Pode-se, também, observar que em todos os ensaios realizados, o fluido no coletor de PVC demorou em média duas horas para alcançar a mesma temperatura inicial de entrada do fluido no coletor de PP. Uma análise comparativa entre ambos os coletores seria mais justa se, além do mesmo volume interno, os coletores solares recebessem água a um mesmo valor de temperatura inicial de entrada.

Comparando-se os sistemas ativos experimentados com o sistema termossifão, pode-se verificar que a média dos valores de temperatura máxima alcançados, para o coletor de PP, nos sistemas ativos é de 45,75 °C, ao passo que para o sistema termossifão calcula-se uma média de temperatura máxima de 45,03 °C. Para o coletor de PVC, a média dos valores de temperatura máxima alcançados nos sistemas ativos é de 34,07 °C, contra uma média de

temperatura máxima no sistema termossifão de 34,88 °C. Tais resultados mostram que, em relação aos valores de temperatura máxima alcançados na saída dos coletores, não há justificativa para o uso de bombas no sistema de aquecimento solar em regime batelada.

O uso de bombeamento não aumentou a temperatura do fluido no coletor solar quando comparado ao sistema termossifão, para ambos os coletores, pois, apesar do PVC e PP terem praticamente as mesmas condutividades térmicas ( $k = 0,17 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ), esta propriedade física é consideravelmente menor do que as observadas para materiais condutores (por exemplo, o cobre tem condutividade térmica cerca de 3500 vezes maior do que os materiais utilizados neste trabalho). Nesta hipótese, pela própria natureza dos materiais alternativos (PP e PVC – maus condutores), será inevitável a presença de altos valores para as resistências térmicas condutivas no coletor. Sabe-se que durante a transferência de calor da superfície do coletor para o interior do fluido, há duas resistências térmicas a serem vencidas: uma condutiva (no coletor) e outra convectiva (do coletor para o fluido). Provavelmente, pelos motivos anteriormente expostos, a transferência de calor, independentemente do material do coletor, está sendo controlada pela resistência térmica condutiva. Significa dizer que a resistência térmica condutiva está sendo muito maior do que a convectiva. Em outras palavras, mesmo em virtude do bombeamento (aumento dos coeficientes de película e, consequentemente, diminuição da resistência térmica convectiva) o fenômeno de transferência de calor continuará sendo controlado pelo mecanismo de condução.

#### **4.3 PRESENÇA DE PLACA DE PROTEÇÃO TRANSPARENTE**

Os ensaios utilizando a sobreposição de uma placa de proteção transparente aos coletores alternativos e em regime batelada foram realizados para escoamento ativo (nas três vazões de bombeamento, a saber, 20 L/h, 40 L/h e 60 L/h) e escoamento passivo (ou termossifão).

Os resultados obtidos são mostrados na forma de distribuição de temperatura, gradiente de temperatura no principal período de insolação do dia e temperatura máxima alcançada com o experimento, para cada configuração estudada.

A Tabela 4.9 mostra o somatório da radiação solar incidente sobre os coletores solares alternativos planos inclinados nos dias de ensaio, bem como o valor da eficiência diária para cada vazão utilizada nos experimentos ativos. É possível perceber, pela Tabela 4.9, que a sobreposição da placa de proteção transparente aos coletores alternativos resultou em

valores maiores para os somatórios da radiação solar total incidente sobre o plano inclinado em relação aos somatórios da radiação total incidente na superfície horizontal, o que não havia acontecido em nenhum experimento anterior.

Tabela 4.9 – Valores Calculados de Radiação Incidente sobre Coletores Inclinados para Experimentos Batelada com Presença de Placa de Proteção Transparente.

Ensaio		Data	Dia do ano (n)	$\Sigma I$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$\Sigma I_T$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$\eta(\%)$	
Termossifão		04/02/2010	35	23921	29268	<b>PP</b>	<b>PVC</b>
Ativo	20L/h	19/01/2010	19	23308	30683	35,3	42,1
	40L/h	01/02/2010	32	25846	35911	50,1	44,3
	60L/h	20/01/2010	20	23621	29837	57,1	78,8

#### 4.3.1 TERMOSSIFÃO COM PRESENÇA DE PLACA DE PROTEÇÃO TRANSPARENTE EM REGIME BATELADA

Foi realizado um ensaio termossifão, com presença de placa de proteção transparente e em regime batelada, no dia 04/02/2010. As Figuras 4.11 e 4.12 mostram as distribuições de temperatura para os ensaios realizados utilizando-se coletor de PP e coletor de PVC, respectivamente.

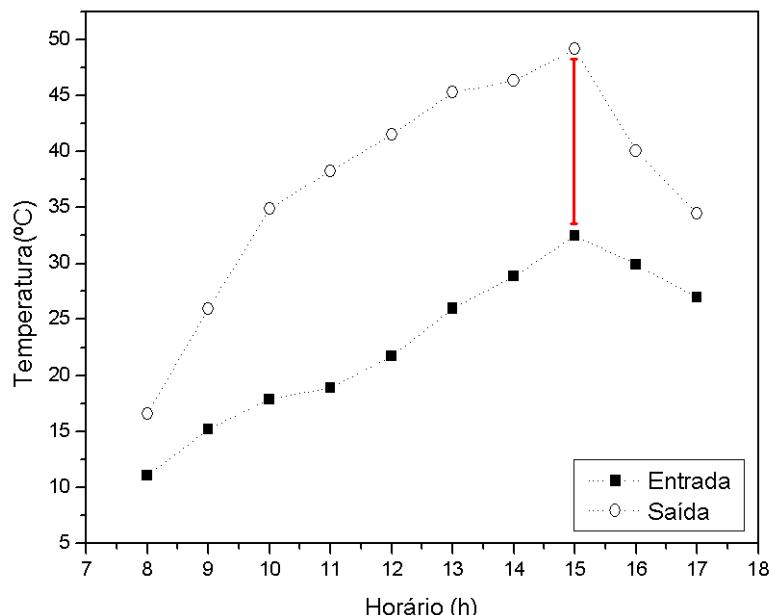


Figura 4.11 – Experimento termossifão, em regime batelada e com proteção transparente, realizado no dia 04/02/2010, no coletor alternativo de PP.

Observa-se, na Figura 4.11, que a temperatura máxima alcançada foi de 49,2 °C, atingida no período das 15 h. Nesse mesmo período, o gradiente de temperatura foi de 16,7 °C e pode-se notar que o coletor de PP levou um tempo aproximado de 7 h para acrescentar 37,3 °C à temperatura inicial de entrada de água na placa coletora. A eficiência diária calculada foi de 44,5 %. Já a placa coletora construída com PVC apresentou, para o principal período de insolação do dia, um gradiente de temperatura de 15,8 °C, sendo a temperatura máxima alcançada de 45,9 °C. O tempo necessário ao PVC para elevar 39,7 °C à temperatura inicial de entrada de fluido no coletor foi de 7 h, conforme se pode observar pela Figura 4.12. A eficiência diária calculada para esse ensaio foi de 85,7 %.

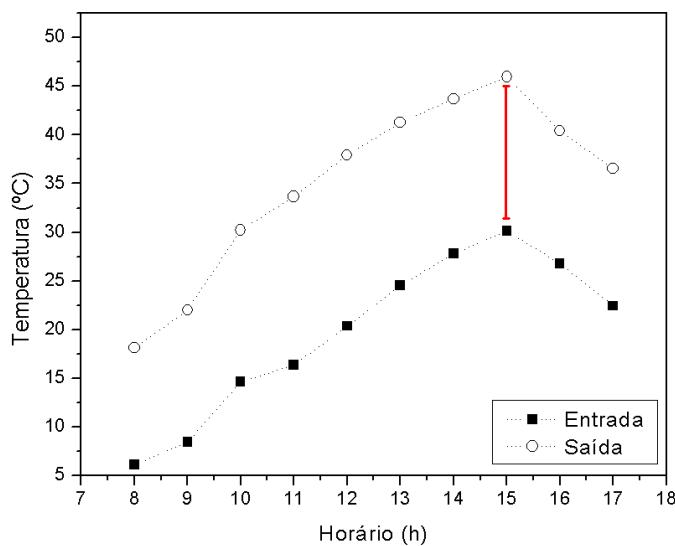


Figura 4.12 – Experimento termossifão, em regime batelada e com proteção transparente, realizado no dia 04/02/2010, no coletor alternativo de PVC.

Comparando-se as médias dos resultados de temperatura máxima e gradientes de temperatura para os experimentos termossifão batelada e sem placa protetora transparente, registrados na Tabela 4.1, com os resultados mostrados nas Figuras 4.11 e 4.12, para experimentos termossifão batelada, porém com presença de placa de proteção transparente, pode-se observar um aumento aproximado de 4,0 °C na temperatura máxima de saída no coletor de PP com presença de placa protetora transparente, ao passo que, a presença de uma proteção transparente sobre o coletor de PVC, proporcionou um acréscimo de 11,0 °C na temperatura de saída do coletor.

Acredita-se que o uso de proteção transparente no sistema termossifão aumentou a temperatura do fluido no coletor solar, tanto para o PVC quanto para o PP, pelo fato de que mesmo com a pintura das superfícies de PVC e PP com tinta preta, a fim de aproximá-los, por

definição, a um corpo negro (superfície ideal), os coletores não se comportaram como tal e acabaram inevitavelmente refletindo uma parcela da energia incidente. Concomitantemente ao fenômeno de reflexão, as superfícies de PVC e PP (“negras”) acabaram perdendo uma quantidade significativa de energia devido ao fenômeno de emissão causado pelo aumento de temperatura da estrutura coletora durante o funcionamento dos ASBC. Logo, com a utilização da proteção transparente, tanto a parcela de energia refletida quanto a parcela de energia emitida tenderam a permanecer no espaço confinado (entre o coletor e a proteção transparente), ordinariamente denominado pela literatura como “efeito estufa”. Assim, ao invés de serem perdidas, provavelmente elas passaram a ser direcionadas para o interior do coletor, o que explica o aumento de temperatura do fluido nos experimentos que tiveram o emprego da proteção transparente.

#### **4.3.2 ENSAIOS ATIVOS COM PRESENÇA DE PLACA DE PROTEÇÃO TRANSPARENTE EM REGIME BATELADA**

Foram realizados três ensaios ativos (um para cada vazão de bombeamento) em regime batelada com presença de placa de proteção transparente sobre os coletores alternativos de PVC e de polipropileno.

##### **4.3.2.1 VAZÃO DE 20 L/h**

No ensaio do dia 19/01/2010 foi utilizada a vazão de 20 L/h no experimento, cujos gráficos de distribuição de temperatura são mostrados nas Figuras 4.13 e 4.14.

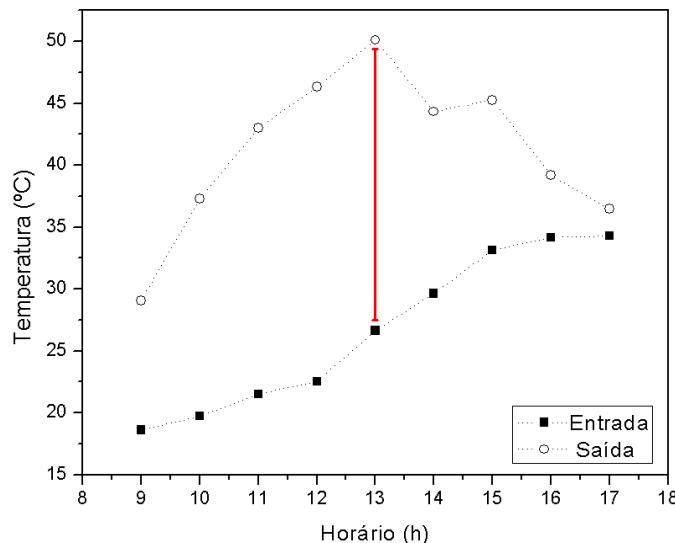


Figura 4.13 – Experimento ativo bombeado a 20 L/h, em regime batelada e com proteção transparente, realizado no dia 19/01/2010, no coletor alternativo de PP.

Pode-se observar na Figura 4.13 que a temperatura máxima alcançada na saída do fluido do coletor de PP foi de 50,1 °C, registrada no período das 13 h, sendo que, nesse mesmo período, o gradiente de temperatura foi de 23,45 °C. Nota-se que o coletor levou aproximadamente 4 h para atingir a temperatura máxima, acrescentando 31,5 °C à temperatura inicial de entrada de água na placa coletora. A eficiência diária calculada foi de 35,29 %.

De acordo com a Figura 4.14, o experimento realizado no coletor de PVC atingiu uma temperatura máxima de 46,8 °C, possuindo um gradiente de temperatura, observado no período de maior insolação do dia, de 25,9 °C. Nota-se também que, assim como ocorreu no coletor de PP, o coletor de PVC levou um tempo aproximado de 4 h para acrescentar 31,5 °C à temperatura inicial de entrada de água na placa coletora. A eficiência diária calculada foi de 42,07 %.

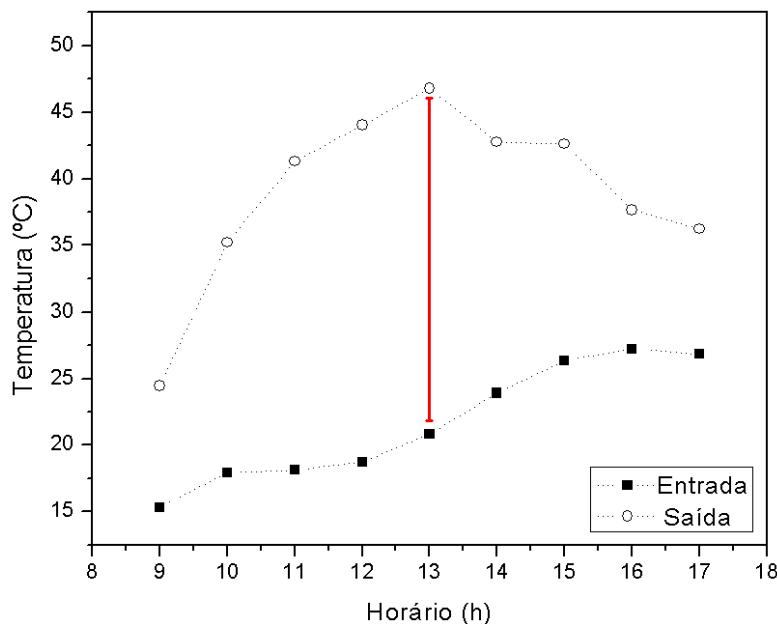


Figura 4.14 – Experimento ativo bombeado a 20 L/h, em regime batelada e com proteção transparente, realizado no dia 19/01/2010, no coletor alternativo de PVC.

Procedendo-se com o cálculo da média aritmética dos valores de temperatura máxima alcançados em cada experimento ativo bombeado a 20 L/h, em regime batelada e sem a presença da placa de proteção transparente, encontrados na Tabela 4.3, observa-se um aumento aproximado de 2,5 °C na temperatura de saída do fluido no ensaio utilizando a placa de proteção transparente acoplada ao coletor de PP. Para o coletor de PVC, o acréscimo na temperatura de saída do fluido no experimento utilizando a sobreposição da placa de proteção transparente ao coletor alternativo, foi de aproximadamente 9,0 °C.

#### 4.3.2.2 VAZÃO DE 40 L/h

Foi utilizada uma vazão de bombeamento de 40 L/h no ensaio do dia 01/02/2010, em regime batelada e com a sobreposição de uma placa de proteção transparente a cada placa coletora alternativa.

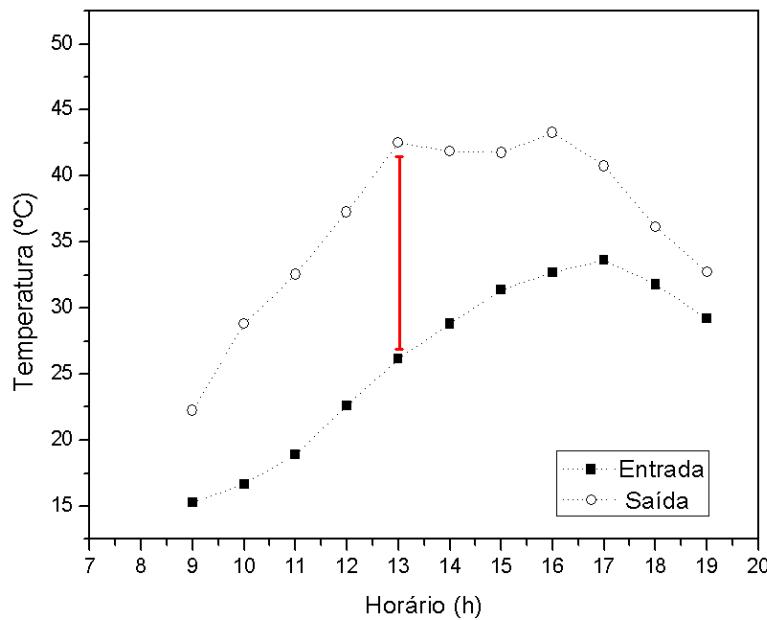


Figura 4.15 – Experimento ativo bombeado a 40 L/h, em regime batelada e com proteção transparente, realizado no dia 01/02/2010, no coletor alternativo de PP.

A Figura 4.15 mostra a distribuição de temperatura de entrada e saída de água do coletor de PP durante o dia do experimento. Pode-se observar uma temperatura máxima de 42,5 °C, registrada no período das 13 h, sendo o gradiente de temperatura obtido no mesmo período do dia de 16,35 °C. Nota-se que o coletor de PP levou 4 h para acrescentar 27,2 °C à temperatura inicial de entrada de água na placa coletora. A eficiência diária calculada foi de 50,1 %.

Para o coletor de PVC, conforme a Figura 4.16, observa-se que a temperatura máxima alcançada foi de 42,0 °C, sendo registrado um gradiente de temperatura de 11,8 °C. Nota-se que o coletor de PVC acoplado a uma placa de proteção transparente levou um tempo aproximado de 7 h para acrescentar 23,8 °C à temperatura inicial de entrada de água na placa coletora. A eficiência diária calculada neste ensaio foi de 44,3 %.

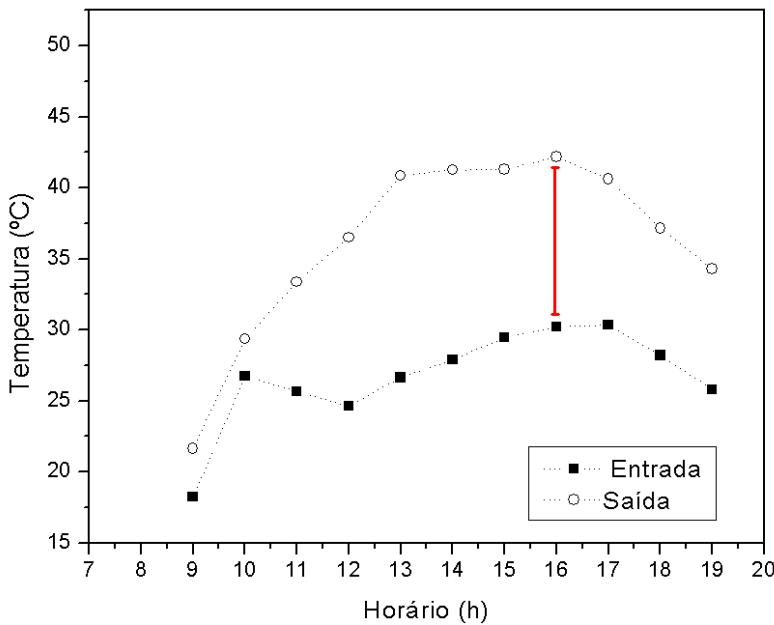


Figura 4.16 – Experimento ativo bombeado a 40 L/h, em regime batelada e com proteção transparente, realizado no dia 01/02/2010, no coletor alternativo de PVC.

Comparando-se a média dos resultados para os experimentos ativos com vazão de 40 L/h, em regime batelada e sem a presença da placa de proteção transparente sobre os coletores alternativos, mostrados na Tabela 4.6, observa-se que a sobreposição da placa transparente ao coletor de PP não proporcionou acréscimo de temperatura, ao passo que, para o coletor de PVC acoplado à placa de proteção transparente, o acréscimo de temperatura foi de 12,13 °C.

#### 4.3.2.3 VAZÃO DE 60 L/h

A vazão de circulação de 60 L/h foi utilizada no ensaio do dia 20/01/2010, em regime batelada e com a sobreposição da placa de proteção transparente ao coletor alternativo. Os resultados para ambos os coletores são mostrados em gráficos de distribuição de temperaturas na entrada e na saída da água dos coletores durante o dia de ensaio, através da Figura 4.17 e da Figura 4.18.

A Figura 4.17 mostra que, para o coletor de PP acoplado à placa protetora transparente, a temperatura máxima alcançada no dia do ensaio foi de 43,0 °C, registrada às 13 h. O gradiente de temperatura nesse mesmo período de tempo foi de 11,4 °C. Percebe-se que foram necessárias 4 h para o coletor elevar a temperatura inicial de entrada de água no coletor em 23,7 °C. A eficiência diária calculada foi de 57,1 %.

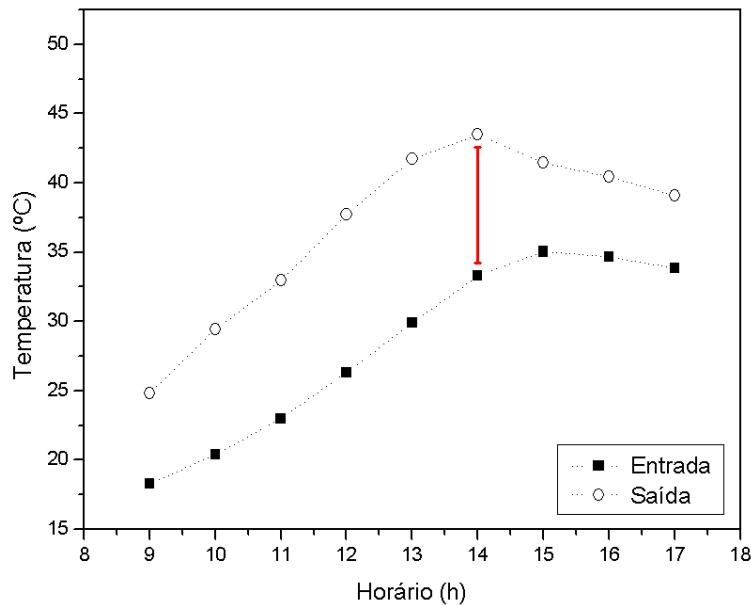


Figura 4.17 – Experimento ativo bombeado a 60 L/h, em regime batelada e com proteção transparente, realizado no dia 20/01/2010, no coletor alternativo de PP.

Na Figura 4.18 pode-se observar uma temperatura máxima alcançada de 42,4 °C para o coletor de PVC com sobreposição da placa de proteção transparente. O gradiente de temperatura registrado no instante em que ocorria a temperatura máxima foi de 14,5 °C. Observa-se que o coletor de PVC acoplado à placa transparente levou um tempo aproximado de 4 h para acrescentar 26,9 °C à temperatura inicial de entrada de água no coletor. A eficiência diária calculada para este ensaio foi de 78,8 %.

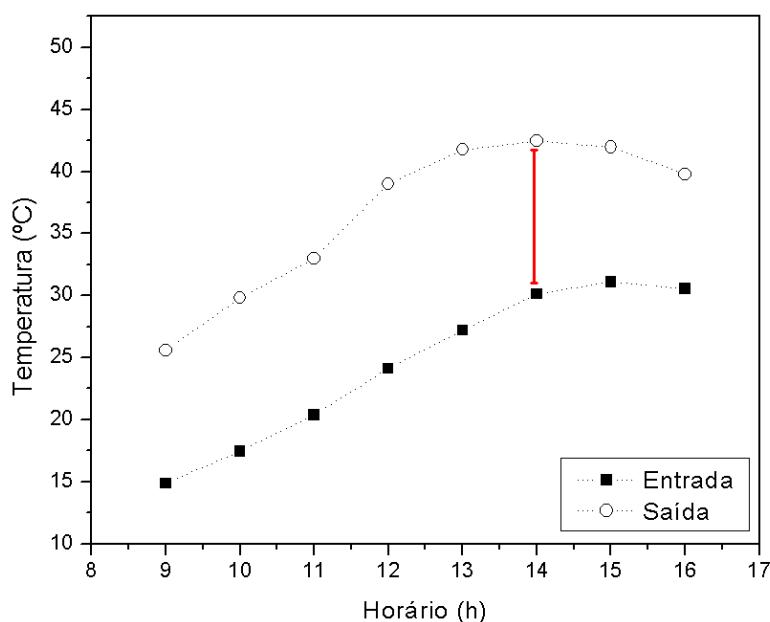


Figura 4.18 – Experimento ativo bombeado a 60 L/h, em regime batelada e com proteção transparente, realizado no dia 20/01/2010, no coletor alternativo de PVC.

Comparando-se os resultados das Figuras 4.17 e 4.18, nos quais há a sobreposição da placa de proteção transparente aos coletores alternativos, com os resultados da Tabela 4.8, para ensaios nas mesmas condições, porém com ausência de placa de proteção transparente, nota-se que não houve acréscimo de temperatura no experimento do coletor de PP, ao passo em que foi registrado um aumento de 8,2 °C para o experimento utilizando coletor de PVC acoplado à proteção transparente.

A Tabela 4.10, a seguir, mostra uma síntese dos resultados de temperatura máxima e eficiência diária obtidos nos ensaios com e sem a presença da placa de proteção transparente.

Tabela 4.10 – Temperatura Máxima e Eficiência Diária para Ensaios com Presença e Ausência de Proteção Transparente.

Ensaios			Termossifão	20 L/h	40 L/h	60 L/h
PP	T <sub>MAX</sub> (°C)	Com Proteção Sem Proteção	49,2 45,03	50,1 46,8	42,5 44,0	43,0 46,4
	Eficiência Diária (%)	Com Proteção Sem Proteção	44,5 67,87	35,3 67,8	50,1 74,4	57,1 68,7
PVC	T <sub>MAX</sub> (°C)	Com Proteção Sem Proteção	45,9 34,8	46,8 38,1	42,0 29,8	42,4 34,2
	Eficiência Diária (%)	Com Proteção Sem Proteção	85,7 49,3	42,1 48,1	44,3 12,6	78,8 12,1

Nos ensaios ativos pôde-se verificar, para as três vazões de bombeamento, que a sobreposição de uma placa de proteção transparente ao coletor alternativo de PVC proporcionou um aumento significativo em sua temperatura máxima atingida, em relação aos experimentos nos quais não havia presença de placa de proteção transparente. Já o coletor de PP acoplado à proteção transparente, com vazões de bombeamento de 40 e 60 L/h, não apresentou aumento na temperatura de saída da água em relação aos resultados obtidos quando não havia presença de placa de proteção transparente.

A Tabela 4.11 mostra os tempos de residência t<sub>R</sub> da água no interior de cada coletor para cada tipo de escoamento estudado nos ensaios, a saber, sistemas ativos bombeados a 20 L/h, 40 L/h e 60 L/h, e sistema passivo (ou termossifão). Para os sistemas ativos, os cálculos foram feitos utilizando os valores de vazão volumétrica e volume das placas coletores. Para o sistema termossifão o cálculo foi feito usando-se os princípios de balanço de energia para o fluido nos *boilers*. No Apêndice C está descrita a metodologia utilizada para o cálculo do tempo de residência no termossifão.

Tabela 4.11 – Tempo de Residência para cada Configuração.

Ensaio	$t_R$ (min)	
	PVC	PP
Termossifão	15,2	11,5
20 L/h	30,0	12,0
40 L/h	15,0	6,0
60 L/h	10,0	4,0

Acredita-se que o fato do uso de proteção transparente conjuntamente com bombeamento apenas favorecer o aumento da temperatura do fluido no coletor de PVC tenha a ver com o tempo de residência do fluido em cada um dos coletores. Em se tratando do sistema termossifão, verificou-se que o tempo de residência do fluido no coletor de PVC foi aproximadamente 30% maior do que no coletor de PP. Em ambos, a proteção transparente favoreceu para com o aumento da temperatura. Por sua vez, em se tratando dos sistemas bombeados, verificou-se que o tempo de residência do fluido no coletor de PVC foi aproximadamente 250% maior do que no coletor de PP. Assim, um maior tempo de contato do fluido com a superfície interna do coletor de PVC deve ter contribuído para que a temperatura do fluido aumentasse quando comparada à estrutura de PP.

#### 4.4 ENSAIOS REGIME CONTÍNUO

Foram realizados ensaios em regime contínuo, também chamados de ensaios de ‘simulação de banhos’, nos quais durante o período do dia em que se verificava uma forte insolação, ocorriam entrada e saída de água, simultâneas, da unidade experimental.

Foram experimentados banhos no sistema passivo e no sistema ativo, nas três vazões de bombeamento, com a ausência e a presença da placa de proteção transparente. Os resultados são expostos na forma de gráficos que mostram a distribuição de temperatura nos *boilers* dos coletores alternativos, a fim de se verificar as perturbações causadas pelo regime contínuo.

##### 4.4.1 SISTEMA TERMOSSIFÃO

Foi realizado um ensaio com sistema termossifão em regime contínuo e sem placa de proteção transparente no dia 07/04/2010. As Figuras 4.19 e 4.20 mostram as distribuições de temperatura nos *boilers* dos coletores de PP e de PVC, respectivamente.

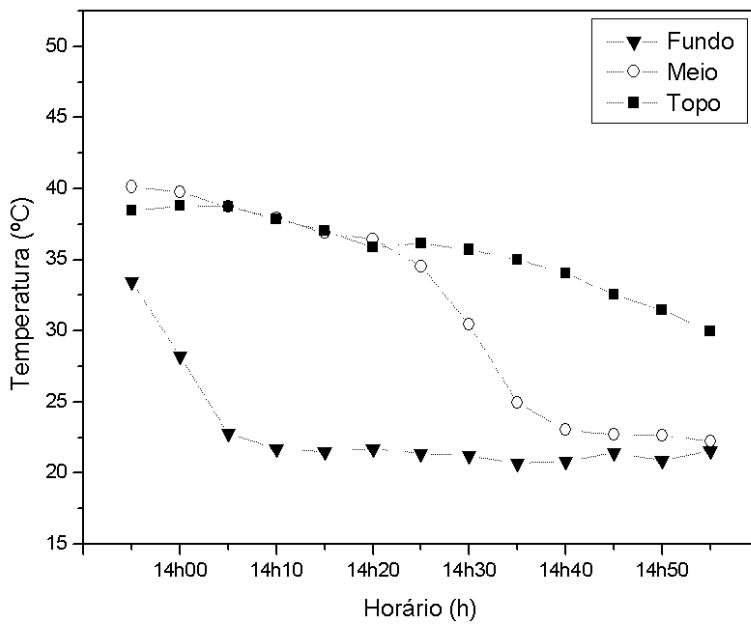


Figura 4.19 – Experimento termossifão, em regime contínuo e sem proteção transparente, realizado no dia 07/04/2010, no coletor alternativo de PP.

Observa-se, através da Figura 4.19, que foi simulado um banho de uma hora de duração com a água proveniente do *boiler* do aquecedor de PP. Pode-se verificar que no momento em que se inicia a entrada água fria (água à temperatura ambiente) na unidade, a temperatura da água na camada inferior do *boiler* diminui bruscamente, indicando que a água aquecida, por ter menor densidade, sobe para as posições intermediária e superior do reservatório. Nota-se que é possível se obter água numa temperatura média de 38,2 °C (agradável para banho) por aproximadamente 20 minutos e que, depois desse tempo, o reservatório mantém as três camadas de estratificação por aproximadamente 15 minutos, quando a camada intermediária se resfria, aproximando sua temperatura à da camada inferior de água no reservatório.

Através da Figura 4.20 nota-se que é possível, para o *boiler* do coletor de PVC, se obter água numa temperatura média de 42,6 °C durante os quarenta minutos de duração do experimento. Verifica-se também que a entrada de fluido frio no reservatório provoca uma queda na temperatura da água presente na seção inferior do reservatório. Somente nos últimos quinze minutos do experimento é que se pode observar a formação das três camadas de estratificação do *boiler*.

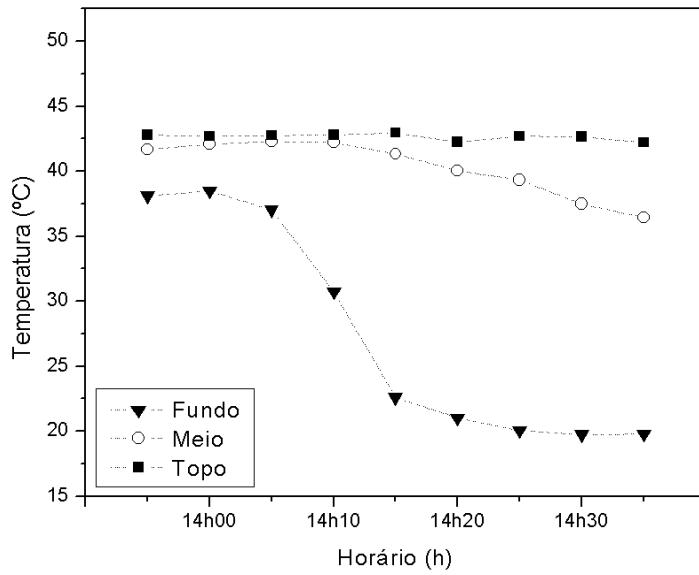


Figura 4.20 – Experimento termossifão, em regime contínuo e sem proteção transparente, realizado no dia 07/04/2010, no coletor alternativo de PVC.

No dia 17/04/2010 foi realizada a simulação de banho em um sistema termossifão acoplado a uma placa de proteção transparente. Os resultados desse ensaio são mostrados nas Figuras 4.21 e 4.22.

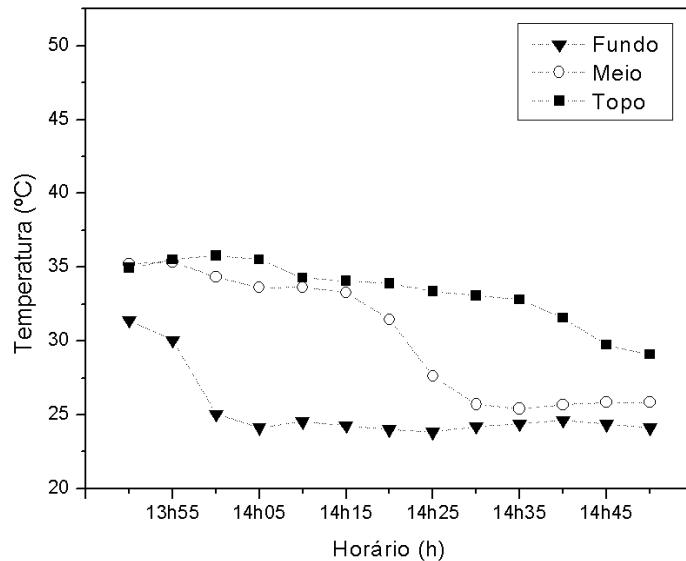


Figura 4.21 – Experimento termossifão, em regime contínuo e com proteção transparente, realizado no dia 17/04/2010, no coletor alternativo de PP.

Pela Figura 4.21, para o reservatório do coletor de PP, nota-se que é possível se obter água à temperatura média de 35,2 °C por aproximadamente vinte minutos, sendo possível se observar que logo após esse período, o *boiler* passa a apresentar as três

camadas de estratificação de água por aproximadamente 15 minutos, quando as camadas inferior e intermediária praticamente igualam suas temperaturas.

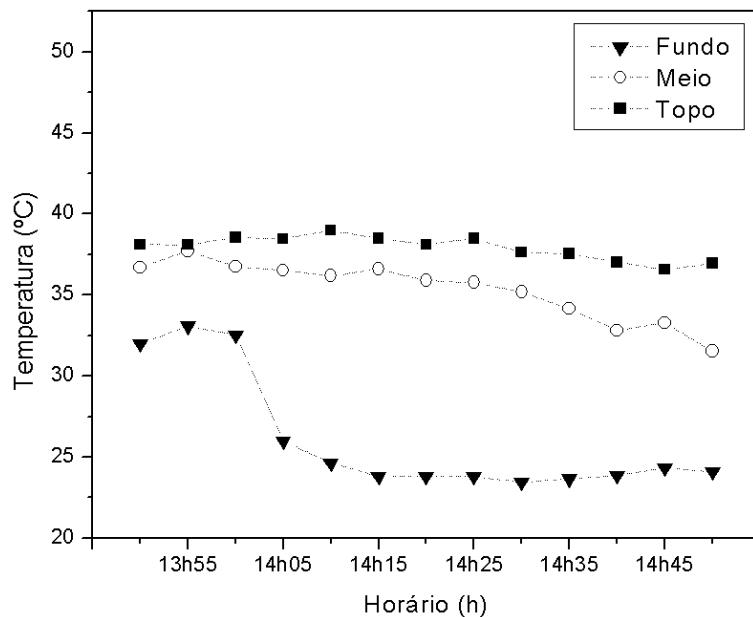


Figura 4.22 – Experimento termossifão, em regime contínuo e com proteção transparente, realizado no dia 17/04/2010, no coletor alternativo de PVC.

Já na Figura 4.22, para o *boiler* do coletor de PVC, observa-se que é possível se obter água à temperatura de 38,3 °C por aproximadamente 40 minutos (todo o tempo do ensaio para o banho do coletor de PVC), e que o reservatório mantém suas três camadas de estratificação por praticamente todo o período do experimento, sendo, no entanto, o gradiente de temperatura entre as camadas superior e intermediária em média de 2,0 °C.

#### 4.4.2 SISTEMAS ATIVOS

Os ensaios ativos foram realizados em três vazões distintas de bombeamento, a saber, 20 L/h, 40 L/h e 60 L/h, em experimentos com ausência e presença de placa protetora transparente sobreposta aos coletores alternativos.

##### 4.4.2.1 VAZÃO DE 20 L/h

Foi realizado um ensaio de simulação de banho, bombeado a 20L/h e sem placa de proteção transparente, no dia 19/03/2010. Os resultados são mostrados nas Figuras 4.23 e 4.24.

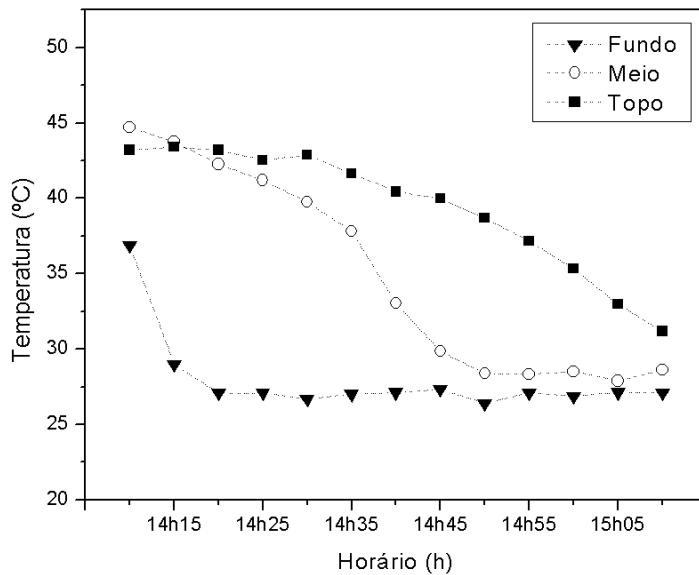


Figura 4.23 – Experimento ativo bombeado a 20 L/h, em regime contínuo e sem proteção transparente, realizado no dia 19/03/2010, no coletor alternativo de PP.

A Figura 4.23 mostra o comportamento do reservatório do coletor de PP durante o período de uma hora de simulação de banho, em que acontecem, simultaneamente, a entrada e saída de água do sistema de aquecimento solar. Verifica-se que é possível se obter água à temperatura média de 41,7 °C por aproximadamente quarenta minutos. Nota-se que o *boiler*, após os vinte primeiros minutos de banho, mantém as três camadas de estratificação por aproximados vinte minutos, quando a temperatura da camada intermediária de água se aproxima da temperatura da camada inferior.

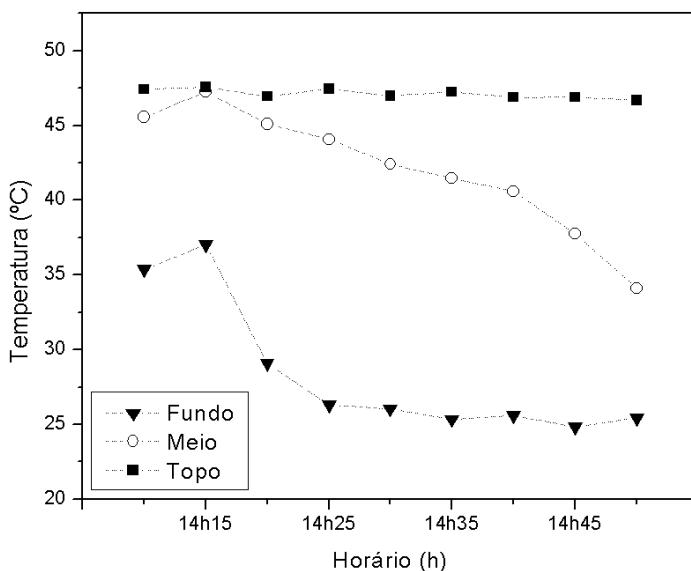


Figura 4.24 – Experimento ativo bombeado a 20 L/h, em regime contínuo e sem proteção transparente, realizado no dia 19/03/2010, no coletor alternativo de PVC.

O comportamento do *boiler* do coletor de PVC é mostrado através da Figura 4.24, na qual se observa que é possível se obter água à temperatura de 47,1 °C por todo o período de tempo do experimento (40 minutos), durante o qual também se pode notar a existência das três camadas de estratificação.

No dia 15/04/2010 foi realizado um experimento ativo, bombeado a 20 L/h, em regime contínuo (simulação de banho) e com a sobreposição de uma placa de proteção transparente aos coletores. Os resultados de distribuição de temperatura nos reservatórios dos coletores de PP e PVC são mostrados através das Figuras 4.25 e 4.26, respectivamente.

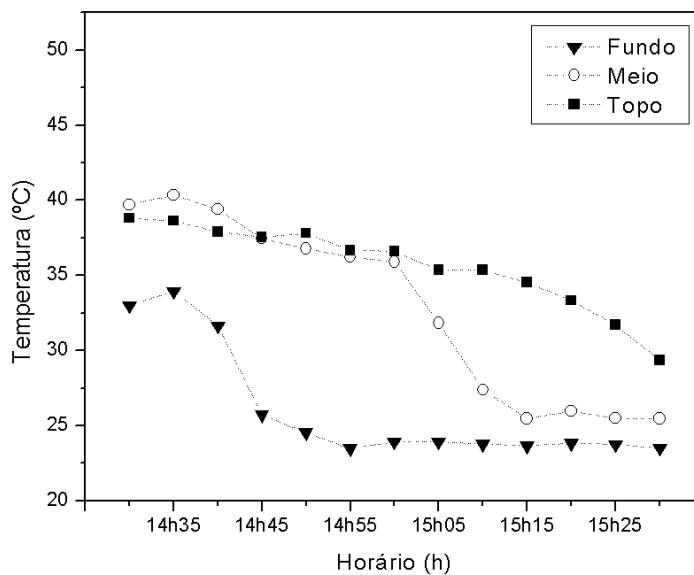


Figura 4.25 – Experimento ativo bombeado a 20 L/h, em regime contínuo e com proteção transparente, realizado no dia 15/04/2010, no coletor alternativo de PP.

A Figura 4.25 mostra a distribuição de temperatura no reservatório do coletor de PP acoplado a uma placa transparente. Pode-se observar que durante trinta minutos é possível se obter um banho à temperatura média de 37,7 °C. Logo após esse período, nota-se a formação das três camadas de estratificação no reservatório, que se mantém separadas por aproximadamente quinze minutos.

Para o coletor de PVC acoplado à placa de proteção transparente, conforme a Figura 4.26, observa-se que é possível se obter água a uma temperatura média de 42,0 °C durante os quarenta minutos de ensaio, período em que se pode observar as três camadas de estratificação do fluido no reservatório.

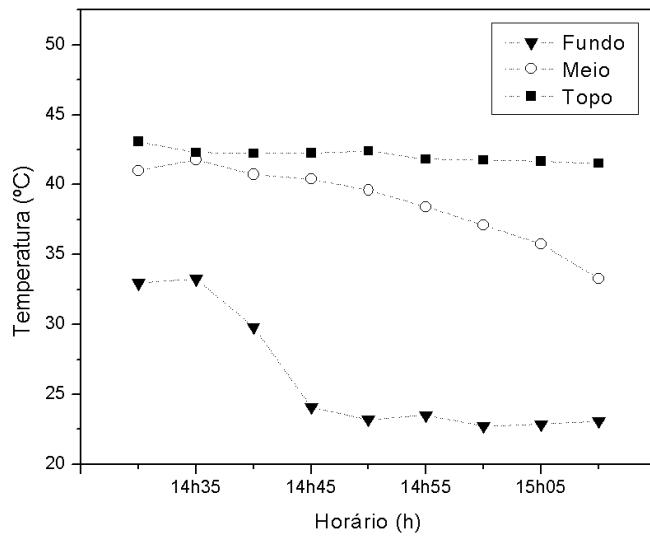


Figura 4.26 – Experimento ativo bombeado a 20 L/h, em regime contínuo e com proteção transparente, realizado no dia 15/04/2010, no coletor alternativo de PVC.

#### 4.4.2.2 VAZÃO DE 40 L/h

Foi realizado, no dia 09/03/2010, um experimento de banho com vazão de circulação da bomba de 40 L/h e sem a utilização da placa protetora transparente sobre os coletores alternativos. As Figuras 4.27 e 4.28 mostram os resultados obtidos. Observa-se pela Figura 4.27, que o reservatório do coletor de PP proporciona trinta e cinco minutos de banho à temperatura de 35,5 °C. Nota-se que após esse período, dá-se início à formação das três camadas de estratificação no *boiler*, as quais permanecem separadas por aproximadamente quinze minutos, quando há uma aproximação da temperatura da camada intermediária com a camada inferior.

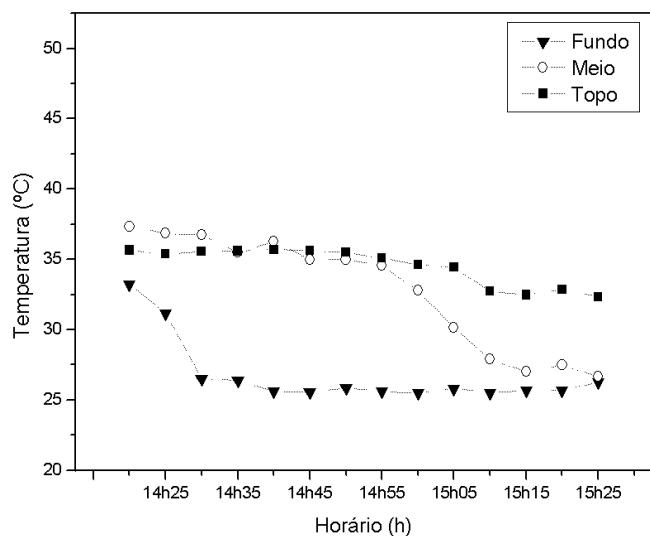


Figura 4.27 – Experimento ativo bombeado a 40 L/h, em regime contínuo e sem proteção transparente, realizado no dia 09/03/2010, no coletor alternativo de PP.

A Figura 4.28 mostra a distribuição de temperatura do *boiler* do coletor de PVC durante o ensaio de simulação de banho ativo bombeado a 40 L/h e sem placa de proteção transparente. Observa-se que é possível se obter água à temperatura média de 37,5 °C durante os quarenta minutos do ensaio. Pode-se perceber estratificação no reservatório nos últimos trinta minutos do experimento, sendo, no entanto, o gradiente de temperatura entre as camadas superior e intermediária de aproximadamente 3,4 °C.

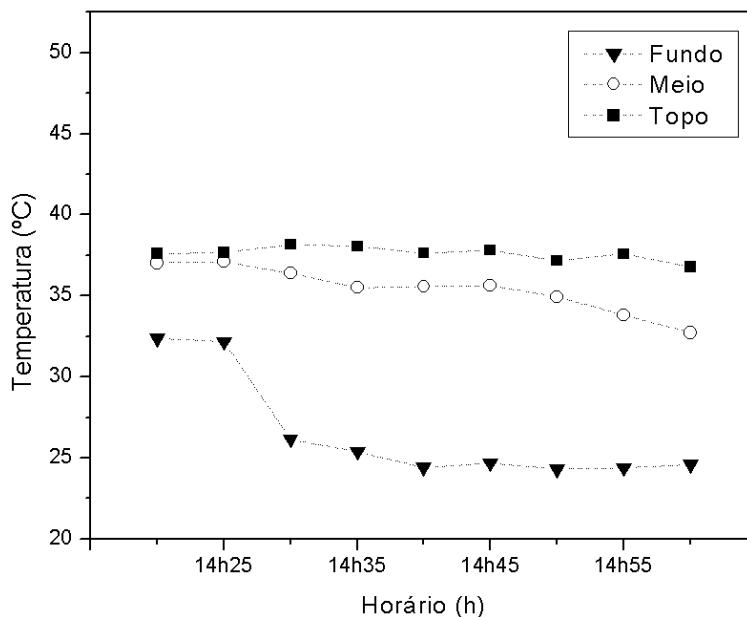


Figura 4.28 – Experimento ativo bombeado a 40 L/h, em regime contínuo e sem proteção transparente, realizado no dia 09/03/2010, no coletor alternativo de PVC.

No dia 19/04/2010 foi realizado um experimento utilizando uma vazão de circulação de 40 L/h para a simulação de um banho com água proveniente dos coletores alternativos acoplados a uma placa de proteção transparente. As Figuras 4.29 e 4.30 mostram os resultados obtidos, respectivamente, para os reservatórios dos coletores de PP e de PVC.

A Figura 4.29 mostra a distribuição de temperatura no *boiler* do coletor de PP. Pode-se observar que esse ensaio proporcionou um banho de cinqüenta minutos com temperatura média de 37,8 °C. Nota-se que somente nos vinte minutos finais do experimento houve a formação das três camadas de estratificação no reservatório.

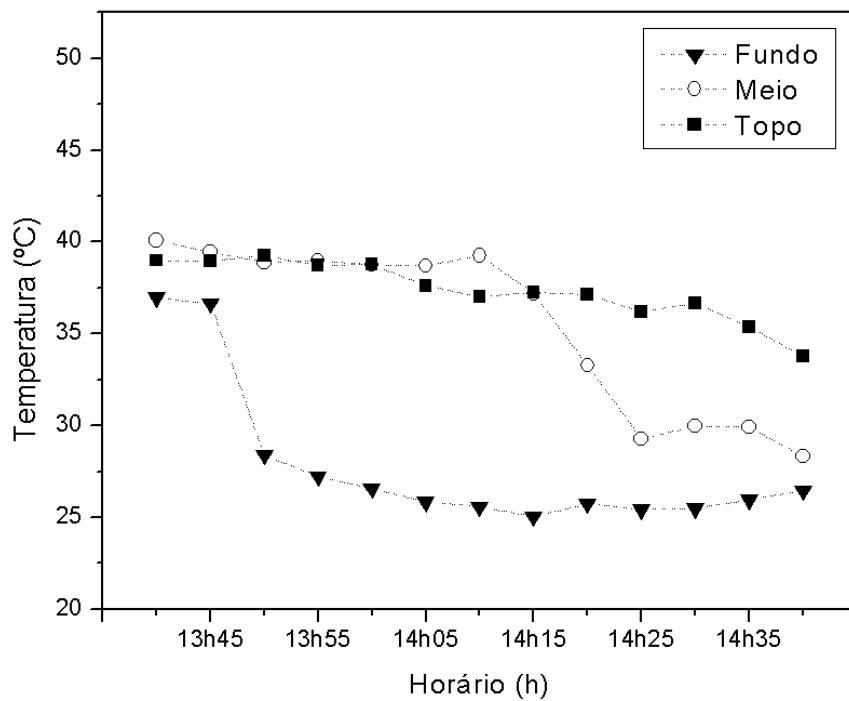


Figura 4.29 – Experimento ativo bombeado a 40 L/h, em regime contínuo e com proteção transparente, realizado no dia 19/04/2010, no coletor alternativo de PP.

Para o reservatório do coletor de PVC acoplado à placa de proteção transparente, conforme Figura 4.30, observa-se uma temperatura média de 40,5 °C num banho de quarenta minutos. Nota-se a formação das três camadas de estratificação no reservatório por praticamente todo o período do experimento, sendo, no entanto, o gradiente aproximado de temperatura entre a camada superior e a camada intermediária de 2,3 °C.

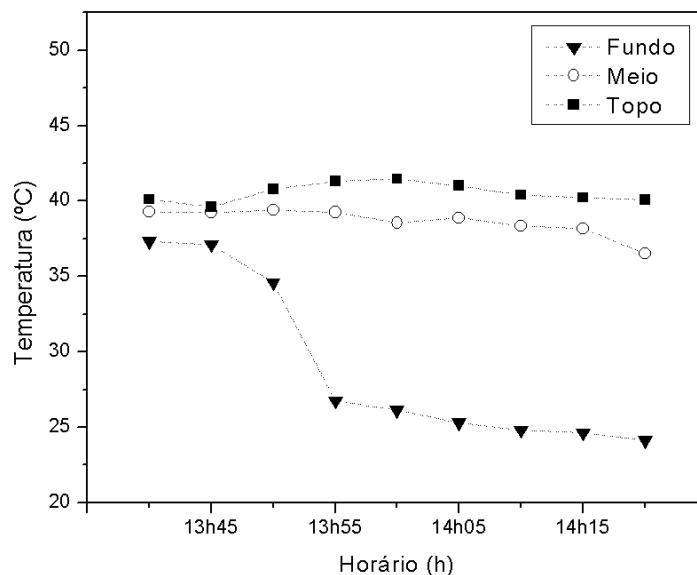


Figura 4.30 – Experimento ativo bombeado a 40 L/h, em regime contínuo e com proteção transparente, realizado no dia 19/04/2010, no coletor alternativo de PVC.

#### 4.4.2.3 VAZÃO DE 60 L/h

No dia 10/03/2010 foi realizado um experimento de simulação de banho no sistema ativo, bombeado a 60 L/h e com ausência de placa de proteção transparente sobreposta aos coletores alternativos. Os resultados são mostrados através de gráficos de distribuição de temperatura nos reservatórios dos coletores alternativos, conforme se observa através das Figuras 4.31 e 4.32.

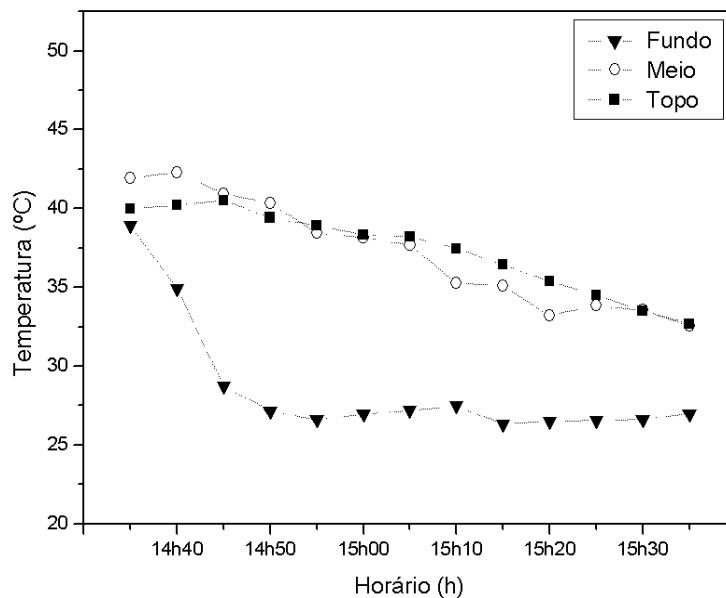


Figura 4.31 – Experimento ativo bombeado a 60 L/h, em regime contínuo e sem proteção transparente, realizado no dia 10/03/2010, no coletor alternativo de PP.

Pela Figura 4.31 observa-se que, para o reservatório acoplado ao coletor de PP e sem a placa protetora transparente, foi possível se obter um banho com temperatura média de 39,1°C por trinta e cinco minutos. Notam-se, praticamente durante todo o período do experimento, apenas duas camadas de água em temperatura diferente dentro do *boiler*, o que pode ser explicado pelo fato de que uma vazão de bombeamento de 60 L/h gera turbulência no reservatório, provocando uma mistura entre as camadas de água.

Para o reservatório do coletor de PVC, conforme a Figura 4.32, a simulação do banho em sistema ativo com vazão de circulação de 60 L/h e ausência de placa de proteção transparente, proporcionou quarenta minutos de banho a uma temperatura média de 43,1 °C, sendo observada a estratificação do *boiler* em três camadas nos últimos vinte minutos do ensaio.

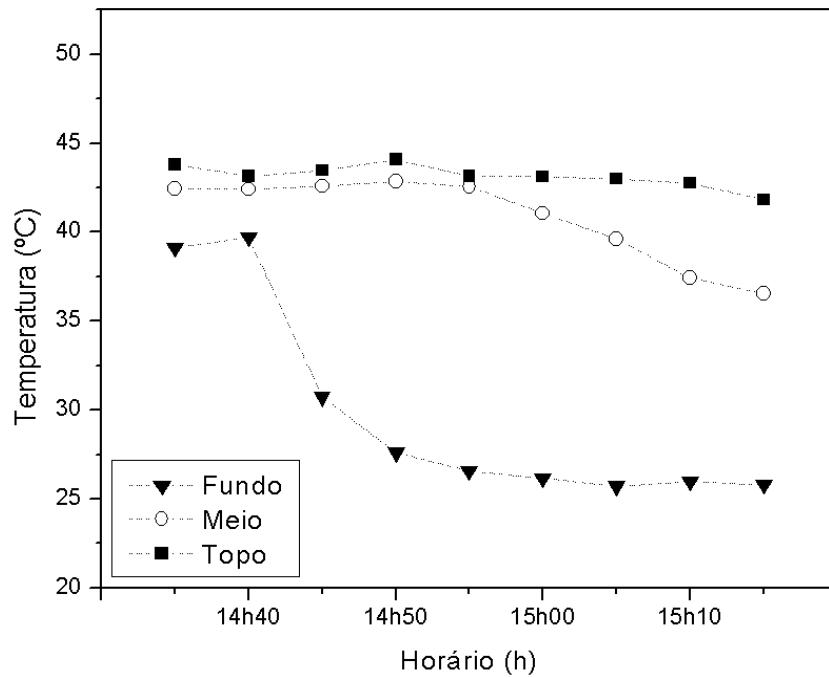


Figura 4.32 – Experimento ativo bombeado a 60 L/h, em regime contínuo e sem proteção transparente, realizado no dia 10/03/2010, no coletor alternativo de PVC.

No dia 27/04/2010 foi realizado um experimento de simulação de banho em sistema ativo, com vazão de circulação de 60 L/h e sobreposição da placa de proteção transparente aos coletores alternativos. As Figuras 4.33 e 4.34 mostram os resultados obtidos para o *boiler* do coletor de PP e para o *boiler* do coletor de PVC, respectivamente.

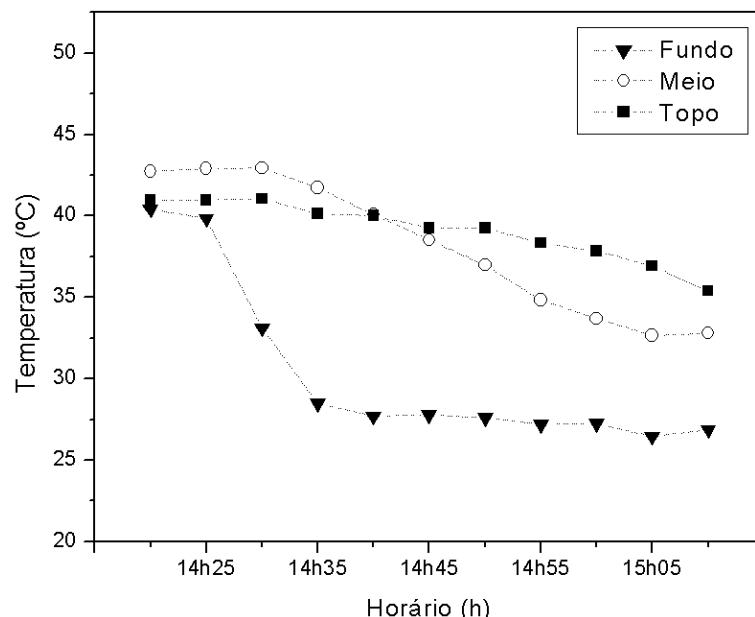


Figura 4.33 – Experimento ativo bombeado a 60 L/h, em regime contínuo e com proteção transparente, realizado no dia 27/04/2010, no coletor alternativo de PP.

Para o reservatório do coletor de PP, conforme Figura 4.33, pode-se observar que foi possível se obter um banho de temperatura média de 39,7 °C por um período de quarenta minutos. Analisando-se as temperaturas da camada intermediária e da camada superior, verifica-se uma turbulência no reservatório, que foi ocasionada pela vazão de circulação de 60 L/h.

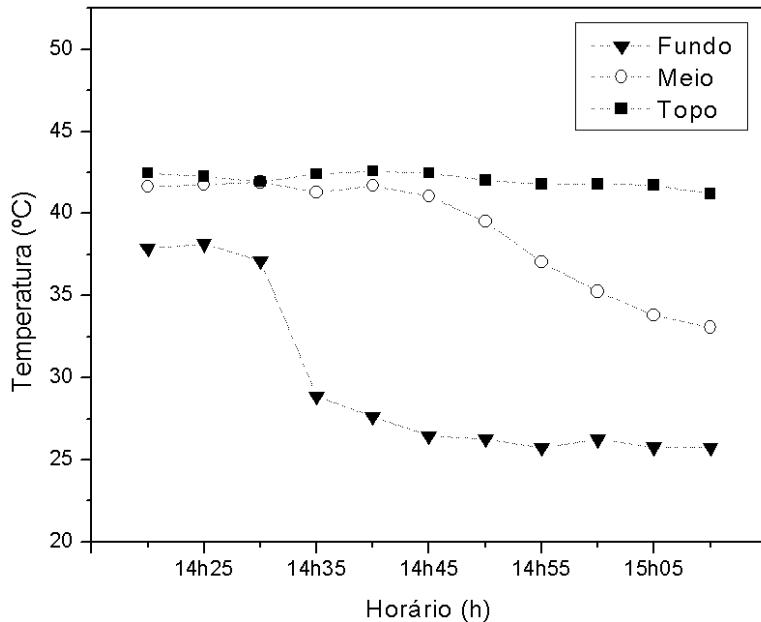


Figura 4.34 – Experimento ativo bombeado a 60 L/h, em regime contínuo e com proteção transparente, realizado no dia 27/04/2010, no coletor alternativo de PVC.

A Figura 4.34 mostra a distribuição de temperatura para o experimento utilizando uma vazão de 60 L/h numa simulação de banho com sobreposição de placa de proteção transparente ao coletor de PVC. Pode-se notar que tal configuração proporcionou uma temperatura média de 42,2 °C para um banho de quarenta minutos. Nota-se que nos trinta e cinco minutos finais do ensaio o *boiler* manteve suas três camadas de estratificação.

Para efeito de comparação entre os experimentos de simulação de banho, os resultados de cada configuração foram sintetizados na Tabela 4.12, a seguir.

Pode-se observar que, tanto para o experimento termossifão quanto para o experimento ativo bombeado a 20 L/h, a sobreposição da placa de proteção transparente a ambos os coletores alternativos não ocasionou uma melhora nos níveis de temperatura do banho. As maiores temperaturas para banho, nessas duas configurações, foram encontradas para o coletor de PVC com ausência da placa protetora transparente, apesar do fato de que as

temperaturas registradas para o coletor de PP também são consideradas agradáveis para banho.

Tabela 4.12 – Síntese dos Resultados do Experimento Contínuo.

<b>Experimento</b>		<b>Temperatura do banho (°C)</b>		<b>Tempo de banho (min)</b>	
		<b>PVC</b>	<b>PP</b>	<b>PVC</b>	<b>PP</b>
<b>Termossifão</b>	<b>Com Proteção</b>	38,3	35,2	40	20
	<b>Sem Proteção</b>	42,6	38,2	40	20
<b>Ativo</b>	<b>20 L/h</b>	<b>Com Proteção</b>	42,0	37,7	40
		<b>Sem Proteção</b>	47,1	41,7	40
	<b>40 L/h</b>	<b>Com Proteção</b>	40,5	37,8	40
		<b>Sem Proteção</b>	37,5	35,5	35
	<b>60 L/h</b>	<b>Com Proteção</b>	42,2	39,7	40
		<b>Sem Proteção</b>	43,1	39,1	35

Considerando-se os resultados das seções 4.3.1 e 4.3.2.1, através dos quais se verifica um aumento significativo nas temperaturas de saída dos ensaios no coletor de PVC acoplado à proteção transparente, em relação aos ensaios nos quais não há tal proteção, pode-se concluir, que o fluido está perdendo calor na saída do *boiler*, seja por difusão entre as camadas, para o sistema ativo com vazão de 20 L/h, ou por causa da turbulência gerada pela vazão de circulação do sistema termossifão, que, de acordo com os cálculos, tem um valor médio de 42,96 L/h para o coletor de PVC e de 22,71 L/h para o coletor de PP, provocando a mistura das camadas no *boiler* do coletor de PVC.

Já a vazão de circulação de 40 L/h se mostrou adequada para transferir o aumento de calor recebido pelo coletor quando este se encontrava acoplado à proteção transparente, fato que se verifica ao se observar que as temperaturas dos experimentos com proteção transparente são maiores, para ambos os coletores alternativos, que as temperaturas de banho registradas para os experimentos sem proteção transparente. Para os experimentos que contavam com a presença da placa de proteção transparente, foi registrada uma maior temperatura de banho no ensaio com o coletor de PVC em relação ao ensaio com o coletor de PP. No entanto, o tempo de banho a uma temperatura agradável, proporcionado pelo ensaio com o coletor de PP, superou o tempo de banho no ensaio com o coletor de PVC.

Para vazão de circulação de 60 L/h praticamente não houve alteração dos resultados obtidos para os ensaios com a proteção transparente, em relação aos resultados dos ensaios

sem a proteção transparente. Verifica-se que, para ambas as configurações, o ensaio com o coletor de PVC proporcionou temperaturas de banho mais altas que as temperaturas de banho obtidas nos ensaios do coletor de PP. A semelhança entre os resultados dos ensaios com e sem a placa de proteção transparente é devida ao baixo tempo de residência que a vazão de 60 L/h proporciona ao fluido em ambos os coletores, em relação às outras vazões de escoamento, não fornecendo ao coletor tempo suficiente para transferir ao fluido uma maior quantidade de energia. No entanto, mesmo contando com um tempo de residência pequeno, as temperaturas registradas nos ensaios de banho para ambos os coletores, com e sem proteção, bombeados a 60 L/h, se mostraram adequadas para banho. Percebe-se que a ausência de estratificação no *boiler* do coletor de PP não impede o usuário de usufruir de água a 39,0 °C por aproximadamente 40 minutos.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÃO

A análise dos diagramas de distribuição de temperaturas, mais especificamente através do conhecimento dos valores máximos registrados em cada configuração estudada, assim como os valores dos gradientes e da eficiência diária, conduziu às seguintes conclusões:

- Proteção Transparente (Regime batelada): o coletor de PVC apresentou melhores resultados nos experimentos em que contava com o efeito estufa provocado pela presença da placa de proteção transparente, elevando a temperatura máxima de saída da água, em todas as configurações estudadas, em média 10 °C; Especificamente para os sistemas ativos, o tempo de residência do fluido no coletor de PVC foi aproximadamente 250 % maior do que no coletor de PP, propiciando um maior tempo de contato do fluido com a superfície interna do coletor de PVC, o que contribuiu para que a temperatura do fluido aumentasse quando comparada à estrutura de PP. Porém, mesmo não apresentando aumentos significativos nas temperaturas máximas de saída da água para os ensaios que utilizaram a proteção transparente, coletor de PP resultou em valores de temperatura máxima de saída de água semelhantes às obtidas no coletor de PVC acoplado à proteção transparente, em todas as configurações.
- Escoamento Passivo (Regime batelada): o coletor de PP apresentou temperaturas mais altas em todos os experimentos do tipo termossifão realizados, sendo registrado um gradiente médio de temperatura de 10,14 °C nos ensaios realizados no coletor de PP em relação aos ensaios realizados no coletor de PVC. No entanto, cabe ressaltar que havia uma diferença significativa no volume útil dos coletores, além de se constatar, também, valores de temperatura inicial de entrada do fluido no coletor de PVC mais baixos que os valores registrados para o coletor de PP. Uma comparação seria justa apenas se fossem observadas condições semelhantes de volume útil e temperatura inicial de entrada para ambos os coletores.
- Escoamento Ativo (Regime batelada): em ambos os coletores, as temperaturas máximas alcançadas nos experimentos bombeados a 20 L/h apresentaram maiores valores que as temperaturas máximas registradas nas outras vazões utilizadas, apesar de que esses valores se aproximaram dos valores de temperatura máxima obtidos para

a vazão de 60 L/h. O coletor de PP apresentou temperaturas mais altas que o coletor de PVC em todas as vazões experimentadas, devido à diferença do volume útil dos coletores e à diferença na temperatura inicial de entrada do fluido nos coletores. No entanto, o uso de bombeamento não aumentou a temperatura do fluido, em ambos os coletores alternativos, quando comparado ao sistema termossifão, pois um aumento da vazão (e consequente aumento do coeficiente de película) não alterou o fato de que o fenômeno de transferência de calor continuava sendo controlado pela condução.

- Simulação dos banhos (Regime contínuo): nos ensaios ativos realizados com a utilização da proteção transparente, as três vazões de bombeamento forneceram água à temperatura agradável para banho, proveniente de ambos os coletores. Os ensaios no coletor de PVC apresentaram temperatura de banho mais alta que os ensaios do coletor de PP, para todas as configurações analisadas. Nos experimentos que utilizaram a proteção transparente, a vazão de 20 L/h proporcionou melhores temperaturas para banho em ambos os coletores, com um tempo de 40 minutos de banho para cada placa coletora. A configuração ativa bombeada a 60 L/h também resultou em temperatura agradável para um banho de aproximadamente 40 minutos para ambos os coletores.

Se o usuário optar por usar o coletor de PVC, resultados melhores de temperatura serão obtidos para um sistema ativo com vazão de 20 L/h, associado a uma proteção transparente. No caso da escolha ser por um coletor de PP em sistema ativo, a vazão adequada seria de 20 L/h, aliada, porém, a um sistema sem proteção transparente. No entanto, o uso de outras vazões variará em poucos graus a temperatura máxima alcançada, podendo, igualmente, serem utilizadas para uso doméstico.

Contudo, cabe salientar que, se o objetivo do usuário for obter um sistema ASBC mais simplificado, uma escolha adequada, baseada nos resultados obtidos neste trabalho, seria usar o coletor alternativo de polipropileno (sem proteção transparente) associado ao sistema de recirculação natural (ou termossifão). Tal opção, seja pela simplicidade do sistema ou facilidade de manuseio, faz jus ao objetivo principal deste trabalho, que por sua vez está focado no projeto de aquecedor solar eficiente e de baixo custo, acessível à grande massa da população de baixa renda. Não obstante, uma nova fonte de recursos renováveis implica em se evitar o desperdício de água e contribuir favoravelmente para a ecoeficiência e conservação do meio ambiente.

### Sugestões para Trabalhos Futuros

Ficam como sugestões para trabalhos futuros: o uso de coletores alternativos planos de mesmo volume, para possibilitar uma melhor comparação entre eles; proceder com o início do ensaio apenas quando ambos os coletores registrarem valores iguais de temperatura inicial de entrada de fluido; a montagem de uma unidade com maior flexibilidade da inclinação dos coletores, possibilitando, assim, variar o ângulo de inclinação em relação à superfície de acordo com as estações do ano; o uso de ferramentas computacionais que permitam a visão interna do que acontece com o fluido no interior da unidade experimental durante diferentes configurações de experimento; a construção de uma unidade experimental com número de coletores e *boilers* suficiente para atender a todas as configurações analisadas em um mesmo dia de ensaio, a fim de tornar a comparação entre eles um dado qualitativo, uma vez que as condições de execução do experimento serão idênticas; o uso de vazões superiores a 60 L/h no escoamento bombeado a fim de analisar as temperaturas de saída de água, pois, mesmo concordando que haverá perturbações no *boiler*, o objetivo final do usuário é obter água quente na saída do reservatório, não importando o comportamento do fluido no interior do mesmo; estudar maneiras de se evitar a perda de calor do reservatório de baixo custo durante os períodos nos quais não há insolação, como por exemplo, à noite; o estudo dos concentradores solares, que podem aquecer grande quantidade de água utilizando uma área menor que os coletores planos.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ABRAVA – Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento - [www.portalabrava.com.br](http://www.portalabrava.com.br) (acessado no fevereiro/2009)
- ARRUDA, L. B., Operações de Sistema de Aquecimento Solar de Água com Controle de Vazões em Coletores Planos, Tese de Doutorado, USP, 2004.
- AZEVEDO, C. G., BESTETI, M. D., Projeto e Construção de um Aquecedor Solar de Água em Escala de Laboratório, Projeto de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Química, UFU, 2007.
- BAPTISTA, A. S. C., Análise da Viabilidade Econômica da Utilização de Aquecedores Solares de Água em Resorts no Nordeste do Brasil, Dissertação de Mestrado da COPPE, UFRJ, 2006.
- BEZERRA, A. M. Aplicações Térmicas da Energia Solar, Ed. Universitária, 3º edição, João Pessoa, 1998.
- CHANG, J. M., SHEN, M. C., HUANG, B. J., A Criterion Study of Solar Irradiation Patterns for the Performance Testing of Thermosyphon Solar Water Heaters, *Solar Energy* Vol. 73, No. 4, pp. 287–292, 2002.
- CHANG, J. M. et al, A proposed modified efficiency for thermosyphon solar heating systems, *Solar Energy*, 2004.
- CHEN, B. R. et al., Long-term thermal performance of a two-phase thermosyphon solar water heater, *Solar Energy* 83, p. 1048–1055, 2009.
- COOPER, P. I., The Absorption of Solar Radiation in Solar Stills, *Solar Energy*, v.12, p. 3, 1969.
- CRISTOFARI C, NOTTON G, POGGI P, LUCHE A., “Modelling and performance of a copolymer solar water heating collector”, *Solar Energy*, vol 72, 2002, n. 2.
- DHARUMAN, C., ARAKERI, J. H., SRINIVASAN, K., Performance evaluation of an integrated solar water heater as an option for building energy conservation, *Energy and Buildings* 38, p. 214–219, 2006.

- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. Solar Engineering of Thermal Process, Ed. John Wiley & Sons, Canadá, 1980.
- DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A., Solar Engineering of Thermal Processes, Wiley, NY, 1991.
- HOTTEL, H. C.; WILLIER, A., Evaluation of flat plate collector performance, In: Transactions of the Conference on the Use of Solar Energy, 2. University of Arizona Press, 1958.
- HUSSAIN, M., URMEE, T. P., Design and Fabrication of Low Cost Solar Water Heaters, 1996.
- INSTITUTO VITAE CIVILIS – [www.vitaecivilis.org.br](http://www.vitaecivilis.org.br) (acessado em fevereiro/2009).
- JURADO, D. A. J., “Modelagem dinâmica de um sistema solar termossifão usando coletores atmosféricos de plástico”, Dissertação de Mestrado. Uberlândia, FEMEC-UFU, 2004. 102p.
- KOFFI, P. M. E. et al., Theoretical and experimental study of solar water heater with internal exchanger using thermosiphon system, Energy Conversion and Management 49, p. 2279–2290, 2008.
- KUDISH, A., EVSEEV, E., WALTER, G., LEUKEFELD, T., “Simulation Study of a Solar Collector with a Selective Coated Polymeric Double Walled Absorber Plate”, Energy Conversion and Management, vol 43, 2002, p. 651-671.
- LIMA, J. B. A., PRADO, R. T. A., Otimização de Sistemas de Aquecimento de Água em Edificações Residenciais Unifamiliares Utilizando o Programa TRNSYS, Dissertação de Mestrado, USP, 2003.
- LIU, B. Y. H., JORDAN, R. C., The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation, Solar Energy, 1960, v. 4, n. 3, p. 1-19.
- MICHAELIDES, I. M. et. al. Comparison of performance and cost effectiveness of solar water heaters at different collector tracking modes in Cyprus and Greece, Energy Conversion and Management, 1999.
- MILTON, S., KAUFMAN, S., RODRIGUES, D., Green Markets International – [www.green-markets.org](http://www.green-markets.org).

- MORRISON, G. L., ROSENGARTEN, G., BEHNIA, M., Mantle Heat Exchangers for Horizontal Tank Thermosyphon Solar Water Heaters. *Solar Energy* 67(1–3):53–64, 1999.
- NAHAR, N. M., Capital Cost and Economic Viability of Thermosyphonic Solar Water Heaters Manufactured from Alternate Materials in India, Índia, *Renewable Energy*, 2002.
- NIEMEYER, R. C. Construção de um Coletor Solar Inflável, Projeto de Graduação, UnB/ENM, Brasília, 91 p., 2006.
- NIEUWOUDT, M. N., MATHEWS, E. H., A Mobile Solar Water Heater for Rural Housing in Southern Africa, *Building and Environment*, 2005.
- OLIVEIRA, S. H. F., Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos Autônomos: Ênfase na Eletricidade de Residências de Baixo Consumo, Dissertação de Mestrado da EP/FEA/IEE/IF, USP, 1997.
- PALZ, W., Energia Solar e Fontes Alternativas, Tradução de ‘Solar elecrticity : an economic approach to solar energy’, Hemus, 2002.
- PENSE INDÚSTRIA – [www.penseindustria.com.br](http://www.penseindustria.com.br) (acessado em dezembro/2008).
- REDDY, B. S., Electrical X Solar Water Heater: a case study, *Energy Converntions and Management* Vol. 36, n. 11, p. 109%1106, 1995.
- REINDL, D.; DUFFIE, J.A.; BECKMAN,W.A., Diffuse Fraction Corelations, *Solar Energy*, v.45, n.1, p. 1-7, 1990.
- RÍSPOLI, I. A. G., O Aquecedor Solar Brasileiro: Teoria e Prática em Prol de uma Transferência de Tecnologia Sustentável, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Civil/UNICAMP – 2008.
- RODRIGUES, D.; MATAJS, R., Mudando o Curso do Uso Doméstico de Energia: Ações para a Promoção do Uso de Coletores Termosolares e Políticas e Mercados para Energia Sustentável, Instituto Vitae Civilis, 2004.
- SAUSSURE, H., <http://solarcooking.org/saussure.htm> (acessado em dezembro/2008).

- SHUKLA, A., BUDDHI, D., SAWHNEY, R.L., Solar Water Heaters with Phase Change Material Thermal Energy Storage Medium: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, p. 2119–2125, 2009.
- SIQUEIRA, D. A., Estudo do Desempenho do Aquecedor Solar de Baixo Custo. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Química/UFU – 2009.
- SOCIEDADE DO SOL – [www.sociedadedosol.org.br](http://www.sociedadedosol.org.br) (acessada em fevereiro/2009).
- SOLAR COOKING – <http://solarcooking.org/saussure.htm> (acessado em dezembro/2008).
- SOLETROL – [www.soletrol.com.br](http://www.soletrol.com.br) (acessado em agosto/2010).
- SOO TOO, Y. C., MORRISON , G. L., BEHNIA, M., Performance of Solar Water Heaters with Narrow Mantle Heat Exchangers, Solar Energy 83, p. 350–362, 2008.
- SOUZA, A. W. A., Fundamentos da Teoria de Energia Solar e de seu Uso, Ed. Fundação Brasileira de Direito Econômico, Belo Horizonte, 1994.
- SOUZA, L. G. M. GOMES, U. U., “Viabilidade Térmica, Econômica e de Materiais da Utilização de Tubos de PVC como Elementos Absorvedores em Coletores de um Sistema de Aquecimento de Água por Energia Solar”, Tese de Doutorado do Programa de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais, UFRN, 2002.
- TABORIANSKI, V. M.; PRADO, R. T. A. Avaliação da Contribuição das Tipologias de Aquecimento de Água Residencial para a Variação dos Balanços de Gases de Efeito Estufa na Atmosfera. Boletim Técnico, Dep. de Engenharia de Construção Civil/Escola Politécnica, USP, 2003.
- THIRUGNANASAMBANDAM, M., INIYAN, S., GOIC, R., A Review of Solar Thermal Technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, p. 312–322, 2010.

## ANEXO A

### RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS TERMOSSIFÃO REALIZADOS NO AQUECEDOR SOLAR CONVENCIONAL

A seguir serão apresentados os valores obtidos nos experimentos termossifão realizados por SIQUEIRA (2009) no aquecedor solar convencional.

A Tabela A.1 mostra os valores calculados de eficiência e temperatura máxima dos reservatórios alternativos nos dias de ensaio no aquecedor solar convencional.

Tabela A.1 – Eficiência e Temperatura dos Reservatórios (Fonte: SIQUEIRA, 2009)

Reservatório	28/11/08	02/12/08	05/12/08	09/12/08	Média
PP	41,3 %	46,5 %	42,0 %	48,5 %	$\bar{\eta}_T=44,5\%$
	41,5 °C	41,6 °C	44,7 °C	41,8 °C	$\bar{T}_{máx}=42,4^{\circ}\text{C}$
PVC	41,3 %	47,4 %	43,4 %	56,2 %	$\bar{\eta}_T=47,1\%$
	41,1 °C	41,8 °C	44,4 °C	45,6 °C	$\bar{T}_{máx}=43,2^{\circ}\text{C}$
Convencional	46,9 %	50,6 %	49,8 %	56,5 %	$\bar{\eta}_T=50,9\%$
	44,5 °C	43,2 °C	45,7 °C	46,5 °C	$\bar{T}_{máx}=45,0^{\circ}\text{C}$

## APÊNDICE A

### DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA PARA OS DEMAIS EXPERIMENTOS

Distribuições de temperatura dos experimentos termossifão e ativos (bombeados a 20, 40 e 60 L/h) em regime batelada, com ausência de placa de proteção transparente.

#### A.1 EXPERIMENTOS TERMOSSIFÃO

Ensaios realizados nos dias 01/07/2009, 02/07/2009, 04/07/2009, 10/07/2009, 11/07/2009, 13/07/2009, 14/07/2009, 28/07/2009, 30/07/2009, 31/07/2009 e 04/08/2009.

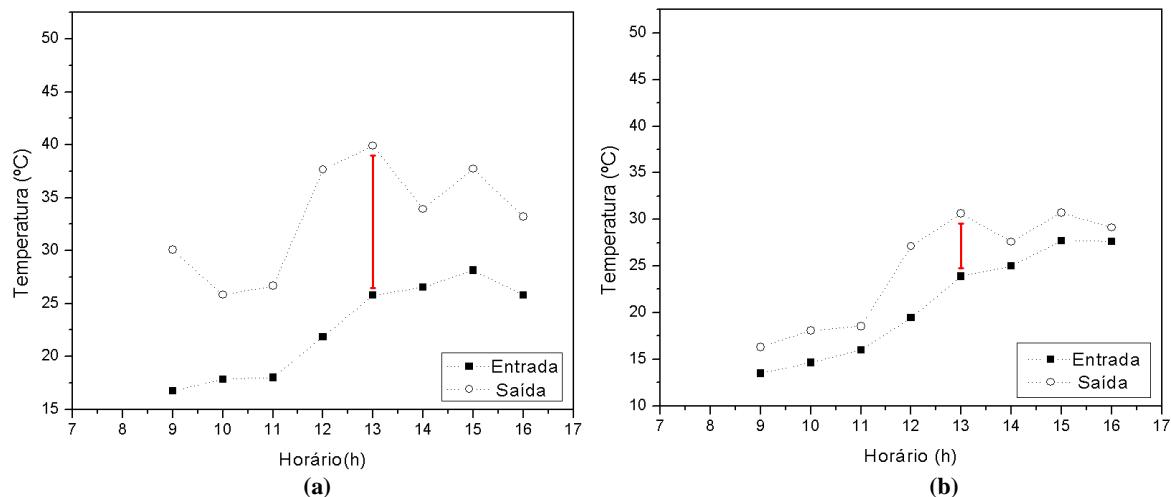


Figura A.1 – Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 01/07/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

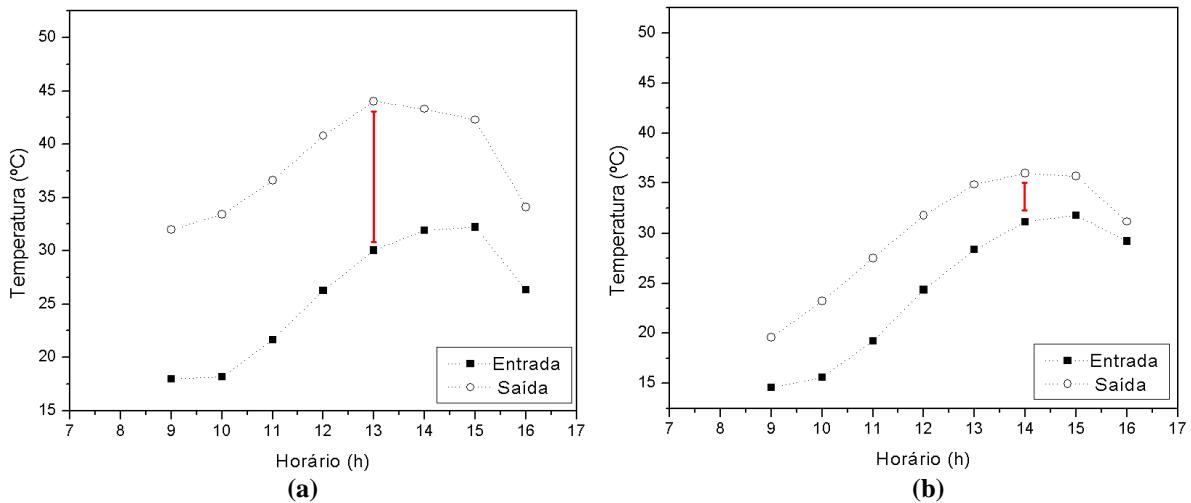


Figura A.2 – Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 02/07/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

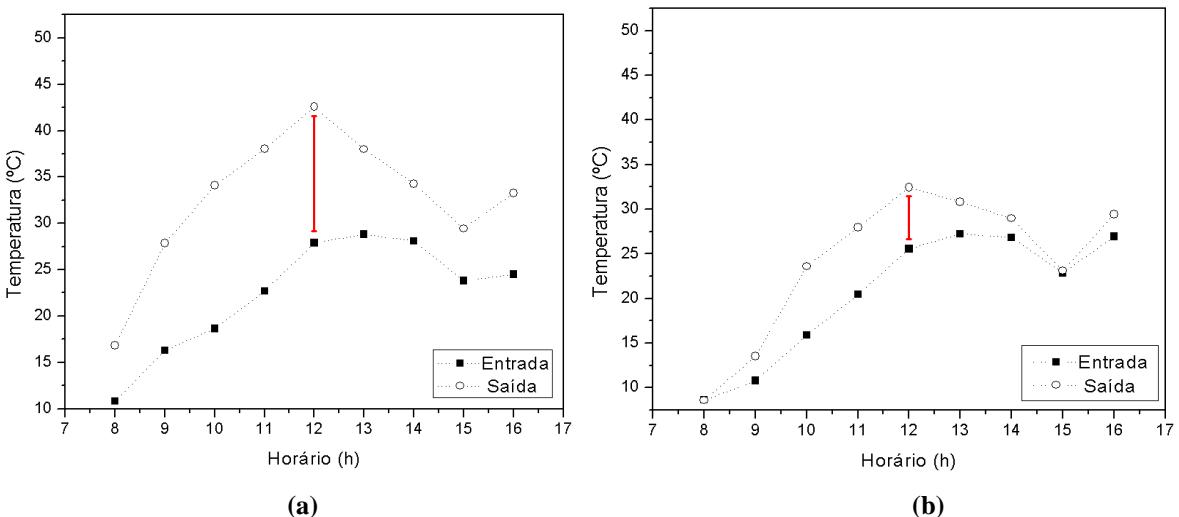


Figura A.3 – Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 04/07/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

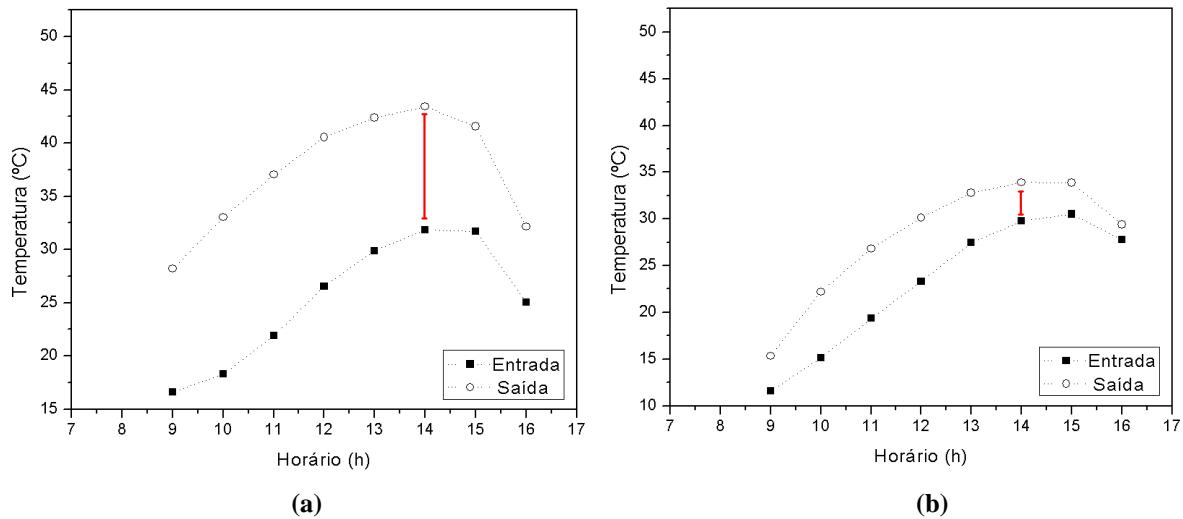


Figura A.4 – Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 10/07/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

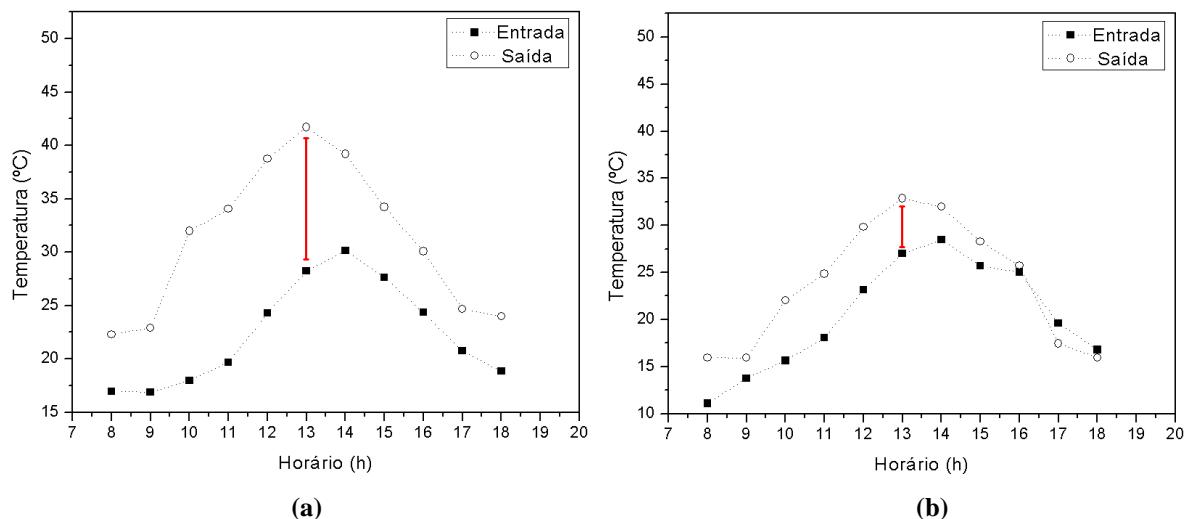


Figura A.5 – Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 11/07/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

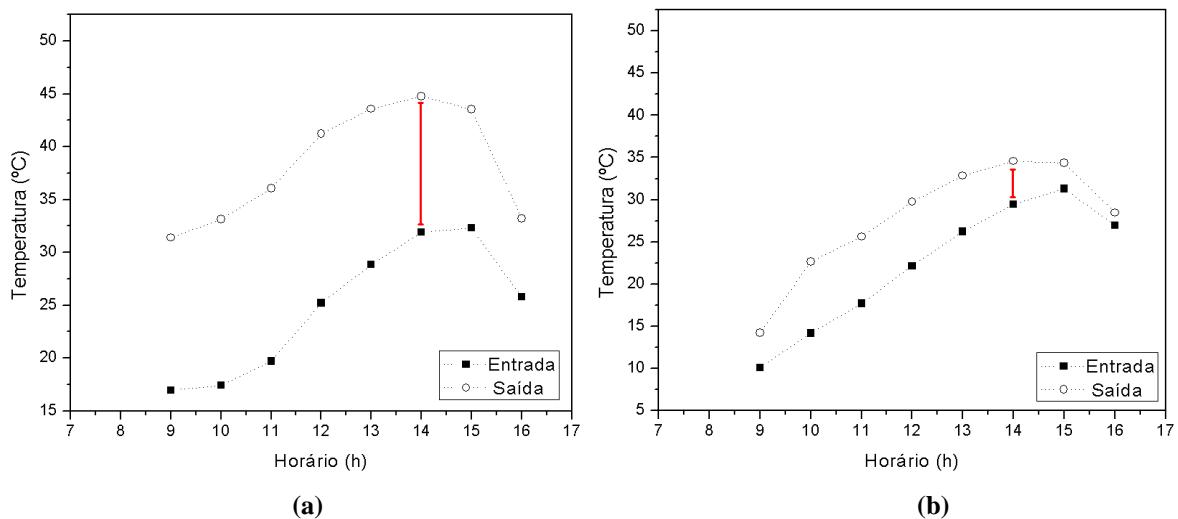


Figura A.6 – Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 13/07/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

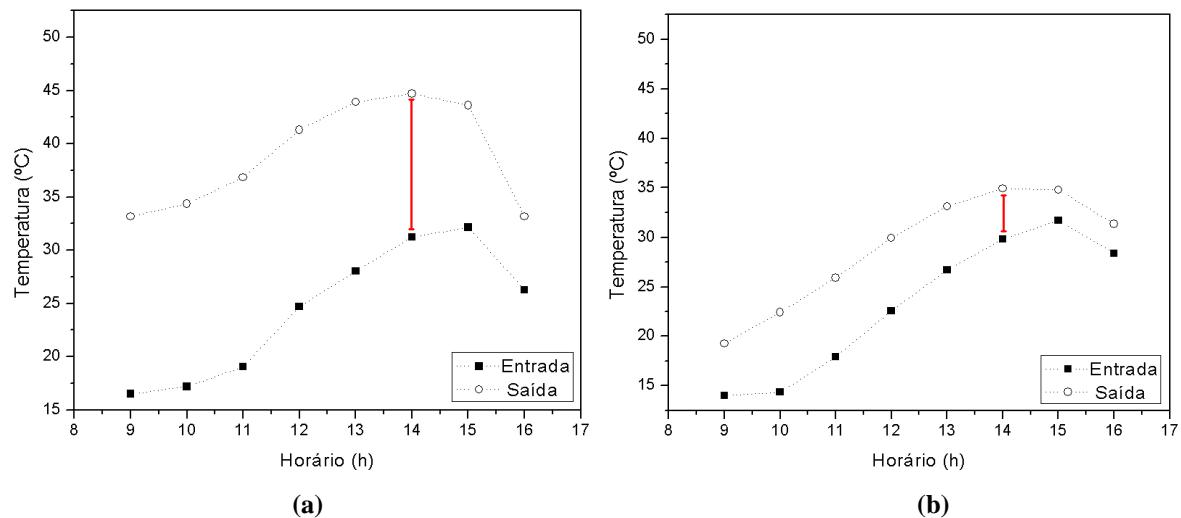


Figura A.7 – Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 14/07/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

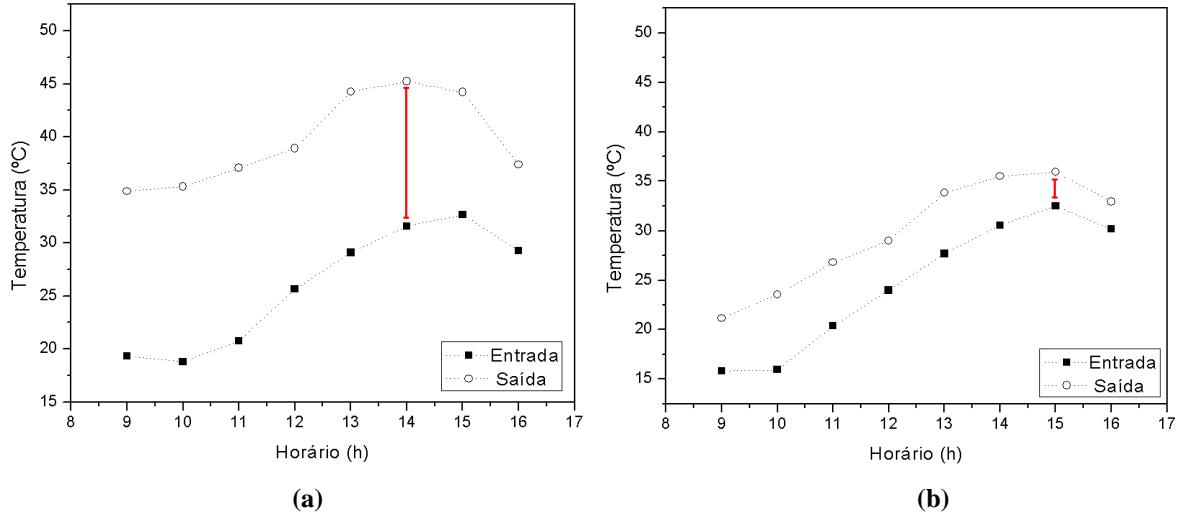


Figura A.8 – Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 28/07/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

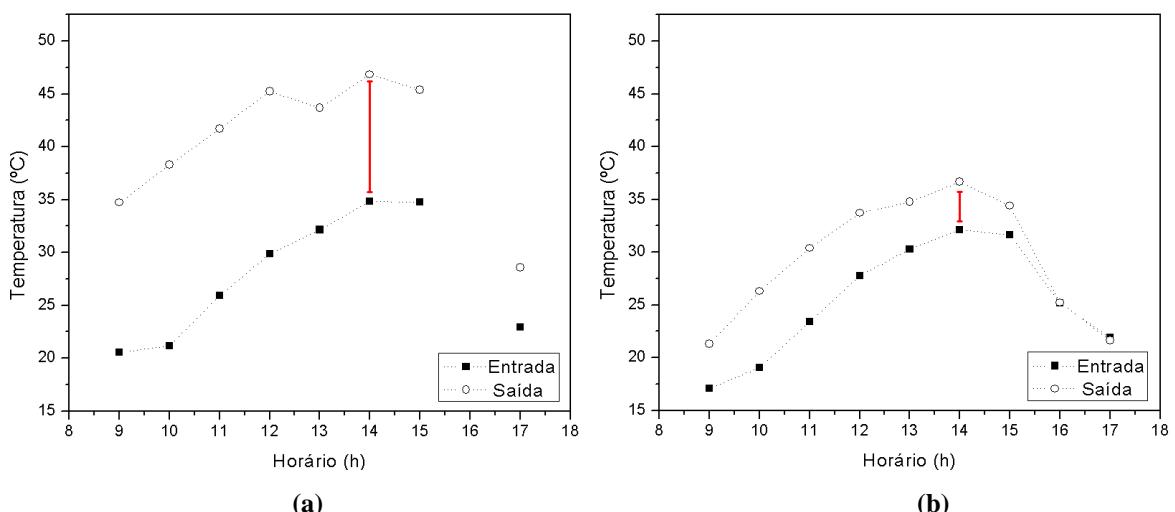


Figura A.9 – Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 30/07/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

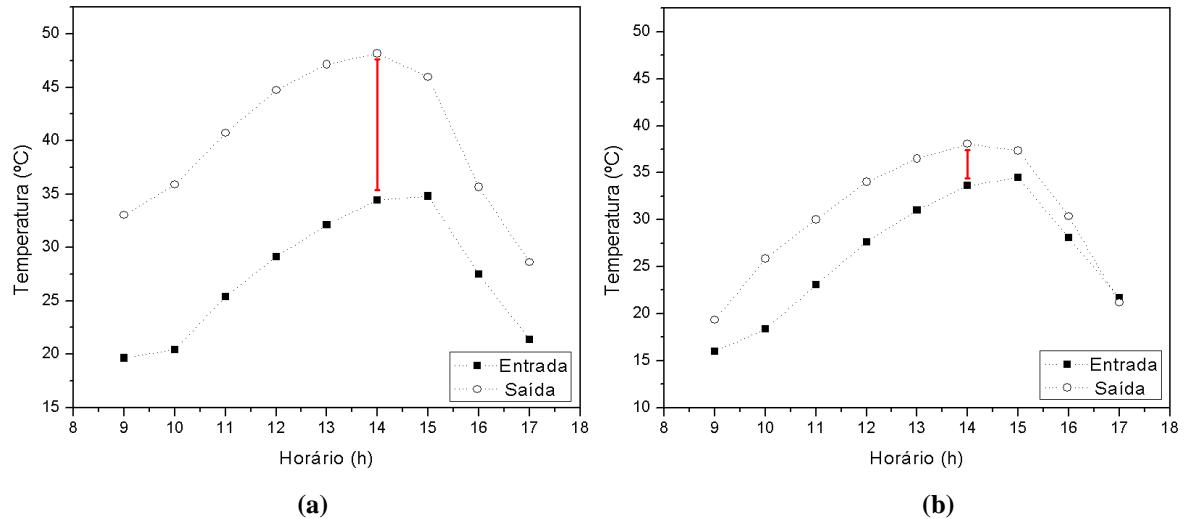


Figura A.10 – Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 31/07/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

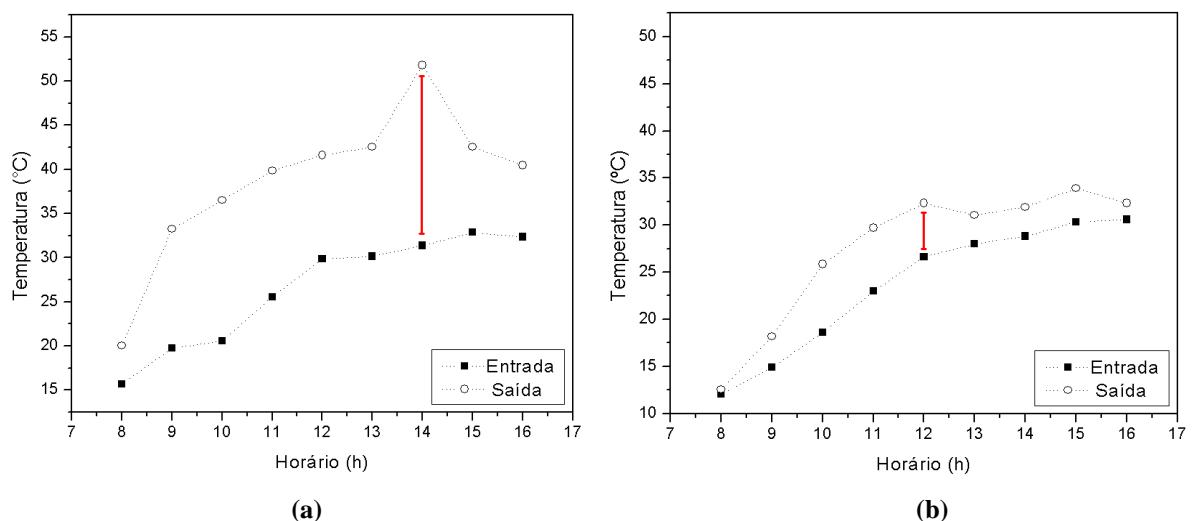


Figura A.11 – Experimento termossifão em regime batelada, sem proteção transparente, realizado no dia 04/08/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

## A.2 EXPERIMENTOS ATIVOS

### A.2.1 BOMBEADOS A 20 L/h

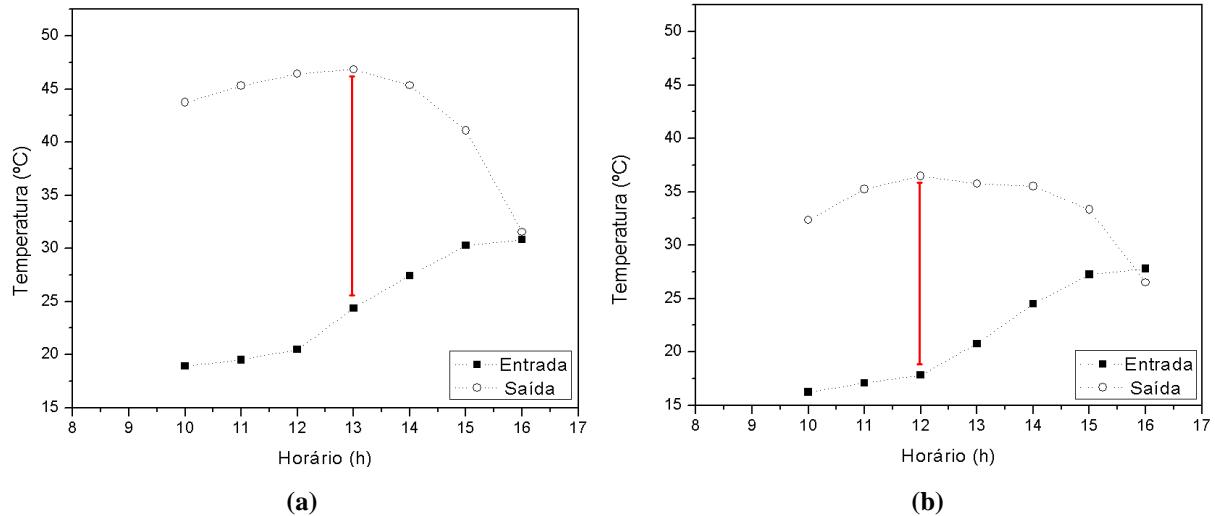


Figura A.12 – Experimento ativo, bombeado a 20 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 15/07/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

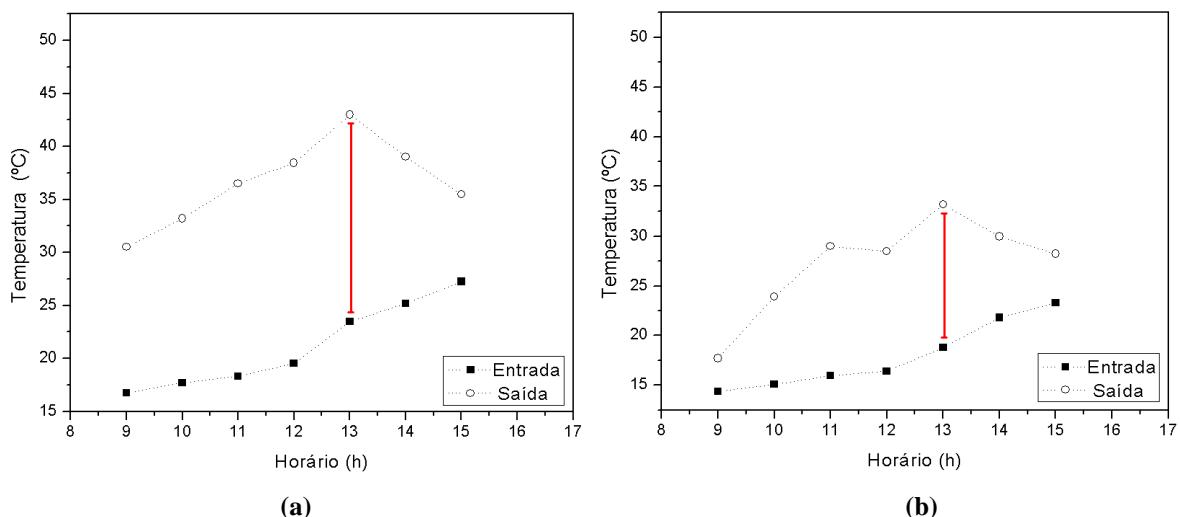


Figura A.13 – Experimento ativo, bombeado a 20 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 16/07/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

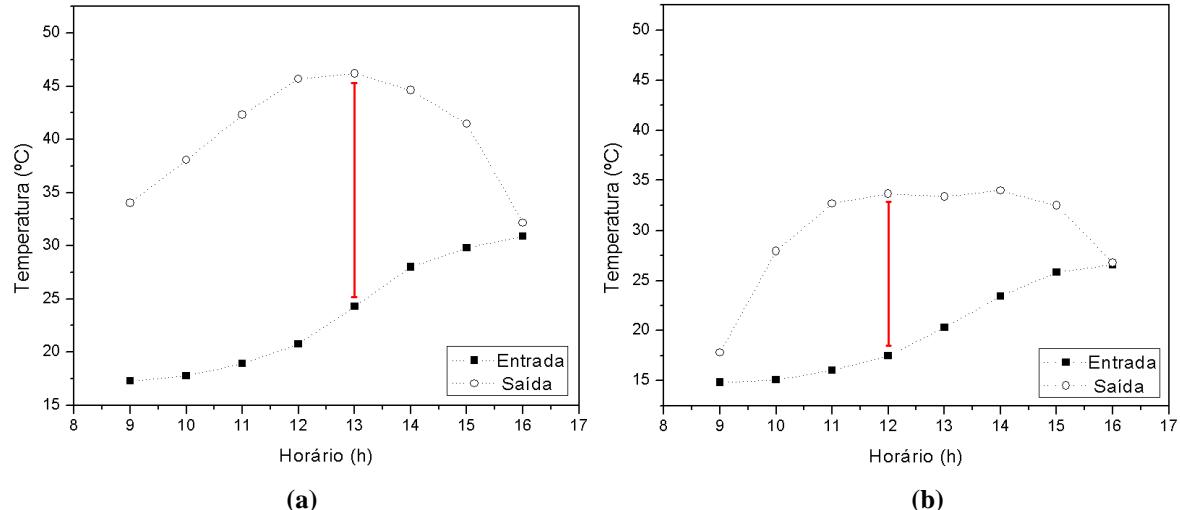


Figura A.14 – Experimento ativo, bombeado a 20 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 17/07/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

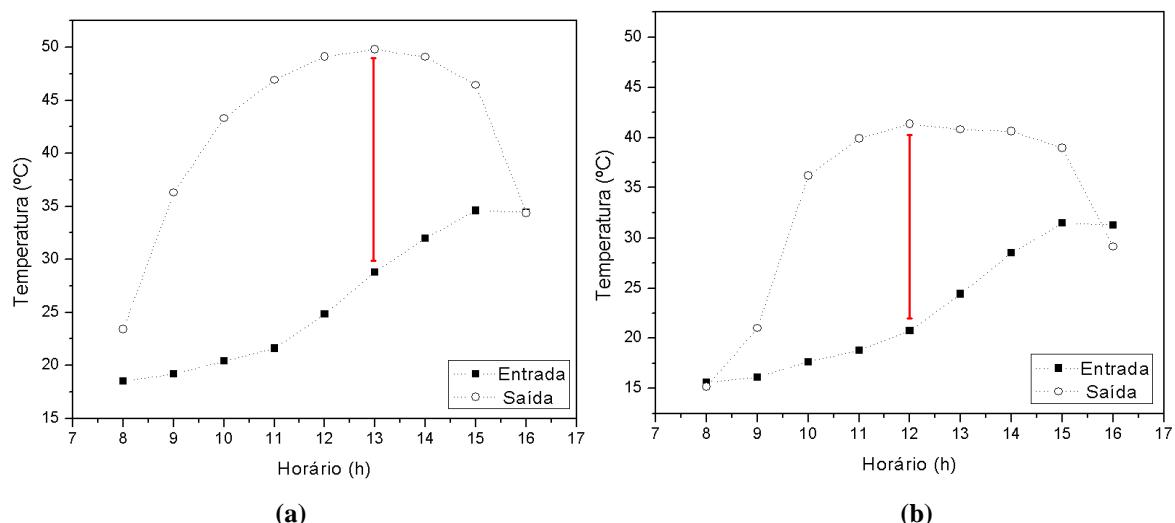


Figura A.15 – Experimento ativo, bombeado a 20 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 06/08/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

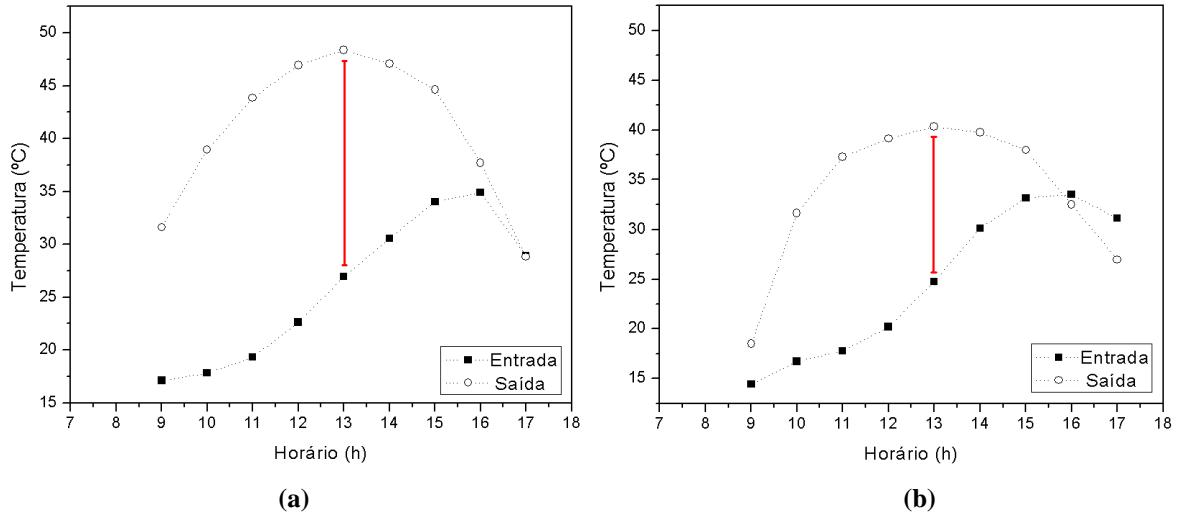


Figura A.16 – Experimento ativo, bombeado a 20 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 10/08/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

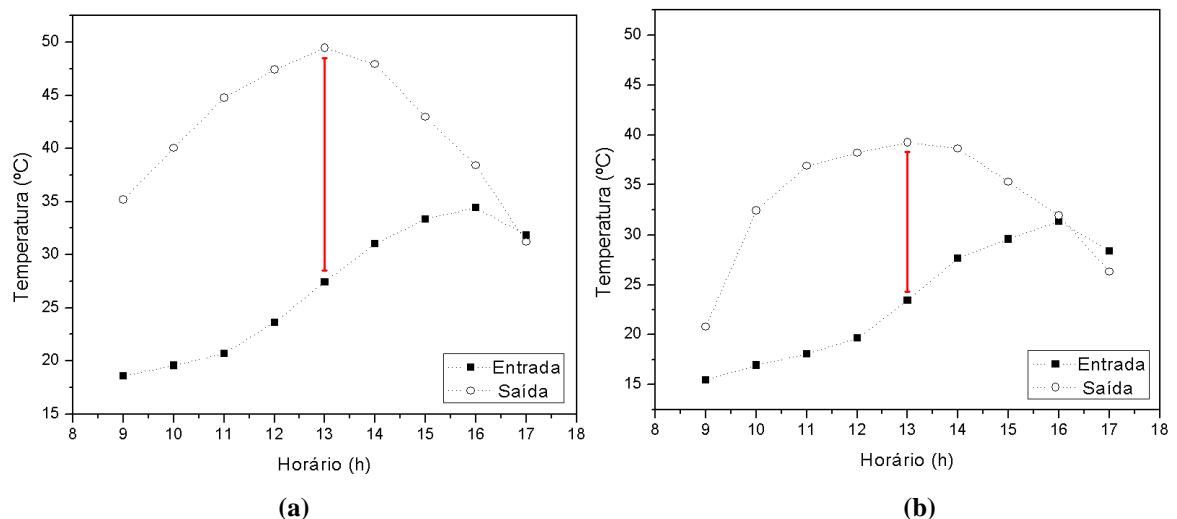


Figura A.17 – Experimento ativo, bombeado a 20 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 12/08/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

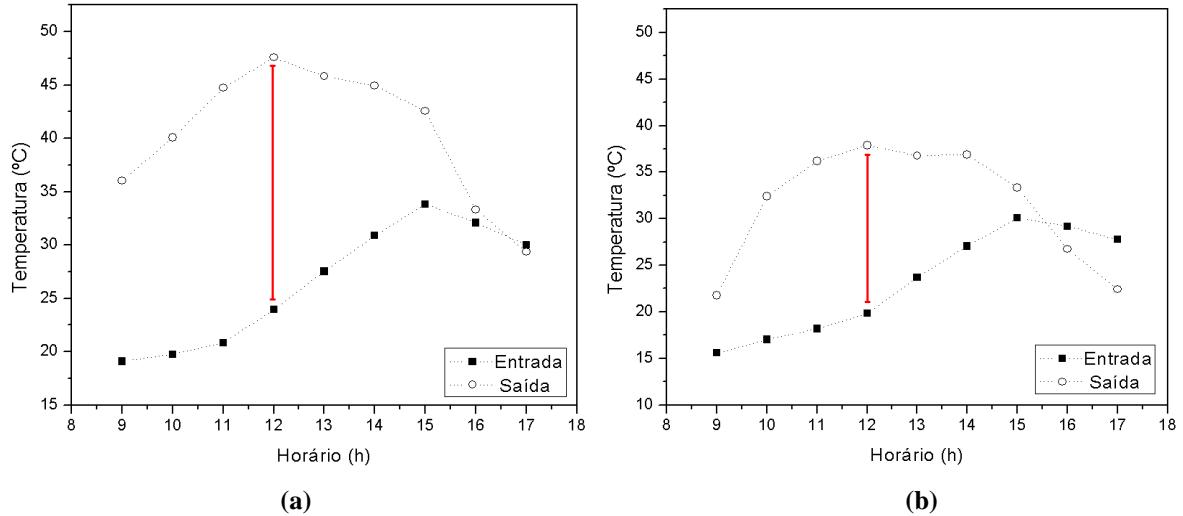


Figura A.18 – Experimento ativo, bombeado a 20 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 13/08/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

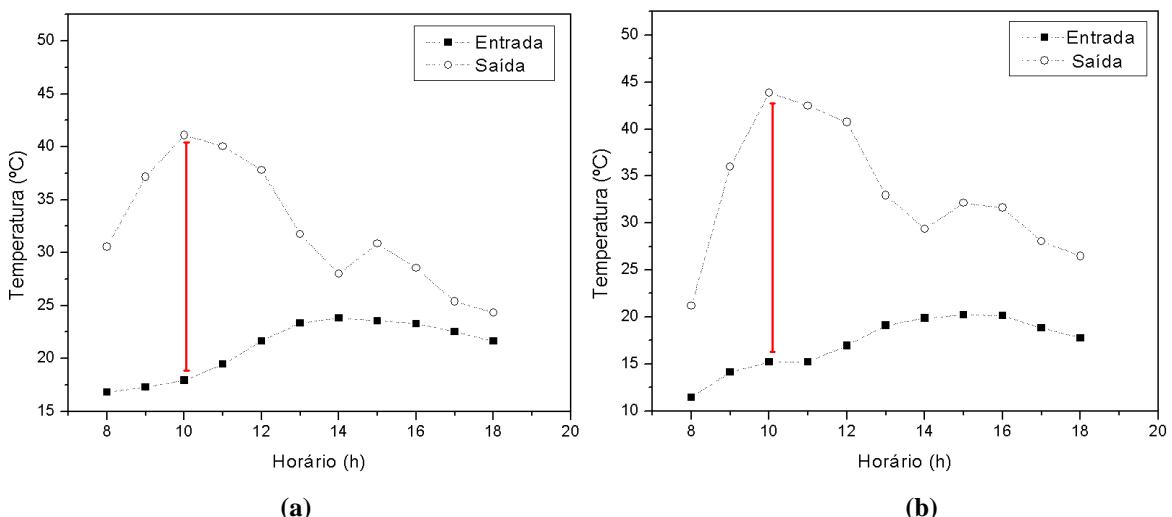


Figura A.19 – Experimento ativo, bombeado a 20 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 12/03/2010, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

### A.2.2 BOMBEADOS A 40 L/h

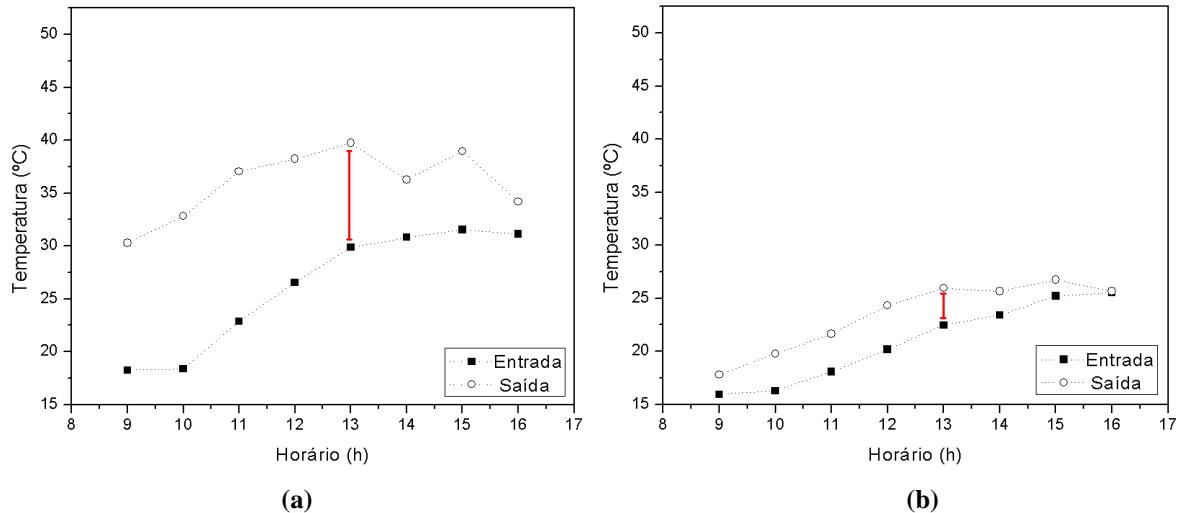


Figura A.20 – Experimento ativo, bombeado a 40 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 15/08/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

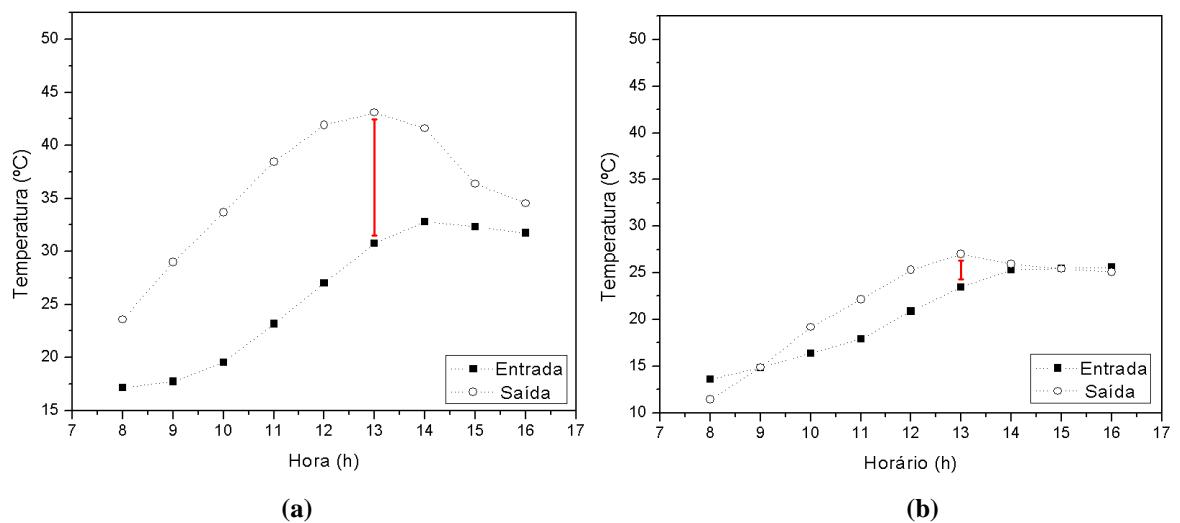


Figura A.21 – Experimento ativo, bombeado a 40 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 31/08/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

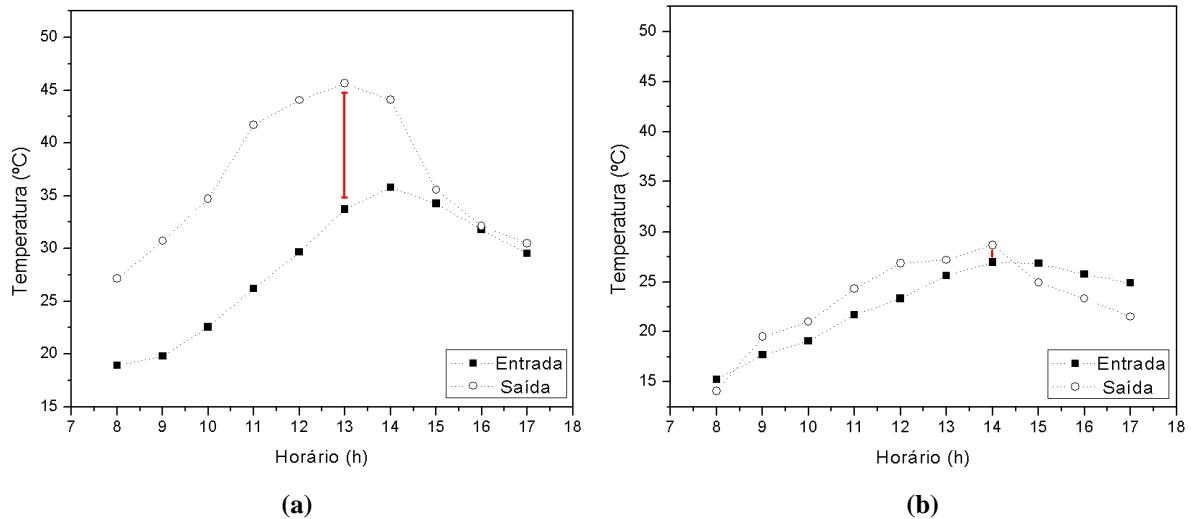


Figura A.22 – Experimento ativo, bombeado a 40 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 08/09/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

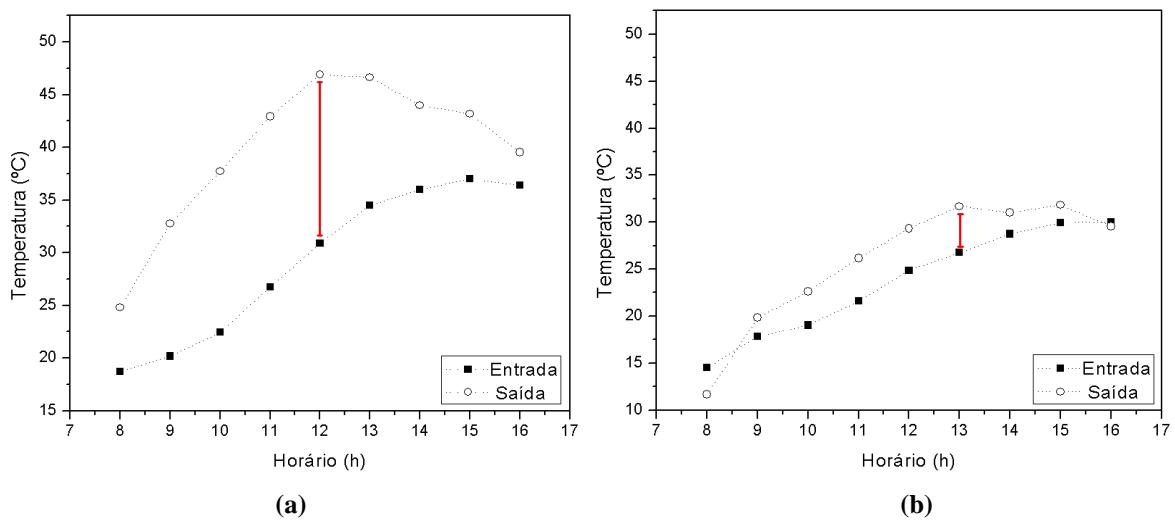


Figura A.23 – Experimento ativo, bombeado a 40 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 14/09/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

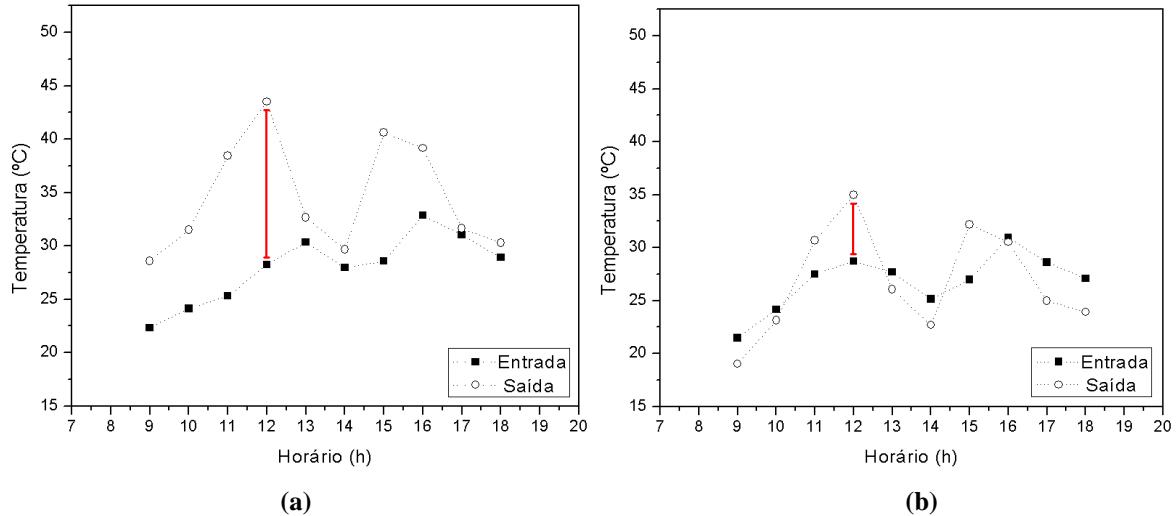


Figura A.24 – Experimento ativo, bombeado a 40 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 12/11/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

### A.2.3 BOMBEADOS A 60 L/h

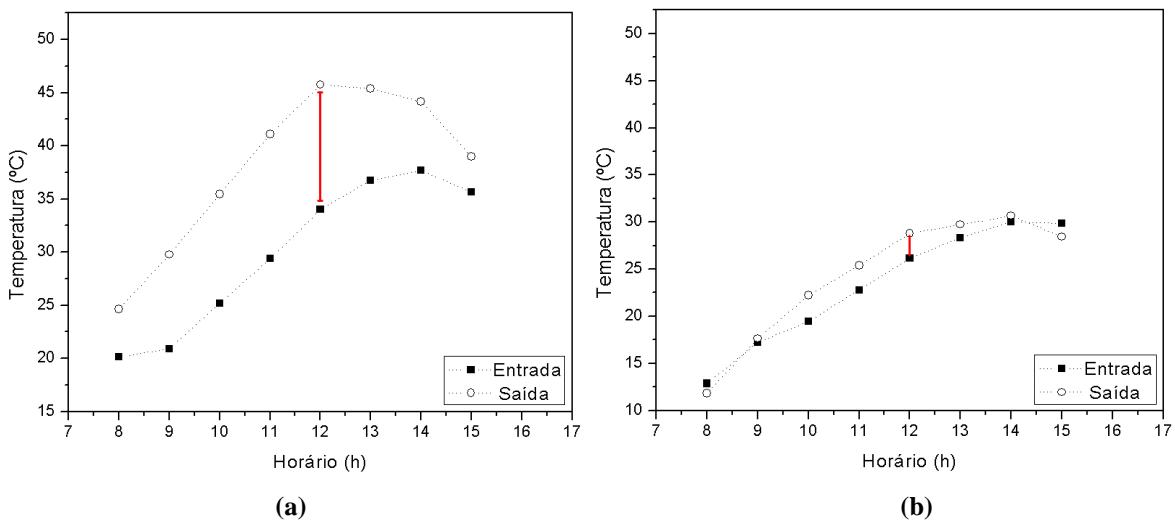


Figura A.25 – Experimento ativo, bombeado a 60 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 15/09/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

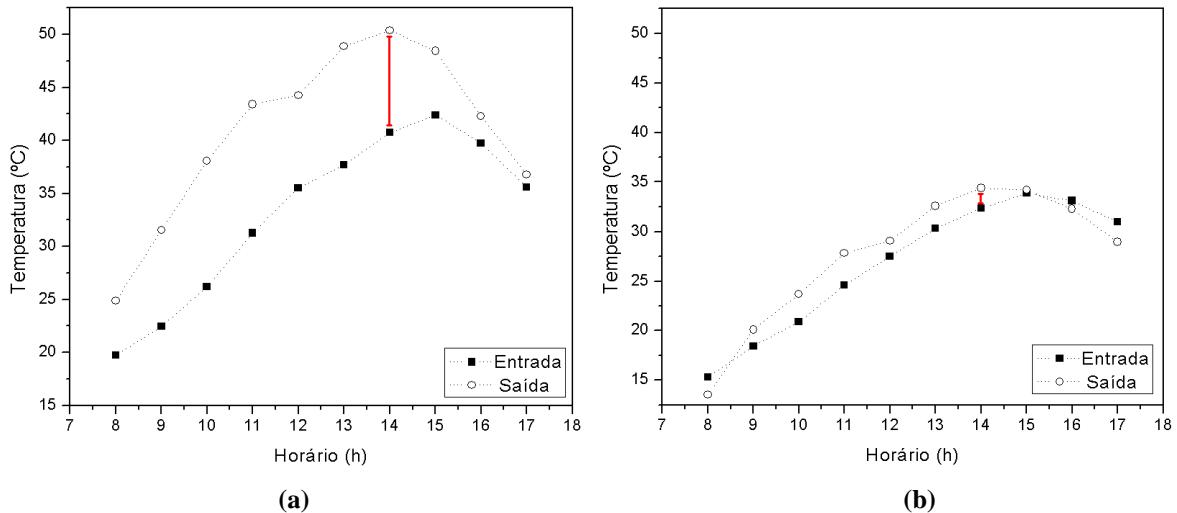


Figura A.26 – Experimento ativo, bombeado a 60 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 16/09/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

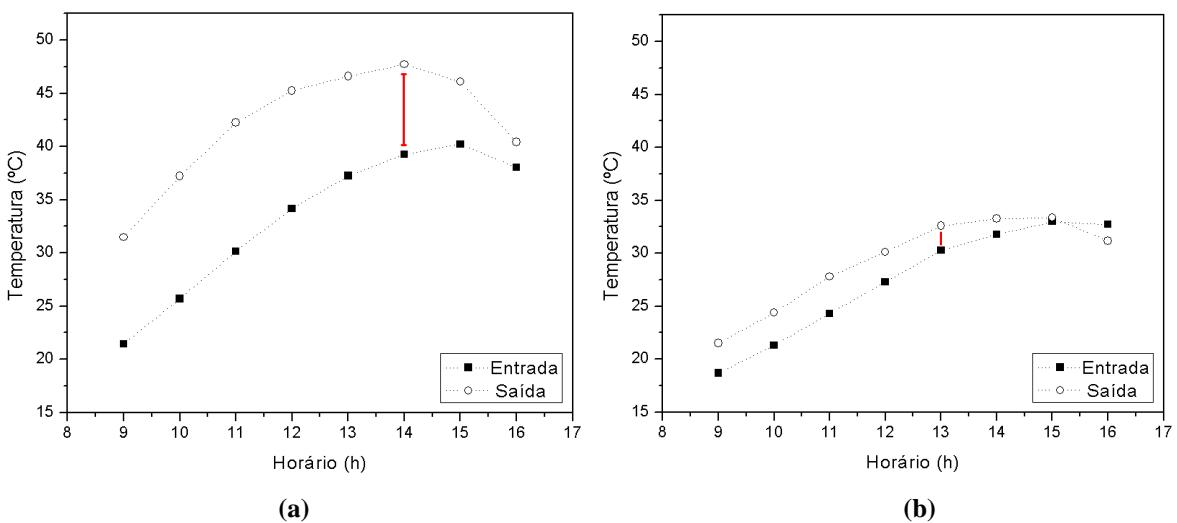


Figura A.27 – Experimento ativo, bombeado a 60 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 17/09/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

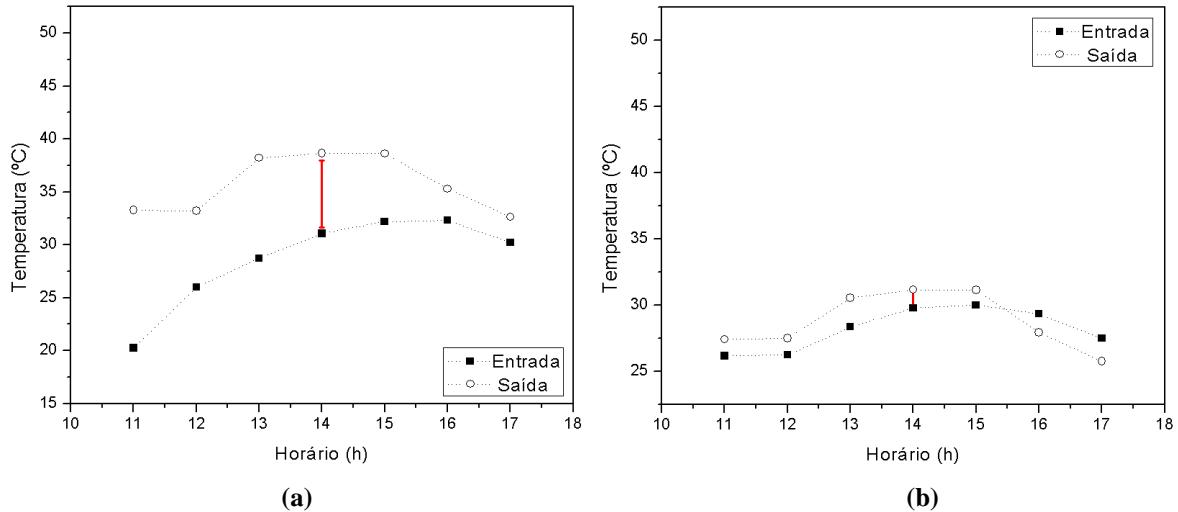


Figura A.28 – Experimento ativo, bombeado a 60 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 10/11/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

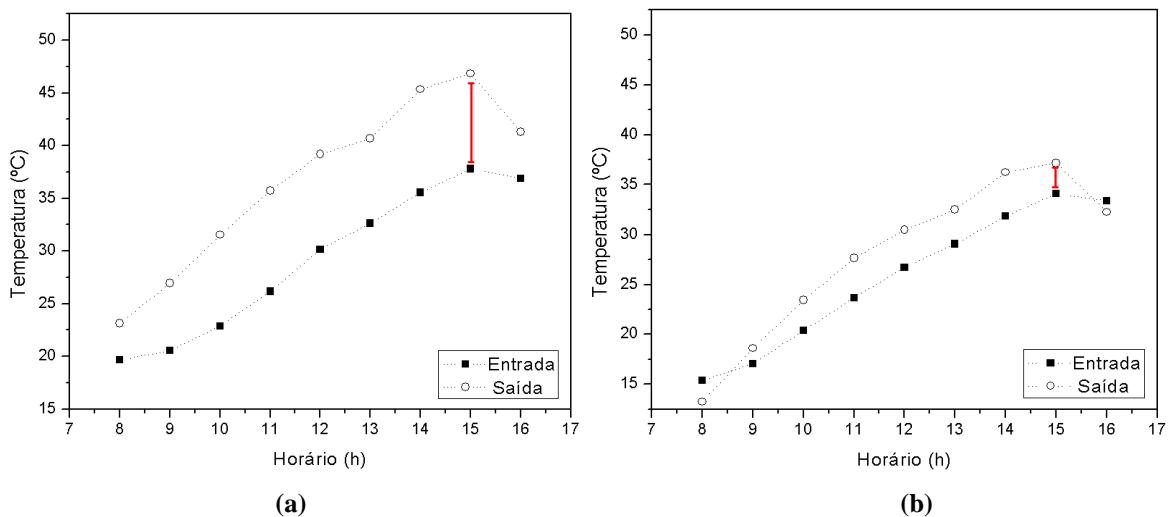


Figura A.29 – Experimento ativo, bombeado a 60 L/h, em regime batelada e sem proteção transparente, realizado no dia 18/11/2009, no coletor alternativo: (a) PP e (b) PVC.

## APÊNDICE B

### CURVAS DE CALIBRAÇÃO

Curva de calibração das bombas peristálticas acopladas aos coletores alternativos.



Figura B.1 – Fotografia da bomba peristáltica com inversor de freqüência (SIQUEIRA, 2009).

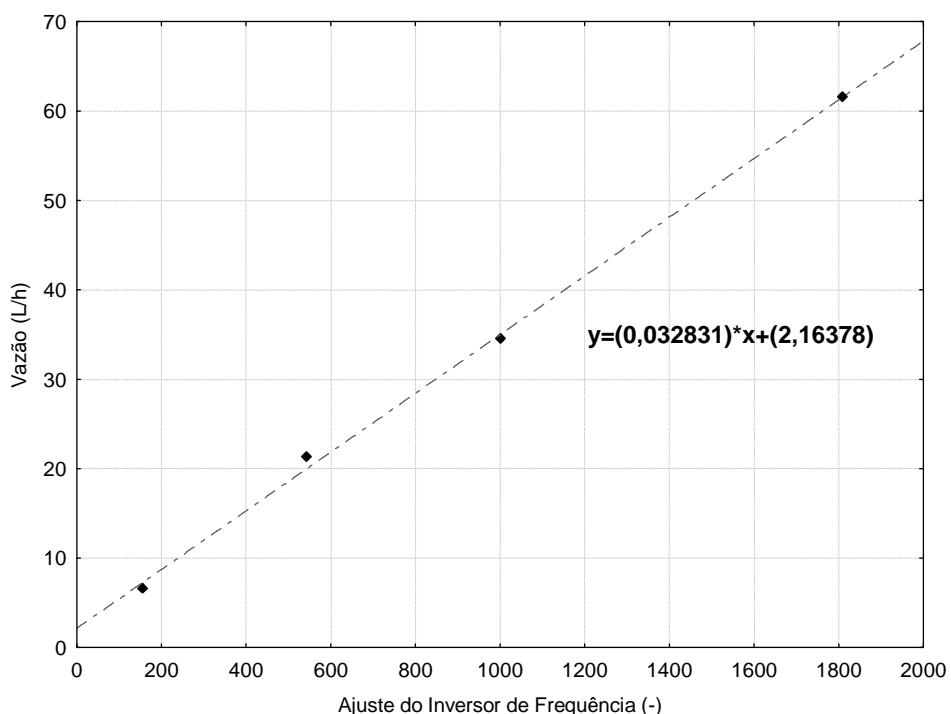


Figura B.2 – Curva de Calibração da Bomba acoplada ao coletor de PVC.

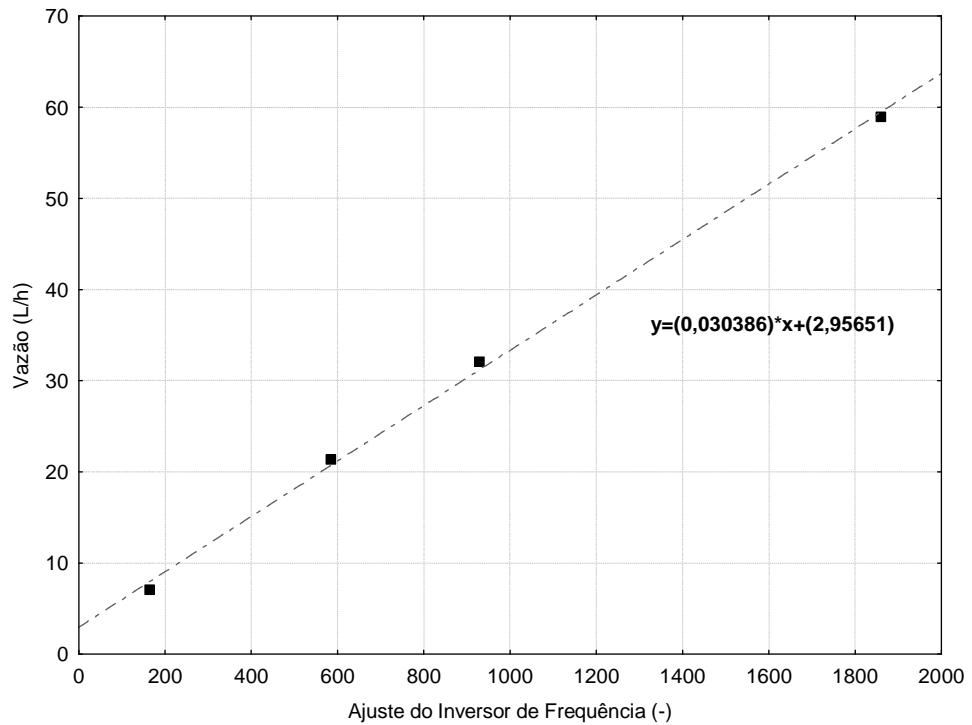


Figura B.3 – Curva de Calibração da Bomba acoplada ao coletor de Polipropileno.

## APÊNDICE C

### METODOLOGIA TEÓRICA PARA A REALIZAÇÃO DO CÁLCULO DO TEMPO DE RESIDÊNCIA PARA O SISTEMA TERMOSSIFÃO

A Equação C.1 indica o Balanço de Energia no reservatório acoplado ao coletor.

$$\rho \bar{c}_p V \frac{dT}{dt} = \dot{m} H_E - \dot{m} H_S \quad (\text{C.1})$$

Tem-se que  $\rho = 1000 [\text{kg/m}^3]$ , o calor específico médio da água ( $c_p$ ) é 4,183 kJ/kg°C,  $V$  é o volume do reservatório alternativo,  $\dot{m}$  [ $\text{kg/min}$ ] é a vazão mássica de escoamento do fluido,  $H_E$  [kJ/kg] é a entalpia de entrada no reservatório e  $H_S$  [kJ/kg] é a entalpia de saída do reservatório. Sabe-se que:

$$\begin{aligned} H_E &= f(T_E) \\ H_S &= f(T_S) \end{aligned} \quad (\text{C.2})$$

$$\begin{aligned} T_E &= g(t) \\ T_S &= h(t) \end{aligned} \quad (\text{C.3})$$

nas quais  $T_E$  é a temperatura de entrada do fluido no reservatório e  $T_S$  é a temperatura de saída do fluido do reservatório.

Foi escolhido o ensaio termossifão do dia 29/07/2009 para representar os demais. Conhecendo-se as temperaturas de entrada e saída dos reservatórios, os valores de entalpia de entrada e saída foram facilmente localizados numa tabela de propriedades termodinâmicas. Integrando-se a Equação C.1, é possível se conhecer o valor de  $\dot{m}$ . Através dos valores de volume do coletor e da densidade do fluido, é possível se calcular o tempo de residência pela Equação C.4, na qual  $V_P$  é o volume do coletor.

$$t_R = \frac{V_P \rho}{\dot{m}} \quad (\text{C.4})$$

Esses cálculos foram realizados para ambos os coletores, uma vez que possuíam volumes distintos.

## APÊNDICE D

### CARACTERÍSTICAS OBSERVADAS NOS DIAS DOS ENSAIOS

A Tabela D.1, a seguir, mostra o relatório de observações para cada dia de ensaio.

Tabela D.1 – Características Climáticas dos Dias de Ensaio.

Data	Características do dia	
	Manhã	Tarde
01/07/2009	Céu claro parcialmente nublado	Ensolarada
02/07/2009	Ensolarada	Ensolarada
04/07/2009	...	...
06/07/2009	...	...
10/07/2009	Ensolarada	Ensolarada
11/07/2009	Ensolarada	Céu claro parcialmente nublado
13/07/2009	Ensolarada	Ensolarada
14/07/2009	Ensolarada	Ensolarada
15/07/2009	Ensolarada	Ensolarada
16/07/2009	Ensolarada	Céu claro parcialmente nublado
17/07/2009	Ensolarada	Ensolarada
28/07/2009	Ensolarada	Ensolarada
29/07/2009	Ensolarada	Ensolarada
30/07/2009	Ensolarada	Ensolarada
31/07/2009	Ensolarada	Ensolarada
04/08/2009	Ensolarada	Céu nublado
06/08/2009	Ensolarada	Céu claro parcialmente nublado
10/08/2009	Céu claro parcialmente nublado	Ensolarada
11/08/2009	Ensolarada	Ensolarada
12/08/2009	Ensolarada	Ensolarada
13/08/2009	Ensolarada	Ensolarada
15/08/2009	Ensolarada	Ensolarada
31/08/2009	Ensolarada	Ensolarada
08/09/2009	Ensolarada	Céu nublado

11/09/2009	Ensolarada	Ensolarada
14/09/2009	Ensolarada	Céu parcialmente nublado
15/09/2009	Ensolarada	Ensolarada
16/09/2009	Ensolarada	Ensolarada
17/09/2009	Ensolarada	Ensolarada
10/11/2009	Ensolarada	Ensolarada
12/11/2009	Céu parcialmente nublado	Céu parcialmente nublado
16/11/2009	Ensolarada	Ensolarada
18/11/2009	Céu parcialmente nublado	Céu parcialmente nublado
19/01/2010	Ensolarada	Ensolarada
20/01/2010	Ensolarada	Ensolarada
01/02/2010	Ensolarada	Ensolarada
04/02/2010	Ensolarada	Ensolarada
09/03/2010	Ensolarada	Ensolarada
10/03/2010	Céu parcialmente nublado	Ensolarada
12/03/2010	Céu parcialmente nublado	Céu nublado
19/03/2010	Ensolarada	Ensolarada
07/04/2010	Ensolarada	Ensolarada
15/04/2010	Ensolarada	Ensolarada
17/04/2010	Ensolarada	Céu parcialmente nublado
19/04/2010	Ensolarada	Ensolarada
27/04/2010	Ensolarada	Ensolarada

## APÊNDICE E

## TEMPERATURA AMBIENTE

A Tabela E.1 mostra os valores horários de temperatura ambiente registrados em cada dia de ensaio.

Tabela E.1 – Valores Horários da Temperatura Ambiente.