LAERTE BERNARDES ARRUDA

**OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR DE
ÁGUA COM CONTROLE DE VAZÕES EM COLETORES PLANOS**

Texto apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do Título de Doutor em Engenharia Civil.

São Paulo

2004

LAERTE BERNARDES ARRUDA

**OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR DE
ÁGUA COM CONTROLE DE VAZÕES EM COLETORES PLANOS**

Texto apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo a obtenção do
Título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de concentração:
Engenharia de Construção Civil e Urbana

Orientador:
Prof. Dr. Racine Tadeu Araujo Prado

São Paulo
2004

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu Orientador.

São Paulo, 19 de julho de 2004.

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Arruda, Laerte Bernardes

Operação de sistemas de aquecimento solar de água com controle de vazões em coletores planos / L.B. Arruda. -- São Paulo, 2004.

230p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

**1.Sistemas prediais 2.Aquecimento solar de água
3.Automação predial I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.**

À minha esposa e filhos que tanto me apoiaram e
têm sido o grande incentivo da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Racine Tadeu Araújo Prado, pela orientação, apoio e incentivo no durante o desenvolvimento desta pesquisa.

À FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo indispensável apoio financeiro.

À Aquecedores Cúmulus S/A. Indústria e Comércio, que gentilmente brindou os coletores solares e os reservatórios térmicos.

Aos professores, funcionários e colegas do Departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica da USP, sempre prestativos, que em muito colaboraram como apoio nos momentos das mais diversas dificuldades.

À Universidade Federal de Uberlândia, por me proporcionar as condições necessárias para a minha dedicação exclusiva a esta pesquisa.

À professora Dr^a. Vânia Maria B. Arruda Fernandes, do Instituto de Letras e Lingüística da UFU, pelo auxílio na revisão do texto.

À minha esposa Consuelo e a meus filhos, pela compreensão, apoio e participação em todos os momentos.

A Deus, pela oportunidade da vida.

RESUMO

O presente trabalho consiste em um estudo experimental sobre o efeito do 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. Foi avaliado o desempenho de todo o sistema sob diferentes condições de insolação, de vazão, de diferenciais de temperatura entre os coletores e o reservatório, em regime não permanente. Os resultados experimentais foram comparados com a equação de rendimento dos coletores, para condições de regime quase permanente, obtida segundo a norma da ABNT – NBR 10184/1988. Os ensaios foram realizados em duas baterias de testes, cada uma composta de dois coletores industrializados e um reservatório isolado termicamente. Em uma destas baterias, o fluxo de água entre os coletores e o reservatório ocorreu por termossifonagem, isto é, sem nenhuma restrição à vazão; na outra bateria, a vazão foi controlada por um registro e uma bomba hidráulica. Um sistema de automação coletou e processou os dados de forma a permitir a execução dos controles desejados, inclusive a simulação de consumo de água quente. O sistema com circulação natural, isto é, por termossifão, demonstrou ter uma grande habilidade de se adaptar à disponibilidade de energia com as temperaturas da água armazenada, por meio da otimização da velocidade da troca de calor. Foi desenvolvido, tomado como referência o escoamento por termossifão, um modelo de operação para sistemas diretos ativos que calcula a vazão com base no monitoramento das temperaturas das extremidades das tubulações que interligam o reservatório e os coletores, temperatura do ar, radiação solar disponível e vazão no instante anterior. O modelo foi testado experimentalmente e a operação do sistema ativo resultou em significativa melhora na eficiência.

Palavras-chave: sistemas prediais, aquecimento solar de água, automação predial.

ABSTRACT

The focus of this work is the experimental study of the effect of water control discharge in solar water-heating systems with a large number of collectors where the temperature gradient is not sufficient for thermosiphon water circulation. The performance of the system was evaluated under different conditions of solar radiation, flow rate, temperature differential between solar collectors and the storage tank and under transient conditions. The results were compared to a collector's performance equation of the quasi-steady-state model according to ABNT-NBR 10184/1988 standard. The tests were carried out on two systems each one constituted of two manufacturing collectors and one thermal tank. In one of these systems the flow between the collectors and storage occurred by thermosiphoning, i.e., by natural convection and without discharge restrictions. In the other, the flow control was done by means of a valve and a pump. In order to allow the execution of the desired controls, including hot water consumption, data were collected and controlled through an automation system. The system of natural circulation shows a great ability to adaptation of disposal energy with water temperature stored, through velocity of heat exchange optimization. An operation model was developed, having thermosiphoning water circulation as reference, for active direct circulation systems that calculate the discharge taking into consideration the monitoring of the differential temperature between solar collectors and the storage tank, the air temperature, solar radiation available and the flow rate on previous time interval. This model was experimentally tested and resulted in a significant improvement in performance of the system operation.

Key words: building systems, solar water heating, building automation.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	01
1.1 – Objetivo	06
2 – REVISÃO DA LITERATURA	07
2.1 – Radiação Solar	07
2.1.1 – Medição da radiação solar	08
2.1.2 – Direção da radiação solar direta	09
2.1.3 – Radiação extraterrestre em uma superfície horizontal	13
2.1.4 – Atenuação da radiação solar na atmosfera	14
2.1.5 – Estimativas da radiação solar na superfície terrestre	16
2.1.5.1 – Frequência da ocorrência de dias e horas claros ou nublados	17
2.1.5.2 – Estimativas das componentes direta e difusa da radiação global	18
2.1.5.3 – Radiação solar direta em dias claros	20
2.1.5.4 – Estimativa da energia solar com dados de horas de radiação direta ..	21
2.1.6 – Radiação total em uma superfície plana inclinada	23
2.1.7 – Efeitos da orientação de coletores planos no aproveitamento da energia solar	26
2.2 – Componentes do sistema de aquecimento solar de água	27
2.2.1 – Coletores de calor solar para aquecimento de água	30
2.2.2 – Reservatórios de água quente	39
2.2.2.1 – Estratificação térmica nos reservatórios de água quente	42
2.2.2.2 – Perdas térmicas nos reservatórios de água quente	51
2.2.3 – Perdas de calor nas tubulações	62
2.2.4 – Fonte auxiliar de energia	64
2.3 – Sistemas diretos de aquecimento solar de água	66
3 – MATERIAIS E MÉTODOS	73
3.1 – Descrição da montagem e equipamentos	73
3.1.1 – Escolha da inclinação dos coletores	77
3.2 – Sistema de automação	80

3.3 – Cálculo das variáveis intervenientes	82
3.3.1 – Temperatura média do reservatório de água quente	82
3.3.2 – Energia da água quente consumida	84
3.3.3 – Energia da água fria que entra no reservatório de água quente	86
3.3.4 – Energia da água fria utilizada na mistura para o consumo	87
3.3.5 – Energia solar	89
3.3.5.1 – Energia solar útil no coletor avaliada pela equação da eficiência	89
3.3.5.2 – Energia solar útil recebida pelo reservatório de água quente	91
3.3.5.3 – Energia solar útil no coletor avaliada pela energia absorvida pela água	95
3.3.6 – Energia elétrica útil	96
3.3.7 – Perdas térmicas no reservatório de água quente utilizando o coeficiente global de perda de calor	97
3.3.8 – Perdas térmicas no reservatório de água quente devido à recirculação de água no coletor	97
3.3.9 – Energia utilizável	98
3.3.10 - Balanço de energia no reservatório de água quente	98
3.4 – Variáveis de avaliação do desempenho	99
3.4.1 – Eficiência do sistema no aproveitamento da energia solar	100
3.4.2 – Fração solar	100
3.4.3 – Fator de carga utilizável	102
3.4.4 – Massa equivalente de água no reservatório	102
3.4.5 – Coeficiente de melhoria da energia utilizável	103
3.4.6 – Relação entre o fator de carga utilizável e a eficiência	104
3.4.7 – Índice de estratificação térmica	104
 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	 106
4.1 – Ensaio preliminares	106
4.1.1 – Avaliação do coeficiente global de perda de calor dos reservatórios ...	106
4.1.2 – Ensaio de recuperação do reservatório com a fonte auxiliar	109
4.2 – Avaliação do desempenho dos sistemas	110
4.2.1 – Verificação experimental da influência das vazões no rendimento dos coletores	116

4.2.2 – Verificação experimental das vazões de consumo e do acionamento da fonte auxiliar de calor	123
4.2.3 – Verificação experimental da influência do controle do acionamento da fonte auxiliar de calor	128
4.2.4 – Observação da estratificação térmica no reservatório de água quente	130
4.3 – O modelo proposto	145
5 – CONCLUSÕES	161
Anexo A – Ensaio de calibração da instrumentação	166
Anexo B – Apresentação dos dados	180
Anexo C – Valores das vazões e temperaturas do sistema de aquecimento por termossifão	218
Anexo D – Modelo de controle da operação da fonte auxiliar de calor	221
LISTA DE REFERÊNCIAS	225

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Variação da intensidade da radiação solar com a latitude. Fonte: Hudson; Markell (1985)	7
Figura 2.2 – Ângulos solares derivados	11
Figura 2.3 – Radiação solar direta em superfícies horizontal e inclinada	12
Figura 2.4 – Sistema direto passivo com fonte de energia interna ou externa	28
Figura 2.5 – Sistema indireto de aquecimento de água, passivo e com aquecedor auxiliar	29
Figura 2.6 – Sistema de aquecimento de água ativo: direto e indireto	29
Figura 2.7 – Seção típica de um coletor de superfície plana	31
Figura 2.8 – Coletores de foco concentrado: parabólico e Fresnel. Fonte Hudson; Markell (1985).....	31
Figura 2.9 – Coletores associados: a) em paralelo; b) em série	39
Figura 2.10 – Esquema do fluxo de energia no reservatório de água quente durante um intervalo de tempo Δt	40
Figura 2.11 – Esquema da estratificação térmica no reservatório	43
Figura 2.12 – Representação esquemática do escoamento em “plug-flow” em um reservatório dividido em quatro seções	45
Figura 2.13 – Seção transversal de um corpo cilíndrico	55
Figura 2.14 – Analogia entre a resistência térmica com a elétrica	55
Figura 2.15 – Distribuição de temperatura e circuito térmico para o fluxo de calor através de uma parede composta	59
Figura 2.16 – Esquema de um sistema passivo direto	67
Figura 3.1 – Vista frontal da bancada de teste	74
Figura 3.2 – Esquema da montagem do sistema “A”	74
Figura 3.3 – Esquema da montagem do sistema “B”	75
Figura 3.4 – Detalhes do reservatório de água quente	76
Figura 3.5 – Detalhes dos equipamentos: hidrômetro, válvula motorizada, válvula de mistura e sensor de temperatura	76
Figura 3.6 – Radiação total no plano inclinado ao longo do ano	80
Figura 3.7 – Esquema da configuração do sistema se automação	82
Figura 3.8 – Esquema dos reservatórios de água quente	83
Figura 3.9 – Temperaturas da água no ensaio de 25/04/02: T6-B ponto da tubulação próximo ao reservatório de água quente cuja temperatura é TR4-B; T’6-B prevista nas equações, T’’6-B prevista pelo modelo “plug-flow”	92
Figura 3.10 – Esquema da subdivisão da tubulação em três trechos consecutivos	93
Figura 3.11 – Escoamento na tubulação pelo modelo “plug-flow”	93
Figura 4.1 – Resultado dos ensaios de resfriamento espontâneo dos reservatórios constantes dos Quadros 4.1 e 4.2	107
Figura 4.2 – Recuperação da temperatura dos reservatórios e eficiência da resistência elétrica	109
Figura 4.3 – Eficiência das resistências elétricas nos instantes iniciais de funcionamento	110

Figura 4.4 – Perfil de consumo OO	111
Figura 4.5 – Perfil de consumo CC	111
Figura 4.6 – Perfil de consumo FG	112
Figura 4.7 – Perfil de consumo AA	112
Figura 4.8 – Perfil de consumo BB	112
Figura 4.9 – Curvas dos rendimentos do coletor solar: a) com variação da radiação solar (equação 4.1); b) com variação das vazões (L/min.m ²) (equação 4.2)	114
Figura 4.10 – Curvas dos rendimentos do coletor solar para várias vazões (L/min.m ²) obtidas da equação (4.2)	115
Figura 4.11 – Curvas dos rendimentos do coletor solar para diferentes vazões (L/min.m ²) e radiação solar, obtidas da equação (4.2)	115
Figura 4.12 – Resultados do ensaio de 16-10-02: a) radiação solar e rendimentos ao longo do dia; b) rendimento em função da diferença de temperatura da água na entrada do coletor e do ar; c) variação da temperatura da água na entrada do coletor, temperatura do ar e vazão de consumo (perfil OO); d) energia térmica ganha pela água em função do tempo	117
Figura 4.13 – Resultados do ensaio de 04-02-03: a) radiação solar e rendimentos ao longo do dia; b) rendimento em função da diferença de temperatura da água na entrada do coletor e do ar; c) temperaturas da água na entrada dos coletores, temperatura do ar, temperaturas na saída e na superfície do coletor A e vazão de consumo (perfil OO); d) energia térmica ganha pela água em função do tempo	119
Figura 4.14 – Resultados do ensaio de 24-02-03: a) radiação solar e rendimentos ao longo do dia; b) rendimento em função da diferença de temperatura da água na entrada do coletor e do ar; c) temperaturas da água na entrada dos coletores, temperatura do ar, temperaturas na saída e na superfície do coletor A e vazão de consumo (perfil OO); d) energia térmica ganha pela água em função do tempo	120
Figura 4.15 – Resultados do ensaio de 11-02-03: a) radiação solar e rendimentos ao longo do dia; b) rendimento em função da diferença de temperatura da água na entrada do coletor e do ar; c) temperaturas da água na entrada dos coletores, temperatura do ar, temperaturas na saída e na superfície do coletor A e vazão de consumo (perfil OO); d) energia térmica ganha pela água em função do tempo	122
Figura 4.16 – Resultados do ensaio de 26-04-02: a) radiação solar e rendimentos ao longo do dia; b) rendimento em função da diferença de temperatura da água na entrada do coletor e do ar; c) temperaturas da água na entrada dos coletores, temperatura do ar, vazão de consumo (perfil FG) e potência das resistências elétricas; d) energia térmica ganha pela água no coletor em função do tempo	124
Figura 4.17 – Resultados do ensaio de 18-12-02: a) radiação solar e rendimentos ao longo do dia; b) temperaturas da água na entrada dos coletores (T_e), temperatura do ar (T_{ar}), vazão de consumo (perfil AA) e potência das resistências elétricas	126

Figura 4.18 – Resultados do ensaio de 09-01-03: a) radiação solar e rendimentos ao longo do dia; b) temperaturas da água na entrada dos coletores (T_e), temperatura do ar (T_{ar}), vazão de consumo (perfil BB) e potência das resistências elétricas	127
Figura 4.19 – Resultados do ensaio de 07-06-02: a) radiação solar e rendimentos ao longo do dia; b) temperaturas da água na entrada dos coletores (T_e), temperatura do ar (T_{ar}), vazão de consumo (perfil CC) e potência das resistências elétricas	127
Figura 4.20 – Resultados do ensaio de 19-12-02: a) radiação solar e rendimentos ao longo do dia; b) temperaturas médias da água nos reservatórios (T_R), temperatura do ar (T_{ar}), vazão de consumo (perfil AA) e potência das resistências elétricas	129
Figura 4.21 – Resultados do ensaio de 17-01-03: a) radiação solar e rendimentos ao longo do dia; b) temperaturas médias da água nos reservatórios (T_R), temperatura do ar (T_{ar}), vazão de consumo (perfil BB) e potência das resistências elétricas	130
Figura 4.22 - Perfil térmico dos reservatórios dos sistemas A e B, ensaio de 16-10-02, com perfil de consumo OO. Temperaturas TR_i tomadas segundo as posições mostradas na Figura 3.8	132
Figura 4.23 - Perfil térmico dos reservatórios dos sistemas A e B, ensaio de 04-02-03, com perfil de consumo OO. Temperaturas TR_i tomadas segundo as posições mostradas na Figura 3.8	133
Figura 4.24 - Perfil térmico dos reservatórios dos sistemas A e B, ensaio de 26-04-02, com perfil de consumo FG. Temperaturas TR_i tomadas segundo as posições mostradas na Figura 3.8	134
Figura 4.25 - Perfil térmico dos reservatórios dos sistemas A e B, ensaio de 18-12-02, com perfil de consumo AA. Temperaturas TR_i tomadas segundo as posições mostradas na Figura 3.8	135
Figura 4.26 – Ensaio do dia 16-10-02: a) índice de estratificação térmica em função do tempo; b) diferença de temperatura na entrada e a média do reservatório; c) número de Richardson em função do tempo; d) vazões em função do tempo. Perfil de consumo OO	137
Figura 4.27 – Ensaio do dia 16-10-02: a) índice de estratificação térmica em função do número de Richardson; b) índice de estratificação térmica em função da diferença de temperatura na entrada e a média do reservatório. Perfil de consumo OO	139
Figura 4.28 – Ensaio do dia 04-02-03: a) número de Richardson (Ri) em função do tempo no sistema A; b) Ri em função do tempo no sistema B; c) índice de estratificação térmica (I_E) em função do tempo; d) I_E em função da diferença ($T_{Re} - \bar{T}_{Rini}$); e) I_E em função de Ri ; f) I_E em função de ($T_{Re} - \bar{T}_{Rini}$). Perfil de consumo OO	140
Figura 4.29 – Ensaio do dia 18-12-02: a) índice de estratificação (I_E) térmica em função do número de Richardson; b) ($T_{Re} - \bar{T}_{Rini}$) em função do tempo; c) I_E em função de Ri ; d) I_E em função de ($T_{Re} - \bar{T}_{Rini}$). Perfil de consumo AA	141

Figura 4.30 – Perfil de temperatura no reservatório do sistema B: a) experimento de 16-10-02; b) experimento de 04-02-03	143
Figura 4.31 – Relação entre o índice de estratificação térmica e os números de Peclet e Fourier do ensaio de 16-10-02. Perfil de descarga OO	144
Figura 4.32 – Relação entre o índice de estratificação térmica e os números de Peclet e Fourier do ensaio de 04-02-03. Perfil de descarga OO	144
Figura 4.33 – Relação entre o índice de estratificação térmica e os números de Peclet e Fourier do ensaio de 18-12-02. Perfil de descarga AA	144
Figura 4.34 – Fluxograma da operação do sistema de aquecimento solar de água, com controle de vazão efetuado pelas diferenças de temperatura na entrada e na saída dos coletores e do reservatório	153
Figura 4.35 – Sub-rotina B: fluxograma do cálculo da vazão de operação do sistema de aquecimento solar de água	154
Figura 4.36 – Experimento de 20-03-03: a) radiação solar e desempenho dos sistemas; b) vazões reais e previstas nos coletores; c) temperaturas e vazões de consumo no sistema A; d) fator de remoção de calor; e) temperaturas no reservatório do sistema A; f) índice de estratificação térmica nos dois sistemas. Perfil de consumo OO	156
Figura 4.37 – Experimento de 07-01-03: a) radiação solar e desempenho dos sistemas; b) vazões reais e previstas nos coletores; c) temperaturas e vazões de consumo no sistema A; d) Fator de remoção de calor; e) temperaturas no reservatório do sistema A; f) índice de estratificação térmica nos dois sistemas. Perfil de consumo AA, sem “timer”	157
Figura 4.38 – Experimento de 11-01-03: a) radiação solar e desempenho dos sistemas; b) vazões reais e previstas nos coletores; c) temperaturas e vazões de consumo no sistema A; d) fator de remoção de calor; e) temperaturas no reservatório do sistema A; f) índice de estratificação térmica nos dois sistemas. Perfil de consumo BB, com “timer”	158

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1	– Métodos de cálculo para testes de coletores solares analisados por Nayak; Amer (2000)	37
Quadro 2.2	– Adimensionais e variáveis empregadas no estudo de transferência de calor	52
Quadro 2.3	– Coeficientes da equação (2.75)	53
Quadro 2.4	– Valores da condutividade térmica de alguns materiais	56
Quadro 3.1	– Relação dos equipamentos	75
Quadro 3.2	– Cálculo a radiação direta em um plano horizontal e da radiação difusa	78
Quadro 3.3	– Cálculo da radiação total no plano inclinado em função da inclinação	79
Quadro 3.4	– Radiação total no plano inclinado em função da inclinação	79
Quadro 3.5	– Comparação da energia solar disponível em função da inclinação do coletor , tendo como referência $\theta = \text{Latitude}$	80
Quadro 4.1	– Determinação do coeficiente global de perda de calor. Experimento 1 (Janeiro de 2002)	108
Quadro 4.2	– Determinação do coeficiente global de perda de calor. Experimentos 2 (abril / 2002) e 3 (Maio / 2002)	108
Quadro 4.3	– Equações de rendimento e valores médios relativos às resistências elétricas dos reservatórios	110
Quadro 4.4	– Síntese dos principais critérios da NBR 10184/88 (ABNT,1988-a) para o ensaio de determinação do rendimento térmico em coletores solares planos	114
Quadro 4.5	– Resumo das principais variáveis dos ensaios mostrados nas Figuras 4.12 a 4.15	116
Quadro 4.6	– Resumo das principais variáveis dos ensaios mostrados nas Figuras 4.16 a 4.19 com a fonte auxiliar habilitada	123
Quadro 4.7	– Valores de algumas das variáveis dos ensaios mostrados nas Figuras 4.12 a 4.25	136
Quadro 4.8	– Comportamentos e tendências das variáveis relacionadas com a estratificação térmica do ensaio de 16-10-02	138
Quadro 4.9	– Diferenças de temperaturas entre a entrada e a saída do coletor e vazões ocorridas na circulação natural	146
Quadro 4.10	– Valores adotados para que o sistema de bombeamento funcione de forma similar ao sistema por termossifão	149

LISTA DE SÍMBOLOS

A : área (m^2);
 A_a : área do absorvedor do coletor (m^2);
 A_c : área do coletor (m^2);
 A_R : área das paredes do reservatório (m^2);
 A_t : seção transversal da tubulação (m^2);
 a e b : constantes empíricas determinadas por análise de regressão;
 $a(?)$: coeficiente global de extinção atmosférica;
 $a_R(?)$: coeficiente de extinção atmosférica devido às moléculas do ar;
 $a_D(?)$: coeficiente de extinção atmosférica devido às partículas em suspensão;
 $a_W(?)$: coeficiente de extinção atmosférica devido à absorção seletiva dos gases;
 C_c : capacidade de carga do reservatório (kJ);
 C_d : capacidade de descarga do reservatório (kj);
 C_p : calor específico da água à pressão constante (kJ/ kg. °C);
 C_T : capacidade térmica efetiva do reservatório (J / K);
 d_i : diâmetro interno (m);
 d_e : diâmetro externo (m);
 E : poder de emissão de um corpo qualquer (kJ/m².h);
 E_{AF} : energia da água fria utilizada para a mistura durante o consumo (kJ);
 E'_{AF} : energia da água fria que abastece o reservatório de água quente (kJ);
 E_{AQ} : energia da água quente que sai do reservatório para o abastecimento (kJ);
 E_b : poder de emissão de um corpo negro (kJ/m².h);
 E_{Er} : energia elétrica consumida pela resistência (kJ);
 E_{Eb} : energia elétrica consumida pela bomba de recirculação (kJ);
 E_{FR} : energia perdida do reservatório para o ambiente (kJ);
 E_H : entalpia (kJ);
 E_{Rc} : energia perdida na recirculação da água pelos coletores (kJ);
 E_{Sc} : energia solar útil no coletor, avaliada pela equação do rendimento (kJ);
 Eu_E : energia útil da fonte auxiliar de calor (kJ);
 Eu_R : energia do reservatório de água quente (kJ);
 Eu_{Sc} : energia solar útil no coletor avaliada pela energia absorvida pela água (kJ);
 Eu_{SR} : energia útil que chega ao reservatório dos coletores (kJ);
 $?E_R$: variação da energia total no reservatório (kJ);
 e : espessura das paredes (mm);
 F' : fator de eficiência do coletor;
 Fr : fator de remoção de calor do coletor;
 F_r'' : fator de vazão do coletor corrigido em função da vazão;
 Fo : número de Fourier;
 F_T : fator de temperatura;
 F_{1-2} : fator de configuração;
 f : coeficiente de atrito;
 G : irradiância ou fluxo de radiação (W/m²);
 G_{bt} : fluxo de radiação direta normal à superfície inclinada (W/m²);
 G_b : fluxo de radiação direta normal a uma superfície horizontal (W/m²);

G_{bn} : fluxo de radiação direta em uma superfície qualquer terrestre (W/m^2);
 G_{eo} : constante solar como função do comprimento de onda λ ($\text{W.m}^{-2}.\text{m}^{-1}$);
 G_{esn} : radiação solar direta normal à superfície (W/m^2);
 G_0 : fluxo de radiação extraterrestre em um plano horizontal (W/m^2);
 G_{on} : fluxo de radiação extraterrestre em um plano normal a radiação direta (W/m^2);
 G_{sc} : constante solar (W/m^2);
 G_T : fluxo de radiação direta em um plano inclinado na superfície terrestre (W/m^2);
 Gr : número de Grashof;
 g : aceleração da gravidade (m/s^2);
 H : radiação solar em um dia (J/m^2);
 $?H_i$: distância entre os sensores da seção i e $(i + 1)$ (cm);
 $\bar{H}$: radiação solar média mensal na superfície terrestre no plano horizontal (J/m^2);
 H_0 : radiação solar total diária extraterrestre no plano horizontal (J/m^2);
 $\bar{H}_0$: radiação solar média mensal extraterrestre no plano horizontal (J/m^2);
 H_f : perda de energia por atrito (N.m/kg);
 H_m : altura manométrica da bomba (m.c.a);
 H_m : radiação total mensal (J/m^2);
 H_R : altura total do reservatório (m);
 $\bar{H}_T$: capacidade calórica (J / K);
 h_c : coeficiente de transmissão convectiva de calor ($\text{W/m}^2.\text{°C}$);
 h_r : coeficiente de transmissão de calor radiante ($\text{W/m}^2.\text{°C}$);
 I : radiação solar total horária na superfície terrestre no plano horizontal (J/m^2);
 I_{bn} : radiação direta na horizontal para um período de uma hora (J/m^2);
 I_0 : radiação solar total horária extraterrestre em um plano horizontal (J/m^2);
 I_{DN} : radiação solar direta normal à superfície terrestre (J/m^2);
 $I_{D?}$: radiação solar difusa (J/m^2);
 I_E : índice de estratificação térmica do reservatório (°C/cm);
 I_r : radiação solar refletida do entorno (J/m^2);
 $I_{i?}$: radiação solar na superfície terrestre para um ângulo de incidência θ (J/m^2);
 K_n : coeficiente da função resposta do método de Rogers ($i=1,2,3...n$);
 $\bar{K}_T$: índice de nebulosidade médio mensal;
 K_T : índice de nebulosidade diário;
 $K_{??}$: coeficiente de correção do ângulo de incidência da radiação solar global;
 $K_{??b}$: coeficiente de correção do ângulo de incidência da radiação solar direta;
 $K_{??d}$: coeficiente de correção do ângulo de incidência da radiação solar difusa;
 k : condutividade térmica (W/m.°C);
 k_s : coeficiente de perda de carga singular ou localizada;
 k_T : índice de nebulosidade horário;
 k_l : relação entre o ganho de energia do reservatório e o consumo do motor da bomba;
 L : comprimento do trecho (m);
 L_E : carga térmica diária da fonte auxiliar (J);
 L_0 : carga térmica diária do consumo de água quente (J);
 L_S : carga térmica diária da energia solar útil (J);
 m : massa (kg), massa de ar;
 m_a : massa efetiva de água na unidade auxiliar (kg);
 m_e : massa efetiva de água no coletor (kg);

m_R : massa de água do reservatório de água quente (kg);
 $\dot{m}$: vazão em massa (kg/ s);
 $\dot{m}_c$: vazão em massa no coletor (kg/ s);
 $\dot{m}_{AF}$: vazão em massa da água fria (kg/ s);
 $\dot{m}_{AQ}$: vazão em massa da água quente para o abastecimento (kg/ s);
 $\dot{m}_{min}$: vazão total mínima a ser bombeada (kg/ s);
 $\dot{m}_{total}$: vazão total em massa que passa pela bomba (kg/ s)
 $(mc)_e$: capacidade de calor efetivo por unidade de área (J / m².K);
 Me : massa equivalente da água no reservatório (kg);
 N : número máximo de horas de insolação no dia (h);
 $\bar{N}$: média máxima mensal de horas possíveis de insolação direta (h);
 N_c : número de segmentos ou nós adotados para o cálculo da eficiência do coletor;
 Nu : número de Nusselt;
 n : número de horas de insolação direta na superfície terrestre ou dia do ano (h);
 n_m : total mensal de horas de insolação (h);
 P : total precipitado (cm);
 P_e : potência da fonte auxiliar (W);
 P_u : potência útil (W);
 Ped : número de Peclet;
 P_b : potência efetiva da bomba de circulação de água (W);
 Pr : número de Prandtl;
 Q_F : vazão em volume (m³/s);
 Q_u : fluxo de energia útil (W);
 q : fluxo de energia (W)
 q_u : fluxo de energia útil no coletor por unidade de área (W/m²);
 R : relação entre a radiação total em uma superfície inclinada e uma superfície horizontal;
 Ra : número de Rayleigh;
 Re : número de Reynolds;
 Re_m : numero de Reynolds modificado;
 Ri : número de Richardson modificado;
 R_i : designação do estado do registro de ordem i
 R_T : resistência térmica (°C/W);
 R_{Tot} : resistência térmica total (°C/W);
 r_t : relação entre radiação horária e diária;
 t : tempo (s);
 T : temperatura (°C);
 T^* : temperatura mínima da água estabelecida para sua utilização (°C);
 T_{AF} : temperatura da água fria que abastece os reservatórios (°C);
 T_{AQ} : temperatura de água quente que sai de reservatório para o abastecimento (°C);
 Tar : temperatura do ar atmosférico (°C);
 Tc : temperatura do coletor (°C);
 Te : temperatura de entrada da água no coletor (°C);
 T_M : temperatura da mistura da água fria com a água quente (°C);
 $\bar{T}R$: temperatura média do reservatório de água quente (°C);
 $\bar{T}R_{ini}$: Temperatura média do reservatório no início de um intervalo Δt (°C);

$\overline{TR}_f$: Temperatura média do reservatório no final de um intervalo Δt (°C);
 TR_e : temperatura de entrada da água no reservatório (°C);
 TR_i : temperatura na seção i do reservatório (°C);
 TR_s : temperatura de saída da água do reservatório (°C);
 TS : temperatura de saída da água do coletor (°C);
 T_S : temperatura de uma superfície (°C);
 T_{pm} : temperatura média do absorvedor (°C);
 T_{pmi} : temperatura do i -ésimo segmento ou nó do coletor (K);
 T_{sky} : Temperatura efetiva do céu (°C);
 U_a : coeficiente global de transferência na unidade auxiliar (W/ °C.m²);
 U_e : coeficiente global de transferência de calor na tubulação de entrada (W/ °C.m²);
 $UE(T^*, t)$: energia utilizável (kJ);
 U_L : coeficiente global de transferência de calor no coletor (W/ °C.m²);
 U_0 : coeficiente global de transferência de calor da água para o ar (W/ °C.m²);
 U_p : coeficiente global de perda de calor na tubulação por unidade de área do coletor (W/ °C.m²);
 U_R : coeficiente global de transferência de calor do reservatório (W/ °C);
 U_1 e U_2 : coeficiente de perda de calor de primeira e segunda ordem (W/ °C.m²);
 U_3 : coeficiente de perda de calor em função da velocidade do vento (J /m³.K);
 V_{AF} : volume de água fria (Litros);
 V_{AQ} : volume de água quente (Litros);
 V_c : volume de água que circula pelo coletor no intervalo de tempo Δt (Litros);
 V_M : volume da mistura da água fria com a água quente (Litros);
 V_R : volume do reservatório (m³);
 v : velocidade do fluido (m/s);
 v_e : velocidade da água na entrada do reservatório (m/s).

Letras gregas:

τ : absortância;
 τ' : fator de correção da equação da mistura;
 τ_s : altitude solar (°);
 τ_a : coeficiente de Angstrom;
 τ_m : altitude solar ao meio dia (°);
 τ_d : difusividade térmica (m²/s);
 θ : inclinação de uma superfície com a horizontal (°);
 τ_a : coeficiente de turbidez atmosférica de Angstrom;
 τ_o : parâmetro que indica o estado da bomba (liga/desliga)
 τ_k : coeficiente de expansão volumétrica (1/ K);
 δ : declinação solar (°);
 δ_f : função delta (igual a 0 ou 1);
 η : relação entre o fator de carga utilizável e a eficiência;
 ϵ_s : emissividade de um corpo;
 ϕ : latitude (°);
 ψ : azimute (°);

η_o : eficiência ótica do coletor, rendimento global diário;
 η_c : rendimento do coletor solar;
 η_L : fator de carga utilizável;
 η_R : rendimento térmico do reservatório;
 η_{Re} : rendimento da resistência elétrica;
 λ : comprimento de onda (m);
 μ : viscosidade absoluta (kg / s.°C);
 μ_p : viscosidade absoluta avaliada à temperatura da parede (kg / s.°C);
 ν : viscosidade cinemática (m²/s);
 θ : ângulo de incidência da radiação direta (°);
 θ_z : ângulo zênite (°);
 ρ : massa específica (kg / m³);
 ρ_g : refletância total do entorno;
 ρ_s : albedo médio do solo;
 ρ_r : refletividade de um corpo;
 ρ_a : albedo médio do céu;
 ρ_L : albedo médio das nuvens;
 τ : fração de insolação;
 σ_b : constante de proporcionalidade de Stephan-Boltzmann (kJ/m².h.K⁴);
 ω : ângulo horário solar (°);
 ω_s : ângulo horário do nascer ou do pôr-do-sol (°);
 ω'_s : ângulo horário do pôr-do-sol no dia médio do mês (°);
 τ : transmitância;
 τ_b : transmitância atmosférica;
 τ^* : tempo adimensional.

1 – INTRODUÇÃO

A conservação e o uso racional de energia renovável, de baixo custo e não poluente, têm sido a preocupação constante nos projetos e no gerenciamento dos sistemas prediais. Os sistemas de aquecimento de água com aproveitamento da energia solar se enquadram nestes requisitos.

O consumo com o aquecimento de água representa uma parcela significativa da energia gasta na edificação residencial. Em habitações populares, segundo Prado; Gonçalves (1992), esta parcela, devido ao chuveiro elétrico, é de 32%. Matafs; Fagá (1996) fizeram uma estimativa de qual seria o consumo de energia elétrica anual, para as regiões sul, sudeste e centro-oeste do Brasil, se todas as residências utilizassem o mesmo sistema de aquecimento e obtiveram:

? aquecimento com chuveiro elétrico	9.500 GWh;
? aquecimento em sistema elétrico de acumulação	26.400 GWh;
? aquecimento com aproveitamento de energia solar	7.900 GWh.

Para o cálculo do primeiro caso acima foi considerada uma potência média anual do chuveiro de 3000 W; para a última hipótese foi adotada a potência de 30% do sistema elétrico de acumulação. Porém, não se trata de comparar apenas a energia anual, mas também a demanda no horário de pico que o chuveiro produziria, principalmente no inverno, e que foi estimada por estes pesquisadores, considerando uma potência média no chuveiro de 4000W para esta época do ano, em 4,65 GW.

Nos sistemas de aquecimento de água através do aproveitamento da energia solar, seus componentes (coletores, reservatórios, trocadores de calor, fonte auxiliar de calor e tubulações) podem apresentar-se sob diversas configurações. A água aquecida para o consumo pode receber o calor diretamente no coletor (sistema direto), ou através de um líquido refrigerante que, após receber a energia térmica no coletor, o transfere à água em um trocador de calor (sistema indireto). Tais sistemas podem ainda ter a circulação do fluido, entre o reservatório de armazenamento e os coletores

ou trocadores de calor, feita através de bombeamento, chamado sistema ativo, ou através do efeito de termossifonagem, chamado sistema passivo conforme denominação encontrada na literatura como: ASHRAE (1999), Duffie; Beckman (1991) e Kreider; Kreith (1982).

Os sistemas diretos têm sido utilizados em nosso país, principalmente em residências isoladas, há mais de duas décadas, aproveitando a energia potencial do reservatório superior e o efeito de termossifonagem para a movimentação da água nos coletores. Nestas aplicações, a capacidade do reservatório adotada varia entre uma vez a uma vez e meia o valor do consumo diário médio estimado. Para compensar eventuais dias de insolação insuficiente, a fonte de calor auxiliar comumente utilizada é uma resistência elétrica inserida no reservatório.

A circulação por termossifonagem ocorre devido à diferença de densidade do fluido aquecido no coletor e do fluido, de temperatura mais baixa, armazenado na parte inferior do reservatório. As condições em que devem ser instalados os coletores em relação ao reservatório e os respectivos tubos de ligação, no que diz respeito ao desnível e isolamento destas tubulações, para o bom funcionamento do termossifão, foram estudados por Vaxman; Sokolov (1986).

Pesquisas sobre a utilização de sistemas ativos têm sido desenvolvidas com intuito de evitar o congelamento do fluido no coletor, como estudado por Beckman et al. (1994), ou para detectar as deficiências de funcionamento do sistema em função do projeto, dos controles e dos “set points” adotados. Freeborne (1985) e Joncich (1991) também procuraram estabelecer recomendações ou padrões para sistemas residenciais visando à melhoria do desempenho e confiabilidade dos mesmos.

O desempenho dos sistemas de aquecimento de água com energia solar tem sido conhecido através do estudo do comportamento de seus componentes sob diversas configurações de instalação. Como resultado destas pesquisas, surgiram metodologias para a determinação da eficiência como, por exemplo, a proposta pela ASHRAE (1996) e Bosanac; Nielsen (1997) para os coletores. Tais métodos geralmente consideram a condição de funcionamento em regime permanente.

Também foram realizados estudos considerando o sistema submetido a regime não permanente, tais como: a avaliação do rendimento de coletores planos para sistemas ativos, citados por Amer et al. (1997), e para sistemas passivos, pesquisados por Huang (1980); a avaliação do comportamento do reservatório de água quente em relação ao trocador de calor, desenvolvida por Dahm et al. (1998).

Como o sistema funciona de forma integrada e uma parte sofre e provoca influência nas demais, torna-se necessário que a avaliação seja efetuada sobre o todo e que considere a variabilidade das fontes de energia, do consumo e das perdas de calor. Spirkel et al. (1997), procurando caracterizar o sistema em si, concluíram que o comportamento dinâmico dos tubos não pode ser modelado implicitamente pelo modelo do coletor, mas sim por parâmetros próprios que devem ser identificados no processo.

Marshall (1999) desenvolveu um modelo para sistemas indiretos que considera o desempenho dos coletores de energia solar, das tubulações, do trocador de calor e o funcionamento das bombas de recirculação, porém para estado de funcionamento em regime permanente. Hilmer (1999) propôs uma solução numérica de um modelo dinâmico com vazões variáveis aplicados a coletores sem cobertura de vidro, empregados para o aquecimento de uma piscina. Este modelo, além de complexo e de difícil aplicação, não pode ser estendido para outras situações com a mesma precisão, já que avalia apenas a temperatura de mistura da água aquecida com a água da piscina e não possibilita levar em conta tanto o balanço da energia armazenada durante o período sem insolação, quanto a elevação da temperatura da água acima da temperatura de utilização.

Uma alternativa para evitar a complexidade dos modelos analíticos é a aplicação do conceito de rede neural artificial. Kalogirou; Panteliou; Dentsoras (1999) aplicaram esta ferramenta para um sistema doméstico passivo em que os parâmetros de entrada eram: a área do coletor, o coeficiente de perda de calor (U), tipo e volume do reservatório. Com dados da radiação solar, temperatura média do ambiente e a

temperatura média da água no início do dia, obtidos em dez experimentos, a rede foi “treinada” para prever a energia útil que poderia ser absorvida e a temperatura no reservatório para quaisquer outras situações.

Para aquecer o volume necessário, em um sistema direto, o dimensionamento pode ser conduzido de forma que a água circule uma única vez pelo coletor, ou várias vezes no dia. Sokolov; Arbel (1992) fizeram o controle de vazão em um sistema direto passivo por meio do controle da temperatura da água na saída do coletor. Quando a temperatura neste ponto atingia um valor pré-determinado, chamado de temperatura de utilização, uma válvula abria totalmente permitindo a passagem da água; a partir do instante que a temperatura abaixasse deste valor, a válvula era fechada gradualmente de forma a manter a temperatura constante, ou fechada totalmente se o valor desejado não fosse atingido. Embora o rendimento do coletor seja reduzido com o aumento da diferença de sua temperatura com o ar ambiente, foi observado um aumento na quantidade de energia utilizável armazenada. A vantagem deste procedimento, argumentam os autores, é que a capacidade do reservatório pode ser reduzida para atender a mesma demanda quando a água é armazenada a uma temperatura maior.

A otimização do projeto de implantação, do gerenciamento e operação de um sistema de aquecimento solar de água de forma a garantir eficiência e segurança, especialmente em grandes edificações, impõe o conhecimento minucioso do seu comportamento, monitoramento e controle dos processos. Embora inúmeros estudos tenham sido feitos, a dúvida na adoção dos parâmetros que influenciam o funcionamento e que resultam em uma vazão ideal de circulação de água nos coletores ainda persiste.

Este trabalho analisa o comportamento de um sistema de aquecimento solar de água, direto e ativo, sob o controle da vazão nos coletores, pela comparação do desempenho com outro sistema direto, porém, passivo, visando sua aplicação em edificações de grande porte, como hotéis e conjuntos habitacionais. Isto é, visando situações em que o gradiente de temperatura não é suficiente para circular a água nos

coletores pelo fenômeno da termossifonagem. Esta forma de comparação foi adotada porque o sistema passivo, funcionando simultaneamente com o outro, fica também sujeito às mesmas variações das condições ambientais e o seu equilíbrio natural torna-se, no dia do ensaio, referência para a análise dos resultados.

Os parâmetros que influenciam diretamente a eficiência de um sistema de aquecimento desta natureza são: o ganho de temperatura da água no coletor; a temperatura de entrada da água no coletor; a temperatura do ar; o perfil de temperatura da água no reservatório; as propriedades térmicas dos componentes e a radiação solar disponível. O ganho de temperatura no coletor depende da vazão, da perda de calor para o ambiente e da radiação disponível. A perda de calor no coletor, por sua vez, está relacionada com suas propriedades térmicas, com a diferença de sua temperatura com a do ar, sendo esta última dependente do perfil térmico da água no reservatório. As demais perdas de calor, no reservatório e nas tubulações, também dependem da diferença das suas temperaturas com a do ar, da velocidade do ar, além das suas características térmicas. Nas tubulações, a vazão também influencia as perdas, principalmente, pelo fato de ser intermitente. O perfil de temperatura no reservatório está relacionado com a diferença de temperatura entre a entrada e a saída da água para o coletor, a entrada de água fria quando há consumo de água quente e com o acionamento da fonte auxiliar de calor. Portanto é necessário que o processo de aquecimento veja trato de forma sistêmica e não das partes integrantes isoladamente.

Foi observado, sob várias condições de funcionamento e de diferentes solicitações de consumo, que o sistema funcionando por termossifão tem uma habilidade singular para manter o equilíbrio das variáveis descritas acima. Qualquer forma de operação que diste muito das vazões encontradas neste tipo de sistema resultou em redução na eficiência do sistema.

1.1 – Objetivo

O objetivo deste trabalho foi o de desenvolver uma metodologia que, avaliando as condições disponíveis, possa estimar a vazão que deve ocorrer, para se obter a melhor eficiência nas condições reinantes, utilizando os parâmetros que caracterizam os coletores dados pela norma da ABNT-NBR 10184/1988-a.

Tomando como referência o escoamento por termossifão, foi desenvolvido um modelo de operação para sistemas diretos ativos que calcula a vazão com base no monitoramento das temperaturas das extremidades das tubulações que interligam o reservatório e os coletores, temperatura do ar, radiação solar disponível e vazão no instante anterior. O modelo foi testado experimentalmente e os resultados atingiram eficiências melhores que qualquer outra forma de operação.

2 – REVISÃO DA LITERATURA

2.1- A radiação solar

“Quase a totalidade da energia incidente sobre a terra é proveniente do sol em forma de radiação eletromagnética” (Bezerra, p. 34, 1998). Apenas parte da radiação que chega à atmosfera, 48% segundo Littlefair (1985), está sob forma de luz visível, com comprimento de onda de 0,38 a 0,78 μm . Porém, esta faixa da irradiação é responsável por grande parte do calor produzido. A radiação solar extraterrestre restante é assim dividida: 45,5% infravermelha e 6,5 % ultravioleta.

O sol, segundo Duffie; Beckman (1991), ilumina a terra a uma distância média de $1,495 \times 10^{11}$ m com uma variação, devido à excentricidade da órbita terrestre, de 1,7% e sob um ângulo de 32 minutos. A curvatura do globo terrestre faz com que a radiação solar se distribua sobre uma superfície diferente a cada latitude, como mostrado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Variação da intensidade da radiação solar com a latitude. Fonte: Hudson; Markell (1985).

Ao efeito da posição do sol em relação a um ponto na calota terrestre deve-se adicionar o efeito da absorção e dispersão da atmosfera (radiação difusa), seja em dia de céu limpo, parcialmente ou totalmente nublado. A radiação total a que um corpo na superfície terrestre está sujeito é a soma da radiação direta, difusa e refletida pelo entorno.

2.1.1 – Medição da radiação solar

As medidas da radiação solar são normalmente tomadas no plano horizontal e disponíveis com valores médios diários ou horários. A energia radiante total mensal, embora utilizada no cálculo ou simulação do comportamento de alguns equipamentos solares para longos períodos de tempo, pode conduzir a erros devido a não linearidade no desenvolvimento do processo.

Os instrumentos de medida da radiação solar são basicamente de dois tipos: os **piroheliômetros** e os **piranômetros**. Os primeiros usam um detector de direcionamento do sol para manter a radiação direta com incidência normal. O piranômetro, também chamado de solarímetro, mede a radiação total (difusa + direta), ou apenas a radiação difusa quando está sob o sombreamento da radiação direta.

A técnica de provocar o sombreamento sobre o piranômetro para medir a radiação difusa, também o protege de parte desta forma de energia radiante vinda da atmosfera. Batlles; Olmo; Alados-Arboledas (1995) desenvolveram um método para corrigir a medição feita por este procedimento, com base em dados de dois locais na Espanha. Nos sistemas de aquecimento de água é de interesse o conhecimento da radiação total ou global disponível.

Duffie; Beckman (1991) ressaltam a importância do conhecimento da forma com que os dados disponíveis foram obtidos para o seu entendimento e utilização. É necessário saber, segundo estes autores, se uma determinada medida foi realizada

instantaneamente (irradiância) ou se é o resultado de valores integrados por um período de tempo (irradiação) de horas ou dias; o período de tempo de coleta dos dados; se a medida refere-se à radiação direta, global ou difusa; quais os instrumentos utilizados; a orientação da superfície coletora e a radiação média do período.

Outra importante informação se refere às horas diárias de insolação. Ou seja, as horas do dia em que o disco solar está visível. Este dado é utilizado para estimativas futuras da radiação solar média e é medido de duas formas. A primeira, conhecida como registrador de Campbell-Stokes, consiste em uma esfera de vidro de 10 cm de diâmetro que concentra os raios em um ponto de uma fita graduada e a queima superficialmente durante o tempo em que a radiação direta atinge um certo valor. A segunda é o medidor de brilho solar de Foster em que duas células fotovoltaicas, uma exposta ao tempo e outra permanentemente protegida da radiação direta, registra o tempo em que as iluminações recebidas por elas não são iguais.

A determinação do número de horas de insolação diária, “n”, depende da sensibilidade do instrumento para detectar o limiar da irradiação direta. Esta capacidade é influenciada pela intermitência da radiação solar, pela umidade do ar e pela inércia térmica do equipamento. Gueymard (1993-a) estudou a radiação no Cabo Canaveral, Flórida, demonstrou que valores acima de $120 \text{ W} / \text{m}^2$ são razoáveis para a determinação deste número.

2.1.2 – Direção da radiação solar direta

O comportamento de uma superfície submetida à radiação direta depende, além das suas propriedades, da intensidade, da duração e da orientação dos raios solares. Esta orientação, em relação a um ponto sobre a superfície terrestre, é obtida através de três ângulos básicos (Duffie; Beckman, 1991):

a-1) a **latitude** (?) que é a localização norte ou sul em relação ao equador, positivo na direção norte;

a-2) **a declinação** (δ) que é a posição angular do sol ao meio dia em relação ao plano do equador, varia de $\pm 23,45^\circ$ conforme a estação do ano;

a-3) **o ângulo horário** (h) que é a posição angular do sol a leste ou a oeste do meridiano local, devido à rotação da terra em seu próprio eixo, e tem valor de 15° por hora, negativo pela manhã e positivo após o meio dia.

A declinação solar é encontrada pela equação de Cooper (1969) apud Duffie Beckman (1991) e ASHRAE (1999):

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

onde n é o número do dia no ano.

Para uma superfície plana e inclinada, a direção da insolação é determinada em relação a outros ângulos, mostrados na Figura 2.2, tais como:

b-1) **inclinação da superfície** (β) com o plano horizontal;

b-2) **azimute** (ϕ): ângulo no plano horizontal, formado entre o norte e a projeção horizontal da normal da superfície;

b-3) **ângulo de incidência** (θ): formado entre os raios solares na superfície e a normal a esta superfície;

b-4) **altitude** (α_s): ângulo entre os raios solares e sua projeção em um plano horizontal, ou seja, é o complemento do ângulo zênite;

b-5) **ângulo zênite** (θ_z): formado entre os raios solares e a vertical.

Figura 2.2 – Ângulos solares derivados.

Na Figura 2.2.b o plano horizontal está perpendicular ao papel e coincidente com o eixo norte sul, revelando o ângulo de incidência θ . Para uma superfície qualquer nesta direção e inclinação β :

$$\cos \theta = \sin \beta \cdot \sin \theta_z \cdot \cos \gamma - \sin \beta \cdot \cos \theta_z \cdot \sin \gamma \cdot \cos \theta_s + \cos \beta \cdot \cos \theta_z \cdot \cos \gamma \cdot \cos \theta_s + \cos \beta \cdot \sin \theta_z \cdot \sin \gamma \cdot \sin \theta_s + \cos \beta \cdot \sin \theta_z \cdot \sin \gamma \cdot \cos \theta_s \cdot \cos \theta_s \quad (2.2)$$

Para superfícies verticais $\beta = 90^\circ$ e a equação (2.2) torna-se:

$$\cos \theta = -\sin \theta_z \cdot \cos \gamma \cdot \cos \theta_s + \cos \theta_z \cdot \sin \gamma \cdot \sin \theta_s + \cos \theta_z \cdot \sin \gamma \cdot \cos \theta_s \cdot \cos \theta_s \quad (2.3)$$

Quando a superfície estiver na posição horizontal ($\beta = 0^\circ$) e o ângulo incidente coincide com o ângulo zênite, ver Figura 2.2-c, a equação (2.2) se reduz a:

$$\cos \theta_z = \sin \beta \cdot \sin \theta_z + \cos \beta \cdot \cos \theta_z \cdot \cos \gamma \quad (2.4)$$

Fazendo na equação acima $\theta_z = 90^\circ$ obtém-se o ângulo horário do pôr-do-sol (w_s):

$$\cos \theta_s = -\tan \beta \cdot \tan \gamma \quad (2.5)$$

Duffie; Beckman (1991) apresentam o cálculo do número de horas diárias (N) de insolação de um determinado ponto sobre a superfície da terra em função da latitude e da declinação solar:

$$N = (2/15) \cdot \cos^{-1}(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad (2.6)$$

Como os dados de energia solar são normalmente coletados na horizontal, torna-se então necessário calcular a radiação horária sobre uma superfície inclinada a partir destes. A relação da radiação direta entre estas duas superfícies (R_b), mostrada na Figura 2.3, é:

$$R_b = \frac{G_{bt}}{G_b} = \frac{G_{bn} \cdot \cos \theta_z}{G_{bn} \cdot \cos \theta_z} = \frac{\cos \theta_z}{\cos \theta_z} \quad (2.7)$$

onde: - G_{bt} é o fluxo de radiação direta normal à superfície inclinada (W/m^2);
 - G_b é o fluxo de radiação direta normal à superfície horizontal (W/m^2);
 - G_{bn} é o fluxo de radiação direta na superfície (W/m^2).

Figura 2.3 – Radiação solar direta em superfícies horizontal e inclinada

2.1.3 – Radiação extraterrestre em uma superfície horizontal

A energia solar, por unidade de tempo, recebida em uma área unitária de superfície perpendicular à direção de propagação das ondas eletromagnéticas e medida à metade da distância entre o sol e a terra é chamada de constante solar. Esta energia (G_{sc}) é em média, segundo ASHRAE (1999), de 1367 W/m^2 .

A órbita elíptica da terra em torno do sol provoca uma variação da distância entre os dois astros e produz, segundo Duffie; Beckman (1991), uma variação no fluxo da radiação solar em $\pm 3\%$. A radiação extraterrestre, medida em um plano normal à radiação direta (G_{on}), isto é, com ângulo de incidência $\theta = 0^\circ$, em qualquer dia "n" do ano, é determinada por estes autores pela relação:

$$G_{on} = G_{sc} \cdot \left[1 \pm 0,033 \cdot \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \quad (2.8)$$

Em uma superfície horizontal situada fora da influência da atmosfera, a radiação extraterrestre é encontrada dividindo a equação acima pela relação R_b dada pela equação (2.7):

$$G_o = G_{sc} \cdot \left[1 \pm 0,033 \cdot \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \cdot \cos \theta_z \quad (2.9)$$

onde: - G_o irradiação solar extraterrestre em um plano horizontal (W / m^2).

A radiação total diária recebida por uma superfície horizontal é dada pela equação (2.10), encontrada pela integração da equação (2.9) com o valor de $\cos \theta_z$ substituído pela equação (2.4) e dentro do período de tempo compreendido entre o poente e o nascente.

$$\bar{H}_0 = \frac{24 \times 3600}{p} \cdot G_{sc} \cdot 0,033 \cdot \cos \left(\frac{360 \cdot n}{365} \cdot \cos f \cdot \cos d \cdot \cos \delta_s \right) \cdot \frac{2p_s}{360} \cdot \sin f \cdot \sin d \quad (2.10)$$

sendo $\bar{H}_0$ a radiação solar diária (J/m^2).

A radiação média mensal diária, $\bar{H}_0$, pode ser estimada pela equação (2.10) com o valor do dia “ n ” que melhor represente a média do mês como proposto por Klein (1977) apud Duffie; Beckman (1991).

2.1.4 – Atenuação da radiação solar na atmosfera

A radiação solar incidente em um ponto da superfície terrestre é a soma das parcelas de energia direta, difusa e a refletida pelo entorno. A radiação direta é proveniente do disco solar e não sofre interação com a atmosfera. A radiação difusa é aquela oriunda da atmosfera, que além de emití-la para a superfície terrestre também o faz para o espaço sideral. A difusão ocorre devido às moléculas do ar, a água e poeiras em suspensão; a absorção devido à ozona, a água e CO_2 . Um corpo qualquer nesta superfície recebe também a energia refletida de seu entorno. O conjunto destas formas de radiação compõe a radiação global.

Littlefair (1985) propôs uma metodologia para determinar a radiação solar através da lei de Bouguer-Lambert, em função do comprimento de onda da radiação (λ), na seguinte forma:

$$G_{esn} = \frac{I_0}{S_0} \cdot G_{eo} \cdot e^{-a(\lambda) \cdot m_d} \quad (2.11)$$

onde: - G_{esn} é a radiação solar direta normal à superfície (W/m^2);
- S é a correção na mudança da distancia entre o sol e a terra;

- G_{eo} é a constante solar como uma função do comprimento de onda λ ($\text{Wm}^{-2}.\text{m}^{-1}$);
- m é a massa de ar;
- $a(\lambda)$ é o coeficiente global de extinção.

A massa de ar “ m ” é uma grandeza que mede a quantidade de ar que a radiação direta tem de atravessar se o sol estiver sobre a vertical do ponto considerado (zênite). Ao nível do mar $m = 1$, quando o sol está sobre o zênite, e $m = 2$ para o ângulo zênite (θ_z) de 60° . Para ângulos de 0° a 70° ao nível do mar:

$$m = (\cos \theta_z)^{-1} \quad (\text{Duffie; Beckman (1991)}) \quad (2.12.a)$$

ou

$$m = (\sec \theta_z)^{-1} \quad (\text{Littlefair (1985), ASHRAE (1999)}) \quad (2.12.b)$$

O coeficiente $a(\lambda)$ mede a habilidade da atmosfera de absorver ou difundir a radiação solar. Para dias nublados este coeficiente é a soma das três parcelas:

$$a(\lambda) = a_R(\lambda) + a_D(\lambda) + a_w(\lambda) \quad (2.13)$$

sendo: - $a_R(\lambda)$ é a atenuação solar devido à difusão pelas moléculas do ar (Rayleigh);

- $a_D(\lambda)$ é a atenuação devido às minúsculas partículas de poeira ou aerossóis;

- $a_w(\lambda)$ é a atenuação advinda da absorção seletiva por vários gases da atmosfera, principalmente o vapor de água, a ozona e o dióxido de carbono.

Littlefair (1985) fez uma revisão das medidas e cálculos da eficácia luminosa obtida por autores de várias partes do mundo e discutiu o efeito da difusão provocada pelas moléculas do ar, através da teoria de dispersão dos raios luminosos, e pelos aerossóis, pela teoria apresentada por Angstrom em 1929. Estas teorias são representadas respectivamente pelas expressões:

$$a_R \propto \frac{I}{\lambda^4} \quad (2.14)$$

e

$$a_D \propto \frac{\beta_a}{\lambda^{a_a}} \quad (2.15)$$

onde: - λ_a depende do tamanho das partículas e aerossóis e tem um valor médio de 1,3;

- β_a é o coeficiente de turbidez de Angstrom que depende da quantidade de partículas em suspensão, seus valores típicos variam de 0,05 a 0,20.

Na absorção por gases o vapor de água tem papel predominante. Psiloglou et al. (1994) avalia que aproximadamente 90% deste tipo de perda, o que corresponde a 10% da redução das perdas que ocorrem na atmosfera, são devido ao vapor de água. Este fenômeno ocorre principalmente para grandes comprimentos de onda, situados na região do infravermelho. O referido autor desenvolveu uma expressão para a transmitância do vapor de água na atmosfera baseado em dados da absorção espectral. Porém, a utilização desta expressão para calcular a radiação direta, difusa ou global fica limitada a regiões que apresentem um perfil atmosférico semelhante ao de Atenas, local para o qual foram ajustados os parâmetros empíricos.

2.1.5 – Estimativas da radiação solar na superfície terrestre

Embora a melhor avaliação da radiação disponível seja através de medidas diretas, torna-se necessária a sua estimativa para locais onde os dados não são disponíveis, ou para realizar previsões de valores prováveis ao longo do ano. Estas estimativas são feitas através de relações empíricas, normalmente, utilizando os valores médios diários ou mensais e relacionando-os com o número de horas de insolação, ou através de análise estatística obtidas de séries históricas.

2.1.5.1 – Frequência da ocorrência de dias e horas claros ou nublados

O índice de nebulosidade é a razão entre radiação média mensal em uma superfície horizontal e a radiação média mensal no topo da atmosfera:

$$\overline{K}_T = \frac{\overline{H}}{\overline{H}_0} \quad (2.16)$$

A nebulosidade pode também ser analisada pelas relações referentes às radiações diárias ou horárias como mostrado abaixo.

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (\text{p/ valores diários de radiação}) \quad (2.17)$$

$$k_T = \frac{I}{I_0} \quad (\text{p/ valores horários da radiação}) \quad (2.18)$$

Os valores de $\overline{H}$, H e I são medidos em um plano horizontal na superfície terrestre e os valores $\overline{H}_0$, H_0 e I_0 calculados pelo equacionamento apresentado anteriormente.

Duffie; Beckman (1991), discutindo os resultados obtidos por Whillier (1956) e Liu; Jordan (1960) sobre índices de nebulosidade, concluem que:

- ? a distribuição é bimodal;
- ? as curvas das frequências acumuladas de K_T são parecidas para locais com o mesmo $\overline{K}_T$ médio, mesmo quando a altitude e a latitude dos locais variam;
- ? para um mesmo local, as curvas de frequência de K_T e k_T são muito similares.

Em projetos de aproveitamento da energia solar torna-se interessante prever os valores médios e mínimos prováveis da energia disponível. Esta previsão pode ser

feita através de métodos empíricos ou teóricos, como apresentado nos próximos itens, ou através de levantamento estatístico de dados que definirão um “ano de referência”.

Festa; Ratto (1993) desenvolveram um procedimento para se obter o "ano de referência" correspondendo a um ano "médio" que considere as ocorrências e persistência dos fatores intervenientes nos resultados obtidos. Este procedimento consiste em comparar a frequência relativa a cada mês com a frequência de todos os meses de mesmo nome.

2.1.5.2 – Estimativa das componentes direta e difusa da radiação global

A irradiação solar na superfície terrestre em qualquer orientação e inclinação é, para o ângulo de incidência θ , designada pela ASHRAE (1999) por I_{θ} sendo:

$$I_{\theta} = I_{DN} \cdot \cos\theta + I_D + I_r \quad (2.19)$$

onde: - I_{DN} é a intensidade da radiação direta normal a superfície da terra em dia claro;

- I_D é a componente difusa normal a superfície da terra;

- I_r é a radiação refletida.

As estimativas das componentes da radiação global podem ser obtidas a partir de dados horários, diários ou da média mensal. Em cada caso a relação entre a radiação difusa com a radiação total pode ser relacionada com o respectivo índice de nebulosidade. Assim, para dados de radiação horária, a radiação difusa é dada por:

$$\frac{I_d}{I} = f \cdot k_T \quad (2.20)$$

onde: - I_d é a radiação horária difusa em um plano horizontal na superfície terrestre;
 - I é a radiação horária total, em um plano horizontal na superfície terrestre.

Muitos modelos para o cálculo da radiação direta, difusa e global foram desenvolvidos por pesquisadores em vários locais do mundo. Inúmeras comparações têm sido feitas entre estes modelos e vários métodos sugeridos para a avaliação do seu erro, mas o comportamento aleatório das diversas variáveis envolvidas limita a aplicação dos parâmetros encontrados aos locais onde foram testados. Como exemplo destes estudos estão os de Moriarty (1991), Camps; Soler (1992), Soler (1992), Ashjaee et al. (1993), Aubinet (1994), Chendo; Maduekwe (1994), entre outros. Dentre os trabalhos desenvolvidos buscando avaliar o erro dos modelos de previsão destacam-se o de Gueymard (1993-a) e o de Stone (1993). O primeiro avaliou o desempenho de onze modelos, utilizando os critérios RMSE (*root mean square error*) e MBE (*mean bias error*), e observou que os modelos físicos, os que interpretam o processo físico de atenuação atmosférica, são geralmente mais precisos e de maior flexibilidade que os empíricos. Os modelos classificados como empíricos, são os que têm equações resultantes de processos estatísticos aplicados em dados observados.

Quando se dispõe somente de medidas diárias, a radiação horária pode ser obtida através da relação $r_t = I / H$ desenvolvida por Collares-Pereira; Rabl (1979), aplicada a cada dia individualmente. Para dias claros esta relação é encontrada pela equação:

$$r_t = \frac{1}{24} \cdot [a + b \cdot \cos w] \cdot \frac{\cos w \cdot \cos w_s}{\sin w_s \cdot 2\pi / 360 \cdot \cos w_s} \quad (2.21.a)$$

$$\text{sendo: } - a = 0,409 + 0,5016 \cdot \sin(w_s - 60); \quad (2.21.b)$$

$$- b = 0,6609 - 0,4767 \cdot \sin(w_s - 60); \quad (2.21.c)$$

- w é o ângulo horário da hora que se deseja calcular;

- w_s é o ângulo horário do pôr-do-sol.

2.1.5.3 – A radiação solar direta em dias claros.

A radiação direta é a que mais interessa para os sistemas de aquecimento de água com energia solar, porque à medida que os coletores absorvem a energia radiante também a perdem para o ambiente, exigindo assim uma energia mínima, chamada energia utilizável, a partir da qual a água começa ser aquecida. Esta energia é de tal ordem de grandeza que normalmente ocorre quando existe a radiação direta, ou seja, em dias claros.

A definição do termo “dia claro”, utilizado no cálculo da radiação horária ou diária, depende das condições de visibilidade. Hottel (1976) propôs a seguinte relação para a estimativa da transmitância atmosférica τ_b , definida como:

$$\tau_b = G_{bn} / G_0 \quad (2.22)$$

e

$$\tau_b = a_0 + a_1 \cdot e^{-k / \cos^2 \theta_z} \quad (2.23)$$

sendo θ_z o ângulo zênite e a_0 , a_1 e k funções da altitude e da visibilidade do local. Hottel (1976) determinou os valores destas constantes para atmosferas com 5 e 23 quilômetros de visibilidade, em altitudes de até 2,5 Km e estabeleceu fatores de correção para quatro diferentes tipos de clima. Isto possibilita que, para céu limpo, as radiações direta total ou normal à horizontal possam ser determinadas para quaisquer outras altitudes pelas equações abaixo:

$$G_b = G_{on} \cdot \tau_b \quad (2.24)$$

$$G_{bn} = G_{on} \cdot \tau_b \cdot \cos \theta_z \quad (2.25)$$

$$I_{bn} = I_{on} \cdot \tau_b \cdot \cos \theta_z \quad (2.26)$$

onde: - G_b é a radiação direta normal a uma superfície horizontal (ver Figura 2.3);

- G_{bn} é a radiação direta a uma superfície horizontal;

- I_{bn} é a radiação direta na horizontal para período de uma hora;
- G_{on} é dada pela na equação (2.8).

2.1.5.4 – Estimativas da energia solar com dados de horas de radiação direta

Vários pesquisadores buscaram relacionar a radiação média mensal com a razão entre o número de horas de insolação que chega à estratosfera e o número de horas que chega à superfície terrestre, uma vez que estes dados, obtidos pelo registrador de Campbell-Stokes, se encontram com maior frequência nas estações climatológicas.

O modelo mais utilizado para relacionar estes parâmetros foi obtido por análise de regressão por Angstron (1924) apud Kamel; Shalaby; Mostafa (1993) e posteriormente estudado por vários pesquisadores. Este modelo é descrito pela expressão:

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = a + b \frac{n}{N} \quad (2.27)$$

onde: - $\bar{H}$ é a radiação média diária em uma superfície horizontal na crosta terrestre;

- $\bar{H}_0$ é a radiação média diária calculada pela equação (2.10);

- a e b são constantes empíricas;

- n é a média mensal de horas diárias de insolação direta e

- N é a média máxima mensal de horas possíveis de insolação direta.

Sivkov (1964) apud Kamel; Shalaby; Mostafa (1993) desenvolveram o seguinte modelo para a determinação da radiação média mensal com dados disponíveis em trinta e uma estações na Itália:

$$H_m = 4,1868 \times 10^4 K_m^{1,24} \tau_m^{0,19} + 10550 \tau_m^{sen} \tau_m^{2,1} + 300 \tau_m^{sen} \tau_m^3 \quad (2.28)$$

onde: - H_m é a radiação global média mensal;

- n_m são as horas mensais de insolação;

- K é um coeficiente de ajuste para o local e

- θ_m é a altitude solar ao meio dia.

Kamel; Shalaby; Mostafa (1993) aplicaram os dois métodos acima em cinco estações do Egito e concluíram que a equação (2.27) teve melhor concordância com os dados.

Halouani et al. (1993) calcularam a radiação média global mensal em superfícies horizontais, a partir da radiação direta horária, utilizando quatro métodos e compararam os resultados com dados de quarenta e seis estações situadas no Canadá. Todos os métodos se fundamentam na equação (2.27). Os melhores resultados, obtidos pelos critérios MBE e RMBE, foram encontrados para os modelos de Gariépy (1980) e de Hay (1990).

A maioria das estações climatológicas dispõe apenas das medidas das horas de insolação, não possuindo piranômetro ou piroheliômetro. Existem métodos como o MRM (*meteorological radiation model*) e o CRM (*cloud-cover radiation model*), discutidos e comparados por Gul; Muneer; Kambezidis (1998), que utilizam dados mais simples, normalmente coletados nestas estações, para calcular a radiação horária global, difusa e direta. O primeiro método, MRM, requer dados de duração horária da insolação e as temperaturas de bulbo úmido e de bulbo seco; o segundo, CRM, utiliza apenas o índice de nebulosidade.

Recentemente têm sido aplicados métodos mais sofisticados para a previsão da radiação solar. Mohandes et al. (2000) aplicaram o conceito de redes neurais em trinta e uma estações na Arábia Saudita para o aprendizado da rede e compararam a previsão da radiação média mensal diária com os dados de outras dez estações. A vantagem deste tipo de método é que ele pode ser aplicado para qualquer região que tenha série histórica de dados, isto é, ele não fica limitado às condições do local onde foi desenvolvido.

Sfetsos; Coonik (2000) compararam vários modelos de redes neurais em Córsega, uma ilha da França, para a previsão da radiação horária em uma superfície horizontal e obtiveram resultados melhores que a metodologia convencional de regressão linear do índice de nebulosidade.

2.1.6 – Radiação total em uma superfície plana inclinada

A modelagem da irradiação solar em uma superfície não horizontal é mais complexa devido ao efeito da configuração da superfície e da irradiação difusa anisotrópica da abóbada celeste, tornando-se desta forma necessárias outras informações além da incidência da radiação direta normal.

Os coletores solares planos são utilizados com uma certa inclinação fixa e voltados para o equador. Isto é, no hemisfério sul voltados para o norte, no hemisfério norte voltados para o sul. Como os dados de radiação são quase sempre coletados na horizontal, torna-se necessário conhecer a razão entre a radiação recebida (R) na superfície inclinada e a recebida na horizontal.

$$R \approx \frac{\text{radiação total na superfície inclinada}}{\text{radiação total na superfície horizontal}} \quad (2.29.a)$$

ou

$$R \approx \frac{I_t^1}{I} \quad (2.29.b)$$

Esta mesma relação é válida para a radiação difusa ou direta resultando, respectivamente, R_d^1 e R_b^1 . Como a radiação global é a soma da difusa e a direta então:

$$R \approx \frac{I_b}{I} \cdot R_b \approx \frac{I_d}{I} R_d \quad (2.30)$$

¹ Os índices t, b e d referem-se respectivamente à radiação total, direta e difusa na superfície terrestre.

A correção da radiação direta para a superfície inclinada é feita pela equação (2.7). Para dias claros a radiação difusa pode ser corrigida aplicando a mesma correção uma vez que, nestes dias, a maior parte desta vem do círculo solar.

Assumindo que a componente difusa da radiação é isotrópica e uniformemente distribuída no céu, não importa a direção da superfície. Desta forma R_d será sempre unitário logo:

$$I_t = I_b \cdot R_b + I_d \quad (2.31)$$

ou

$$R = \frac{I_b}{I} + \frac{I_d}{I} \quad (2.32)$$

Porém, se for considerado que a radiação difusa, embora isotrópica, seja composta por uma parcela proveniente do céu e de outra devido à reflexão da terra para o céu e deste para a terra novamente, em uma superfície com ângulo de inclinação β , o fator de direcionamento para o céu, segundo Duffie; Beckman (1991), é dado por $(1 + \cos\beta)$ e a parcela da reflexão da terra seria $(1 - \cos\beta) / 2$. Se a vizinhança da placa tem uma refletância ρ_g para o total de insolação, então a luz refletida por esta vizinhança será $(I_b + I_d) \cdot \rho_g \cdot (1 - \cos\beta) / 2$ e a irradiação total será dada, no modelo isotrópico, por:

$$I_t = I_b \cdot R_b + I_d \cdot \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + (I_b + I_d) \cdot \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \cdot \rho_g \quad (2.33)$$

e

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

Em projetos de sistemas de aquecimento de água é usual o emprego de dados de insolação média diária ou média mensal. A relação R deve ser reescrita, na forma das equações (2.35) e (2.36).

$$\bar{H}_t = \bar{H} \cdot \left(1 + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \cdot \bar{R}_b \right) \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} + \bar{H}_d \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (2.35)$$

$$\bar{R}_b = \frac{\bar{H}_t}{\bar{H}} = \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \right) \cdot \bar{R}_b + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} + \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (2.36)$$

onde: - $\bar{R}_b$ é a razão entre a radiação direta diária média em uma superfície inclinada e a de uma superfície horizontal, no mês considerado.

Para as superfícies inclinadas voltadas para o equador, no hemisfério sul, com $\beta = 180^\circ$ a equação de $\bar{R}_b$ é :

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\phi - \delta) \cdot \cos \phi_s' \cdot \sin(\phi_s' - \phi_s) + \sin(\phi - \delta) \cdot \sin \phi_s' \cdot \sin \phi_s}{\cos \phi \cdot \cos \phi_s' \cdot \sin \phi_s' \cdot \sin \phi_s} \quad (2.37)$$

onde ϕ_s' é o ângulo horário do por do sol dado pelo dia médio do mês, adotando a menor das duas expressões abaixo:

$$\phi_s' = \min \left| \frac{\cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta)}{\cos^{-1}(-\tan(\phi - \delta) \tan \phi_s)} \right| \quad (2.38)$$

A radiação difusa média diária pode ser estimada pela equação de Collares-Pereira; Rabl (1979):

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 0,775 + 0,00606 \phi_s + 90 \phi_s + 0,505 \phi_s + 0,00455 \phi_s + 90 \cos \phi_s + 15 \bar{K}_T + 103 \quad (2.39)$$

Quando não se tem disponível as medidas de insolação no local desejado, utilizam-se diretamente os dados de estações mais próximas, ou a interpolação destes. Rmenud; Salvisberg; Kunz (1998) descrevem um método para calcular os valores horários da radiação global em uma superfície inclinada para um local qualquer. Em um primeiro

passo o método interpola a radiação média mensal horizontal das estações vizinhas para o local, depois os valores horários são gerados por modelos estocásticos e finalmente a radiação horizontal é transportada para uma superfície inclinada.

2.1.7 – Efeitos da orientação de coletores planos no aproveitamento da energia solar.

Foi simulado por Duffie; Beckman (1991) a radiação diária mensal para latitude de 45° norte com o coletor voltado para o equador (ângulo azimutal $\theta = 0^\circ$), considerando a refletância da superfície 0,2 e índice de nebulosidade $\overline{K_T} = 0,5$ constante durante o ano. Os resultados permitiram concluir:

- ? a maior energia total anual foi obtida para $\theta = 0^\circ$, ou seja, quando a inclinação da superfície coletora coincide com a latitude tornando os raios solares perpendiculares à superfície coletora;
- ? a maior energia total anual varia menos que 5% quando o ângulo θ varia $\pm 20^\circ$ da latitude;
- ? a energia total no inverno é máxima quando o ângulo $\theta = \phi + 15^\circ$;
- ? uma superfície vertical recebe menos 8% de energia do que uma superfície com $\theta = 60^\circ$ se $\tau_r = 0,6$ (solo coberto de neve) e 11% menos se $\tau_g = 0,2$;
- ? cálculos efetuados com declividades do coletor com 30° e 60° mostraram que a energia total varia com o ângulo azimutal (ϕ);
- ? para ângulos planos azimutais variando até 30° para leste ou oeste, a diferença na energia anual é pequena;
- ? para cada 15° de mudança no ângulo θ , a máxima energia disponível muda uma hora mais cedo se θ for positivo e uma hora mais tarde se θ for negativo.

2.2 – Componentes do sistema de aquecimento solar de água

Os sistemas de aquecimento de água consistem basicamente de coletores da energia solar, trocadores de calor, reservatórios de água quente, equipamentos auxiliares de aquecimento e sistema de distribuição de água quente.

A água utilizada no abastecimento predial pode ser aquecida diretamente no coletor ou de forma indireta através de um fluido refrigerante. Este fluido é aquecido no coletor solar e depois transfere este calor à água de abastecimento. A circulação da água ou do fluido refrigerante nos coletores pode se dar por termossifão, criado pela diferença de densidades do líquido devido à variação de temperatura, ou por um sistema de bombeamento. Portanto, existem quatro configurações diferentes:

- 1 – Sistema passivo direto;
- 2 – Sistema passivo indireto;
- 3 – Sistema ativo direto e
- 4 – Sistema ativo indireto.

O esquema da Figura 2.4 mostra um sistema passivo direto com duas opções: a primeira com um único reservatório onde a fonte auxiliar de energia está dentro do mesmo; na segunda existe um aquecedor auxiliar ligado em série.

No sistema indireto, o trocador de calor pode armazenar ou não um certo volume de água quente. O esquema da Figura 2.5 é o exemplo de um sistema onde o trocador de calor não armazena água quente ou armazena um volume insuficiente que é complementado no reservatório que contém a fonte auxiliar de calor.

"A principal razão para o uso de sistemas indiretos é a proteção ao congelamento" afirmam Hudson; Markell (1985). Os fluidos refrigerantes normalmente utilizados são o etileno-glicol e o propileno-glicol que têm baixo ponto de congelamento. A desvantagem do sistema indireto está no seu menor rendimento.

Figura 2.4 – Sistema direto passivo com fonte de energia interna ou externa.

A vantagem do sistema direto ativo é que o reservatório pode estar em qualquer posição em relação aos coletores, inclusive em nível inferior a estes. Este sistema é também empregado quando o número de coletores é muito grande e o gradiente de temperatura não é suficiente para manter o fluxo necessário por termossifão.

A bomba do sistema ativo mostrada na Figura 2.6 é acionada quando a diferença de temperatura entre a parte superior do coletor e o reservatório atinge um valor preestabelecido. Seu desligamento ocorre quando esta diferença de temperatura torna-se pequena ou quando a água do reservatório alcança um valor desejável.

Como nos sistemas passivos, o sistema direto ativo pode também possuir dois reservatórios. Um destes reservatórios fica exclusivamente para o armazenamento e o outro contém a fonte auxiliar.

Figura 2.5 – Sistema indireto de aquecimento de água passivo, com aquecedor auxiliar.

Figura 2.6 – Sistemas de aquecimento de água ativos: direto e indireto.

2.2.1 – Coletores de calor solar para aquecimento de água

Existem basicamente dois tipos de coletores de calor solar: os coletores de superfície plana e coletores de foco ou com concentrador de energia. Os primeiros são compostos por uma série de condutos interligados nas extremidades, acondicionados em uma caixa metálica com fundo fosco na cor preta e com isolamento térmico no fundo.

Os coletores planos são utilizados para temperaturas abaixo de 93 °C (Hudson; Markell, 1985). Podem ter ou não uma placa de cobertura de material transparente. Esta cobertura “visa realizar o efeito estufa, uma vez que a radiação emitida pela placa absorvedora, que possui elevados comprimentos de onda, pode ser refletida para o interior e, além disto, a colocação de mais placas de cobertura reduz o coeficiente de convecção neste local, reduzindo as perdas de calor para o ambiente.” (Prado, 1996). A Figura 2.7 mostra uma seção típica de um coletor plano.

No aquecimento de piscinas, a água sofre pequenos acréscimos de temperatura ao passar pelo coletor e a cobertura de vidro não é tão necessária para aumentar a eficiência porque, segundo Hudson; Markell (1985) a perda por irradiação é desprezível para pequenas diferenças de temperaturas, como também são pequenas as perdas por condução e convecção.

O coletor concentrador foca a energia recebida em um grande refletor, ou em uma lente Fresnel, para um pequeno absorvedor, como mostrado na Figura 2.8. Devido à grande quantidade de energia concentrada o absorvedor atinge altas temperaturas rapidamente. Boyle (1996) indica o uso deste tipo de coletor para temperaturas da água entre 50 a 150 °C. O refletor ou a lente deve estar corretamente posicionado para receber a radiação, o que torna necessário um mecanismo que permita o movimento do coletor rastreando o movimento solar.

Figura 2.7 – Seção típica de um coletor de superfície plana.

Figura 2.8 – Coletores de foco concentrado: parabólico e Fresnel. Fonte: Hudson; Markell (1985).

Este recurso não é utilizado em coletores de superfície plana por três razões. A primeira, porque implica em certa complexidade, no ajuste e aferição, para as aplicações práticas, principalmente para fins domésticos; a segunda razão, porque aumenta a área necessária para a implantação dos coletores, pois o distanciamento entre placas deve ser acrescido para que na movimentação não ocorra sombreamento; a terceira, devido à elevação do custo de implantação e manutenção do mecanismo.

Hellstrom et al. (2003) procuraram melhorar as propriedades ópticas dos coletores planos utilizando filme de teflon, segundo vidro, tratamento anti-reflexivo e um

refletor. A combinação dos três primeiros fatores aumentou o rendimento anual de 24,6% a 50 °C e a combinação dos quatro fatores aumentou de 19,9 a 29,4% o rendimento para as mesmas condições.

A radiação absorvida, por unidade de área, em um coletor plano é igual à diferença entre o fluxo de energia solar incidente (G_T) e as perdas térmicas e ópticas existentes. A energia térmica perdida para a vizinhança por condução, convecção e radiação, segundo Duffie; Beckman (1991), pode ser representada pelo produto do coeficiente global de transferência de calor (U_L) pela diferença entre a temperatura média do absorvedor (T_{pm}) e a temperatura média do ar (T_{ar}), portanto o fluxo de energia útil (Q_u) em um dado instante é:

$$Q_u = A_c \cdot \tau_g \tau_e \cdot G_T - U_L \cdot (T_{pm} - T_{ar}) \quad (2.40)$$

onde: - A_c é a área do absorvedor do coletor e $(\tau_g)_e$ são a transmitância e a absorptância efetivas.

A temperatura média do absorvedor depende da geometria, das propriedades dos materiais empregados, da radiação solar incidente e do fluido de entrada, o que torna difícil sua obtenção, tanto analiticamente como experimentalmente. Por isto a energia útil é comumente expressa em termos da temperatura do fluido:

$$Q_u = A_c \cdot Fr \cdot \tau_g \tau_e \cdot G_T - U_L \cdot (T_e - T_{ar}) \quad (2.41)$$

onde: - T_e é a temperatura do fluido na entrada do coletor;

- Fr é o fator de remoção de calor, equivale à eficiência, definido como a relação entre a quantidade real de calor absorvida e a máxima quantidade de calor possível que pode ser transferido.

Devido à cobertura de vidro, o ângulo de incidência (θ) solar influencia a transmitância e a absorptância. O coeficiente de correção devido ao ângulo de incidência (K_{θ}) é definido pela ASHRAE (1996) como sendo a relação entre o valor

de $(\tau)_{\theta}$ para um ângulo θ qualquer e o valor de $(\tau)_n$ para a radiação normal ao coletor. Esta relação é encontrada experimentalmente através da determinação do coeficiente b_0 da equação (ABNT, 1988-a), (ASHRAE, 1996):

$$K_{\tau} = \frac{(\tau)_{\theta}}{(\tau)_n} = 1 + b_0 \frac{1}{\cos \theta} \quad (2.42)$$

A energia transferida ao coletor é máxima quando todo este está à temperatura local do fluido, pois, nesta situação, as perdas de calor para o ambiente são as menores possíveis. Como o coletor se aquece durante o processo, o fator de remoção de calor é na realidade menor. O fator de eficiência do coletor (F') é a razão entre a energia real transferida para a água e a energia útil que resultaria se o absorvedor estivesse à temperatura local da água. Duffie; Beckman (1991) demonstram que este fator também é definido pela relação entre o coeficiente global de transferência de calor da água para o ar (U_0) e o coeficiente global de perda de calor do coletor (U_L) e apresentam as seguintes relações:

$$F' = \frac{U_0}{U_L} \quad (2.43)$$

$$Fr = \frac{\dot{m}.Cp}{A_c.U_L} \ln \exp \left(\frac{A_c.U_L.F'}{\dot{m}.Cp} \right) \quad (2.44)$$

A determinação de F' a partir dos dados de Fr obtidos de um ensaio em regime quase permanente é obtido na equação (2.45).

$$F' = \frac{\dot{m}.Cp}{A_c.U_L} \ln \left(1 + \frac{Fr.U_L.A_c}{\dot{m}.Cp} \right) \quad (2.45)$$

A energia útil ou disponível no coletor também pode ser determinada pelo ganho de temperatura do fluido entre a entrada (T_e) e a saída (T_s):

$$Q_u = \dot{m}.Cp.(T_s - T_e) \quad (2.46)$$

onde: - $\dot{m}$ é a vazão em massa;

- C_p é o calor específico do fluido a pressão constante;

A eficiência do coletor é definida como a razão entre o ganho útil de energia durante um período de tempo e a energia solar incidente neste período:

$$\eta_c = \frac{\int Q_u dt}{A_c \int G_T dt} \quad (2.47)$$

A eficiência instantânea é dada em função das temperaturas e pode ser obtida dividindo ambos os lados da equação (2.41) por $G_T A_c$:

$$\eta_c = Fr(??)_e + Fr U_L \frac{\int Te - Tar dt}{\int G_T dt} \quad (2.48)$$

A temperatura Te pode ser tomada como a temperatura de entrada ou a de saída do fluido, ou a média entre elas. Métodos de ensaios para a determinação do rendimento térmico de coletores solares planos, segundo a equação acima, são descritos na NBR 10184/88 (ABNT, 1988-a) e ASHRAE Standard 93-1986 apud ASHRAE (1999). Estes métodos são desenvolvidos para a condição de regime quase permanente, isto é, para a situação em que a vazão e a temperatura do fluido de trabalho na entrada do coletor solar são aproximadamente constantes no decorrer do tempo e as variações da radiação solar são pequenas.

Em ambos os métodos as vazões dos ensaios são fixas. A NBR 10184/83 (ABNT, 1988-a) estabelece 1 L / min. por unidade de área do coletor e a ASHRAE (1999) determina uma vazão de 0,0204 L / (s/m²), ou seja, 1,224 L/(min/m²).

Para vazões muito abaixo destes valores a temperatura do coletor aumenta fazendo com que o rendimento diminua. Torna-se necessário fazer um ajuste nos valores de $Fr(??)_e$ e $Fr U_L$. Duffie; Beckman (1991) demonstram que estes novos valores podem ser encontrados fazendo:

$$\frac{|F_r'' U_L|_{uso}}{|Fr U_L|_{teste}} = \frac{|F_r''(??)|_{uso}}{|Fr(??)|_{teste}} = r \quad (2.49)$$

e

$$r = \frac{\dot{m}_1 \cdot Cp}{A_c \cdot |Fr U_L|_{teste}} = \exp\left(\frac{A_c \cdot F' \cdot U_L}{\dot{m}_1 \cdot Cp}\right) \quad (2.50)$$

onde: $F_r'' \cdot U_L$ e $F_r''(??)$ são os novos valores para a nova vazão $\dot{m}_1$ e $F' U_L$ calculado pela equação (2.45).

Várias pesquisas foram desenvolvidas considerando o sistema submetido a regime não permanente. Amer; Nayak; Sharma (1997) comparam os resultados experimentais de quatro métodos com os resultados obtidos pelo método indicado pela ASHRAE 93-1986 Standard (ASHRAE, 1999). Os métodos são examinados criticamente sob os seguintes pontos de vista: dos procedimentos experimentais, das técnicas de identificação dos parâmetros e dos resultados obtidos. Os autores concluem que todos eles são parcialmente falhos.

Nayak; Amer (2000) compararam teórica e experimentalmente nove métodos que avaliam a capacidade térmica de coletores em testes dinâmicos e confrontaram os resultados com dados experimentais. O resumo dos métodos estudados por estes autores é mostrado no Quadro 2.1. Os métodos de Rogers, Wijesundera e o designado por Filter foram excluídos da comparação por entenderem que estes não podem prever o comportamento dinâmico do coletor porque estimam apenas os parâmetros em regime permanente. Os demais métodos têm em comum a segmentação do coletor em pequenos trechos ou nós para calcular o rendimento total a partir do rendimento de cada trecho consecutivo. Os métodos de Perers, DSC e NDM (*new dynamic method*) alcançaram resultados mais próximos dos dados experimentais.

O método DSC é o único que considera variável, simultaneamente, a vazão, a radiação e a temperatura do ambiente, porém resulta em grande quantidade de dados

a serem trabalhados uma vez que o intervalo de tempo de amostragem é de dois segundos e o coletor dividido em trinta segmentos. Este método foi também testado por Bosanac; Nielsen (1997) e obtiveram resultados com erro de $\pm 5\%$ na energia útil anual prevista. Todos os demais métodos fixam condições permanentes que não ocorrem em um sistema real.

Coletores solares não convencionais têm sido utilizados com sucesso. Janjai; Esper; Mühlbauer (2000) apresentam um estudo teórico e sua validação experimental para um coletor formado por duas canaletas ligadas em série, cada uma com 24,1 metros de comprimento, 1,25m de largura, trinta centímetros de profundidade e com cobertura de plástico, utilizado no aquecimento de água em um hotel em Almeria, Espanha.

Os coletores podem ser interligados em série ou em paralelo conforme mostra a Figura 2.9, ou uma combinação dos dois casos. No caso de dois coletores combinados em paralelo, sendo eles idênticos, a vazão é a mesma nos dois, segundo Duffie; Beckman (1991); assim, se forem consideradas as temperaturas de entrada aproximadamente iguais nos dois, ambos terão o mesmo desempenho.

No caso do arranjo em série, a temperatura de entrada no segundo coletor T_{se} é consideravelmente maior que a temperatura de entrada no primeiro, alterando assim seu rendimento. Pode ser observado na equação (2.48) que quanto maiores as temperaturas no coletor (T_e), maiores as perdas e menor o rendimento. Por tal razão a disposição em paralelo é mais indicada para pequenas instalações.

Quadro 2.1 – Métodos de cálculo para testes de coletores solares analisados por Nayak; Amer (2000).

Método / (Autor)	Equação do modelo	Parâmetros característicos	Condições*
Rogers / (Rogers, 1981; adotado pela norma British Standard Institution).	$q_u = \sum_{n=1}^N \frac{Fr_n}{n} K_n G_{Tj} \ln \left(\frac{Fr U_L \bar{T}_e}{\bar{T}_a} \right)$	$Fr, \eta_e, Fr U_L$	$\bar{m} \neq C; T_e \neq C; G_t \neq C;$ Tar = pequena variação
Filter / (Wang et al., 1987)	$q_u = \int_0^{\tau} Fr \eta_e h_T G_T dt + Fr U_L (T_e - T_a)$	$Fr, \eta_e, Fr U_L$	$\bar{m} \neq C; T_e \neq C;$ $G_T \neq C; T_a \neq C$
Saunier / (Saunier; Chungpaibulpatana, 1983)	$m_a + m_e C_p \frac{T_{pm} - T_0}{t} = A_a G_T + U_1 (T_a - T_{pm}) + Tar$ $U_2 A_a (T_{pm} - T_a) = (P_b - P_e)$	m_e, T_0, U_1, U_2	$P_e \neq C; q_u \neq 0;$ $\bar{m} \neq$ muito grande
Exell / (Chungaibulpatana; Exell, 1988)	$\bar{H}_T (T_{pm}(t_2) - T_{pm}(t_1)) = \int_{t_1}^{t_2} P_b - P_e - G_T dt + U_1 (T_a - T_{pm})$ $\int_{t_1}^{t_2} T_{pm}(t) Tar dt = U_2 A_a \int_{t_1}^{t_2} T_{pm} Tar dt$	$T_0; U_1; U_2$	$P_e \neq C; q_u \neq 0$
Perers / (Perers et al., 1990; Perers; Walletun, 1991)	$q_u = F' \eta_e K_b (T_a - T_{pm}) G_b + F' \eta_e K_d (T_a - T_{pm}) G_d + F' U_1 (T_a - T_{pm})$ $F' U_2 (T_a - T_{pm}) + F' U_3 (T_a - T_{pm}) + F' U_{sky} T_{sky} = m_c \eta_e \frac{dT_{pm}}{dt} + U_p (T_a - T_{pm})$	$F' \eta_e; K_b; K_d;$ $F' U_1; F' U_2; F' U_3;$ $F' U_{sky}; (m_c) \eta_e$	$T_e \neq C; \bar{m} \neq C;$ $Tar \neq C$
DSC – Dynamic Solar Collector Procedure / (Spirkl, 1993; Bosanac et al., 1994; Spirkl et al. 1997)	$\frac{(m_c) \eta_e}{N_c} \frac{dT_{pmn}}{dt} = \frac{F'}{N_c} \eta_e G_T + U_L (T_{pmn} - T_a) + \bar{m} C_p (T_{pmn} - T_{pmn-1})$	$F' \eta_e; F' U_L; (m_c) \eta_e$	$\bar{m} \neq C; G_T \neq C;$ $Tar \neq C$

(continua)

(continuação) Quadro 2.1 – Métodos de cálculo para testes de coletores solares analisados por Nayak; Amer (2000).

Método / (Autor)	Equação do modelo	Parâmetros característicos	Condições*
Wijeysundera / (Wijeysundera et al. 1996)	$C_T \frac{dT_s}{dt} = A_a Fr \left(G_T(t) U_L (T_e - T_{ar}) + A_{RU} \frac{1}{T_R} T_{pm} \right)$	Fr ; $Fr U_L$; C_T A_{RU}	m ; C ; G_T ; C ; T_{ar} ; C
QDT – Quick Dynamic Test Procedure/ (Amer et al. 1996)	$q_u = F' \left(G_T + F' U_L T_{pm} - T_{ar} \right) (mc)_e \frac{dT_{pm}}{dt}$	F' ; $F' U_L$; $(mc)_e$	m ; C ; T_e ; C ; T_{ar} ; C G_T controlado
NDM – New Dynamic Method / (Amer et al. 1999)	$T_s = T_e e^{\frac{F' U_L}{mc} t}$ $N \frac{F' U_L}{k + 0} G_T - k T - k \frac{F' U_L}{mc} T_{ar} - k \frac{F' U_L}{mc} k t$	F' ; $F' U_L$; $(mc)_e$	m ; C ; T_e ; C ; T_{ar} ; C G_T ; C

* C = constante

Figura 2.9 – Coletores associados: a) em paralelo; b) em série.

2.2.2 – Reservatórios de água quente

O aquecimento de água com energia solar configura-se como um sistema central de acumulação. A água aquecida gradativamente durante o dia é armazenada para utilização nos momentos de consumo, inclusive durante a noite. O volume armazenado deve ser determinado em função do perfil de demanda, do volume de consumo diário e da relação entre temperatura de utilização e da temperatura de armazenamento da água. Em termos práticos, para pequenas instalações em residências isoladas, este volume corresponde de 100 a 150% do valor do consumo diário.

O reservatório de água quente tem o funcionamento muito dinâmico, pois recebe, armazena e cede calor a taxas variáveis ao longo do tempo. O calor recebido provém do coletor solar e da fonte auxiliar de energia; o cedido inclui as perdas para o ambiente, o consumo de água quente e possível circulação da água nos coletores, quando este último está com temperatura abaixo da temperatura do reservatório. A Figura 2.10 ilustra este fluxo representado pelas equações (2.51) a (2.54).

Figura 2.10 – Esquema do fluxo de energia no reservatório de água quente durante um intervalo de tempo Δt .

A energia útil total que o reservatório recebe (Eu_R), durante um intervalo de tempo Δt é:

$$Eu_R = E'_{AF} + Eu_{SR} + Eu_E \quad (2.51)$$

sendo:

$$E'_{AF} = m_{AF} C_p T_{AF} ; \quad (2.52)$$

$$Eu_{SR} = \dot{m}_c C_p (T_{Re} - T_{Rs}) \Delta t \quad (2.53)$$

$$Eu_E = \eta_{Re} P_e \Delta t \quad (2.54)$$

onde: - Eu_{SR} é a energia solar captada no coletor que chega até ao reservatório (kJ);

- Eu_E é a energia útil da fonte auxiliar de calor (kJ);

- E'_{AF} é a energia da água fria (entalpia) que reabastece o reservatório (kJ);

- m_{AF} é a massa de água fria que entra no reservatório no intervalo Δt (kg);

- $\dot{m}_c$ é a vazão em massa que passa pelo coletor (kg /s);

- η_{Re} o rendimento da resistência elétrica (fonte auxiliar);

- T_{Re} é a temperatura da água na entrada do reservatório (°C) e

- T_{Rs} é a temperatura da água na saída do reservatório (°C).

A variação da energia total no reservatório (ΔE_R) é igual a soma de todas as energias envolvidas, considerando negativas aquelas que tiram calor, ou seja:

$$\Delta E_R = m_R \cdot C_p \cdot \Delta \bar{T}_R = E_{UR} = E_{AQ} + E_{FR} + E_{RC} \quad (2.55)$$

sendo:

$$E_{AQ} = \dot{m}_{AQ} C_p T_{AQ} \cdot \Delta t; \quad (2.56)$$

$$E_{FR} = U_R \cdot (\bar{T}_R - T_{ar}) \cdot \Delta t; \quad (2.57)$$

$$E_{RC} = \dot{m}_c \cdot C_p \cdot T_{Re} - T_{Rs} \cdot \Delta t \quad (2.58)$$

onde: - m_R é a massa de água no reservatório (kg);

- $\Delta \bar{T}_R$ é a variação da temperatura média do reservatório no intervalo Δt (K);

- E_{AQ} é a energia da água quente que sai para o abastecimento (kJ);

- E_{FR} é o calor cedido ao ambiente (kJ);

- E_{RC} é a energia perdida na circulação de água quando o coletor está a uma temperatura abaixo da temperatura do reservatório (kJ) e

- U_R é o coeficiente global de transferência de calor do reservatório (W/°C).

A distribuição da temperatura no interior do reservatório de água quente pode ser estudada de duas formas. A primeira, como considerado nas equações (2.55) e (2.57), é mais conservadora e pressupõe que ocorra uma mistura total da água dentro do reservatório, enquanto a segunda forma considera a estratificação térmica devido às diferenças de densidade do líquido. Esta última é mais realista e de maior interesse para o estudo dos sistemas de aquecimento solar, pois a estratificação térmica interfere no rendimento do coletor solar.

2.2.2.1 – Estratificação térmica nos reservatórios de água quente.

Os modelos que consideram a estratificação térmica são desenvolvidos, segundo Duffie; Beckman (1991), em duas categorias. Na primeira, chamada de múltiplos nós, a abordagem é feita dividindo o reservatório em 'N' seções ou nós e é feito um balanço de energia entre cada seção consecutiva, portanto uma abordagem analítica. Na segunda categoria, chamada "plug-flow", as várias seções se movem como uma pilha de livros em uma estante: quando uma seção na entrada ou na saída se move, ocorre um igual deslocamento em volume nas demais seções.

Para serem formulados, os modelos requerem que se saiba como a água que entra no reservatório se distribui nas seções vizinhas. O modelo de múltiplos nós, descrito a seguir segundo Duffie; Beckman (1991), considera que as vazões de entrada se distribuem em apenas um segmento e que neste ocorre uma mistura total. As seções são numeradas de cima para baixo (1...N); o número da seção que recebe a água do coletor tem a designação S_h , o número da seção que recebe a água fria de reabastecimento é designado por S_L . Na Figura 2.11 os valores de S_h e S_L são, respectivamente, 3 e N.

Três funções de controle são para determinar quais módulos recebem água do coletor e da água fria. Estas funções são:

$$F_i^c = \begin{cases} 1 & \text{se } i = S_h \\ 0 & \text{se } i \neq S_h \end{cases} \quad (2.59)$$

$$F_i^L = \begin{cases} 1 & \text{se } i = S_L \\ 0 & \text{se } i \neq S_L \end{cases} \quad (2.60)$$

$$F_i = \bar{m}_c \sum_{j=1}^{i-1} F_j^c + \bar{m}_{AF} \cdot \sum_{j=i}^N F_j^L \quad (2.61)$$

Figura 2.11 – Esquema da estratificação do fluido no reservatório

O balanço de energia em cada segmento é expresso como:

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_i \cdot \frac{dTR_i}{dt} &= \frac{UA}{Cp} (T_{ar} - TR_i) - F_i^c \cdot \dot{m}_c (TR_e - TR_i) - F_i^L \cdot \dot{m}_{AF} (T_{AF} - TR_i) \\
 &+ \dot{m}_i (TR_{i+1} - TR_i) Cp \quad \text{se } i > 0 \\
 &- \dot{m}_i (TR_i - TR_{i-1}) Cp \quad \text{se } i > 0 \\
 &+ P_{EI} \quad \text{para } i = 1, N
 \end{aligned} \tag{2.62}$$

onde $(UA)_i$ é o coeficiente global da perda de calor da seção i .

Este modelo não considera tendência de desestratificação com o tempo devido à difusão e condução do calor pelas paredes do reservatório.

Para a exemplificação do modelo "plug-flow", segundo Duffie; Beckman (1991), será considerado que o retorno dos coletores está na seção mais alta do reservatório. A Figura 2.12 mostra um esquema para o reservatório dividido em quatro seções de volumes V_i cada uma e temperatura TR_i . Em um determinado período de tempo o coletor entrega um volume V_c que é igual a $\dot{m}_c \cdot t / 4$ à temperatura TR_e . Supondo que TR_e seja maior que TR_1 , um novo seguimento irá somar ao topo do tanque e o perfil existente é deslocado (ver Figura 2.12-B). Ao mesmo tempo, entra com temperatura

T_{AF} um volume V_{AF} igual a $\bar{m}_{AF} \cdot t / \rho$. Se T_{AF} é menor que TR_4 , então um segmento é adicionado ao fundo do reservatório e o perfil existente se desloca novamente (ver Figura 2.12-C). Os passos 1 e 2 estão apresentados seqüencialmente, mas ocorrem simultaneamente. O deslocamento total do perfil é igual à diferença entre o total do volume que vem do coletor e o volume que vem da água fria, ou seja, $(\bar{m}_c - \bar{m}_{AF}) \cdot t / \rho$. Os segmentos ou frações de segmentos cujas posições ficam fora dos limites do reservatório são os cedidos ao consumo ou retornados do coletor.

Se o reservatório for dividido em N segmentos, as temperaturas médias da água quente liberada para o abastecimento e para os coletores são estimadas como mostrado a seguir.

Se: $V_c < V_{AF}$

$$TR_s = T_{AF} \quad (2.63.a)$$

e

$$T_{AQ} = \frac{\sum_{i=1}^{k-1} V_i T_{Re} + a \sum_{i=k}^N V_i T_i}{\sum_{i=1}^{k-1} V_i + a \sum_{i=k}^N V_i} / V_{AF} \quad (2.63.b)$$

onde o volume V_k é o volume do segmento que deixou o reservatório parcialmente e o coeficiente "a" é a porcentagem deste volume que foi entregue ao abastecimento, calculado pelas condições:

$$0 \leq a \leq 1$$

$$V_c = \sum_{i=1}^{k-1} V_i + a V_k \leq V_{AF} \quad (2.64)$$

Se: $V_c > V_{AF}$

$$T_{AQ} = T_{Re} \quad (2.65.a)$$

e

$$TR_s = \frac{\sum_{i=1}^N T_{AF} V_{AF} + \sum_{i=k+1}^N V_i T_i + a \sum_{i=k}^N V_i T_i}{\sum_{i=1}^N T_{AF} V_{AF} + \sum_{i=k+1}^N V_i T_i + a \sum_{i=k}^N V_i T_i} / V_c \quad (2.65.b)$$

onde a e k precisam satisfazer as condições:

$$0 \leq a \leq 1$$

$$V_{AF} = \sum_{i=1}^N V_i + a \sum_{k=1}^N V_k + V_c \quad (2.66)$$

Figura 2.12 – Representação esquemática do escoamento em "plug-flow" em um reservatório dividido em quatro seções.

As perdas no reservatório e a condução de calor entre os segmentos devem ser avaliadas antes do perfil ter sido ajustado pela solução da seguinte equação diferencial para cada seguimento:

$$\rho C_p V_i \frac{dT_i}{dt} = (UA)_i (T_i - T_{ar}) - (k.A)_{i,i+1} \frac{T_{i+1} - T_i}{z_{i,i+1}} - (k.A)_i \frac{T_i - T_{i-1}}{z_{i,i-1}} \quad (2.67)$$

onde: - $z_{i,i-1}$ é a distancia entre os centros dos segmentos $i-1$ e i ;

- $z_{i,i+1}$ é a distancia entre os centros dos segmentos i e $i+1$ e

- k é a condutividade térmica (W / m.°C).

Este último modelo, segundo Duffie; Beckman (1991), pode representar maiores graus de estratificação que o modelo dos múltiplos nós.

Hahne; Chen (1998) analisaram o perfil térmico e a eficiência térmica de um reservatório cilíndrico vertical, com o fluxo de água quente feito pelo topo e a descarga pelo fundo, sob condições adiabáticas. O método utilizado para estudar as características do escoamento e da transferência de calor foi a solução numérica do arranjo das equações da continuidade, da quantidade de movimento e da conservação da energia. A análise se baseou na premissa que "uma boa estratificação térmica em um reservatório de água quente resulta em uma alta eficiência do reservatório a uma dada temperatura". A eficiência do reservatório é definida pela equação (2.68).

$$\eta_R = \frac{\int_0^{t_c} \dot{m} C_p (T_{Re} - T_{Rs}(t)) dt}{m C_p (T_{Re} - \bar{T}_{R_{ini}}} \quad (2.68)$$

onde m é a massa total de água no reservatório, $\dot{m}$ a vazão em massa da água quente que entra, t_c é o tempo para o enchimento total do reservatório, T_{Re} ; T_{Rs} e $\bar{T}_{R_{ini}}$ são, respectivamente, as temperaturas de entrada, saída e inicial. Nota-se que na equação acima a temperatura de entrada do líquido é constante, apenas a temperatura de saída é que varia com o tempo em função da estratificação e da mistura da água no reservatório.

Os autores relacionaram a eficiência de carga com os seguintes adimensionais: número de Richardson (Ri) modificado, número de Peclet (Ped) e módulo de Fourier (Fo), definidos pelas equações (2.69) a (2.71).

$$Ri = \frac{Gr}{Re_m^2} = \frac{g \cdot \beta_k \cdot TRe \cdot \bar{T}R_{ini} \cdot H_R}{\nu_e^2} \quad (2.69)$$

$$Ped = Re_m \cdot Pr = \frac{\nu_e H_R}{\alpha_d} \quad (2.70)$$

$$Fo = \frac{\alpha_d t}{H_R^2} \quad (2.71)$$

onde: - Gr é o número de Grashof $\beta_k \cdot TRe \cdot \bar{T}R_{ini} \cdot H_R^3 / \nu_e^2$;

- ν_e é a viscosidade cinemática (m²/s);

- Re_m é o numero de Reynolds modificado $\nu_e H_R / \alpha_d$;

- Pr é o número de Prandtl α_d / ν_e ;

- β_k é o coeficiente de expansão volumétrica (K⁻¹);

- H_R é a altura total do reservatório (m);

- ν_e é a velocidade de entrada (m/s) e

- α_d a difusividade térmica (m²/s).

Hahne; Chen (1998) fizeram neste trabalho as observações descritas abaixo.

- Para pequenas diferenças de temperatura entre a água que entra e a que está no reservatório, o aumento da velocidade de entrada diminui a eficiência térmica; à medida que a diferença de temperatura aumenta, o efeito de flutuação da água quente aumenta e a descarga direta da água quente pelo fundo diminui. Para diferenças de temperatura maiores que 20 K, o efeito da

velocidade pode ser desprezado, nesta situação a eficiência permanece quase constante em torno de 97 a 98%.

- ? Quando o número de Richardson é grande ($Ri > 0,25$), o aumento da vazão melhora a eficiência se a temperatura da água que entra for muito elevada ($> 80\text{ }^{\circ}\text{C}$), pois, quanto maior Ri maior o efeito de flutuação da água quente, aumentando a estratificação térmica; porém, quando este número é pequeno, ou a temperatura de entrada baixa, o efeito é ao contrário: a eficiência diminui com o aumento da vazão. Todavia o efeito da vazão é muito menor que o efeito da diferença de temperatura.
- ? Se a relação entre a altura e o diâmetro (H_R/d) estiver no intervalo de um a quatro, o aumento desta relação promove um aumento na eficiência; para valores maiores que quatro este efeito é desprezível.
- ? Para valores de Ri entre 0,001 e 0,01, quanto maior o Ri e quanto maior o número de Peclet, maior a eficiência; para número de Richardson maior que 0,25 a eficiência é quase constante, variando entre 97 e 98%.
- ? Para números de Richardson maior que 0,25 a eficiência aumenta com o aumento do módulo de Fourier; para valores pequenos de Ri acontece o contrário, porém o efeito deste parâmetro é pequeno quando comparado com a influência dos outros dois adimensionais utilizados. Este pequeno efeito da difusão térmica da água na estratificação também foi encontrado por Shyu et al. (1989) apud Alizadeh (1999).

Hahne; Chen (1998) encontraram a seguinte relação para a eficiência do reservatório:

$$\eta_R = 1 - 0,206.Ri^{-0,57}.Pe^{-0,49}.Fo^{-0,74}.(H_R/d)^{-1,10} \quad (2.72)$$

A equação acima só se aplica à água e é válida para as seguintes condições:

$$0,0013 < Ri \leq 10; \quad 1,25 \cdot 10^6 \leq Pe_d \leq 1,95 \cdot 10^6; \quad 8,15 \cdot 10^{-6} \leq Fo \leq 1,54 \cdot 10^{-3} \quad \text{e}$$

$$1,0 \leq H/D \leq 8,1.$$

Yoo; Kim; Kim (1999) desenvolveram uma solução analítica para o cálculo da estratificação térmica em reservatórios cilíndricos verticais funcionando nas mesmas condições testadas por Hahne; Chen (1998), isto é, com uma única entrada de água quente no topo e uma saída no fundo do reservatório. O método considera o processo adiabático, sem nenhum outro trocador de calor interno e prevê que na primeira seção, próxima a entrada de água quente, ocorre uma mistura total e que nas demais seções o fluxo se dá pelo modelo "plug-flow". É exigido que a temperatura de entrada seja maior ou igual à temperatura do topo do reservatório, podendo ser constante ao longo do tempo ou variável segundo uma função linear ou exponencial. A função da temperatura ($T = f(t)$) pode sofrer alterações ao longo do processo, desde que seja conhecida.

Alizadeh (1999) estudou a estratificação térmica em reservatórios horizontais realizando quatro tipos de ensaios com a circulação da água simulando apenas a descarga e a recarga, isto é, sem considerar o circuito da água nos coletores. Os dois primeiros tipos de ensaio iniciavam com o reservatório preenchido com água quente e com um perfil térmico pré-estabelecido. No primeiro tipo, a água era introduzida com temperatura igual à temperatura do fundo e, no segundo, com temperatura abaixo desta última. No terceiro tipo de ensaio, o reservatório tinha a temperatura uniformizada para receber a água fria. E, no quarto tipo, a primeira situação era repetida com um bocal direcionando o fluxo 30° para baixo, ligando a tubulação de entrada ao reservatório. As vazões variaram de 6 a 10 litros por minuto. Para verificar o quanto a estratificação se mantém ao longo do processo, foi utilizado como referência um tempo adimensional t^* dado pela equação (2.73).

$$t^* = \frac{t \cdot Q_F}{V_R} \quad (2.73)$$

onde Q_F e V_R são respectivamente a vazão em volume que entra no tempo Δt e o volume total do reservatório. Porém, a estratificação térmica em um tanque horizontal não é possível para $Ri < 1$, segundo Wu; Bannerot (1987) apud Alizadeh (1999). Neste trabalho também foram desenvolvidos dois modelos numéricos para calcular o perfil térmico do reservatório validando-o com os dados obtidos. Os modelos, à semelhança do desenvolvido por Yoo; Kim; Kim (1999), consideram que há um determinado número de camadas ou seções próximas à entrada da água em que há mistura. No primeiro modelo a mistura é considerada turbulenta, a água ao entrar se mistura totalmente com as "m" camadas onde isto ocorre; as demais camadas recebem da camada inferior um volume ΔV , com nova temperatura, se mistura e passa para a camada seguinte o mesmo volume com a temperatura da mistura. No segundo método a mistura nas "m" camadas iniciais ocorre uma a uma e as demais camadas se comportam conforme o modelo "plug-flow". O número "m" de camadas em que ocorre a mistura foi selecionado, para a validação do modelo, a partir dos resultados experimentais, sem nenhuma relação definida.

Alizadeh (1999) observou que:

- ? a estratificação térmica é preservada até $\Delta t^* = 4$, após este tempo uma mistura turbulenta atinge a metade superior do reservatório;
- ? um pequeno aumento no desempenho ocorre quando entra água fria em relação à entrada de água quente no fundo do reservatório;
- ? a estratificação térmica foi aumentada com o bocal direcionador;
- ? na análise do balanço da energia envolvida no processo as perdas de calor para o ambiente e a condutibilidade térmica da água podem ser desprezadas.

A degradação da estratificação térmica é causada por diversos mecanismos de transferência de calor, tais como: a convecção forçada dentro do tanque, a mistura de água provocada pelas entradas e saídas de água, a perda para o ambiente, a convecção natural induzida pelas paredes do reservatório que se aquecem por condução e a difusão interna do calor devido aos gradientes de temperaturas.

As condições em que foram feitos estes trabalhos não representam a situação real do reservatório em funcionamento em um sistema de aquecimento, pois, no caso do reservatório vertical, a água quente não entra pelo topo, a água fria entra e sai próxima à base; simultaneamente ao fluxo de água no circuito de descarga e carga, ocorre o fluxo de água no circuito dos coletores; estes fluxos não são uniformes e nem permanentes quanto à massa e quanto à energia térmica; a fonte auxiliar de calor induz o aquecimento em um ponto intermediário do reservatório.

2.2.2.2 Perdas térmicas nos reservatórios de água quente

O coeficiente global de transferência de calor (U_R) é determinado considerando as principais formas com que este fenômeno ocorre: convecção interna, condução pelas paredes, convecção e radiação das paredes externas. Se o contorno da superfície sólida tem temperatura mais alta que a do fluido que o envolve, o calor escapa primeiramente por condução na direção do fluido aumentando sua energia interna e gerando um movimento que remove a camada aquecida por outra de menor temperatura. Quando o movimento da massa fluida ocorre devido à variação da densidade, a convecção é chamada "natural"; quando o movimento é provocado por uma causa externa, a convecção é chamada "forçada".

O fluxo de calor da convecção natural é expressa pela equação:

$$q = h_c \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (2.74)$$

onde: - T_s é a temperatura na superfície (°C);

- T_∞ é a temperatura a uma distância infinita (°C);

- h_c é o coeficiente de transmissão convectivo de calor (W/ °C.m²) e

- A o elemento de área.

O coeficiente de transmissão de calor não é uniforme sobre a superfície e o parâmetro acima se refere a seu valor médio. Sua determinação é de máxima

importância para a avaliação das perdas térmicas e foi motivo de exaustivas pesquisas, resultando em inúmeras fórmulas empíricas e algumas soluções analíticas. “O problema não é um problema simples, pois além de dependerem de *diversas propriedades do fluido*, como densidade, viscosidade, condutividade térmica e calor específico, os coeficientes dependem da geometria da superfície e das condições do escoamento” (INCROPERA; DEWITT (1992), p.126). No Quadro 2.2 estão resumidos os adimensionais e as variáveis empregadas nas equações a seguir.

Quadro 2.2 – Adimensionais e variáveis empregadas no estudo de transferência de calor.

Número de:	Expressão	Variáveis / Dimensões (Massa (M), comprimento (L), tempo (t) e temperatura (T)).
Grashof	$Gr \propto \frac{g \cdot \beta \cdot T_S \cdot L^3}{\nu^2}$	β - coeficiente de expansão volumétrica = $1 / (\text{Temp. de película (K)}) \dots (1 / T)$ g - aceleração da gravidade (L / t ²)
Nusselt	$Nu \propto \frac{h_c L}{k}$	ν - viscosidade absoluta (M / Lt) ν - viscosidade cinemática (L ² / t) ρ - massa específica..... (M / L ³)
Prandtl	$Pr \propto \frac{C_p \cdot \rho}{k} \cdot \frac{\nu}{\alpha_d}$	h_c - coefic. de transmissão convectivo de calor (M / t ³ T) k - condutibilidade térmica (ML / t ³ T)
Reynolds	$Re \propto \frac{\nu L}{\nu}$	L - dimensão característica (L) ν - velocidade do fluido(L / t)
Peclet	$Ped \propto Re \cdot Pr$	C_p - calor específico(L ² / t ² .T). α_d - difusividade térmica (L ² / t)

Na convecção forçada, se forma um filme junto às paredes sólidas que tem capacidade de transferência de calor dependente do número de Reynolds. A determinação de h_c deve ser feita de acordo com o regime de escoamento.

A superfície externa do reservatório, quando exposta ao tempo sofre a influência dos ventos e seu estudo pode ser feito por analogia ao escoamento do ar em corpos bojudos. Churchill; Benstein (1977) encontraram a seguinte equação para número de Peclet maior que 0,2:

$$Nu \propto 0,3 + \frac{0,62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{1 + 0,4/Pr^{1/3}} \left(1 + \frac{D}{L} \right)^{1/4} \quad (2.75)$$

Onde os coeficientes A , B , CI e D são dados no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 – Coeficientes da equação (2.75)

Número de Reynolds	A	B	CI	D
$10^3 < Re < 10^4$	2/3	1/4	0	$0,4/Pr$
$7.10^4 < Re < 4.10^5$	1/2	1	1/4	$Re / 282000$
$4.10^5 < Re < 10^7$	5/8	4/5	1/4	$Re / 282000$

Nakai; Okazaki (1975) propuseram a seguinte expressão para o número de Peclet (Ped) menor que 0,2:

$$Nu = 0,8327 + \ln(Ped)^{1/2} \quad (2.76)$$

A formulação acima pode ser aplicada com o cilindro em qualquer posição, desde que o fluxo forçado seja normal ao seu eixo longitudinal.

Em algumas situações a transferência de calor não pode ser caracterizada apenas como "natural" ou "forçada". O modo predominante do transporte de energia térmica depende da velocidade do fluido. Se a velocidade é muito elevada, irá encobrir a maior parte dos efeitos das correntes de convecção natural. Por outro lado, se a velocidade for muito baixa as correntes de convecção natural é que influenciarão consideravelmente o fenômeno. Holman (1983) sugere o seguinte critério para análise:

$$Gr / Re^2 \geq 1 \quad ? \quad \text{calor se transfere principalmente por convecção natural.} \quad (2.77)$$

A condução de calor através das paredes pode chegar a ser o principal fator de perda para o caso em estudo. Ocorre conforme a capacidade dos materiais em transportar esta energia, isto é, conforme a sua condutividade térmica (k). Este fenômeno se desenvolve de forma análoga à passagem da corrente elétrica. O fluxo térmico (q) é calculado pela equação de Fourier:

$$q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.78)$$

onde: - A é a seção transversal do material e

- $\Delta T / \Delta x$ é a variação da temperatura ao longo da distância Δx .

Em superfícies planas o fluxo total de calor, considerando q , k , A e a espessura e constantes, é dado por:

$$q = \frac{kA}{e} (T_2 - T_1)$$

ou

$$q = \frac{kA}{e} (T_2 - T_1) \quad \text{para } (T_2 > T_1) \quad (2.79)$$

A equação acima pode ser escrita em função da resistência térmica (R_T) do meio:

$$R_T = \frac{e}{kA} \quad (2.80)$$

logo:

$$q = \frac{\Delta T}{R_T} \quad (2.81)$$

Nas superfícies circulares, como a seção transversal de tubos e cilindros - ver Figura 2.13 - a área A é igual a $2\pi rL$, sendo r o raio e L o comprimento. Substituindo a equação (2.80), com este valor de área, na equação (2.81) e integrando dentro dos limites r_1 e r_2 obtém-se:

$$q = \frac{2\pi Lk (T_1 - T_2)}{\ln(r_2/r_1)} \quad \text{para } (T_1 > T_2) \quad (2.82)$$

ou

$$R_T = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} \quad (2.83)$$

Em superfícies compostas por vários materiais, a resistência térmica se comporta como um arranjo de resistências elétricas ligadas em série, sendo a resistência total igual à soma de todas elas (ver Figura 2.14):

$$R_{Total} = R_{T1} + R_T + R_3 + \dots \quad (2.84)$$

No Quadro 2.4 são apresentados os valores da condutividade térmica dos materiais comumente empregados nos sistemas de aquecimento de água.

Figura 2.13 – Seção transversal de um corpo cilíndrico.

Figura 2.14– Analogia entre a resistência térmica com a elétrica.

Quadro 2.4 – Valores da condutividade térmica de alguns materiais.

Material	<i>k</i> (W /m.°C)
1 – Tubulações e Reservatórios	
1.1 – Aço carbono zincado a quente (Aço galvanizado)	44,9
1.2 – Cobre	339
1.3 – Policloreto de vinila clorado (CPVC)	0,138
2 – Isolantes	
2.1 – Lã de Vidro	0,038
2.2 – Polietileno expandido	0,035
2.3 – Poliuretano de baixa densidade	0,020

Tanto na convecção forçada como na natural o problema pode ser tratado de forma similar à perda por condução, pois a resistência do filme convectivo é igual ao inverso do coeficiente de transmissão vezes a área:

$$R_T = \frac{1}{Ah_c} \quad (2.85)$$

A perda por radiação corresponde à transmissão de energia térmica de uma região a outra por ondas eletromagnéticas, sem que o espaço intermediário altere seu estado térmico. Os gases monoatômicos e diatômicos como o hélio, oxigênio, nitrogênio, ar, etc. são transparentes às radiações térmicas, logo não têm absortividade nem emissividade.

O estudo da radiação do calor se baseia na definição do "corpo negro" e de leis físicas que regem o fenômeno. O corpo negro é definido como sendo uma superfície onde a absortividade (α) é unitária e a refletividade (ρ_r) e a transmissividade (τ) são nulas. Estes índices representam, respectivamente, a relação entre o fluxo de calor gerado, refletido e transmitido com a radiação total incidente em uma superfície.

Uma superfície real sempre irradia menos que um corpo negro na mesma temperatura. Se a superfície ou corpo tiver emissividade monocromática igual em todos os comprimentos de onda, esta é denominada de "superfície ou corpo cinzento" e a potência emissiva é dada, segundo Holman (1983), por:

$$E = \epsilon_s \cdot \epsilon_b \cdot T^4 \quad (2.86)$$

onde: - ϵ_s é a emissividade ou poder de emissão no equilíbrio térmico e

- ϵ_b é a constante de proporcionalidade de Stephan-Boltzmann, cujo valor é de $4,92 \cdot 10^{-8} \text{ Kcal /m}^2 \cdot \text{h} \cdot (\text{°K})^4$.

O fluxo de calor recebido de uma área A_2 com temperatura T_2 , oriunda de uma área A_1 , com temperatura T_1 é:

$$q_{1-2} = \epsilon_b \cdot A_1 \cdot F_{1-2} (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.87)$$

onde F_{1-2} é o fator de configuração e está relacionado com a posição, a forma geométrica das áreas e a emissividade dos corpos cinzentos. No caso de um corpo envolvido por outro, sendo ambos cinzentos, um com superfície côncava e outro com superfície convexa, como no caso de um reservatório ou uma tubulação que atravessa um ambiente, o fator de configuração é:

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} \quad (2.88)$$

Deve ser observado que o índice 1 da equação acima se refere ao corpo envolvido, ou seja, à superfície irradiante. Se A_2 for muito maior que A_1 a relação A_1/A_2 tende a zero, logo $F_{1-2} \rightarrow \epsilon_{s1}$. Substituindo esta expressão na equação (2.87) obtém-se:

$$q_{1-2} = \epsilon_b \cdot A_1 \cdot \epsilon_{s1} \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.89)$$

Normalmente se utiliza o conceito de condutância térmica de radiação ou coeficiente de transmissão de calor radiante (h_r), que equivale ao coeficiente de transmissão de calor por convecção da equação (2.74). Holman (1983) compara as equações (2.74) e (2.87) e conclui que h_r pode-se expresso por:

$$h_r = \frac{q_{1 \rightarrow 2}}{A_1 (T_1 - T_2)} = F_{1 \rightarrow 2} \frac{\sigma_b (T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2} \quad (2.90)$$

Kreith (1973) propõe um fator de temperatura F_T para a determinação de h_r :

$$h_r = F_{1 \rightarrow 2} F_T \quad (2.91)$$

sendo:

$$F_T = \frac{0,172 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{T_1 - T_2} \quad (2.92)$$

A temperatura na equação (2.92) é dada em graus Rankine. Uma vez determinado o coeficiente h_r , o cálculo da perda da radiação pode ser feito pela equação (2.74) ou pela equação (2.79).

No processo de troca de calor pode ocorrer a combinação de vários, senão de todos, estes mecanismos. Além disto, o calor pode fluir por estruturas compostas de vários materiais como é o caso das tubulações ou dos reservatórios térmicos que são envolvidos por materiais isolantes. A Figura 2.15 mostra uma estrutura composta por três paredes onde a camada interna (e_1) está exposta à água com temperatura (T_1) maior que o ar que envolve a camada externa (T_6). Nestas condições o fluxo de calor que atravessa as paredes, vencendo resistência do filme convectivo interno é igual à soma do fluxo que sai por convecção e radiação na face externa.

As equações que definem o fluxo de calor através do filme convectivo interno e da condução nas paredes são:

$$q = h_c A (T_1 - T_2) = (k_1 A / e_1) (T_2 - T_3) = (k_2 A / e_2) (T_3 - T_4) = (k_3 A / e_3) (T_4 - T_5) \quad (2.93)$$

Figura 2.15 – Distribuição de temperatura e circuito térmico para o fluxo de calor através de uma parede composta.

Cada equação da expressão (2.93) pode ser escrita em termos da resistência térmica podendo ser demonstrado que:

$$T_1 - T_5 = q(R_{T1} + R_{T2} + R_{T3} + R_{T4}) \quad (2.94)$$

O fluxo de calor que chega até a superfície externa das paredes é igual a soma do fluxo através do filme convectivo do ar mais o fluxo da radiação, logo:

$$q = h_{c-ar}A(T_5 - T_6) + \epsilon \cdot A \cdot \sigma \cdot (T_5^4 - T_6^4) \quad (2.95)$$

A equação (2.95) pode ser expressa em termos da resistência térmica de suas parcelas e somada à equação (2.94) resultando:

$$(T_1 - T_6) = q.[R_{T1} + R_{T2} + R_{T3} + R_{T4} + (R_{T5} \cdot R_{T6}) / (R_{T5} + R_{T6})] \quad (2.96)$$

onde $R_{T6} = 1/h_r \cdot A$; ou ainda:

$$q = U \cdot A \cdot (T_1 - T_6) \quad (2.97)$$

onde U é o coeficiente global de transmissão de calor dado por:

$$U = \frac{1}{R_{T1} + R_{T2} + R_{T3} + R_{T4} + \frac{R_{T5} \cdot R_{T6}}{R_{T5} + R_{T6}}} \quad (2.98)$$

Embora o coeficiente global de transmissão de calor exprima as propriedades térmicas de uma maneira mais racionalizada, a dificuldade em sua determinação permanece porque as resistências térmicas dependem das características dos materiais envolvidos, da velocidade dos fluidos onde ocorrem os filmes convectivos, da forma e posição dos corpos em relação ao fluxo e das temperaturas reinantes. Por outro lado, as temperaturas dependem das resistências térmicas.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas, através da NBR 10185/1988, estabelece critérios para a determinação de três parâmetros que caracterizam os reservatórios térmicos para líquidos destinados a sistemas de energia solar. O primeiro é o *coeficiente global de fluxo de calor para o ambiente* (U_R); o segundo é a *capacidade de carga* (C_c) definida como a quantidade de energia que pode ser transferida a um reservatório térmico, durante um certo intervalo de tempo, por uma vazão pré-definida através do reservatório; o terceiro é a *capacidade de descarga* (C_d) definida como a energia que pode ser transferida do reservatório. As equações que definem estes coeficientes estão relacionadas a seguir.

$$U_R = \frac{\dot{m}_u \cdot C_p}{25.3600} \cdot \int_0^{3600} (T_{Re} - T_{Rs}) dt \quad (2.99)$$

onde $\dot{m}_u$ é a vazão através do reservatório que resulta em um volume igual a capacidade do mesmo após quatro horas de escoamento. A temperatura da água na entrada do reservatório neste ensaio é fixada em 25 °C acima da temperatura do ambiente.

$$C_c = \dot{m}_{ca} \cdot C_p \cdot \int_0^{t_c} (T_{Re} - T_{Rs}) dt - U_R \cdot t_c \cdot \frac{1}{t_c} \cdot \frac{(T_{Re} - T_{Rs})}{2} \cdot T_{ar} \cdot dt \quad (2.100)$$

e

$$C_d = \dot{m}_d \cdot C_p \cdot \int_0^t (T_{Rs} - T_{Re}) dt \quad (2.101)$$

onde t_c e t_d são os tempos de cada ensaio de carga e descarga, fixados em duas horas para um primeiro ensaio e quatro horas para o segundo; $\dot{m}_{ca}$ e $\dot{m}_d$ são as vazões em massa de carga e descarga que acumulam um volume igual à capacidade do reservatório durante o período de ensaio.

Estes últimos coeficientes são determinados para as condições de fluxo constante e queda ou elevação da temperatura de 15 °C. Cabe ressaltar que o reservatório não fica exposto à ação dos ventos.

Com objetivo de padronizar os procedimentos de ensaios, a normalização pode criar situações que diferem da operação real do equipamento. Orphelin; Adnot (1997), analisando o gerenciamento da demanda gerada de energia pelos aquecedores de água elétricos, revisaram os critérios adotados na avaliação das perdas térmicas nas normas internacionais e de vários países tais como a IEC-379/1987, ANSI/ASHRAE Standard 118.2/1993, a francesa NFC73-221, a alemã DIN 44532 e a britânica BS5615. Observaram que, devido à estratificação térmica da água e a variação da diferença de temperatura do reservatório com o ar, o coeficiente global de calor pode variar de 0,90 a 0,65 do valor médio diário encontrado nos testes de laboratório. Concluíram que estes testes servem bem ao usuário para análises comparativas sobre o isolamento térmico, mas não dão informações suficientes das perdas reais e as possibilidades de controle.

O coeficiente global de transferência de calor pode ser determinado através do modelo de mistura total, segundo Petrucci (1998), aplicando a equação (2.55), quando a fonte de calor está desligada e não há nenhum outro fluxo no reservatório:

$$\rho V_R C_p d\bar{T}_R(t) = \frac{U_R [\bar{T}_R(t) - T_{ar}]}{dt} \quad (2.102)$$

onde $\bar{T}_R(t)$ é a variação da temperatura média no intervalo dt .

Integrando a equação (2.102) no intervalo de tempo de 0 a t obtém-se:

$$U_R = \frac{\rho V_R C_p}{t} \ln \frac{[\bar{T}_{R_{ini}} - T_{ar}]}{[\bar{T}_{R_f} - T_{ar}]} \quad (2.103)$$

onde $\bar{T}_{R_{ini}}$ e $\bar{T}_{R_f}$ são as temperaturas médias do reservatório no início e no final do intervalo.

2.2.3 – Perda de calor nas tubulações.

As perdas de calor nas tubulações, da mesma forma que nos reservatórios, dependem das temperaturas da água e do ar, do regime de escoamento do líquido, da resistência térmica dos materiais empregados, da velocidade do vento e da posição da tubulação (horizontal, vertical ou inclinada). Esta situação exige uma solução interativa ou de muita complexidade para o concurso de soluções analíticas.

A temperatura da água ao longo do comprimento de uma tubulação que sai de uma fonte de calor, segundo Schultz; Goldschmit (1983), é calculada a partir de um balanço energético em um volume de controle diferencial resultando:

$$k_t A_t + k_w A_w \frac{d^2 T}{dx^2} + m.c. \frac{dT}{dx} - (T - T_{ar}) (h_c + h_r) = 0 \quad (2.104)$$

onde: k é a condutividade térmica, e os índices “t” e “w” indicam as propriedades do tubo e da água, h_c e h_r são os coeficientes de transmissão de calor convectivo e radiante respectivamente.

A equação acima é aplicada para a condição de equilíbrio térmico e fluxo constante no intervalo de tempo considerado. Devido ao fato da queda de temperatura nestas condições ser relativamente pequena, o termo de segunda ordem é desprezado. Desta forma, admitindo a condição de contorno $T_{(x=0)}$ igual à temperatura da tubulação próxima à fonte de calor (reservatório ou coletor), a solução desta equação diferencial resulta em:

$$T(x) = T_a + \frac{T(x_0) - T_a}{\exp\left(\frac{4x}{v \cdot d_i^2 \cdot L \cdot R_{Tot}}\right)} \quad (2.105)$$

onde: x é a distância da seção até a fonte de calor, x_0 é o ponto onde a temperatura é conhecida, v a velocidade da água, R_{Tot} a resistência térmica total nas paredes para o comprimento L e d_i o diâmetro interno da tubulação.

A equação (2.105) foi desenvolvida e verificada experimentalmente pelos autores citados acima para a condição de estado permanente, em tubulações sem isolamento térmico, sujeitas à convecção natural com o ambiente e com saída livre para a atmosfera. As tubulações que unem os coletores ao reservatório não estão sujeitas às mesmas condições e ainda sofrem a influência nas extremidades destes equipamentos que têm maior massa térmica.

O comportamento térmico do escoamento nestas tubulações é avaliado melhor pelo modelo de escoamento "plug-flow" (Duffie; Beckman, 1991). A tubulação é dividida em trechos, conforme descrito para o reservatório no item 2.2.2.1 e ilustrado na Figura 2.12, e de acordo com a massa de água que entra em um dado intervalo de tempo o perfil de temperaturas é calculado.

Quando não há escoamento de fluido na tubulação, o balanço de energia em uma seção qualquer em regime não permanente e desprezando o gradiente de temperatura na direção longitudinal é:

$$(T - T_a)(h_c + h_r) + \rho \cdot d_e \cdot \frac{dT}{dt} \cdot A \cdot C_p \cdot \dot{V} = (T - T_a)(h_c + h_r) + \rho \cdot d_e \cdot \frac{dT}{dt} \cdot A \cdot C_p \cdot \dot{V} \quad (2.106)$$

onde A é a seção transversal do tubo e os índices “ w ” e “ T ” se referem à água e ao tubo respectivamente.

Schultz; Goldschmit (1983) linearizaram a equação (2.106) para pequenos intervalos de tempo, onde o coeficiente de transmissão de calor possa ser considerado constante, e obtiveram:

$$T_t - Tar = (T_0 - Tar) e^{-\frac{t \cdot h \cdot d_e}{A_t \cdot Cp_w + A_t \cdot Cp_T}} \quad (2.107)$$

onde T_0 é a temperatura no instante zero, T_t a temperatura no instante t , Tar a temperatura média do ar entre os dois instantes e h é a soma o coeficiente de transmissão de calor convectivo e o coeficiente de transmissão de calor radiante.

O coeficiente de transmissão de calor pode ser substituído na equação (2.107) em função da resistência térmica total:

$$h = 1 / R_{Tot} \cdot d_e \cdot L \quad (2.108)$$

A equação (2.108) torna-se:

$$T_t - Tar = (T_0 - Tar) e^{-\frac{t}{A_t \cdot Cp_w + A_t \cdot Cp_T \cdot R_{Tot} \cdot L}} \quad (2.109)$$

2.2.4 – Fonte auxiliar de energia

Embora o sistema de aquecimento com energia solar seja de acumulação, isto é, armazene água aquecida durante o período em que há insolação disponível para atender a demanda nos momentos que esta superar a capacidade de aquecimento por

esta fonte de calor, é necessário também contar com uma outra fonte de calor alternativa para períodos de insolação insuficiente.

A segunda fonte de calor pode ser elétrica, a gás ou uma bomba de calor ligada em série. Esta fonte pode estar localizada internamente ao reservatório ou externamente. Quando externa, pode ser de passagem ou de acumulação, sendo mais usual a primeira.

Shariah; Löf(1997) avaliaram o funcionamento de um sistema com fontes auxiliares dentro e fora do reservatório de água quente através da porcentagem de participação do aquecimento solar no volume total aquecido. Quatro perfis de consumo foram comparados. Os autores observaram que: a) para um perfil de consumo contínuo e aleatoriamente distribuído das 6 às 24 horas, a posição da fonte não influencia na porcentagem de participação solar; - b) em um perfil uniforme e contínuo durante 10 horas e para consumos concentrados na parte da manhã e da tarde, o aquecimento externo é mais vantajoso; - c) dobrar o volume armazenado em qualquer caso aumentou no máximo 5% a participação do aquecimento solar; - d) a participação do sol ficou reduzida entre 30 a 40% quando se exigiu um aumento da temperatura na saída do reservatório de 60° C para 80 °C.

O aumento na eficiência em um perfil de consumo diurno e contínuo se deve porque a água aquecida é diretamente aproveitada no momento em que é gerada, diminuindo a oportunidade de perda térmica no armazenamento, e também ao fato que o reservatório está continuamente sendo reabastecido com água fria, portanto, o coletor também recebe água a uma temperatura menor, o que resulta em um aumento no seu rendimento. Já no caso de consumos concentrados de manhã ou à noite, não permanece muito calor armazenado após o consumo, para ser perdido nos longos períodos em que o sistema não é solicitado, desde que a fonte auxiliar também não opere nestes períodos.

A fonte auxiliar pode ter potência fixa, ligar sempre com a potência máxima, ou uma potência variável ou modulada de acordo com a necessidade. Petrucci (1998)

desenvolveu um modelo para modular a potência de um aquecedor de acumulação conjugado a uma fonte externa de calor a gás, em função da potência máxima fornecida e da vazão de circulação entre o reservatório e o aquecedor.

2.3 – Sistemas diretos de aquecimento solar de água

Como exposto anteriormente, os sistemas solares de aquecimento de água podem apresentar quatro configurações distintas. Doravante serão tratados apenas os sistemas diretos com coletores planos, por serem estes o objeto deste estudo.

No sistema passivo a circulação natural no coletor ocorre quando este se aquece o suficiente para estabelecer uma diferença de densidade entre o coletor, o reservatório e o trecho que alimenta o coletor, que gere um gradiente de carga capaz de colocar a água em movimento. A intensidade do fluxo se ajusta ao ganho líquido de energia produzida pela elevação da temperatura e conseqüente variação da densidade.

Segundo Duffie; Beckman (1991), a abordagem deste problema pode ser feita de duas formas. Na primeira, o fluxo é encontrado pela modelagem matemática do sistema onde são considerados os parâmetros que o influenciam tais como: as propriedades e dimensões das partes constituintes, a dependência da densidade com a temperatura e as diferenças de pressões causadas pelas diferenças de densidade. Na segunda, a abordagem consiste em adotar uma diferença de temperatura típica da água entre a saída e a entrada do coletor com a qual a vazão pode ser determinada. Löf; Close (1967) e Cooper (1973) apud Duffie; Beckman (1991) encontram uma diferença de temperatura de aproximadamente dez graus centígrados na qual a vazão natural se estabelece.

Pela segunda abordagem, a vazão do termossifão pode ser determinada pelas equações (2.111-a) ou (2.111-b). A primeira foi obtida igualando-se o fluxo de calor útil no coletor, dado pela equação (2.110), com o fluxo de calor dado pela equação

(2.41) a segunda equação foi encontrada substituindo o valor de Fr , dado na equação (2.44).

$$\dot{Q}_u = \dot{m} C_p (T_s - T_e) \quad (2.110)$$

$$\dot{m} = \frac{A_c [Fr.G_T.(?) + Fr.U_L.(T_e - T_{ar})]}{C_p.(T_s - T_e)} \quad (2.111-a)$$

$$\dot{m} = \frac{-U_L F' A_c}{C_p \ln \left[1 - \frac{U_L (T_s - T_e)}{G_T [h_{a,e} + U_L (T_e - T_{ar})]} \right]} \quad (2.111-b)$$

A modelagem do escoamento por termossifão é feita igualando o gradiente de pressão, gerado pela diferença de densidade, com as forças de resistência ao escoamento. A equação (2.112), chamada de equação do momentum, complementada pela equação (2.113), mostra o resultado da aplicação deste conceito ao esquema da Figura 2.16.

Figura 2.16 – Esquema de um sistema passivo direto.

$$\int_0^{H_1} \rho T_1 dy - \int_0^{H_2} \rho T_2 dy - \int_0^{H_2} \rho T_3 dy - \int_0^{H_1 + H_4} \rho T_4 dy = H_{fi} \quad (2.112)$$

onde H_{fi} é a perda de energia de cada um dos trechos 1, 2 e 4 dado por:

$$H_f = \frac{fLv^2}{2d_i} + k_s \frac{v^2}{2} \quad (2.113)$$

sendo: - f o coeficiente de atrito interno;

- L o comprimento de do trecho;

- v a velocidade do escoamento;

- d_i o diâmetro interno do tubo e

- k_s é coeficiente de perda de carga singular devido aos cotovelos, válvulas, reduções e entradas e saídas das tubulações.

A variação da massa específica ($\rho(T)$) e da viscosidade ($\eta(T)$) com a temperatura são dadas pelas equações (2.114) e (2.115).

$$\rho(T) = 1000,5 - 0,076244T - 0,003498T^2 \quad (\text{kg/ m}^3) \quad (2.114)$$

$$\eta(T) = 0,164323 \cdot 10^{-2} + 0,393398 \cdot 10^{-4}T + 0,43606 \cdot 10^{-6}T^2 + 0,180044 \cdot 10^{-8}T^3 \quad (\text{kg/ m/ s}) \quad (2.115)$$

A equação do momentum descrita anteriormente pode ser aplicada quando se conhece o valor das temperaturas ao longo de todo o circuito, caso contrário, estas temperaturas podem ser determinadas pelo balanço de energia no coletor, nas tubulações e no reservatório como exemplificado nas equações (2.116) e (2.117), apresentadas por Vaxman; Solokov (1986), desenvolvidas sob as seguintes hipóteses:

- ? o escoamento é unidirecional;
- ? os coeficientes de transferências de calor são constantes;
- ? a capacitância térmica da estrutura do sistema é desprezível em relação ao fluido;
- ? a condução de calor é desprezível comparada com a convecção do fluido;

as perdas por atrito no reservatório são desprezíveis.

O fluxo de energia no coletor, em um intervalo de tempo Δt , é:

$$m_e C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{Q_F}{A_l} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} = A_c F' G_T \Delta t \cdot a_e \cdot U_L (T_e - T_{ar}) \quad (2.116)$$

onde A_l é a área total dos tubos no coletor.

Equação do fluxo de energia, no intervalo de tempo Δt , para tubulações e reservatórios:

$$m_i C_p \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{Q_F}{A_i} \frac{\Delta T}{\Delta x} = U_i A_{oi} \Delta T - T_{ar} \quad (2.117)$$

onde: m é a massa; A_{oi} é a área externa do componente e o índice i refere-se ao número do componente considerado.

Vaxman; Solokov (1986) estudaram a inversão do fluxo neste tipo de sistema. Os resultados da simulação feita com a resolução das equações acima mostraram que, pelo menos a ligação entre os coletores e o reservatório, trecho 2 da Figura 2.16, deve ser isolado termicamente para evitar o fluxo reverso e que a eficiência do sistema depende da altura entre o topo do coletor e o fundo do reservatório (H_0). Esta altura, segundo os resultados, deve estar entre 30 e 80 centímetros.

A eficiência do sistema de aquecimento normalmente aumenta com o aumento da energia solar incidente e com a altura relativa do tanque. Huang (1980) demonstrou que, para coletores formados por duas placas paralelas com uma distância Δ entre elas, quando os coeficientes N_e e N_f dados pelas equações (2.118) e (2.119) são maiores que 10^5 , a eficiência independe destes dois fatores.

$$\frac{1}{N_e} = \frac{k_s}{gH_R} \frac{A_c^2}{A_t^2} \frac{U_L^2}{C_p^2} \quad (2.118)$$

$$\frac{1}{N_f} = \frac{\nu_o}{gH_R} \frac{L_c^2}{L_t^2} \frac{8}{3} \frac{L_t}{A_t} \frac{A_c}{A_t} \frac{U_L}{C_p} \quad (2.119)$$

onde: ν_o é a viscosidade cinemática para a temperatura ambiente e os índices c e t referem-se ao coletor e aos tubos, respectivamente.

Outros pesquisadores resolveram o conjunto das equações do momentum e do balanço energético, utilizando vários métodos matemáticos e diferentes formas para o cálculo da perda de carga. Morrison; Tran (1984) utilizaram o método de elementos finitos e a equação (2.120) para cálculo do coeficiente de atrito, e compararam os resultados com seis sistemas experimentais. McGarity; Revelle; Cohon (1984) resolveram o sistema de equações diferenciais com soluções analíticas para o balanço de energia no reservatório. Este desenvolvimento foi mais próximo da condição real, pois foram consideradas a fonte auxiliar de energia e a carga de consumo de água quente. A metodologia desenvolvida foi chamada ANSIM (Analytical Simulation) e comparada com valores de testes e com o modelo de simulação TRNSYS (Transient System Simulation Program). Outro diferencial do modelo ANSIM é que ele foi aplicado em três situações: a) a intervalos de tempo horários admitindo a linearidade das forças atuantes durante este intervalo; b) a intervalos de tempo horários considerando o valor médio das forças atuantes; c) a dois horários diários considerando a taxa de absorção da energia solar, a temperatura ambiente e a carga de consumo representadas por um polinômio do segundo grau.

$$f = \frac{64}{Re} \left(1 + \frac{0,038}{L^{0,96}} \right) \quad (2.120)$$

Huang; Hsieh (1985) desenvolveram um método simplificado que permite o cálculo das variáveis a intervalos de quinze minutos, ao invés de 1 a 40 segundos como normalmente utilizado nos demais métodos, com dados meteorológicos horários. O método é baseado na aproximação de regime quase permanente de Hottel; Whillier; Bliss, descrito por Duffie; Beckman (1991), para o absorvedor e em um levantamento experimental do coeficiente de atrito por uma equação polinomial do segundo grau. A vantagem deste modelo é a redução do tempo de computação, principalmente, para simulações anuais, porém a calibração da equação empírica de perda de carga exige a elaboração de ensaios para cada situação em que o método for aplicado.

Nos sistemas diretos ativos a questão principal é saber qual a vazão ideal nos coletores. As vazões mais elevadas impedem a estratificação térmica no reservatório, e a mistura da água quente com a fria aumenta a temperatura da água que sai para o coletor. Na equação (2.41) pode ser notado que quanto maior a temperatura na entrada do coletor (T_e) menor é o rendimento. Vazões muito pequenas, que permitiriam a perfeita estratificação térmica, segundo Duffie; Beckman (1991), podem conduzir a uma distribuição desigual do fluxo no coletor ocasionando áreas mais quentes, resultando em uma redução no rendimento. Além disto, a temperatura mais elevada provoca maior perda para o ambiente. Para vazões muito pequenas, os autores recomendam substituir a configuração no coletor de tubos paralelos por uma configuração em serpentina.

Duffie; Beckman (1991) alertam que na prática não ocorre nos reservatórios nem a mistura total nem a estratificação total e definem as vazões usuais como elevadas para valores entre 0,6 a 1,2 kg/min.m² e vazões baixas para valores entre 0,12 a 0,42 kg/min.m².

Em sistemas indiretos a recomendação da ASHRAE (1999) é que a vazão no coletor fique entre 0,6 e 1,62 L/min.m².

Foram apresentados neste capítulo os fundamentos teóricos e a revisão bibliográfica sobre os sistemas de aquecimento de água com energia solar em coletores planos, por meio do estudo dos fatores intervenientes em cada componente. Estes conhecimentos foram indispensáveis para o planeamento dos ensaios, o desenvolvimento da metodologia utilizada e a proposição de um modelo de operação para sistemas ativos.

Serão apresentados a seguir os materiais e métodos utilizados na obtenção dos dados e na utilização destes para a avaliação do desempenho dos sistemas ensaiados.

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – Descrição da montagem e equipamentos

Foram montados dois sistemas de aquecimento solar, ambos do tipo direto, abastecidos por um único reservatório de água fria de quinhentos litros. Cada sistema era composto por dois coletores com área unitária de 1,41 metros quadrados e um reservatório de armazenamento de água quente com capacidade nominal de 200 litros, munido com uma resistência elétrica de 1500 Watts e um termostato de controle próprio. Os coletores são do tipo plano, com uma cobertura de vidro e ficaram voltados para a direção norte.

No sistema de aquecimento designado pela letra "B" - ver Figura 3.1- o fluxo de água entre os coletores e o reservatório ocorria pelo efeito de termossifonagem e sem nenhum tipo de controle da vazão. No outro sistema, designado por "A", o escoamento podia ocorrer tanto pelo efeito da termossifonagem como por circulação forçada pela ação de uma eletro-bomba. O controle da vazão era efetuado pela abertura ou fechamento parcial de uma válvula instalada na saída dos coletores. Esta válvula, designada por R4 na Figura 3.2, era acionada por um motor elétrico cujo controle do tempo de funcionamento e sentido de rotação era feito pelo sistema de automação.

Sensores de temperatura, do tipo termo-resistência, foram instalados nas tubulações, coletores e reservatórios de água quente, como pode ser visto nas Figuras 3.2 e 3.3. Nas tubulações as temperaturas da água foram observadas nos seguintes pontos: na entrada e nas saídas do reservatório de água quente; na entrada e na saída do coletor e no trecho de abastecimento do consumo. Nos reservatórios – ver Figura 3.4 - foram inseridos seis sensores distribuídos ao longo de seu comprimento. Nos coletores, a temperatura da superfície do absorvedor foi coletada em um ponto central em relação às laterais e a um terço da altura, em relação à face inferior, conforme indicação da ASHRAE (1986).

Figura 3.1 – Vista frontal da bancada de teste.

Figura 3.2 –Esquema da montagem do sistema "A" (ver símbolos no Quadro 3.1)

Figura 3.3 – Esquema da montagem do sistema "B" (ver símbolos Quadro 3.1)

Quadro 3.1 – Relação dos equipamentos.

Símbolo	Grandeza Medida	Descrição	Faixa de Operação	Observações
R1, R2 e R3	-	-Registro para manutenção.	(1)	(1) Operação manual.
R4	-	-Válvula motorizada	(2)	(2) Abertura / fechamento parcial para controle de vazões.
R5	-	-Válvula para simulação de consumo.	(3)	(3)Válvula solenóide normalmente fechada.
R6	-	-Válvula de proteção anti-congelamento.	(3)	(4) Abertura parcial para mistura de água fria.
R7	-	-Válvula de mistura	(4)	
TR1 a TR6 T1 a T10	Temperatura	Sensor de temperatura	0 - 150°C	Escala: 0,1 °C
V	-	Ventosa: duplo efeito	-	Para fluxo de vapor e ar
VR	-	Válvula de retenção	-	-
TPR	-	Válvula de segurança	-	-
F1	Vazão	Hidrômetro digital	L/s	Vazão nominal = 0,6 m³/h
F2	Vazão	Hidrômetro digital	L/s	Vazão nominal = 1,5 m³/h
W1 e W2	Potência ativa	Transdutor de potência	0 – 2500 W	-
B	-	Bomba centrífuga	25 L/min Hm=42 KPa	Potência máxima 80W
AN	Veloc/ do ar	Anemômetro	0 – 50 m/s	Escala 0,1m/s
Pi	Radiação solar	Piranômetro	0 -1100 W/m²	Inclinação igual a do coletor

O consumo de água foi simulado pela abertura de uma válvula solenóide instalada na extremidade final da tubulação de saída da água quente, cuja temperatura da água era controlada por uma válvula misturadora - ver Figuras 3.2 e 3.3 – e designadas respectivamente por R5 e R7.

Figura 3.4 – Detalhes do reservatório de água quente.

Figura 3.5 – Detalhes dos equipamentos: (1)hidrômetro, (2) válvula motorizada, (3) válvula de mistura e (4) sensor de temperatura na tubulação.

A válvula misturadora utilizada era operada pela ação de um gás que, ao se expandir com a elevação da temperatura, acionava um registro que controlava o fluxo da água fria necessário para se obter a temperatura de mistura desejada. A Figura 3.5 mostra em detalhe alguns destes equipamentos.

A medida da radiação foi efetuada com auxílio de um piranômetro instalado com a mesma inclinação dos coletores. Um sensor de chuva permitia a verificação da ocorrência de precipitação durante os ensaios. A velocidade dos ventos foi medida por um anemômetro tipo concha.

3.1.1 – Escolha da inclinação dos coletores

A inclinação ótima do coletor é a que conduz à maior captação de energia e isto ocorre quando a superfície coletora está perpendicular aos raios solares, isto é, quando o azimute da superfície (θ) é igual ao azimute solar (θ_s) e o ângulo de incidência é nulo ($\theta = 0$). A primeira condição se obtém posicionando a superfície para norte, no hemisfério sul ($\theta = 180^\circ$)⁽²⁾, ou para o sul se a localização for no hemisfério norte ($\theta = 0^\circ$).

Nos coletores planos e fixos, sem rastreamento do movimento aparente do sol, a condição ao longo do ano que resulta em maior tempo de exposição é obtida quando: $\theta = \phi$ (inclinação igual à latitude). Porém no inverno a inclinação deve ser maior para compensar a desfavorável declinação do sol. A escolha de θ deve permitir uma melhor captação no inverno sem provocar prejuízo significativo no desempenho anual do sistema.

A aplicação do equacionamento apresentado no item 2.1 é exemplificada nos Quadros 3.2 a 3.4, e os resultados comparados no Quadro 3.5 e na Figura 3.6, de onde podem ser extraídas as seguintes conclusões:

- a radiação anual total atinge o valor máximo para $\theta = 5^\circ$ a 10° ;
- a radiação total no período crítico (maio, junho e julho) é máxima para $\theta = \phi + 23,45^\circ$ (declinação máxima do sol);
- a declividade ideal se encontra no intervalo $\phi + 23,45^\circ$.

² Para azimute na direção sul

Quadro 3.2 - Cálculo da radiação direta em um plano horizontal e da radiação difusa.

Constantes	Símbolo	Valor	NOTAS:											
Latitude do local (graus)	f	-23,33	(1) Constantes determinadas por NIRENBERG (1991)											
Coeficiente a (1)	a	0,21	(2) Valor estimado para cidades, MONTENEGRO (2000).											
Coeficiente b (1)	b	0,53	(3) ASHRAE (1999)											
Ângulo azimutal (hemisf. sul) (graus)	g	180	(4) Segundo Klein (1977) apud Duffie; Beckman (1991)											
Longitude (graus)	LONG.	46,89	(5) BRASIL- Normais Climatológicas (1992)											
Refletância do solo (albedo) (2)	r	0,2	(6) Equação (2.27).											
Constante solar (W/m ²) (3)	G _{sc}	1367												
Variáveis Independentes	Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	
Dia do ano representativo do mês (4)	n	17	47	75	105	135	162	198	228	258	288	318	344	
Número de horas de insolação no dia (média mensal) (5)	n	4,79	5,16	4,66	4,67	4,92	4,84	5,3	5,05	4,19	4,37	4,82	4,21	
Insolação diária máxima (eq. 2.6)	N	13,27	12,76	12,14	11,45	10,87	10,59	10,72	11,21	11,87	12,56	13,13	13,41	
Variáveis dependentes														
Declinação (eq. 2.1) (graus)	??	-20,92	-12,95	-2,42	9,41	18,79	23,09	21,18	13,45	2,22	-9,60	-18,91	-23,05	
Ângulo horário do pôr-do-sol (eq. 2.5)	? s?	99,49	95,69	91,04	85,90	81,56	79,41	80,38	84,08	89,04	94,18	98,50	100,57	
Radiação extraterrestre global diária no plano horizontal (eq. 2.10) (Wh/m ²)	$\overline{H_o}$	11759	11095	9946,2	8356,4	6923,5	6224,6	6505,1	7680,3	9249,7	10648	11533	11872	
Rad. global na horizontal (Wh/m ²) (6)	$\overline{H}$	4719,8	4707,9	4112,3	3560,7	3114,1	2815,3	3071,1	3446,5	3672,5	4200	4665,4	4468,4	
Índice de nebulosidade (eq. 2.16)	K _T	0,4014	0,4243	0,4135	0,4261	0,4498	0,4523	0,4721	0,4488	0,397	0,3944	0,4045	0,3764	
Radiação difusa (eq. 2.39) (Wh/m ²)	$\overline{H_d}$	2535,1	2361,6	2026,3	1646,3	1332,8	1177,6	1252,4	1509,7	1831	2191,7	2473,9	2525,2	
Verificação da hora do pôr-do-sol na superf. inclinada (eq. 2.38) (radianos)	? "s?	1,7364	1,6702	1,589	1,4992	1,4235	1,3859	1,4029	1,4674	1,5541	1,6438	1,7191	1,7554	

Quadro 3.3 - Cálculo da radiação total no plano inclinado em função da inclinação.

Cálculo para $\theta = 23,3^\circ$													
	Símbolo	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Verificação pôr-do-sol (eq. 2.38) (rad.)	θ_s	1,5710	1,5709	1,5708	1,5707	1,5706	1,5706	1,5706	1,5707	1,5708	1,5709	1,571	1,571
Ângulo do pôr-do-sol - superfície incl. (rad.)	θ'_s	1,5710	1,5709	1,5708	1,4992	1,4235	1,3859	1,4029	1,4674	1,5541	1,5709	1,571	1,571
Relação entre as radiações (eq. 2.37)	Rb	0,8748	0,9464	1,0590	1,2200	1,3803	1,4696	1,4285	1,2844	1,1180	0,9796	0,8921	0,8569
Rad. total no plano inclinado (Wh/m²)	H_T	4381	4524	4186	3944	3762	3559	3824	3964	3845	4104	4366	4124
Rad. total anual no plano inclinado(Wh/m ²)	$\sum H_T$	48585											
Rad. total no período crítico (Wh/m ²)	$\sum H_{Tc}$	11146											

?

?

Quadro 3.4 - Radiação total no plano inclinado em função da inclinação.

Ângulo de inclinação (graus)	$\theta = ?$	0,0	5,0	10,0	13,3	15,0	18,3	20,0	23,3	25,0	28,3	30,0	33,3
Rad. total anual (Wh/m ²)	$\sum H_T$	46554	47424	48060	48349	48458	48588	48614	48585	48528	48338	48200	47853
Rad. total no período crítico (Wh/m ²)	$\sum H_{Tc}$	9000	9561	10071	10377	10458	10792	10919	11146	11252	11437	11521	11661
Ângulo de inclinação (graus)	$\theta = ?$	35,0	38,3	40,0	46,8	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	80,0	90,0	
Rad. total anual (Wh/m ²)	$\sum H_T$	47632	47129	46830	45374	44550	43091	41435	39598	37597	33189	28485	
Rad. total no período crítico (Wh/m ²)	$\sum H_{Tc}$	11723	11819	11856	11928	11917	11842	11699	11488	11211	10466	9388	

?

Figura 3.6 – Radiação total no plano inclinado ao longo do ano.

Quadro 3.5 – Comparação da energia solar disponível em função da inclinação do coletor , tendo como referência ? = Latitude.

Ângulo de inclinação - ? (graus)	Variação da energia total anual (%)	Variação da energia total no período crítico (%)
? = ? = 23,3°	0,0	0,0
? = ? + 5° = 28,3°	-0,5	+2,6
? = ? + 10° = 33,3°	-1,5	+4,6
? = ? + 15° = 38,3°	-3,3	+6,0
? = ? + 23,45° ? 46,8°	-6,6	+6,5

A comparação entre os ganhos de radiação total anual e de radiação recebida no período crítico, destacados no Quadro 3.5, conduziu a escolher o ângulo 33,3°.

3.2 – Sistema de automação

O sistema de automação consiste na aquisição dos dados, monitoramento em tempo real e controle sobre o sistema. O hardware é composto por circuito eletrônico

gerenciador, chamado *daqboard*, conectado diretamente à placa mãe do computador, que recebe as leituras dos instrumentos através de sinais condicionados por circuitos eletrônicos externos. Os circuitos condicionadores possuem funções específicas para cada tipo de leitura ou sinal. A *daqboard* é o elemento de interface entre o software gerenciador e os circuitos condicionadores de sinal e os circuitos que atuam sobre o processo.

A placa do circuito gerenciador possui três portas, a primeira (P1) analógica com oito canais de entrada expansíveis até 256 e dois de saída. A segunda porta (P2) é para a comunicação na forma digital e trabalha com uma velocidade de 16 bits. A terceira porta (P3) contém entradas de contadores de pulso, de frequência e de sinais digitais de alta frequência.

Os circuitos eletrônicos externos estão conectados a *daqboard* segundo suas funções na seguinte forma (ver Figura 3.7):

- porta P1: - quatro placas modelo DBK-9, com oito entradas para a leitura dos sensores de temperatura (RDT) a quatro fios;
 - uma placa modelo DBK-15, que recebe o sinal dos transdutores de tensão do piranômetro e dos transdutores de potência ativa das resistências e da bomba;
- porta P2: - uma placa modelo DBK-25 com oito relês para comando das válvulas solenóides, das válvulas proporcionais e da bomba;
 - uma placa modelo DBK-20 que transmite o sinal a um outro circuito de relês para comando das válvulas restantes;
- porta P3 – uma placa modelo DBK-11, para contar os pulsos do hidrômetro eletrônico e o sinal de estado (Aberto/Fechado) das válvulas proporcionais.

O funcionamento das válvulas produz interferências nos circuitos. Para contornar este problema foi criado um segundo circuito de relês comandados pela DBK-25 para atuarem diretamente sobre as válvulas; instalados vários filtros de linha nos circuitos de alimentação das válvulas e amplificado o sinal do hidrômetro, por um

circuito sugerido pelo fabricante, antes de entrar na DBK-11 . Devido a grande carga instalada na dashboard, modelo 2000, tornou-se necessário conectar uma fonte auxiliar de energia para complementar a alimentação do hardware.

Figura 3.7 – Esquema da configuração do sistema de automação.

Todos os equipamentos do sistema de automação são da marca Iotech, representados no Brasil pela empresa Intercomp Eletrônica Ltda que é também a distribuidora do software utilizado e responsável pela implantação do sistema. O software, DasyLab versão 5.6.02, é um produto específico para este hardware e proporciona boa integração com os programas disponíveis no mercado, facilitando o manuseio dos dados.

3.3 – Cálculo das variáveis intervenientes

3.3.1 – Temperatura média do reservatório de água quente

O reservatório de água quente é munido de seis sensores de temperatura, implantados ao longo de sua dimensão vertical. O volume total do reservatório foi dividido em seis partes proporcionais às alturas médias de água que envolve cada sensor, como

mostrado na Figura 3.8. A temperatura média de cada reservatório é determinada pela média ponderada destes volumes como mostrado a seguir.

Figura 3.8 – Esquema dos reservatórios de água quente

$$\bar{TR} = \frac{\sum_{i=1}^{n?6} \rho_i V_i TR_i}{\sum_{i=1}^{n?6} \rho_i V_i} \quad (3.1)$$

onde : - $\bar{TR}$ é a temperatura média do reservatório;
 - TR_i é a temperatura da água do reservatório no sensor na posição i .

Considerando a variação da massa específica (ρ) desprezível, resultou para o sistema A:

$$\bar{TR} = A \left(\frac{43,65.TR1 + 34,38.TR2 + 36,01.TR3 + 36,19.TR4 + 34,92.TR5 + 33,52.TR6}{218,68} \right) \quad (3.2)$$

Para o sistema B:

$$\bar{T}_R = B \left(\frac{44,52TR1 + 33,48TR2 + 36,01TR3 + 36,01TR4 + 34,457TR5 + 34,21TR6}{218,68} \right) \quad (3.3)$$

3.3.2 – Energia da água quente consumida

A vazão de abastecimento é composta pela mistura da água quente, fornecida pelo reservatório de água quente, com a água fria, efluente do reservatório superior de água fria. Uma válvula termostática (ver Figuras 3.2 e 3.3, válvula R7) tende a manter a temperatura da mistura constante depois de atingida um valor pré-estabelecido. Considerando a água incompressível, o volume total da mistura em um intervalo de tempo Δt é soma dos volumes das duas parcelas que a compõe:

$$V_M = V_{AF} + V_{AQ} \quad (3.4.a)$$

e a energia da mistura (E_M) é a soma das energias das parcelas:

$$E_M = E_{AF} + E_{AQ} \quad (3.4.b)$$

A entalpia do sistema neste caso se resume à energia térmica da massa dada por:

$$E_H = V \cdot \rho \cdot Cp \cdot T \quad (3.4.c)$$

Onde $E=0$ quando $T = 0^\circ\text{C}$. A equação (3.4.b) pode ser reescrita substituindo a equação (3.4.c) para cada caso:

$$V_M \cdot \rho \cdot Cp \cdot T_M = V_{AF} \cdot \rho \cdot Cp \cdot T_{AF} + V_{AQ} \cdot \rho \cdot Cp \cdot T_{AQ} \quad (3.4.d)$$

Sendo ρ e Cp constantes para as temperaturas envolvidas, como admitido anteriormente, e substituindo o valor de V_{AF} da equação (3.4.a) na equação (3.4.d), obtém-se:

$$V_{AQ} = V_M \cdot \frac{T_M - T_{AF}}{T_{AQ} - T_{AF}} \quad (3.5)$$

Substituindo a equação (3.5) na equação (3.4.c), encontra-se a energia liberada do reservatório de água quente, durante um intervalo de tempo de consumo t :

$$E_{AQ} = Cp \cdot V_M \cdot \frac{T_M - T_{AF}}{T_{AQ} - T_{AF}} \cdot T_{AQ} \quad (3.6)$$

Os pontos de medição destas variáveis estão mostrados nas Figuras 3.2 e 3.3. Em função da numeração dos sensores desta Figura, a equação (3.6) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$E_{AQ} = Cp \cdot Q_{F2} \cdot t \cdot \frac{T_8 - T_1}{T_7 - T_1} \cdot T_7 \quad (3.6.a)$$

sendo Q_{F2} a vazão da mistura dada no hidrômetro F2.

Nos primeiros instantes do escoamento para o consumo, a água acumulada nas tubulações pode ter temperaturas em T_7 e T_8 que indicam a não ocorrência da mistura como sugeridas nas equações (3.6) e (3.6.a). Para haver a mistura de água quente com a água fria é necessário que:

$$T_7 > T_8 > T_1 \quad (3.7.a)$$

Nos instantes iniciais da abertura da válvula R5 (Figura 3.2) podem ocorrer a seguintes situações:

- a) $T_7 > T_8 > T_1$ e $T_7 > T_1$ não decorreu, desde a abertura da válvula, tempo e/ou vazão suficiente para vencer a inércia térmica do sistema e do próprio sensor T_8 , E_{AQ} é desprezado:

$$E_{AQ} = 0 \quad (3.7.b)$$

- b) $T_7 \neq T_8 \neq T_1$ e $T_7 \neq T_1$? não decorreu tempo suficiente para a resposta de T_7 , uma vez que este tempo não é exatamente igual para todos os sensores, a estimativa de E_{AQ} neste instante deve ser feita pela temperatura da água no topo do reservatório:

$$E_{AQ} = Cp \cdot Q_{F2} \cdot t \cdot \frac{T_8 - T_1}{T_{R6} - T_1} \cdot T_{R6} \quad (3.7.c)$$

- c) $T_7 \neq T_1$? em qualquer relação entre T_7 e T_8 ($T_7 \neq T_8$ ou $T_7 = T_8$) o tempo decorrido desde o início do escoamento não foi suficiente para alcançar o equilíbrio térmico; nesta circunstância a válvula termostática R7 fecha totalmente o escoamento do ramal de água fria até que T_7 atinja a temperatura desejada resultando:

$$E_{AQ} = Cp \cdot Q_{F2} \cdot t \cdot T_7 \quad (3.7.d)$$

3.3.3 – Energia da água fria que entra no reservatório de água quente

O reservatório de água fria fornece água para mistura da vazão que segue para o consumo e para o reservatório de água quente. O volume de reabastecimento neste último é igual ao volume efluente de água quente, porém, com massas ligeiramente diferentes devido às diferentes massas específicas. As energias da água fria e da água quente que transitam, em um dado intervalo de tempo, no reservatório de água quente, são dadas pela equação (3.4.c) como mostrado abaixo.

$$E'_{AF} = V_{AF} \cdot \rho_{AF} \cdot Cp \cdot T_{AF} \quad (3.8.a)$$

$$E_{AQ} = V_{AQ} \cdot \rho_{AQ} \cdot Cp \cdot T_{AQ} \quad (3.8.b)$$

Dividindo a equação (3.8.a) pela equação (3.8.b) e fazendo $V_{AF} = V_{AQ}$, obtém-se:

$$E'_{AF} = E_{AQ} \cdot \frac{T_{AF} - T_{AQ}}{T_{AF} - T_{AQ}} \quad (3.9.a)$$

Reescrevendo a equação (3.9.a) para as variáveis indicadas na Figura 3.8:

$$E'_{AF} = E_{AQ} \cdot \frac{T_1 - T_{AF}}{T_{R6} - T_{AQ}} \quad (3.9.b)$$

3.3.4 – Energia da água fria utilizada na mistura para o consumo

Conhecer a energia da água fria consumida possibilita a verificação da validade das considerações feitas nas equações (3.7.a) a (3.7.d). A equação da energia em questão é obtida isolando o valor de V_{AQ} na equação (3.4.a) e substituindo-o na equação (3.4.d), resultando:

$$E_{AF} = Cp \cdot Q_{F2} \cdot t \cdot \frac{T_M - T_{AQ}}{T_{AF} - T_{AQ}} \quad (3.10.a)$$

Em termos dos parâmetros da Figura 3.3, a expressão acima passa a ser:

$$E_{AF} = Cp \cdot Q_{F2} \cdot t \cdot \frac{T_8 - T_7}{T_1 - T_7} \quad (3.10.b)$$

As mesmas considerações feitas para os primeiros instantes do escoamento da vazão de consumo no item 3.3.2 são válidas aqui. As equações apresentadas a seguir foram propostas para o cálculo da energia da água fria. Para haver a mistura de água quente e conseqüente aplicação da equação (3.10.b) é necessário que:

$$T_7 \approx T_8 \approx T_1 \quad (3.11.a)$$

Se:

a) $T_7 \approx T_8 \approx T_1$ e $T_7 \approx T_1 \approx E_{AQ} = 0$, então E_{AF} é:

$$E_{AF} \approx C_p \cdot Q_{F2} \cdot t \cdot T_1 \quad (3.11.b)$$

b) $T_7 \approx T_8 \approx T_1$ e $T_7 \approx T_1 \approx$ não decorreu tempo suficiente para a resposta de T_7 , a estimativa de E_{AQ} para este instante deve ser feita pela temperatura da água no topo do reservatório:

$$E_{AF} \approx C_p \cdot Q_{F2} \cdot t \cdot \frac{T_8 - T_{R6}}{T_1 - T_{R6}} \cdot T_1 \quad (3.11.c)$$

c) $T_7 \approx T_1 \approx$ assim como no caso da água quente, a válvula termostática R7 fecha totalmente o escoamento do ramal de água fria até que T_7 atinja a temperatura desejada, portanto:

$$E_{AF} \approx 0 \quad (3.11.d)$$

A energia total da água fria que é consumida pela mistura é:

$$E_M \approx \sum_1^n Q_{F2} \cdot t \cdot C_p \cdot T_M \quad (3.12)$$

Os erros provocados pela inércia térmica, imprecisão das medidas e as perdas de calor conduzem a uma correção dos resultados da equação (3.4.d) da seguinte forma:

$$\sum V_M \cdot C_p \cdot T_M \approx \sum V_{AF} \cdot C_p \cdot T_{AF} + \sum V_{AQ} \cdot C_p \cdot T_{AQ} \quad (3.13.a)$$

$$\sum_1^n Q_{F2} \cdot t \cdot C_p \cdot T_M \approx \sum_1^n E_{AQ} + \sum_1^n E'_{AF} \quad (3.13.b)$$

3.3.5 – Energia Solar

O aproveitamento da energia solar foi avaliado em dois pontos do sistema: no coletor e no reservatório de água quente. No coletor, a energia útil pode ser avaliada pela equação de rendimento obtida em laboratório para regime quase permanente, como estabelece a NBR 10184 de 01/1988, ou pela energia efetivamente ganha pela água ao escoar através deste. A seguir serão detalhados os três métodos utilizados.

3.3.5.1 Energia solar útil no coletor avaliada pela equação da eficiência

A curva de eficiência do coletor, determinada segundo a metodologia estabelecida na NBR 10184, e os parâmetros da equação (2.48) que caracterizam o coletor foram fornecidos pelo fabricante:

$$\eta_c = 65,27 - 536,1 \frac{(T_e - T_a)}{G_T} \quad (3.14-a)$$

$$F'(\theta) = 0,699 \quad (3.14-b)$$

$$F'U_L = 5,739 \text{ (W/}^\circ\text{C.m}^2\text{)} \quad (3.14-c)$$

onde: - η_c é a eficiência reduzida do coletor (%);

- G_T é o fluxo de radiação solar total no plano inclinado (W/m²);

A vazão indicada pela Norma Brasileira para a determinação dos coeficientes acima é de 1 litro/min./ m² de coletor. Para vazões diferentes deste valor, especialmente para valores maiores, é recomendado que os parâmetros $F_r U_L$ e $F_r \eta_{t,a} \eta_n$ sejam corrigidos conforme método descrito no item 2.2.1.

Utilizando os valores fornecidos na equação (3.14.a) e substituindo os dados na equação (2.50) encontra-se seguinte expressão para a vazão Q_{F1} dada em litros por segundo:

$$r = 273,33.Q_{F1} \cdot e^{\frac{1}{255,33.Q_{F1}}} \quad (3.15)$$

O coeficiente b_0 para a correção da transmitância e absortância da cobertura de vidro, devido ao ângulo de incidência (θ) solar, também foi fornecido pelo fabricante e vale 0,072. O coeficiente de correção destas propriedades (K_{ta}), dado pela equação (2.42), é:

$$K_{ta} = \frac{\tau_{ta,e}}{\tau_{ta,n}} = 1 - 0,072 \cdot \frac{1}{\cos \theta} \quad (3.16)$$

Existe um nível crítico de radiação (G_T) utilizável, ou seja, existe uma radiação mínima que resulta em rendimento nulo. A radiação mínima é determinada igualando a equação (3.14) a zero, resultando:

$$G_{Crítico} = 8,214.(T_e - T_a) \quad \text{ou} \quad G_{Crítico} = 8,214.(T_e - T_a) \quad (3.17)$$

Uma vez determinada a relação r , a energia útil no coletor pode ser estimada:

$$E_{Sc} = A_c \cdot G_T \cdot r \cdot (0,657.K_{ta} + 5,361 \frac{T_e - T_a}{G_T}) \quad \text{para} \quad G > G_{crítico} \quad (3.18)$$

3.3.5.2 Energia solar útil recebida pelo reservatório de água quente

A energia solar útil recebida no reservatório é determinada pela diferença de temperatura que o fluxo de água ganha entre seu retorno do coletor (entrada no reservatório) e a saída do reservatório. Ao percorrer as tubulações que interligam o reservatório aos coletores, a água perde calor reduzindo a eficiência do sistema. As vazões nestes circuitos variaram para o sistema A (circulação por bombeamento) de 0,005 a 0,140 L/s e no sistema B (circulação por termossifão) de 0,005 a 0,015 L/s. As velocidades nas tubulações de cobre, DN 20mm, variaram de 0,016 a 0,446 m/s. Isto resulta em números de Reynolds, considerando temperaturas entre 20 e 55 °C, no sistema A entre 318 e 8912 e no sistema B entre 318 e 955. Portanto, o regime de escoamento varia desde a estagnação até o regime laminar, para o sistema B, ou até o escoamento hidraulicamente liso, para o sistema A.

Quando não há escoamento de fluido na tubulação, as estimativas das temperaturas em pontos intermediários das tubulações que interligam os coletores aos reservatórios foram feitas pela expressão desenvolvida por Schultz; Goldschmidt (1983), apresentada no item 2.2 pela equação (2.109) e transcrita na equação (3.19).

$$T_{it} = T_{ar} + (T_0 - T_{ar}) e^{-\frac{t}{\eta_{A.CP} \eta_W + \eta_{A.CP} \eta_P R_{Tot} L}} \quad (3.19)$$

Quando há fluxo de água o modelo de Schultz; Goldschmidt (1983), dado pela equação (2.105) e transcrita na equação (3.20), também é aproximado, pois foi desenvolvido para a condição de escoamento permanente, em tubulações sem isolamento térmico e sujeitas à convecção natural do ar atmosférico e com uma única extremidade aquecida.

$$T(x) = T_{ar} + (T(x_0) - T_{ar}) e^{-\frac{4x}{\eta_{c.v.} d_i^2 L R_{Tot}}} \quad (3.20)$$

As equações (3.19) e (3.20) foram aplicadas apenas para pontos intermediários das tubulações, pois suas extremidades estão conectadas com massas térmicas significativamente maiores que a do escoamento interno. Isto faz com que o valor das temperaturas lidas nos sensores T_6 e T_2 (ver Figuras 3.2 e 3.3) sejam influenciadas pelas temperaturas do reservatório nas respectivas posições e as temperaturas T_5 e T_3 sejam influenciadas pela temperatura do coletor.

A Figura 3.9 mostra como as temperaturas lidas na tubulação de retorno do coletor próxima ao reservatório, T6-B, são diferentes das temperaturas previstas pelas equações acima, chamada na Figura de $T'6-B$, principalmente antes das oito horas e depois das dezesseis horas e trinta minutos. Isto demonstra que, quando não há mais vazão de água quente, a temperatura neste ponto é influenciada pela temperatura do reservatório, representada pela curva TR4-B.

Figura 3.9 – Temperaturas da água no ensaio de 25/04/02: T6-B ponto da tubulação próximo ao reservatório de água quente cuja temperatura é TR4-B; $T'6-B$ prevista pelas equações (3.19) e (3.20); $T''6-B$ prevista pelo modelo “plug-flow”.

Para obter a energia em que a água efetivamente retorna ao reservatório, foi utilizado o modelo “plug-flow”, similar ao descrito para o reservatório no item 2.2.2.1, dividindo a tubulação em três partes como esquematizado na Figura 3.10.

Figura 3.10 – Esquema da subdivisão da tubulação em trechos consecutivos.

Este modelo consiste em admitir que a massa de água que está em cada seguimento se comporte como um corpo sólido; a cada instante este corpo é empurrado pela massa de água que entra na tubulação, ocupando uma posição adiante e deslocando em uma igual distância o corpo da frente. Se no intervalo de tempo considerado a massa de água que entra a montante não ocupa todo o comprimento do trecho, este ficará ocupado em parte por água vinda da seção anterior e parte pela água que já estava no trecho.

Em um dado intervalo de tempo a massa que entra na tubulação é $\dot{m} \cdot t$ gerando uma nova configuração do perfil de temperatura (Figura 3.11).

Figura 3.11 – Escoamento na tubulação pelo modelo "plug-flow".

A cada intervalo de tempo o volume de água que entra na tubulação é comparado com o volume de cada trecho para se determinar o perfil térmico final, como mostrado a seguir.

- a) Se: $\dot{m} \neq \dot{m}_1 + m_2 + m_3$? a temperatura de saída (T_s) e a temperatura média do segmento 2 (T_{1-2}) são:

$$T_s = \frac{1}{\dot{m}} (\dot{m}_3 T_3 + m_2 T_2 + m_1 T_1) \quad (3.21)$$

e

$$T_{1-2} = T_1 + T_f \quad (3.22)$$

onde T_f é a perda de calor encontrada na equação (3.20).

- b) Se: $\dot{m}_2 + m_3 \neq \dot{m} \neq \dot{m}_1 + m_2 + m_3$? apenas uma parte da massa $\dot{m}$ sairá da tubulação, as temperaturas no final do intervalo são:

$$T_s = \frac{1}{\dot{m}} (\dot{m}_3 T_3 + m_2 T_2 + a m_1 T_1) \quad (3.23)$$

T_{1-2} dado pela eq. (3.22) e

$$a = \frac{\dot{m} - \dot{m}_2 - m_3}{m_1} \quad (3.24)$$

- c) Se: $m_3 \neq \dot{m} \neq \dot{m}_2 + m_3$? apenas uma parte da massa $\dot{m}$ sairá da tubulação sendo:

$$T_s = \frac{1}{\dot{m}} (\dot{m}_3 T_3 + a m_2 T_2) \quad (3.25)$$

$$\bar{T}_{1-2} = \frac{\dot{m}_1 + a \dot{m}_2 T_2 + a m_1 (T_1 + T_f)}{m_2} \quad (3.26)$$

$$a = \frac{\dot{m} - \dot{m}_3}{m_2} \quad (3.27)$$

- d) Se: $m_3 \neq \dot{m} \cdot t$ apenas parte da massa m_3 sairá da tubulação, $\bar{T}_{1,2}$ é obtido na equação (3.26), sendo:

$$T_s \neq T_3 \quad \text{e} \quad (3.28)$$

$$a \neq \frac{\dot{m} \cdot t}{m_3} \quad (3.29)$$

As temperaturas em T_1 e T_2 são lidas a cada instante diretamente nos sensores; quando a vazão é nula, a temperatura T_{1-2} é avaliada pela equação (3.19); os comprimentos foram adotados da seguinte forma:

$$L_1 \neq L_3 \neq L_{Total}/4 \quad \text{e} \quad L_1 \neq L_3 \neq 1,0m \quad (3.30-a)$$

$$L_2 \neq L_1 \neq L_3 \quad (3.30-b)$$

A energia solar útil que o reservatório recebe do coletor é:

$$Eu_{SR} \neq Cp \cdot (Q_{FI} \cdot (T_s \neq T_2)) \quad (3.31)$$

A aplicação do equacionamento acima é mostrada na Figura 3.9 representada pela curva de temperatura T"6-B que é quase coincidente com a temperatura T6-B.

3.3.5.3 Energia solar útil no coletor avaliada pela energia absorvida pela água

O conhecimento da vazão e do ganho de temperatura da água que escoar pelo coletor permite avaliar a quantidade de energia efetivamente absorvida da radiação solar. Nas Figuras 3.2 e 3.3, os sensores T_3 e T_5 se localizam, respectivamente, a montante e a jusante dos coletores. Como o sensor T_3 está sob a influência da temperatura do coletor, o cálculo da temperatura efetiva que a água entra neste (T_e) foi feito seguindo

a mesma metodologia do item anterior, isto é, utilizando as equações (3.21) a (3.29). A energia solar útil absorvida em um intervalo de tempo Δt é:

$$Eu_{Sc} = Cp.(Q_{FI} - \rho).(T_s - T_e) \quad (3.32)$$

3.3.6 – Energia elétrica útil

A energia auxiliar utilizada é gerada por uma resistência elétrica, cujo consumo é medido por um transdutor de potência ativa (E_{Er}). A energia útil absorvida pela água (Eu_E) é determinada pela equação que define o rendimento:

$$\eta_R = \frac{Eu_E}{E_{Er}} \quad (3.33)$$

Os rendimentos das resistências foram determinados nos ensaios que avaliaram as capacidades de recuperação dos reservatórios conforme será descrito no item 4.1.2. Foram encontradas as seguintes equações:

$$\eta_A = 1,7.10^{-5}.t^2 + 0,08042.t \quad (R^2 = 0,9402) \quad (3.34-a)$$

$$\eta_B = 1,5.10^{-5}.t^2 + 0,07482.t \quad (R^2 = 0,9936) \quad (3.34-b)$$

$$\eta_A = 0,1047.\bar{T}_{R-A} + 95,783 \quad (R^2 = 0,9402) \quad (3.35-a)$$

$$\eta_B = 0,2023.\bar{T}_{R-B} + 99,503 \quad (R^2 = 0,9429) \quad (3.35-b)$$

Os resultados das equações acima estão em porcentagem e o tempo t é o tempo em segundos a partir do instante em que a resistência é acionada.

3.3.7 – Perdas térmicas do reservatório de água quente utilizando o coeficiente global de perda de calor

O reservatório de água quente está exposto ao ar atmosférico e sujeito as suas variações. A avaliação do coeficiente de transferência de calor foi feita experimentalmente como será descrito no item 4.1.1, sendo obtido os valores de 4,02 W/ °C e 5,16 W/ °C para os reservatórios dos sistemas A e B respectivamente. A perda é estimada pela expressão:

$$E_{FR} = U_R \cdot (\bar{T}_R - T_{ar}) \quad (3.36)$$

3.3.8 – Perdas térmicas no reservatório de água quente devido à recirculação de água no coletor

Após a parada da bomba ou a queda brusca da energia solar disponível no coletor, como acontece no sombreamento por nuvens densas, a massa líquida tende por inércia a continuar seu movimento por alguns instantes. Se a temperatura do coletor cai abaixo da temperatura do reservatório, a água pode retornar com temperatura inferior a da saída e provocar uma perda de calor que influenciará a eficiência global do sistema. Este fenômeno ocorre com vazões menores que as da circulação normal e por pequenos intervalos de tempo, ou seja, até que a energia cinética seja dissipada nas perdas por atrito. Sua avaliação é feita por:

$$E_{RC} = C_p \cdot Q_{F1} \cdot (T_{Re} - T_{Rs}) \cdot t \quad (3.37)$$

onde T_{Re} e T_{Rs} são respectivamente as temperaturas na entrada e na saída do reservatório e Q_{F1} a vazão no medidor F1 da Figura 3.2.

3.3.9 – Energia utilizável

O conceito de energia utilizável é bastante aplicado à intensidade da radiação solar. Como mostrado na equação (3.17), existe uma radiação mínima a partir da qual o coletor começa a aquecer a água, portanto, a radiação só é utilizável para valores acima deste mínimo. Duffie; Beckman (1991) apresentam vários métodos para estabelecer a radiação solar utilizável horária e diária.

Sokolov; Arbel (1992) utilizaram o conceito da energia utilizável, $UE(T^*, t)$, aplicado à energia contida na massa de água acumulada no reservatório no instante t , com temperatura igual ou maior que a temperatura estabelecida para utilização T^* . Segundo estes autores esta grandeza identifica a carga térmica, à temperatura constante T^* , que o sistema pode suportar naquele instante. Sua expressão matemática é:

$$UE(T^*, t) = Cp \cdot m \cdot \bar{T}R \quad \text{se} \quad \bar{T}R \geq T^* \quad (3.38)$$

onde: - Cp é o calor específico da água;
 - $\bar{T}R$ é a temperatura média da água do reservatório e
 - m é a massa de água dentro do reservatório.

3.3.10 – Balanço da energia no reservatório de água quente

O presente estudo se baseia no balanço energético do reservatório de água quente. A energia útil total que o reservatório recebe é a soma da energia da água fria, que entra para o reabastecimento, da energia solar e da energia da fonte auxiliar, como mostrado na equação (2.51) e transcrita abaixo.

$$Eu_R = E'_{AF} + Eu_{SR} + Eu_E \quad (3.39)$$

A variação da energia total no reservatório é igual a soma das energias envolvidas, considerando negativas aquelas que tiram calor, ou seja:

$$\Delta E_R = m.C_p.\Delta T_R + E_{u_R} + (E_{AQ} + E_{FR} + E_{Rc}) \quad (3.40)$$

onde a ΔT_R é a variação da temperatura do intervalo de tempo Δt .

A perda térmica calculada pela equação (3.36) pressupõe que o coeficiente global de perda de calor seja constante ao longo do tempo. Na verdade não é, pois as temperaturas do ar e do reservatório variam simultaneamente, além disso, possíveis rajadas de ventos modificam as condições do entorno do reservatório fazendo com que o coeficiente de transmissão convectivo também altere. As perdas térmicas ao longo do dia foram reavaliadas a partir do rearranjo da equação (3.40):

$$E_{FR} + E_{u_R} + m.C_p.\Delta T_R + E_{AQ} + E_{Rc} \quad (3.41)$$

ou

$$E_{FR} + E_{u_R} + m.C_p(\bar{T}_{R_{t2}} - \bar{T}_{R_{t1}}) + E_{AQ} + E_{Rc} \quad (3.42)$$

onde $\bar{T}_{R_{t2}}$ e $\bar{T}_{R_{t1}}$ representam, respectivamente, as temperaturas médias do reservatório no final e no início do intervalo de tempo Δt , dadas pela equação (3.1).

3.4 – Variáveis de avaliação do desempenho

A avaliação do desempenho geral do sistema pode ser feita através de vários parâmetros que expressam a habilidade que o mesmo tem em aproveitar a energia solar disponível. O rendimento do sistema de captação e armazenamento da energia solar, a parcela de participação desta energia para atender a carga de demanda, a quantidade de água que atinge uma temperatura mínima necessária ao consumo, bem como a fração solar e os coeficientes que indiquem a melhoria da quantidade de

energia disponível em função da operação do sistema são exemplos de variáveis que podem ser utilizadas para análise, conforme descrito abaixo.

3.4.1 – Eficiência do sistema no aproveitamento da energia solar

A eficiência do sistema de captação e transporte da energia solar é definida pela relação da energia útil que chega ao reservatório e a energia solar disponível durante este tempo.

$$\eta_0 = \frac{\int Q_u \cdot dt}{A_c \cdot \int G_T dt} \quad (3.43)$$

onde Q_u é o fluxo da energia útil no reservatório devido à energia solar, G_T o fluxo da radiação solar no plano do coletor e A_c a área do coletor.

3.4.2 – Fração solar

Na análise econômica de um sistema de aquecimento solar de água é fundamental o conhecimento da parcela da necessidade total do sistema que é suprida pela energia solar e da parcela que é suprida pela energia auxiliar.

A necessidade do sistema (L_0) é a carga térmica utilizada no consumo da água quente mais as perdas de calor que ocorrem. Duffie; Beckman (1991) sugerem a seguinte expressão para a fração solar aplicáveis a períodos de tempo de mês ou um ano:

$$F_s = \frac{L_0 - L_E}{L_0} \quad (3.44)$$

onde: L_E é a energia da fonte auxiliar e L_S a energia solar útil.

Quando se trata das energias acumuladas em grandes períodos de tempo, como no caso acima, a diferença na temperatura inicial e final do reservatório resulta em uma variação de energia desprezível. Porém, se a análise é feita no período de um dia esta diferença é considerável, pois o reservatório ao acumular a energia que excedeu as necessidades do dia anterior passa a ter uma reserva de calor que ajuda a suprir a demanda do dia seguinte diminuindo a necessidade das energias solar e elétrica como, por exemplo, quando se alternam dias ensolarados com dias nublados ou chuvosos.

A equação (3.40) em sua forma completa é:

$$?E_R + Eu_{SR} + E'_{AF} + Eu_E + (E_{AQ} + E_{FR} + E_{Rc}) \quad (3.45)$$

Isolando a soma dos parâmetros que representam o consumo de energia da equação acima, chega-se à carga de utilização:

$$L_0 + \eta E_{AQ} + E'_{AF} + \eta E_{FR} + E_{Rc} + ?E_R + Eu_{SR} + Eu_E \quad (3.46)$$

sendo $?E_R$ a variação da energia entre o início e o final do período de tempo considerado. Dividindo ambos os lados da equação (3.46) por L_0 , obtém-se a soma das frações das energias solar e elétrica que abastecem o sistema:

$$1 + \frac{Eu_{SR}}{L_0} + \frac{Eu_E}{L_0} \quad (3.47)$$

A fração solar foi encontrada pela relação:

$$F_S = \frac{Eu_{SR}}{\eta E_{AQ} + E'_{AF} + \eta E_{FR} + E_{Rc} + ?E_R} \quad (3.48)$$

3.4.3 – Fator de carga utilizável

O fator de carga é definido por Sokolov; Arbel (1992) como a razão entre a energia utilizável e a radiação total disponível (equação 3.48). Embora este fator seja parecido com a definição da eficiência, um não deve ser confundido com o outro, alertam os autores. A eficiência reflete a habilidade do sistema em coletar a energia e depende do equipamento e sua configuração, já o fator de carga mede a habilidade do sistema em atender uma dada demanda de energia pela fonte solar.

$$F_L = \frac{\int_0^t U_E(T^*, t) dt}{A_C \cdot \int_0^t G_T dt} \quad (3.49)$$

sendo o numerador da equação (3.49) a energia utilizável resultante da radiação solar obtida pela vazão efluente dos coletores:

$$\int_0^t U_E(T^*, t) dt = \int_0^t \dot{m} C_p (T_R - T^*) dt \quad \text{para } T_R \geq T^* \quad (3.50)$$

3.4.4 – Massa equivalente de água no reservatório

A massa equivalente no instante t , $Me(T^*, t)$, é a quantidade de água que pode ser extraída à temperatura T^* da massa de água m_R , que se encontra no reservatório à temperatura $\bar{T}_R$. Isto é, a energia térmica existente em uma massa m_R no reservatório em um determinado instante equivale à energia térmica contida em uma massa de água Me , à temperatura T^* . Sokolov; Arbel (1992) propuseram:

$$Me(T^*, t) = m_R \cdot \frac{\bar{T}_R - T_e}{T^* - T_e} \quad \text{para } \bar{T}_R \geq T^* \quad (3.51)$$

onde T_e é a temperatura em que a água se encontra ao entrar no coletor quando a vazão é ajustada de forma que a temperatura de saída do mesmo seja exatamente igual a T^* . Este parâmetro foi proposto por Sokolov; Arbel (1992) para representar a quantidade máxima de água aquecida pelo sol, à temperatura T^* , que o sistema pode liberar para satisfazer a carga de demanda em um instante qualquer.

A utilização do conceito de massa equivalente, dada pela equação (3.51), fica restrita a uma única condição de vazão, controlada pela temperatura da saída do coletor. O mesmo raciocínio pode ser empregado se for tomada como referência apenas a temperatura média do reservatório, da água fria e a temperatura de utilização T^* . Neste caso, considerando a massa e o calor específico constante dentro dos limites de utilização deste tipo de sistema, a equação da massa equivalente passa a ser:

$$Me(T^*, t) = m_R \cdot \frac{\bar{T}_R - T_{AF}}{T^* - T_{AF}} \quad \text{para} \quad \bar{T}_{RT} = T^* \quad (3.52)$$

3.4.5 – Coeficiente de melhoria da energia utilizável

O controle das vazões, em sistemas de aquecimento de água com bombeamento, tem por objetivo melhorar a quantidade de água a ser aquecida durante o dia. Uma forma de medir o resultado desta interferência é a relação entre as massas equivalentes de um sistema com controle das vazões e outro sem controle. Esta relação será chamada de Coeficiente de Melhoria da Energia Utilizável ($CMEU(T^*, t)$), dado por:

$$CMEU(T^*, t) = \frac{Me(T^*, t)_c - Me(T^*, t)}{Me(T^*, t)_c} = 1 + \frac{Me(T^*, t)}{Me(T^*, t)_c} \quad (3.53)$$

onde o índice c se refere ao sistema com controle de vazão. Este parâmetro é negativo quando a massa gerada pelo sistema com controle é menor que a massa

gerada pelo sistema sem controle, e positivo em caso contrário. Seu objetivo é medir a melhoria que pode ser alcançada com o controle de vazões.

3.4.6– Relação entre o fator de carga utilizável e a eficiência

A relação entre o fator de carga utilizável e a eficiência definida no item 3.4.1 permite comparar a quantidade de energia utilizável acumulada à temperatura T^* com a energia útil obtida, conforme a equação abaixo. Quando toda a água quente é gerada a uma temperatura maior ou igual a T^* a relação atinge seu valor máximo igual a um.

$$\eta = \frac{Q_L(T^*, t)_c}{Q_0(T^*, t)} \quad (3.54)$$

3.4.7 – Índice de estratificação térmica

A estratificação térmica influencia diretamente o rendimento do sistema. Este índice é proposto para servir de medida do gradiente de temperatura da água dentro do reservatório. Seu cálculo é dado pela equação abaixo.

$$I_E = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(TR_{(i+1)} - TR_i)}{H_i}}{n} \quad (3.55)$$

onde: - I_E é o índice de estratificação ($^{\circ}\text{C}/\text{cm}.$);

- TR_i é a temperatura do reservatório na seção i ($^{\circ}\text{C}$);

- H_i é a distância entre os sensores da seção i e $(i+1)$ (cm) e

- n é o número de seções consideradas.

A análise do índice de estratificação foi realizada entre as seções em que há a circulação da água que escoam pelos coletores, isto é, entre a saída e a entrada do reservatório para os coletores (Ver TR1 a TR4 da Figura 3.8).

Foram descritos neste capítulo os recursos utilizados na pesquisa quanto aos materiais, equipamentos e métodos empregados para o estudo do comportamento dos sistemas de aquecimento de água com energia solar em coletores planos. Os ensaios preliminares destes equipamentos, os resultados dos ensaios programados, as análises dos resultados e o modelo proposto para a operação dos sistemas ativos serão apresentados a seguir.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Ensaios preliminares

Para maior confiabilidade nos dados coletados, foram realizados ensaios para a calibração da instrumentação de medida e controle, apresentados no Anexo A, sendo utilizados os recursos do sistema de aquisição implantado. Nas válvulas de fluxo proporcionais e *on / off*, cuja atuação é controlada pela vazão medida no hidrômetro, foram feitos apenas testes para verificação de seus comandos.

Foram realizados inicialmente ensaios para determinar os parâmetros que caracterizassem os equipamentos quanto às dimensões reais e propriedades. Quanto às dimensões, foi verificada a capacidade real do reservatório de água quente (218,62 Litros) e as dimensões dos coletores (1,41m² de área total). Quanto às propriedades, foram feitos ensaios para estimar o coeficiente global de perda de calor dos reservatórios, o rendimento e capacidade de recuperação da resistência elétrica da fonte auxiliar.

4.1.1 – Avaliação do coeficiente global de perda de calor dos reservatórios

O coeficiente global de perda de calor (U_R) de cada reservatório de água quente foi obtido através de ensaios de resfriamento espontâneo, com leituras de temperatura realizadas com intervalos de tempo de um minuto. Este experimento consistiu em aquecer a água do reservatório próximo à temperatura máxima de operação, desligar a fonte de calor e registrar a queda de temperatura e as condições ambientais ao longo do tempo.

No Quadro 4.1 e 4.2 estão os resultados dos três ensaios realizados. No primeiro ensaio, realizado em janeiro de 2002, a coleta nos dois reservatórios não foi simultânea, por este motivo existe no primeiro Quadro duas colunas para a temperatura do ar. Nos demais experimentos a coleta foi simultânea.

A variação das temperaturas médias horárias ao longo do tempo permitiu estimar o valor médio dos coeficientes, através da equação (2.103), em 4,02 e 5,16 W /°C para os reservatórios A e B, respectivamente. Não foi observada nenhuma relação consistente com a velocidade dos ventos dentro do limite de média horária de 0 a 2,4m/s, como pode ser visto na Figura 4.1, onde estão plotados os dados e as curvas ajustadas para os valores encontrados de U_R .

Figura 4.1 – Resultado dos ensaios de resfriamento espontâneo dos reservatórios constantes dos Quadros 4.1 e 4.2.

Quadro 4.1 – Determinação do coeficiente global de perda de calor. Experimento 1 (Janeiro de 2002).

Período de Tempo (horas)	Temperaturas lidas (°C)				Veloc. do vento		Temp. prevista	
	Res. A (°C)	Res. B (°C)	Ar Res A	Ar Res. B	Res. A (m/s)	Res. B (m/s)	Res. A (°C)	Res. B (°C)
Experimento 1 - (09-01-02 - UA= 4,02 W/°C e UB = 5,16 W/°C)								
0	59,0	63,1	24,5	24,9	0,77	2,52	59,0	63,1
3	57,5	61,8	21,2	24,1	1,88	1,98	55,8	60,4
6	55,1	58,5	20,9	20,7	0,76	0,92	53,6	57,0
9	53,0	56,0	20,8	20,8	0,4	0,96	51,7	54,4
12	51,2	53,8	20,8	20,8	0,77	0,58	50,1	52,1
15	49,5	51,7	21,3	20,8	1,03	0,64	48,7	50,1
18	48,0	49,9	23,6	22,0	1,77	1,39	47,8	48,4
21	47,0	48,7	26,0	24,7	1,57	1,75	47,1	47,2
24	45,9	47,5	25,5	26,1	1,89	1,56	46,3	46,1
27	45,2	45,9	24,1	24,8	1,45	1,78	45,3	44,9

Quadro 4.2 – Determinação do coeficiente global de perda de calor. Experimentos 2 (abril / 2002) e 3 (Maio / 2002).

Período de Tempo (horas)	Temperaturas lidas			Velocidade do vento (m/s)	Temperaturas previstas	
	Res. A (°C)	Res. B (°C)	Ar (°C)		Res. A (°C)	Res. B (°C)
Experimento 2 (12-04-02 - UA= 4,02 W/°C e UB = 5,16 W/ °C)						
0	70,8	66,4	26,1	1,81	70,8	66,4
3	68,7	64,2	24,9	1,01	68,1	63,4
6	65,6	61,0	23,5	0,42	65,4	60,5
9	62,9	58,4	23,0	0,64	63,1	57,9
12	60,5	56,0	22,8	0,51	60,9	55,6
15	58,7	53,8	23,0	1,14	59,0	53,5
18	58,0	51,9	25,1	1,7	57,6	51,9
21	57,6	50,4	25,7	1,86	56,2	50,5
24	57,3	48,8	24,1	2,41	54,7	48,9
27	55,3	47,0	23,1	1,92	53,1	47,3
30	53,6	45,4	22,7	1,8	51,7	45,8
33	52,0	43,9	22,1	0,96	50,2	44,3
36	50,5	42,4	21,4	0,62	48,8	42,9
39	49,1	41,2	22,5	1,68	47,5	41,7
42	47,9	40,4	25,5	2,13	46,5	40,8
45	46,8	39,9	26,2	1,54	45,6	39,9
48	45,9	39,1	24,2	1,49	44,6	39,0
52	44,7	38,1	22,8	0,84	43,3	37,7
54	43,5	37,1	22,5	1,24	42,6	37,1
57	42,3	36,2	21,9	0,89	41,6	36,2
60	41,3	35,3	21,4	1,34	40,7	35,4
Experimento 3 (22-05-02 - UA= 4,02 W/°C e UB = 5,16 W/ °C)						
0	43,1	54,2	17,6	1,50	43,1	54,2
3	42,3	52,8	18,5	2,02	42,3	52,4
6	40,6	50,2	18,6	2,37	41,4	50,6
9	39,1	47,9	17,3	2,03	40,1	48,4
12	37,7	45,7	16,9	1,99	38,8	46,4
15	36,5	43,7	16,2	1,67	37,6	44,4
18	35,5	41,8	15,9	2,12	36,4	42,6
21	35,0	40,0	15,7	1,97	35,3	40,9

4.1.2 – Ensaio de recuperação do reservatório com a fonte auxiliar

Para avaliação do conhecimento da fonte auxiliar de energia, os reservatórios foram submetidos a um aquecimento, com a água a uma temperatura inicial igual à temperatura do ar, produzido exclusivamente pela resistência elétrica durante um período de doze horas.

Este ensaio permitiu conhecer o rendimento da fonte de calor ao longo do tempo em que permanece acionada. Quando a fonte é ligada, a resistência está à temperatura da água e se aquece mais rápido que esta até atingir a temperatura final; a temperatura média do líquido vai aumentando gradativamente e de maneira quase uniforme em todo o reservatório. O rendimento nos primeiros quarenta e cinco minutos é diretamente proporcional ao tempo que a resistência foi acionada, como pode ser observado nas Figuras 4.2 e 4.3. Nos instantes seguintes o rendimento é uma função da temperatura da água. As equações ajustadas às curvas experimentais e os valores médios encontrados estão sintetizados no Quadro 4.3.

Figura 4.2 – Recuperação da temperatura dos reservatórios e eficiência da resistência elétrica.

Figura 4.3 - Eficiência das resistências elétricas nos instantes iniciais de funcionamento.

Quadro 4.3 – Equações de rendimento e valores médios relativos às resistências elétricas dos reservatórios.

Descrição / intervalos de tempo	Valores médios / equações	
	Reservatório A	Reservatório B
Potência elétrica (W)	1678,8	1678,3
Potência útil média (W)	1493,8	1465,5
Rendimento médio em 12 horas (%)	89,0	87,3
Rendimento: $t < 2700$ s (%)	$-0,000017.t^2 + 0,08042.t$ $R^2 = 0,9402$	$-0,000015.t^2 + 0,07482.t$ $R^2 = 0,9936$
Rendimento: $t > 2700$ s (%)	$95,78 - 0,104.T_R$ $R^2 = 0,9402$	$99,50 - 0,2023.T_R$ $R^2 = 0,9429$

Observações: t = tempo em segundos; T_R = temperatura média em °C; R^2 = coeficiente de determinação da regressão.

4.2 – Avaliação do desempenho dos sistemas

Os setenta e dois experimentos realizados no estudo do desempenho dos sistemas de aquecimento de água tiveram duração de vinte e quatro horas e foram submetidos à influência de cinco diferentes perfis de consumo. Os dados estão resumidos no Anexo B. O intervalo de tempo entre cada ciclo de leitura dos dados foi de quinze

segundos, sendo registradas trinta e uma medidas de temperatura, quatro de vazões, três de potência ativa, a radiação solar, a velocidade dos ventos e o tempo.

Os perfis de consumo, mostrados nas Figuras 4.4 a 4.8, se diferenciam na distribuição das vazões ao longo do tempo, mas com volumes diários aproximadamente iguais e foram escolhidos pelos seguintes critérios:

- ? perfil OO – consumo concentrado no final do dia que permite a observação do comportamento diurno do sistema, com ou sem a participação da fonte auxiliar, sem a interferência da descarga de água quente no reservatório;
- ? perfil CC – consumo com uma concentração no período da manhã e um grande pico no final da tarde, extraído de medições feitas em campo por Ilha² (1991) em apartamentos de três quartos;
- ? perfil FG – distribuição mais uniforme ao longo do dia, sem picos significativos, também retirado de medidas feitas em campo por Ilha² (1991);
- ? perfil AA – distribuição e pico concentrado no período da manhã, com pequeno consumo no final do dia para avaliar a capacidade do sistema de atender demandas em um instante qualquer;
- ? perfil BB – situação inversa em relação ao perfil AA, isto é, distribuição e pico concentrado no final do dia e pequeno consumo no período da manhã.

Figura 4.4 – Perfil de consumo OO

Figura 4.5 – Perfil de consumo CC

² Estes dados foram originalmente obtidos com o registro das vazões em intervalos de cinco segundos e integradas em um período de uma hora.

Figura 4.6 – Perfil de consumo FG.

Figura 4.7 – Perfil de consumo AA.

Figura 4.8 – Perfil de consumo BB.

Os dados originais dos perfis CC e FG foram ajustados para que os volumes coincidisse com os dos demais em 180L. Os perfis AA e BB também foram inspirados nos dados do trabalho de Ilha (1991).

O desempenho de um sistema depende do desempenho dos seus componentes, pois o funcionamento de um depende e interfere no funcionamento do outro. No sistema de aquecimento de água por energia solar, o componente mais importante é o coletor solar. Entram também na avaliação o comportamento do reservatório de água quente e as tubulações que interligam os dois.

As tubulações são analisadas quanto à resistência térmica, ou seja, pela quantidade de calor que é perdido pelo fluido transportado ao longo de sua extensão. O

reservatório é analisado quanto ao fluxo de calor perdido para o ambiente e quanto à distribuição das temperaturas em seu interior, isto é, quanto ao perfil térmico com que armazena a energia. A estratificação térmica é importante por duas razões: primeira, porque a água mais aquecida fica mais próxima da saída de consumo, não sendo necessário que todo o reservatório esteja com a temperatura elevada para atender a uma determinada demanda; a segunda razão é que a massa líquida armazenada na parte inferior é a que segue para os coletores e sua temperatura interfere diretamente no rendimento destes.

As variáveis que interferem no desempenho térmico do coletor solar são: a intensidade e duração do fluxo da irradiação eletromagnética total incidente, a temperatura da entrada da água, a temperatura do ar, as características ópticas e térmicas dos materiais com que é construído, a vazão do fluido em seu interior e a velocidade do ar.

Uma vez escolhida a inclinação do coletor e definida sua posição como descrito nos itens 3.1 e 3.1.1, o fluxo e a duração da radiação solar se tornam variáveis independentes. Também são variáveis independentes a temperatura e velocidade do ar. As demais variáveis são dependentes, porém apenas a temperatura de entrada da água e a vazão do fluido podem sofrer intervenções diretas em sua operação.

O rendimento do coletor foi avaliado conforme a NBR 10184 / 88 (ABNT, 1988-a) e está expresso na equação (4.1). É importante ressaltar que o ensaio recomendado por esta norma, cujos critérios estão sintetizados no Quadro 4.4, é para a condição de operação em regime quase permanente.

$$\eta_c = 0,6527 - 5,361 \frac{T_e - T_{ar}}{G_T} \quad (4.1)$$

A equação acima pode ser aplicada a vazões diferentes às de ensaio deste que corrigidas pelo fator r dado pela equação (2.50), tornado-se:

$$\eta_c = 0,6527 - 5,361 \frac{T_e - T_{ar}}{G_T} \quad (4.2)$$

Quadro 4.4 – Síntese dos principais critérios da NBR 10184/88 (ABNT-1988-a) para o ensaio de determinação do rendimento térmico em coletores solares planos.

Variáveis	Valores / variação máxima
Vazão	1 L/min.m ² ± 2%
Temperaturas	
- do ar (T_{ar})	± 1 °C
- de entrada (T_e)	± 0,3 °C
- variação entre a diferença ($T_s - T_e$)*	± 0,6 °C
Radiação solar (G_T)	> 600 ± 50 W/m ²
Velocidade do vento	< 4,5 m/s
* T_s = temperatura de saída da água no coletor	

As equações (4.1) e (4.2) foram aplicadas para três valores de radiação e diversos valores de vazão tendo como resultados os gráficos das Figuras 4.9 e 4.10. Comparadas as famílias de retas em cada gráfico, observa-se que: as declividades das retas são fortemente influenciadas pela radiação solar; o rendimento aumenta à medida que a vazão aumenta; a redução da vazão de teste tem mais influência sobre os rendimentos que o aumento das vazões.

Figura 4.9 – Curvas dos rendimentos do coletor solar: a) com variação da radiação solar (equação 4.1); b) com variação das vazões (L/min.m²) (equação 4.2).

Figura 4.10 – Curvas dos rendimentos do coletor solar para várias vazões (L/min.m²) obtidas da equação (4.2).

A variabilidade do rendimento fica mais evidenciada quando se compara uma situação com baixa vazão e baixa radiação com outra com altos valores de vazão e de radiação. A Figura 4.11 mostra que para um mesmo valor intermediário de $(T_e - T_{ar})/G_T$ o rendimento pode variar em mais de cinquenta por cento.

Figura 4.11 - Curvas dos rendimentos do coletor solar para diferentes vazões (L/min.m²) e radiação solar, obtidas da equação (4.2).

Durante o funcionamento do sistema de aquecimento solar, em um dia qualquer, a insolação pode variar muito devido à nebulosidade, como também pode variar a temperatura do ar. Soma-se a isto a variação da temperatura da água na entrada do coletor que pode elevar-se devido ao aquecimento solar ou à fonte auxiliar, ou pode reduzir caso ocorra consumo de água quente e conseqüente admissão de água fria no reservatório. Como resultado, o rendimento varia consideravelmente.

4.2.1 – Verificação experimental da influência das vazões no rendimento dos coletores

O aumento da vazão tende a melhorar o fator de remoção de calor (equação 2.44), como demonstrado nas Figuras 4.9-b e 4.11, e a reduzir as perdas de calor no coletor e das tubulações para a atmosfera, pois o ganho de temperatura ($T_s - T_e$) torna-se menor. Mas à medida que a vazão cresce a estratificação térmica no reservatório tende a diminuir, fazendo com que a temperatura da parte inferior se eleve mais rapidamente e aumente a relação $(T_e - T_{ar})/G_T$. Por conseguinte, há uma tendência de redução no rendimento durante o período diurno.

As Figuras 4.12 a 4.15 mostram os resultados de quatro ensaios realizados com diferentes vazões, porém com mesmo perfil de consumo (perfil OO) e fonte auxiliar desligada. Cada uma destas figuras representa um ensaio cujos dados estão resumidos no Quadro 4.5.

Quadro 4.5 – Resumo das principais variáveis dos ensaios mostrados nas Figuras 4.12 a 4.15.

Figura	Data do ensaio	Vazão média no coletor (kg/m ² .min)		Massa total no coletor (kg)		Rendimento global no dia (%)				$T_s - T_e$ (°C)			
						No coletor		No reservat.		Início do fluxo		Médio	
		Sistema		Sistema		Sistema		Sistema		Sistema		Sistema	
		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
4.12	16/10/02	0,215	0,230	315	364	48,2	48,3	42,8	43,1	9,8	4,9	17,9	15,6
4.13	04/02/03	0,777	0,174	677	306	38,7	43,7	36,9	38,5	12,3	7,2	7,6	17,0
4.14	24/02/03	0,326	0,194	326	295	45,7	50,0	43,4	44,5	10,1	4,9	16,0	18,1
4.15	11/02/03	0,105	0,196	154	323	36,4	42,6	33,4	37,0	15,3	5,0	33,9	17,4

No experimento do dia 16/10/02, ambos os sistemas funcionaram por termossifonagem. A abertura do registro que liberava o escoamento para o coletor foi controlada pela diferença de temperatura da água entre a saída do reservatório e a saída do coletor. Esta diferença havia sido adotada de 8 °C e provocou um retardo no início do fluxo, como pode ser visto na Figuras 4.12-a e 4.12-d.

Figura 4.12 – Resultados do ensaio de 16-10-02: a) radiação solar e rendimentos ao longo do dia; b) rendimento em função da diferença de temperatura da água na entrada do coletor e do ar; c) variação da temperatura da água na entrada do coletor, temperatura do ar e vazão de consumo (perfil OO); d) energia térmica ganha pela água em função do tempo.

O produto $\dot{m}C_p(T_s - T_e)$, que é o numerador da equação da eficiência, foi menor no sistema A até às 9:45 horas e maior que o sistema B após este horário. Este aumento

no desempenho do sistema A até o final do dia não foi suficiente para compensar a deficiência inicial. Embora a vazão do sistema B seja pouco maior que a do sistema A, este último manteve uma maior estratificação térmica, resultando em menores temperaturas na entrada do coletor (T_e) como pode ser visto na Figura 4.12-c.

Neste ensaio as vazões dos dois sistemas são muito próximas e as diferenças nos comportamentos pequenas. Nos dois ensaios mostrados a seguir as vazões médias do sistema com bombeamento foram respectivamente 351% e 68% maiores que a vazão do sistema por termossifão.

No experimento do dia 04-02-03, o aproveitamento do calor disponível no coletor do sistema A alcançou valores instantâneos maiores como mostrado nas Figuras 4.13- a e 4.13-d, porém o rendimento global no final do dia foi inferior ao rendimento do sistema B. Neste dia a temperatura do ar elevou-se de 24,2°C para 32,1°C entre as 7:00 horas e 12:30 horas e a intensidade de irradiação solar foi alta, porém sombreada com frequência por nuvens esparsas.

As elevadas vazões do primeiro sistema foram muito intermitentes e provocaram uma rápida retirada de calor do coletor fazendo com que a diferença de temperatura entre a água na saída do reservatório e na saída do coletor atingisse o valor adotado para o desligamento da bomba (4°C), conforme Figura 4.13-c.

Durante o intervalo de tempo decorrido entre duas partidas da bomba, o coletor re-aquece e também perde parte do calor ganho para a atmosfera. Se neste período o sol é encoberto pelas nuvens, o coletor diminui sua temperatura sem contribuir com o sistema de aquecimento de água. Esta situação foi frequente a partir das 10:30 h, quando a variação da radiação foi mais intensa e a temperatura de entrada estava mais elevada. O aumento da temperatura na entrada é consequência da menor estratificação térmica no reservatório.

A grande variação da energia solar disponível e da temperatura do ar repercutiram na relação entre a eficiência do coletor e a expressão $(T_e - T_{ar})/G_T$, como mostrado na

Figura 4.13-b. As inclinações das retas ajustadas por regressão linear foram maiores nas primeiras horas do dia porque parte do calor absorvido pelo coletor ficou nele armazenado e não foi transferido à água. O aumento da temperatura do coletor muito acima da temperatura da água – ver Figura 4.13-c – reduz a eficiência do aquecimento, pois diminui o fator de remoção de calor (Fr).

Figura 4.13 – Resultados do ensaio de 04-02-03: a) radiação solar e rendimentos ao longo do dia; b) rendimento em função da diferença de temperatura da água na entrada do coletor e do ar; c) temperaturas da água na entrada dos coletores, temperatura do ar, temperaturas na saída e na superfície do coletor A e vazão de consumo (perfil OO); d) energia térmica ganha pela água em função do tempo.

Assim como no experimento analisado acima, no dia 24-02-03 também ocorreu uma grande variação na radiação solar, só que neste caso, desde as primeiras horas do dia.

O aproveitamento do calor disponível no coletor do sistema A alcançou poucas vezes valores instantâneos maiores que do outro sistema, conforme Figura 4.14-a e 4.14-d. O rendimento global foi inferior ao rendimento do sistema B. Neste dia a temperatura do ar também se elevou rapidamente de 22,5°C para 32,8°C entre as 7:00 horas e 13:20 horas.

Figura 4.14 – Resultados do ensaio de 24-02-03: a) radiação solar e rendimentos ao longo do dia; b) rendimento em função da diferença de temperatura da água na entrada do coletor e do ar; c) temperaturas da água na entrada dos coletores, temperatura do ar, temperaturas na saída e na superfície do coletor A e vazão de consumo (perfil OO); d) energia térmica ganha pela água em função do tempo.

A vazão do sistema A neste experimento iniciou no período da manhã com um valor médio de 0,372 kg/m².min e foi reduzida após as 10:00 horas para 0,310 kg/m².min.

Embora estas vazões sejam maiores que as do sistema B, não foram tão elevadas nem tão intermitentes como no experimento do dia 04-02-03, por isto as temperaturas do coletor e da água na sua saída (T_s) não oscilaram tanto como no caso anterior, mas foram suficientes para reduzir a estratificação térmica no reservatório a partir das nove horas, como mostrado na curva de temperatura Te -A na Figura 4.14-c.

Nos dois sistemas a relação entre a eficiência do coletor e a expressão $(Te-Tar)/G_T$, como mostrado na Figura 4.14-b, não apresentou nítida diferença entre o período da manhã, devido ao calor absorvido pelo coletor, e o restante do dia. Foi observada uma grande dispersão dos pontos em torno das retas médias obtidas por análise de regressão, como também foram encontrados, para os ensaios realizados, diferentes valores para as inclinações e para os pontos de interseção destas retas com o eixo das abscissas. Estas duas últimas variáveis representam as média dos parâmetros $F_r' U_L$ e $F_r' (??)$ respectivamente. Portanto, em situações transientes não é possível estimar com confiança, nem para o sistema trabalhando por termossifonagem, um único valor que possa representar bem estes pontos durante todo o ensaio.

Nos dois experimentos apresentados acima, foi imposto ao sistema com circulação forçada trabalhar com vazões maiores que a vazão do sistema por termossifão. O ensaio que será apresentado a seguir, de 11-02-03, foi realizado sob o mesmo perfil de consumo, porém com uma vazão média igual a 53,9 % da vazão do termossifão.

Pode ser visto na Figura 4.15-c que a baixa vazão do sistema A fez com que a temperatura de saída da água do coletor fosse alta, atingindo a 90°C, e semelhante à temperatura do próprio coletor. Se, por um lado, esta semelhança em dias com nebulosidade alta evita a perda de calor nos períodos em que não há circulação de água, isto é, entre uma partida e outra da bomba, por outro lado eleva a diferença de temperatura com o ar fazendo aumentar as perdas térmicas do coletor.

Embora a temperatura de entrada da água nos coletores do sistema A tenha permanecido quase todo o tempo abaixo da temperatura do mesmo ponto do sistema B, a eficiência instantânea deste último foi superior durante quase todo o dia,

resultando uma eficiência global também maior, como pode ser visto no gráfico “a” da Figura 4.15. A máxima eficiência resulta do máximo valor do produto $\dot{m}.C_p.(T_s - T_e)$ que o sistema pode alcançar para as condições de exposição dos coletores solares, como confirmado na Figura 4.15-d. Isto significa que, se a vazão diminui muito, a temperatura se eleva, mas o produto entre as duas variáveis é menor que o produto alcançado pelo escoamento por termossifão.

Figura 4.15 – Resultados do ensaio de 11-02-03: a) radiação solar e rendimentos ao longo do dia; b) rendimento em função da diferença de temperatura da água na entrada do coletor e do ar; c) temperaturas da água na entrada dos coletores, temperatura do ar, temperaturas na saída e na superfície do coletor A e vazão de consumo (perfil OO); d) energia térmica ganha pela água em função do tempo.

Neste ensaio, assim como nos demais ensaios descritos anteriormente em que as oscilações da radiação solar é intensa, os parâmetros $F_r' U_L$ e $F_r' (??)$, obtidos respectivamente pela inclinação e pelo ponto de intercessão da reta ajustada com o eixos das abscissas, não representam bem todos os pontos da relação rendimento x $(Te-Tar)/G$, conforme Figura 4.15-b.

4.2.2 – Verificação experimental da influência das vazões de consumo e do acionamento da fonte auxiliar de calor

O efeito do consumo diurno de água quente e do acionamento da fonte auxiliar de calor na eficiência do aquecimento solar de água será visto a seguir, tendo como exemplo os ensaios cujos dados estão resumidos no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 – Resumo das principais variáveis dos ensaios mostrados nas Figuras 4.16 a 4.19 com a fonte auxiliar habilitada.

Figura	Data do ensaio	Vazão média no coletor (kg/m ² .min)		Volume total no coletor (kg)		Rendimento global no dia (%)				T_s-T_e (°C)			
						No coletor		No reservat.		Início do fluxo		Médio	
	Perfil de consumo	Sistema		Sistema		Sistema		Sistema		Sistema		Sistema	
		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
4.16	26/04/02	2,084	0,220	1312	324	31,1	38,6	28,7	32,6	11,7	9,2	3,2	13,5
	FG												
4.17	18/12/02	0,366	0,204	429	312	39,4	39,3	33,0	31,5	10,6	9,8	9,4	14,6
	AA												
4.17	09/01/03	0,565	0,175	569	302	38,1	43,5	35,7	36,5	10,3	5,9	8,8	15,8
	BB												
4.18	07/06/02	2,098	0,226	390	317	27,8	36,8	25,8	32,2	11,7	11,4	6,0	13,9
	CC												

O comportamento do sistema A no ensaio do dia 26-04-02 foi semelhante ao do dia 04-02-03 devido à alta vazão. A diferença se deve ao acionamento da resistência elétrica na madrugada e ao consumo de água quente durante ao dia. Quando o escoamento nos coletores iniciou-se, a temperatura de entrada se elevou rapidamente, pois a água do reservatório já estava aquecida. A cada descarga provocada pelo

consumo entrava no reservatório água fria, que ao circular pelo coletor diminuía novamente a temperatura de entrada “ T_e ” e aumentava o rendimento instantâneo. Porém a grande vazão do sistema bombeado intensificava a mistura da água dentro do reservatório resultando em uma recuperação mais rápida da temperatura de entrada no coletor. Os gráficos da Figura 4.16 mostram claramente este efeito.

Figura 4.16 – Resultados do ensaio de 26-04-02: a) radiação solar e rendimentos ao longo do dia; b) rendimento em função da diferença de temperatura da água na entrada do coletor e do ar; c) temperaturas da água na entrada dos coletores, temperatura do ar, vazão de consumo (perfil FG) e potência das resistências elétricas; d) energia térmica ganha pela água no coletor em função do tempo.

Os altos valores da eficiência em alguns momentos alcançados pelo sistema com bombeamento - ver Figura 4.16-d - não foram suficientes para resultar no final do dia um aproveitamento da energia radiante disponível melhor que o obtido pelo sistema por termossifão. Porém é notória a influência benéfica do consumo de água quente durante o dia na eficiência do sistema de aquecimento solar da água.

Também como nos demais casos, a relação entre a eficiência do coletor e a expressão $(T_e - T_a)/G_T$, mostrada na Figura 4.16-b, teve uma grande dispersão dos pontos em torno das retas médias além de valores diferentes para as inclinações e para os pontos de interseção destas retas com o eixo das abscissas. Isto confirma as observações anteriores de que, em situações transientes, a estimativa de $F_r' U_L$ e $F_r' (??)$ deve ser feita para cada intervalo de tempo e nas condições reinantes durante o ensaio.

Tendo em vista que o rendimento total é proporcional à $\eta_m.C_p.(T_s - T_e)dt$ e não de resultados isolados de alguns pontos, serão apresentados, na discussão a seguir dos demais experimentos, apenas os gráficos “a” e “c” das figuras anteriores.

O perfil de consumo AA tem maior concentração na parte da manhã. O acionamento da resistência elétrica nas primeiras horas do dia é freqüente nesta situação. No ensaio de 18-12-02 o consumo matinal ocorreu entre as 6:31 horas e 8:32 horas e a resistência elétrica foi acionada no mesmo momento que iniciou a circulação de água pelos coletores, às 7:30 horas. Embora houvesse entrada de água fria após o acionamento da resistência, a temperatura total no reservatório subiu de tal forma a aumentar também a temperatura da água de entrada no coletor. O rendimento instantâneo foi reduzido até às 8:40 horas e a partir deste instante começou a aumentar acompanhando o crescimento na energia radiante disponível - ver Figura 4.17 - embora “ T_e ” também continuasse se elevando. Próximo às 12:00 horas ocorreu nova descarga de consumo, a água fria que entrou no reservatório diminuiu novamente a temperatura de entrada “ T_e ” e aumentou o rendimento instantâneo.

A vazão do sistema A foi pouco maior que a vazão do sistema B fazendo com que os resultados da eficiência global no coletor fossem praticamente iguais, mas uma

pequena diferença a favor do primeiro sistema pode ser notada no Quadro 4.6 quanto ao rendimento junto ao reservatório. A maior vazão do primeiro sistema, mesmo sendo de pouca intermitência, fez com que as perdas nas tubulações fossem menores.

Figura 4.17 – Resultados do ensaio de 18-12-02: a) radiação solar e rendimentos ao longo do dia; b) temperaturas da água na entrada dos coletores (Te), temperatura do ar (Tar), vazão de consumo (perfil AA) e potência das resistências elétricas.

O perfil de consumo BB tem maior concentração na parte da tarde, mas a fonte auxiliar de energia foi acionada, no ensaio do dia 09-01-03, das quatro horas até às 5:30 horas, conforme Figura 4.18. As descargas de água quente às 6:30 horas e às 7:30 horas, menores que as descargas correspondentes no perfil de consumo AA, influenciaram pouco na tendência de aumento da temperatura Te , como no experimento do dia 18-12-02 e o comportamento dos sistemas nos dois ensaios foram semelhantes exceto pela vazão imposta ao sistema A no dia 18-12-02 ter sido muito menor que a vazão no dia 09-01-03. Como consequência, a diferença entre a eficiência avaliada no coletor e no reservatório foi muito menor no segundo ensaio, como pode ser observado no Quadro 4.6. O sistema B, por ter uma redução gradual da vazão no final do dia, ao por do sol, consegue aproveitar melhor a baixa radiação solar neste período.

Figura 4.18 – Resultados do ensaio de 09-01-03: a) radiação solar e rendimentos ao longo do dia; b) temperaturas da água na entrada dos coletores (T_e), temperatura do ar (T_{ar}), vazão de consumo (perfil BB) e potência das resistências elétricas.

O experimento do dia 07-06-02, mostrado na Figura 4.19, foi realizado com o perfil de consumo CC que é caracterizado por uma distribuição de vazões concentradas no período da manhã e um grande pico a tarde. Nos momentos em que ocorrem as descargas, a queda da temperatura na parte inferior influencia diretamente o rendimento.

Figura 4.19 – Resultados do ensaio de 07-06-02: a) radiação solar e rendimentos ao longo do dia; b) temperaturas da água na entrada dos coletores (T_e), temperatura do ar (T_{ar}), vazão de consumo (perfil CC) e potência das resistências elétricas.

A vazão do sistema A, quase cinco vezes a vazão do sistema B, foi bastante intermitente e submetia os coletores a longos períodos sem escoamento. O resultado foi uma eficiência no final do dia bem inferior à por termossifão.

O acionamento da fonte auxiliar de energia produz dois efeitos negativos sobre a eficiência da energia solar. O primeiro é a elevação da temperatura do reservatório de água quente de forma homogênea, como visto no item 4.1.2. O segundo efeito é o de aumentar as perdas térmicas por manter a temperatura do reservatório elevada em períodos onde não existe consumo.

4.2.3 – Verificação experimental da influência do controle do acionamento da fonte auxiliar de calor

A fonte auxiliar de calor deve atender às demandas de consumo de água quente que não puderem ser supridas pela energia solar. Seu acionamento, quando feito apenas por um termostato, pode ocorrer em horários em que não há consumo, ou muito tempo antes que este ocorra. Esta situação deve ser evitada para que não haja comprometimento da eficiência dos coletores solares e nem aumento nas perdas de calor no reservatório.

Para poder controlar o acionamento da fonte auxiliar, foram utilizados dois recursos: o primeiro consiste na programação de horários, feita com um “timer”, para habilitar ou não o termostato integrante do reservatório; o segundo recurso consiste no controle por um modelo matemático que calcula o tempo necessário que a resistência deve ser acionada para atender uma demanda prevista nas horas seguintes.

O “timer” apenas limita o horário que a resistência está habilitada a funcionar. Quem decide se ela entrará em operação é o termostato inserido na parte superior do reservatório, segundo limites pré-estabelecidos. Foi fixado como limite inferior 51 °C para o acionamento e, como limite superior, 56 °C para o desligamento. Deve ser

ressaltado que o termostato é colocado a noventa centímetros do fundo do reservatório e a resistência a doze centímetros, como descrito no Anexo A. Portanto todo o volume do reservatório atinge o limite superior.

O modelo de controle, detalhado no Anexo D, avalia o tempo que irá decorrer a partir de um determinado instante até o início do consumo e o compara com o tempo necessário que a resistência irá demorar para elevar a temperatura média atual até a temperatura de utilização (T^*), adotada em 50 °C. Quando o tempo necessário para o aquecimento é atingido, a resistência elétrica é acionada.

O ensaio do dia 19-12-02 foi realizado com o primeiro processo de controle, ou seja, com a programação do “timer”, conforme Figura 4.20. Embora os rendimentos avaliados junto aos reservatórios sejam próximos ($\eta_A = 29,7\%$ e $\eta_B = 30,9\%$), o consumo de energia elétrica no final do dia do sistema A (19.977,3 kJ) foi bem menor que do sistema B (26.589,9 kJ), o que reflete diretamente na fração solar ($F_S - A = 49,8\%$ e $F_S - B = 42,9\%$), ou seja, houve um melhor aproveitamento do calor proveniente da fonte solar para atender as demandas.

Figura 4.20 – Resultados do ensaio de 19-12-02: a) radiação solar e rendimentos ao longo do dia; b) temperaturas médias da água nos reservatórios (TR), temperatura do ar (Tar), vazão de consumo (perfil AA) e potência das resistências elétricas.

A Figura 4.21 mostra o ensaio de 17-01-03, em que o acionamento da resistência foi feito pela metodologia apresentada no Anexo D. Este procedimento liga a resistência elétrica com maior precisão e chegou a interferir na eficiência global ($\eta_A = 31,0\%$ e $\eta_B = 20,6\%$), além de economizar a energia da fonte auxiliar cujo consumo foi de 18.694,4 kJ no sistema A e 39.870,7 kJ no sistema B, resultando em frações solares $F_{S-A} = 53,7\%$ e $F_{S-B} = 21,3\%$.

Figura 4.21 – Resultados do ensaio de 17-01-03: a) radiação solar e rendimentos ao longo do dia; b) temperaturas médias da água nos reservatórios (TR), temperatura do ar (Tar), vazão de consumo (perfil BB) e potência das resistências elétricas.

Outro ensaio que comprova a eficácia do modelo apresentado pode ser visto no Anexo B referente ao dia 27-01-03, realizado em um dia muito nublado, a radiação solar não foi suficiente para que circulasse água pelos coletores, assim, as frações solares foram nulas e a energia elétrica consumida foi de 27.443,3 kJ no sistema A e 54.016,8 kJ no sistema B.

4.2.4 – Observação da estratificação térmica no reservatório de água quente

As principais variáveis que interferem na estratificação térmica de um dado reservatório são: vazão de circulação da água nos coletores e a diferença entre a temperatura da água que entra no reservatório e a sua temperatura interna média. A

primeira variável tem uma influência ambígua, pois a medida que seu valor aumenta tende a melhorar o fator de remoção de calor do coletor e, ao mesmo tempo, a diminuir a estratificação térmica no reservatório, fazendo com que a temperatura da parte inferior se eleve mais rapidamente aumentando a relação $(T_e - T_{ar})/G$. Quanto maior esta relação menor a eficiência do coletor.

O aumento da temperatura de entrada da água no reservatório só é obtido com a redução da vazão, porém se esta se reduz muito a temperatura do coletor e das tubulações se elevam aumentando as perdas para o exterior.

Portanto, a vazão deve ter um valor que não desestabilize a estratificação térmica espontânea do reservatório e nem reduza muito o ganho de temperatura da água que circula pelo coletor.

Hahne; Chen (1998) concluíram que quando o número de Richardson (equação 2.69) é maior que 0,25, o fluxo descendente em um reservatório vertical se comporta como um pistão, empurrando a água de cima para baixo, situação que ocorre em parte da altura do reservatório do sistema estudado. E mostraram que nesta condição, para a velocidade de entrada de até 0,3m/s, a eficiência do reservatório dada pela equação (2.48) é de 97% se a diferença entre a temperatura inicial do reservatório e a temperatura da água de entrada for de 20°C e a eficiência é de 94% se a diferença for de 5°C. As condições dos experimentos realizados por estes autores diferem da realidade dos sistemas estudado quanto à localização e quantidade das aberturas de entrada e saída do reservatório; na condição inicial do reservatório, que estaria com temperatura uniforme, e na vazão permanente e uniforme.

O valor médio do número de Richardson (Ri), calculado com temperatura inicial do intervalo de tempo considerado, variou de 0,4 a 800 atingindo picos de até 7000. Como este adimensional depende da temperatura inicial do reservatório, sua variação é relativa às condições iniciais. Para poder compará-lo com o nível de estratificação térmica, foi proposto um índice de estratificação térmico, dado pela equação (3.55), que mede a variação da temperatura por unidade de altura do reservatório.

Na Figura 4.22 estão as temperaturas dos reservatórios dos dois sistemas durante o ensaio do dia 16-10-02, cujos índices de estratificação térmica e vazões médias são muito próximos. Ao comparar os dados desde ensaio com os do dia 04-02-03, mostrado na Figura 4.23, que foi submetido ao mesmo perfil de consumo e vazões no sistema A muito maior que as anteriores, observa-se que a estratificação térmica do sistema bombeado é pequena em relação aos demais casos, principalmente durante a circulação de água pelo coletor.

a)

b)

Figura 4.22 - Perfil térmico dos reservatórios dos sistemas A e B, ensaio de 16-10-02, com perfil de consumo OO. Temperaturas TR_i tomadas segundo as posições mostradas na Figura 3.8.

a)

b)

Figura 4.23 - Perfil térmico dos reservatórios dos sistemas A e B, ensaio de 04-02-03, com perfil de consumo OO. Temperaturas TR_i tomadas segundo as posições mostradas na Figura 3.8.

Em ambos os exemplos anteriores não houve nenhuma descarga no reservatório durante o processo de aquecimento com energia solar e as resistências elétricas estavam desativadas. Nas Figuras 4.24 e 4.25, correspondentes aos ensaios dos dias 26-04-02 e 18-12-02 respectivamente, observa-se que nos períodos de acionamento da fonte auxiliar, mostrado nas Figuras 4.16 e 4.17, desaparece a estratificação

térmica e apenas a temperatura da parte inferior sofre a influência do reabastecimento do reservatório.

a)

b)

Figura 4.24 - Perfil térmico dos reservatórios dos sistemas A e B, ensaio de 26-04-02, com perfil de consumo FG. Temperaturas TR_i tomadas segundo as posições mostradas na Figura 3.8.

a)

b)

Figura 4.25 - Perfil térmico dos reservatórios dos sistemas A e B, ensaio de 18-12-02, com perfil de consumo AA. Temperaturas TR_i tomadas segundo as posições mostradas na Figura 3.8.

No Quadro 4.7 estão resumidos alguns dados dos ensaios analisados acima. Observa-se que o número de Richardson não pode ser interpretado pelo seu valor absoluto. Nos ensaios com vazões de descarga durante o dia, o índice de estratificação térmica é muito influenciado pela queda de temperatura do fundo do reservatório e apresenta,

em alguns casos, picos desproporcionais à média do ensaio como, por exemplo, nos dias 07-06-02 e 09-01-03 mostrados neste Quadro.

Quadro 4.7 – Valores de algumas das variáveis dos ensaios mostrados nas Figuras 4.12 a 4.25.

Figuras	Data do ensaio	Vazão no reservatório (kg/min)		Índice de estratificação térmica (°C/cm)				(T Re?TRini) (°C)				Eficiência global no reservatório	
				Valor médio		Valor Máximo		Valor médio		Valor Máximo			
	Perfil de consumo	Sistema		Sistema		Sistema		Sistema		Sistema		Sistema	
		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
4.12 4.22	16/10/02 OO	0,606	0,647	0,182	0,162	0,237	0,211	10,1	9,4	16,0	15,3	42,8	43,1
4.13 4.23	04/02/03 OO	2,192	0,487	0,075	0,143	0,099	0,241	5,8	11,2	9,7	20,7	36,9	38,5
4.14	24/02/03 OO	(a) 0,919	0,547	0,190	0,166	0,232	0,231	12,6	11,2	18,5	19,1	43,4	44,5
4.15	11/02/03 OO	0,297	0,564	0,316	0,164	0,426	0,224	24,6	10,4	41,0	17,0	33,4	37,0
4.16 4.24	26/04/02 FG	5,875	0,621	0,063	0,195	0,314	0,389	1,5	4,8	2,3	11,6	28,7	32,6
4.17 4.25	18/12/02 AA	1,032	0,575	0,119	0,141	0,333	0,407	5,1	7,9	6,7	13,1	33,0	31,5
4.18	09/01/03 BB	1,592	0,493	0,170	0,221	0,431	0,387	5,1	7,6	8,9	16,3	35,7	36,5
4.19	07/06/02 CC	5,916	0,636	0,177	0,223	0,522	0,477	2,1	4,7	3,1	10,3	25,8	32,2
4.20	19-12-02 AA	1,297	0,565	0,215	0,147	0,469	0,383	4,1	7,2	6,2	13,5	29,7	30,9
4.21	17-01-03 BB	1,489	(b) 0,438	0,111	0,179	0,251	0,498	4,8	2,1	9,3	13,4	31,0	20,6

Observações: (a) Experimento iniciou com vazão de 1,045 kg/min e reduziu para 0,873 kg/min; (b) dia com alta nebulosidade.

O valor do número de Richardson (Ri) foi sempre superior a 0,25 e a diferença entre a temperatura de entrada e a média do reservatório ($T_{Re} - \bar{T}R_{ini}$), em todos os ensaios, variou de 2,3 °C a 12,8 °C com picos de até 20,7 °C para o sistema por termossifão. Este sistema apresentou uma boa estratificação em todos os casos em que a fonte auxiliar não operou durante o dia. O valor ($T_{Re} - \bar{T}R_{ini}$) > 20 °C, citado por Hahne; Chen (1998) para garantir a estratificação térmica, exigiria uma vazão

através dos coletores muito baixa ao longo do dia, como ocorreu no dia 11-02-03 e conduziu a uma eficiência global menor que a do sistema B.

Será discutida a seguir a variação destes parâmetros, primeiramente para o ensaio do dia 16-10-02, mostrados na Figura 4.26, em que a estratificação térmica foi semelhante nos dois sistemas e posteriormente serão analisadas outras situações. No Quadro 4.8 estão sintetizadas as tendências em cada período de tempo da variação das variáveis intervenientes.

Figura 4.26 – Ensaio do dia 16-10-02: a) índice de estratificação térmica em função do tempo; b) diferença de temperatura na entrada e a média do reservatório; c) número de Richardson em função do tempo; d) vazões em função do tempo. Perfil de consumo OO.

Quadro 4.8 – Comportamentos e tendências das variáveis relacionadas com a estratificação térmica do ensaio de 16-10-02.

Sistema	Intervalo de tempo (horas)	Vazão	$(T Re? \bar{TR}_{ini})$	Ri	Índice de estratificação
A	0:00 – 7:50	Nula	-	-	? Constante
	7:50 – 10:30	Crescente	Crescente	Decrescente	Crescente
	10:30 – 12:00	Crescente	? Constante	Crescente	? Constante
	12:00 – 15:30	Decrescente	Decrescente*	Crescente*	Decrescente
	15:30 – 16:20	Decrescente*	Decrescente*	Decrescente*	Decrescente
	16:20 – 0:00	Nula	-	-	? Constante
B	0:00 – 7:30	Nula	-	-	? Constante
	7:30 – 10:00	Crescente	Crescente	? Constante	Crescente
	10:00 – 12:00	Crescente	? Constante	Crescente	? Constante
	12:00 – 15:30	Decrescente	Decrescente*	Crescente*	Decrescente
	15:30 – 16:22	Decrescente*	Decrescente*	Decrescente*	Decrescente
	16:22 – 0:00	Nula	-	-	? Constante

Observação: - * indica grande variação no período.

A estratificação térmica até o início do escoamento pelos coletores é semelhante nos dois sistemas. A principal diferença no comportamento das variáveis está no momento do início do escoamento. No sistema A, a água começou a circular pelos coletores vinte e cinco minutos após o sistema B e as condições só se tornaram similares às dez horas, conforme Figura 4.26-d. Durante este período de tempo, entre 7:55 horas e 10:30 horas, as vazões correspondentes em cada instante foram menores no primeiro sistema, porém com maior taxa de crescimento. Isto resultou em um número inicial de Richardson maior, pois $(T Re? \bar{TR}_{ini})$ também partiu de um valor maior, mas decrescente com o tempo como mostrado na Figura 4.26-c.

Os gráficos “a”, “b” e “c” da Figura 4.26, bem como os dois gráficos da Figura 4.27, mostram que, para este intervalo do número de Richardson, o índice de estratificação térmica não aumenta na proporção direta de Ri , mas guarda proporcionalidade com $(T Re? \bar{TR}_{ini})$.

No ensaio de 04-02-03, a vazão do primeiro sistema foi muito maior que a vazão no segundo sistema. Nos gráficos “a” e “b” da Figura 4.28, o número de Richardson do sistema A tem ordem de grandeza cem vezes menor que a do outro sistema. A vazão

intermitente do primeiro sistema fez com que seu valor oscilasse continuamente entre 3,5 e 11,3 enquanto a do sistema B decaísse ao longo do tempo.

Figura 4.27 – Ensaio do dia 16-10-02: a) índice de estratificação térmica em função do número de Richardson; b) índice de estratificação térmica em função da diferença de temperatura na entrada e a média do reservatório. Perfil de consumo OO.

A estratificação térmica inicial em ambos os sistemas foi muito pequena e, após o início do aquecimento solar, aumentou seu valor até as 10 horas. A partir deste instante a estratificação do sistema A não melhorou mais até o final do dia como pode ser visto nas Figuras 4.28-c e 4.23-a. No sistema B a estratificação aumentou até às 12:00 horas e aí reduziu proporcionalmente à redução de $(TRe - \bar{TR}_{ini})$, ver gráfico Figura 4.28-f.

Nos gráficos “e” e “f” da Figura 4.28, a variação do índice de estratificação térmica não varia proporcionalmente ao número de Richardson nem com o valor de $(TRe - \bar{TR}_{ini})$ no sistema A, devido ao alto valor e a intermitência da vazão. Já para o sistema com escoamento por termossifão, o comportamento foi semelhante com o do dia 16-10-02, ou seja, o índice de estratificação térmica não aumenta na proporção direta de Ri , mas guarda proporcionalidade com $(TRe - \bar{TR}_{ini})$. Porém esta proporcionalidade não representa uma relação única nos dois experimentos.

Figura 4.28 – Ensaio do dia 04-02-03: a) número de Richardson (Ri) em função do tempo no sistema A; b) Ri em função do tempo no sistema B; c) índice de estratificação térmica (I_E) em função do tempo; d) I_E em função da diferença $(TRe - \bar{TR}_{ini})$; e) I_E em função de Ri ; f) I_E em função de $(TRe - \bar{TR}_{ini})$. Perfil de consumo OO.

Se nos ensaios sem reposição de água fria no reservatório para suprir o consumo de água quente e sem acionamento da resistência elétrica, a estratificação térmica ora aumenta ora diminui com o aumento do número de Richardson, com maior razão ainda nenhuma relação foi encontrada entre estas duas variáveis quando existem estas interferências, como pode ser visto na Figura 4.29.

Figura 4.29 – Ensaio do dia 18-12-02 a) índice de estratificação (I_E) térmica em função do número de Richardson; b) $(T_{Re} - \bar{T}R_{ini})$ em função do tempo; c) I_E em função de Ri; d) I_E em função de $(T_{Re} - \bar{T}R_{ini})$. Perfil de consumo AA.

Foi visto na Figura 4.25 que no período em que houve consumo, das 6:31 às 8:32 horas, a entrada de água fria aumentou a estratificação térmica até a resistência ser

acionada, às 7:30 horas. A partir deste momento a estratificação térmica tende a desaparecer - ver Figura 4.29 - porém, como a energia radiante tende a aumentar gradativamente neste horário, o escoamento nos coletores não cessou e a diferença $(T_{Re} - \bar{T}R_{ini})$ aumentou ao longo do tempo. Só após o desligamento da fonte auxiliar de calor, às 10:00 horas, é que a estratificação começou a se restabelecer e às 12:00 horas foi fortemente acelerada pela nova descarga de água quente ocorrida no reservatório.

No período da manhã a insolação aumenta ao longo do tempo e, para uma mesma vazão, a relação $(T_{Re} - \bar{T}R_{ini})$ também se eleva fazendo com que o índice de estratificação térmica aumente continuamente caso não haja outras interferências no sistema e se for satisfeita as seguintes condições:

$$\left. \begin{array}{l} T_{Re} - \bar{T}R_{ini} \geq 4^{\circ}C \\ e \\ Ri \geq 100 \end{array} \right\} \quad (4.3)$$

Após as doze horas a estratificação térmica tende a reduzir com o decréscimo da energia solar disponível e com a elevação da temperatura média da água do reservatório ocorrida no período da manhã. A variação destas duas últimas variáveis tem como consequência a redução de $(T_{Re} - \bar{T}R_{ini})$. Foi observado que, se neste período do dia as condições expressas em (4.3) forem satisfeitas, a redução da estratificação térmica é pequena ou até é nula por um período de tempo, melhorando o rendimento dos coletores.

A determinação de $\bar{T}R_{ini}$ depende da instalação de sensores dentro do reservatório, aumentando o número de pontos de monitoramento. Se o perfil de estratificação térmica entre o ponto de saída e o de retorno dos coletores fosse linear, esta temperatura média seria ligeiramente menor que a temperatura média da água na tubulação entre os pontos de retorno e saída do reservatório, como expresso na equação (4.4).

$$\overline{TR} = \frac{(T_{Re} + TR_s)}{2} \quad (4.4)$$

À medida que a estratificação térmica se desenvolve, o perfil de temperaturas tende a uma exponencial e a desigualdade da expressão (4.4) se acentua, como pode ser visto na Figura 4.30 onde estas variáveis estão representadas por $TR_{médio}$ e $T_{médio}$, respectivamente. Sem estratificação o perfil de temperaturas é uma reta vertical e maior é a diferença destes termos. Portanto, se a temperatura média do reservatório for substituída pela temperatura média nas tubulações de entrada e saída, o efeito é a favor da segurança, ou melhor, é de garantir a tendência de haver um gradiente térmico no reservatório. A condição (4.3) foi substituída por:

$$\frac{(TR - T_{Re} - TR_s)}{4^\circ C} \leq e^{-\frac{Ri}{100}} \quad (4.5)$$

Figura 4.30 – Perfil de temperatura no reservatório do sistema B: a) experimento de 16-10-02; b) experimento de 04-02-03.

Em suas análises Hahne; Chen (1998) concluíram que para o número de Richardson acima de 0,25 o número de Peclet e o número de Fourier não têm influência na estratificação térmica. Nos dados coletados também não foi encontrada nenhuma

relação consistente do índice de estratificação térmica com estes adimensionais, como pode ser observado nos dados exemplificados nas Figuras 4.31 a 4.33.

Figura 4.31 – Relação entre o índice de estratificação térmica e os números de Peclet e Fourier do ensaio de 16-10-02. Perfil de descarga OO.

Figura 4.32 – Relação entre o índice de estratificação térmica e os números de Peclet e Fourier do ensaio de 04-02-03. Perfil de descarga OO.

Figura 4.33 – Relação entre o índice de estratificação térmica e os números de Peclet e Fourier do ensaio de 18-12-02. Perfil de descarga AA.

4.3 – O modelo proposto

O sistema operando por termossifonagem se aproxima do equilíbrio entre o fluxo de calor solar disponível e o fluxo de calor efetivamente retirado pela água nos coletores e mantém a estratificação térmica durante todo o dia. A vazão registrada pela termossifonagem só não representa a exata proporção em que, para as condições de temperaturas reinantes, o calor retirado no coletor é igual ao fluxo da radiação solar absorvida menos as perdas térmicas, porque parte da energia absorvida é também utilizada para vencer as forças de inércia e de atrito da massa líquida em movimento, como descrito na equação (2.112).

O dimensionamento das tubulações que interligam o reservatório aos coletores tem efeito direto na energia consumida por atrito. Este escoamento ocorreu em regime laminar ($Re < 2200$) tanto nos experimentos por termossifão, como no sistema A quando operado segundo o modelo apresentado.

A comparação dos resultados dos dois sistemas indicaram que, nos sistemas onde necessariamente a circulação de água pelos coletores tem que 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 está entre uma a duas vezes o valor da vazão que ocorria se o sistema estivesse funcionando por termossifonagem em condições favoráveis de desnível e com número reduzido de coletores.

Em aplicações práticas, a quantidade de pontos de monitoração e controle deve ser reduzida ao mínimo necessário, não apenas para a simplificação da operação, mas também devido ao elevado custo de cada ponto instalado. Com este propósito é apresentada a seguir uma metodologia para operação do sistema, que utiliza a monitoração apenas das temperaturas do ar, da água nas tubulações em pontos próximos aos reservatórios e aos coletores, da vazão mássica total nos coletores e da radiação total no plano inclinado.

Esta metodologia se estrutura em três questões básicas:

1. com que diferença de temperatura deve ser iniciada a circulação de água nos coletores solares?
2. qual a vazão inicial para que os parâmetros que regem o processo sejam avaliados e a vazão corrigida para um valor otimizado?
3. qual deve ser a vazão para as condições encontradas em cada intervalo de tempo?

As temperaturas são avaliadas sob dois aspectos: deve haver uma diferença de temperatura da água na saída e na entrada ($T_s - T_e$) do coletor que indique um aquecimento suficiente para o início do escoamento, ou seja, o acionamento da bomba; uma vez iniciado o escoamento, a diferença de temperatura entre o retorno da água e sua saída do reservatório ($T_{Re} - T_{Rs}$) deve manter as condições favoráveis à estratificação térmica e obter um ganho de calor que compense a energia gasta no bombeamento.

O valor da diferença de ($T_s - T_e$) adotado foi a média encontrada para o início do escoamento do sistema por termossifão, cujos resultados estão resumidas no Quadro 4.9. Estes valores se assemelham aos relatados por Löf; Close (1967) e Cooper (1973), apud Duffie; Beckman (1991), que afirmam que a vazão se estabelece para uma diferença aproximada de dez graus centígrados.

Quadro 4.9 – Diferenças de temperaturas entre a entrada e a saída do coletor e vazões ocorridas na circulação natural.

Descrição	Temperaturas ($T_s - T_e$) (°C)			Vazões (QF1-B) (L /min.m ²)				Volume diário (L)
	Média do ensaio	Início do escoa- mento	Valor na eficiência máxima	Média do ensaio	Início do escoa- mento	Valor na eficiência máxima	Valor máximo no ensaio	
Valor médio	15,0	6,9	19,8	0,21	0,05	0,21	0,28	295,1
Desvio padrão	2,4	2,2	5,4	0,03	0,02	0,05	0,03	58,9

Para propiciar a estratificação térmica, foi adotado o valor mínimo da diferença de ($T_{Re} - T_{Rs}$) sugerido na condição (4.5), ou seja, 4 °C.

A vazão deve ser tal que o fluxo de calor no reservatório seja igual ou maior que a potência gasta no bombeamento. Na equação (4.6) o coeficiente k_1 representa a porcentagem mínima desejada de ganho de energia em relação ao consumo da bomba de circulação. Nesta equação está incluso o rendimento térmico das tubulações.

$$\dot{m}_{min} \cdot Cp \cdot (T_{Re} - T_{Rs}) \geq k_1 \cdot \frac{P_b}{(T_{Re} - T_{Rs})} \quad (4.6)$$

onde: - P_b é a potência consumida pelo motor da bomba de recirculação (W);

- $\dot{m}_{min}$ é a vazão total mínima que deve ser bombeada (kg/s);

- T_{Re} é a temperatura da água de retorno dos coletores na entrada do reservatório (°C);

- T_{Rs} é a temperatura da água na saída do reservatório para os coletores (°C);

- $k_1 \geq \frac{\text{ganho de energia solar}}{\text{energia consumida na bomba}}$.

Portanto, a bomba só deve ser acionada para valores de $k_1 \geq 1$, caso contrário estaria consumindo uma energia elétrica maior que o ganho de energia térmica do sistema.

A vazão média mínima neste tipo de coletores, segundo Duffie; Beckman (1991), é de 0,002 kg/s.m². No Anexo B o valor encontrado para a vazão inicial foi de 0,05 a 0,02 kg/min.m², ou 0,00083 a 0,00033 kg/s.m², o valor mínimo que provocou alterações significativas nas temperaturas foi de 0,0011 kg/s.m² ou 0,003 kg/s. Com este valor foram obtidas, das curvas dos rendimentos da bomba e do motor elétrico fornecidas pelo fabricante, uma altura manométrica de 6,0 m.c.a, um rendimento global de 0,23 e calculada uma potência consumida de 0,79 W. Substituindo estes valores na equação (4.6) obtém-se $k_1 \geq 63$, ou seja, a energia térmica aproveitada é

sessenta e três vezes maior que a energia consumida pelo motor da bomba. Portanto, esta verificação é importante em grandes sistemas, onde as perdas nas tubulações e, conseqüentemente, a energia dissipada tornam-se mais significativas podendo reduzir consideravelmente o valor de k_I .

A vazão inicial também deve atender a segunda condição da equação (4.5), isto é, se $Ri > 100$. A equação (2.69) que define o número de Richardson modificada pode ser escrita em função da vazão:

$$Ri = \frac{g \Delta T Re \Delta T_R H_R}{273 \bar{T} x_m / A_t} \quad (4.7)$$

onde H_R é a altura do reservatório; A_t a seção transversal da tubulação e $\bar{T}$ a temperatura média do reservatório.

Substituindo na equação (4.7): os dados iniciais adotados anteriormente para a vazão e para as diferenças de temperaturas, a altura do reservatório de 1,18m e a seção transversal da tubulação, encontra-se um número de Richardson de 1364 se $\bar{T} = 30^\circ C$ e $Ri = 1241$ se $\bar{T} = 60^\circ C$. O que satisfaz plenamente a condição imposta.

O início do escoamento é determinado por ΔT_c e por ele monitorado durante os primeiros instantes. Depois deste tempo são os limites de ΔT_R e do número de Richardson é que irão definir pelo funcionamento ou não da bomba. Estes limites de temperatura estão resumidos no Quadro 4.10. O intervalo de tempo mínimo para que ΔT_R comece a ser verificado é de cinco minutos, que é o valor mínimo da constante de tempo recomendado pela ABNT (1988-a), a quinze minutos. No trabalho foi adotado este último intervalo de tempo.

Os valores mínimos indicados no Quadro 4.10 para variação das temperaturas iniciais nos coletores - ΔT_c entre $5^\circ C$ e $7^\circ C$ - se substituídos na equação (2.110) resultam em um aproveitamento da energia solar entre 20 W/m^2 a 29 W/m^2 para a vazão mínima inicial de $0,001 \text{ kg/s.m}^2$. Esta vazão, como relatado anteriormente,

corresponde a 50% do valor médio mínimo comentado por Duffie; Beckman (1991) para sistemas de baixas vazões e são coerentes com os valores encontrados no Quadro 4.9.

Os limites das diferenças de temperaturas no reservatório e do número de Richardson devem ser verificados para situações diferentes destas como, por exemplo, diferentes relações de altura e diâmetro e em reservatórios horizontais.

Quadro 4.10 – Valores adotados para que o sistema de bombeamento funcione de forma similar ao sistema por termossifão.

Diferença de temperatura	Temperaturas (°C)		
	Valor médio	Valor mínimo	Valor máximo
No coletor: $\Delta T_c = (T_s - T_e)$	16	de 5 a 7 ^(a)	25
No reservatório $\Delta T_R = (T_{Re} - T_{Rs})$	10	4 ^(b)	-

Observações: ^(a) Valor 7 °C foi adotado para o acionamento da bomba e o valor 5 °C para os instantes posteriores até que o controle seja feito por ΔT_R ;
^(b) valor dado pela equação (4.5).

Após o início da circulação de água nos coletores, a vazão e a diferença de temperatura no coletor devem manter uma relação que iguale o fluxo de calor ganho pela água com o fluxo de calor absorvido pelo coletor solar, observados os limites mínimos descritos anteriormente. Matematicamente esta relação pode ser obtida igualando as equações (2.41) com a equação (2.110) resultando na equação (4.8).

$$\dot{m}' \cdot \frac{A_c \cdot G_T \cdot Fr(??) \cdot Fr U_L (T_e - T_{ar})}{C_p \cdot (T_s - T_e)} \quad (4.8)$$

onde $\dot{m}'$ é a vazão aproximada uma vez que os valores disponíveis de $Fr(??)$ e $Fr U_L$ são para as condições de teste em regime quase permanente. Esta vazão aproximada, avaliada para as temperaturas reais do momento, serve para estimar os novos fatores $F_r' \cdot (??)$ e $F_r' \cdot U_L$.

O fluxo de calor útil no coletor é a diferença entre o fluxo total menos as perdas para o ambiente. As perdas correspondem a uma parcela da radiação total e é chamada de energia crítica. Esta energia crítica é encontrada igualando o fluxo de energia útil da equação (2.41) a zero, tendo como resultado a equação (4.9).

$$G_{Tcrítico} = \frac{F_r U_L (T_e - T_{ar})}{F_r (??)} \quad (4.9)$$

A energia útil disponível no coletor, expressa em função da energia crítica, é:

$$Q_u = A_c F_r' U_L (G_T - G_{Tcrítico}) \quad \text{ou} \quad Q_u = A_c F_r' (??) (G_T - r(T_e - T_{ar})) \quad (4.10)$$

onde $F_r' (??)$ é a primeira estimativa para a vazão aproximada $\dot{m}'$ e r dada pela relação (4.11).

$$r = \frac{F_r U_L}{F_r (??)} \quad (4.11)$$

Igualando a equação (4.10) com a equação (2.110) obtém-se a primeira estimativa de $F_r' (??)$:

$$F_r' (??) = \frac{\dot{m}' . C_p . (T_s - T_e)}{A_c . (G_T - r(T_e - T_{ar}))} \quad (4.12)$$

A estimativa de $F_r' U_L$ é feita pela equação (2.45), transcrita na equação (4.13).

$$F_r' U_L = \frac{\dot{m}' C_p}{A_c} \ln \left(\frac{F_r U_L A_c}{\dot{m}' C_p} \right) \quad (4.13)$$

O processo é iterativo, com os primeiros valores de $F_r' (??)$ e $F_r' U_L$ nova vazão $\dot{m}''$ é calculada pela equação (4.8) e determinados novos valores para $F_r'' U_L$ e $F_r'' U_L$ pela aplicação das equações (4.11), (4.12) e (4.13). Com estes últimos fatores a vazão prevista ($\dot{m}_{prev}$) é finalmente encontrada na equação (4.14).

$$\dot{m}_{prev} = \frac{A_c [G_T F_r'' (??) + F_r'' U_L (T_e - T_{ar})]}{C_p (T_s - T_e)} \quad (4.14)$$

A operação do sistema de aquecimento direto e ativo pode ser, para as condições apresentadas acima, resumida nos passos descritos a seguir.

- ? dados de entrada: diferenças de temperaturas nos coletores e no reservatório de acordo com os valores do Quadro 4.10, vazão inicial, coeficiente k_1 e dados dos coletores ($F_r' (??)$ e $F_r' U_L$);
- ? definição do intervalo de tempo entre as leituras do processo (de preferência a cada minuto);
- ? fechamento do registro de controle de vazão e verificação se a bomba está desligada;
- ? leitura das variáveis no início de cada intervalo: T_{Re} , T_{Rs} , T_e , T_s , T_{ar} , G_T , P_b e vazão inicial;
- ? Cálculo de $(Tc)_{real}$, $(TR)_{real}$, $G_{Tcrítico}$ e $\dot{m}_{mín}$;
- ? verificação da vazão: a) se nula, decisão sobre o início do escoamento quando o valor de (Tc) atingir o valor estabelecido e a radiação solar ultrapassar valor crítico dado pela equação (4.9), com a vazão mínima pré-fixada; b) se a vazão não for nula: comparar com a vazão mínima calculada;
- ? verificação quanto à vazão mínima: se a vazão real for menor que a mínima, fechamento parcial do registro e/ou desligamento da bomba; se for maior verificar o tempo;
- ? Verificação do tempo: se forem decorridos menos de quinze minutos do início do escoamento comparação de $(Tc)_{mín}$ com $(Tc)_{real}$, se forem decorridos mais de 15 minutos comparar $(TR)_{mín}$ com $(TR)_{real}$;

- ? se o resultado da comparação $(\Delta T)_{min}$ for maior que $(\Delta T)_{real}$, fechamento parcial do registro e/ou desligamento da bomba; se maior calcular número de Richardson;
- ? sub-rotina B: cálculo da vazão aproximada pela equação (4.8), correção dos fatores F_r'' e $F_r'' U_L$ pela aplicação das equações (4.11), (4.12) e (4.13) com a vazão estimada, cálculo da vazão pela equação (4.14);
- ? comparação da vazão calculada com a vazão lida;
- ? ajuste da vazão pelo acionamento ou desligamento da bomba ou através da abertura ou fechamento de registros;
- ? registro de dados;
- ? reinício das leituras das temperaturas no instante seguinte.

Na Figura 4.34 está o fluxograma do processo descrito acima. As variáveis R_I e Δ_0 referem-se ao(s) registro(s) de controle e à bomba, respectivamente; quando estão inoperantes seus valores são iguais a zero. Ou seja, $\Delta_0 = 0$? bomba desligada; $\Delta_0 = 1$? bomba ligada, $R_I = 0$? registro totalmente fechado. Pode ser utilizado um único registro com controle de fechamento gradual, ou um conjunto de válvulas solenóides em um feixe de tubulações paralelas, com diâmetro inferior ao da tubulação que segue até os coletores, operando em seqüência. No primeiro caso, o registro pode assumir as posições $R_I = 1, 2, 3 \dots n$ -posições de abertura. No segundo caso, no momento em que a bomba é acionada, abre a primeira válvula, $R_I = 1$, a medida da necessidade de aumento na vazão vão se abrindo as demais válvulas, $R_2 = 1, R_3 = 1 \dots R_n = 1$. No fechamento, isto é, na necessidade de redução da vazão ocorre o inverso. A sub-rotina B é o processo iterativo para o cálculo da nova vazão e é mostrada na Figura 4.35.

Este modelo de controle foi aplicado a alguns ensaios e os resultados são mostrados nas Figuras 4.36 a 4.38. Os parâmetros que melhor refletem os resultados alcançados na comparação são: o rendimento global no dia; a estratificação térmica média nos reservatórios e a fração solar, sendo utilizada esta última, quando a fonte auxiliar está habilitada.

Figura 4.34 – Fluxograma da operação do sistema de aquecimento solar de água, com controle de vazão efetuado pelas diferenças de temperatura na entrada e na saída dos coletores e do reservatório.

Figura 4.35 – Sub-rotina B: fluxograma do cálculo da vazão de operação do sistema de aquecimento solar de água.

O experimento da Figura 4.36 foi realizado com perfil de consumo OO, com as fontes auxiliares desabilitadas, exceto por um acionamento acidental ocorrido no sistema A durante 4 minutos às 23:40 horas. O gráfico “a” mostra a maior eficiência do sistema com controle de vazões. No final do dia obteve-se uma eficiência de 44,2% no primeiro sistema contra 41,2% no sistema por termossifão. As vazões obtidas pelo sistema de controle aproximaram-se razoavelmente das vazões previstas pelo modelo como mostrado no gráfico “b” da referida figura. Tanto o fator que representa a porcentagem de calor que a água absorve da radiação solar, $F_r'' (??)$, como o fator que representa a parcela de energia que o coletor perde para o meio ambiente foram maiores no sistema A, conforme gráficos “c” e “d” da Figura 4.36.

A vazão média no sistema A foi 50% maior, mas não prejudicou a estratificação térmica no reservatório – ver gráficos “e” e “d” da Figura 4.36 – e sim fez com que as temperaturas da água na saída do coletor ficassem próximas da temperatura da superfície do absorvedor, como consequência o acréscimo do fator de remoção de calor compensou o aumento do fator $F_r'' U_L$.

O modelo de operação proposto também obteve bons resultados quando o sistema foi submetido a consumos de água quente durante o dia, com a resistência habilitada. O ensaio ilustrado na Figura 4.37 simulou o perfil de consumo AA com a resistência habilitada só pelo termostato, isto é, sem programação do período de tempo. No início da manhã, as primeiras vazões de consumo acionaram as resistências elétricas dos dois sistemas até às 9:50 horas, fazendo com que a estratificação térmica desaparecesse, exceto por algumas quedas momentâneas na temperatura do fundo do reservatório (TR1-A). Se houvesse programação de horário para a habilitação da resistência no sistema A, esta seria desligada logo após o término do consumo às 8:31 horas, propiciando a recuperação da estratificação térmica.

Nesta situação, o tempo que a resistência elétrica permanece acionada em cada sistema depende das condições em que se encontrava o reservatório no início do dia, às 00:00 hora, por isto não houve ganho quanto a fração solar que foi de 51,1% para o sistema com controle de vazões e 51,4% para o sistema B.

Embora o índice de estratificação térmica no sistema A não tenha atingido valores mais altos que os do sistema B, os índices $F_r'' . U_L$ - ver Figura 4.37-d – foram o suficientemente maiores para garantir uma eficiência de 34,4% para o primeiro sistema contra 33,9% no segundo sistema.

No ensaio do dia 11-0-03, mostrado na Figura 4.38, foi simulado o perfil de consumo BB e a programação para o acionamento da resistência. O gráfico “c” desta figura mostra que, logo após o término do consumo, por volta da 9:45 horas - ver gráfico “e” - a resistência no sistema A foi desligada e o aquecimento da água continuou a ocorrer devido à energia solar. A estratificação térmica se manteve menor no primeiro sistema entre as 11:00 horas e 16:30 horas com uma acentuada queda em torno das 15:00 horas, devido às altas vazões que ocorreram neste horário.

Neste último ensaio, o sistema A também obteve bons índices em relação ao sistema B resultando respectivamente em 33,0% e 28,3% para a eficiência global e 59,1% e 56,0% para a fração solar.

Figura 4.36 – Experimento de 20-03-03: a) radiação solar e desempenho dos sistemas; b) vazões reais e previstas nos coletores; c) temperaturas e vazões de consumo no sistema A; d) fator de remoção de calor; e) temperaturas no reservatório do sistema A; f) índice de estratificação térmica nos dois sistemas. Perfil de consumo OO.

Figura 4.37 – Experimento de 07-01-03: a) radiação solar e desempenho dos sistemas; b) vazões reais e previstas nos coletores; c) temperaturas e vazões de consumo no sistema A; d) Fator de remoção de calor; e) temperaturas no reservatório do sistema A; f) índice de estratificação térmica nos dois sistemas. Perfil de consumo AA, sem “timer”.

Figura 4.38 – Experimento de 11-01-03: a) radiação solar e desempenho dos sistemas; b) vazões reais e previstas nos coletores; c) temperaturas e vazões de consumo no sistema A; d) fator de remoção de calor; e) temperaturas no reservatório do sistema A; f) índice de estratificação térmica nos dois sistemas. Perfil de consumo BB, com “timer”.

Em resumo, em todos os casos em que a vazão do sistema A foi igual ou até três vezes maior que a vazão do sistema com circulação de água por termossifão, a eficiência global, avaliada entre a entrada e a saída do reservatório de água quente, do primeiro sistema também foi maior ou igual a do sistema B. O controle do período de acionamento da fonte auxiliar melhora a eficiência global como também a fração solar. A dificuldade neste controle está em conhecer precisamente qual perfil de consumo ocorrerá durante o dia, senão corre-se o risco de, não havendo energia solar disponível, não atender as demandas diferentes do perfil adotado na programação horária.

O controle da vazão do modelo proposto acima foi efetuado pela abertura ou fechamento de uma válvula motorizada com comando de acionamento feito pelo sistema de automação, durante o funcionamento da bomba. A variação da vazão na bomba influencia o seu rendimento, mas não chega a inviabilizar o controle, uma vez que a potência útil recebida do motor elétrico é proporcional ao produto da altura manométrica (H_m) pela vazão (Q_F) dada pela equação (4.15). Portanto quando alguma destas variáveis tende a zero, a potência útil também tende a zero e a potência fornecida pela fonte de energia fica restrita à necessária para vencer as forças de atrito interno e a inércia do conjunto moto-bomba. Por esta razão é recomendado que o registro de recalque de qualquer instalação seja fechado no momento da partida de uma bomba centrífuga.

$$P_{\text{útil}} = \frac{\gamma \cdot H_m \cdot Q_F}{75} \quad (4.15)$$

Onde: - $P_{\text{útil}}$ é a potência útil que a água recebe (Cv);

- γ é o peso específico do líquido (kgf/m³);

- H_m é a altura manométrica da bomba (m.c.a) e

- Q_F é a vazão líquida (m³/s).

Uma outra forma de controlar a vazão pode ser a adoção de um motor com um indutor de velocidade de rotação alterando as características do funcionamento da bomba centrífuga com os seguintes efeitos:

$$\frac{Q_{F1}}{Q_{F2}} \propto \frac{rpm_1}{rpm_2} \quad (4.16- a)$$

$$\frac{Hm_1}{Hm_2} \propto \frac{rpm_1^2}{rpm_2^2} \quad (4.16- b)$$

$$\frac{P_{util1}}{P_{util2}} \propto \frac{rpm_1^3}{rpm_2^3} \quad (4.16- c)$$

onde rpm o número de rotações por minuto e os índices 1 e 2 indicam as diferentes condições de rotação.

A vazão pode também ter um controle de passo, ou seja, um controle efetuado por várias válvulas solenóides instaladas em um feixe de condutos paralelos com diâmetro menor que o previsto para conduzir a água até os coletores. Estas válvulas têm menor custo que as válvulas motorizadas com abertura gradual e são facilmente encontradas no mercado. O acionamento de cada válvula seria feito de acordo com a necessidade de aumentar ou diminuir a vazão, como previsto no modelo de operação proposto.

5 – CONCLUSÕES

Foram estudados experimentalmente os efeitos do controle de vazões em sistemas diretos de aquecimento solar de água, visando desenvolver um modelo de operação para instalações de grande porte, onde o gradiente de temperatura não é suficiente para circular a água pelo efeito da termossifonagem.

Vários experimentos foram realizados comparando o desempenho de um sistema solar de aquecimento de água direto e ativo com outro direto e passivo. Ambos os sistemas foram submetidos às demandas de consumo diferentes, representadas por cinco perfis distintos, e sujeitos ou não a uma fonte auxiliar de energia. O sistema ativo foi operado sob várias condições de temperatura de partida da bomba e de vazões.

Na operação de sistemas de aquecimento desta natureza, o melhor rendimento é encontrado com o equilíbrio entre a vazão, o acréscimo de temperatura da água no coletor e o perfil de temperatura da água do reservatório. Por outro lado, a temperatura com que a água sai do coletor depende da vazão, da radiação solar disponível, da temperatura do ar e da temperatura na entrada do mesmo.

O rendimento do coletor, como visto na equação 2.48, se reduz com o acréscimo da temperatura da água na sua entrada e este acréscimo ocorre a medida que a água que está no fundo do reservatório se aquece. Isto faz com que a manutenção da estratificação térmica seja considerada indispensável para a boa eficiência do sistema.

A estratificação depende da velocidade do escoamento e da diferença entre a temperatura da água de retorno dos coletores e a temperatura interna média do reservatório. Com intuito de observar o comportamento do perfil de temperatura no reservatório vertical em função destas variáveis, funcionando em situação real, foram

determinados e comparados com o índice de estratificação térmica os adimensionais: número de Richardson, de Peclet e de Fourier.

Quando a vazão no coletor é muito grande, a temperatura do coletor aumenta muito acima da temperatura da água e reduz a eficiência do aquecimento, pois diminui o fator de remoção de calor e diminui a estratificação térmica. O número de Richardson tende a reduzir, pois é inversamente proporcional á velocidade (equação 2.69). Este efeito é mostrado na Figura 4.13 do experimento de 04-02-03, onde a vazão média do sistema bombeado foi de $0,274 \text{ kg/min.m}^2$.

O número de Richardson aumenta com a temperatura da água de retorno dos coletores, porém esta ultima temperatura só aumenta com a redução da vazão de circulação nos coletores. Se e a vazão se reduz demasiadamente, as temperaturas do coletor e das tubulações se elevam aumentando as perdas de calor para o exterior.

O valor absoluto do número de Richardson por si só não pôde avaliar a melhora ou não do rendimento do sistema. Para o reservatório vertical utilizado, quando este adimensional é mantido acima de 100 e a diferença de temperatura entre a entrada e a saída da água do reservatório é maior que 4°C , a estratificação térmica tende a se manter constante ou a reduzir menos com a elevação da temperatura interna do reservatório ao longo do dia. A manutenção da estratificação térmica é importante até certa hora do dia, em torno das dezesseis horas, pois o que se pretende com isto é aumentar o rendimento enquanto a incidência da radiação solar é elevada. A elevação da temperatura do fundo do reservatório antes deste horário diminui o número de horas diurnas de funcionamento do coletor com eficiência mais elevada.

Os números de Peclet e Fourier não expressaram de forma conclusiva nenhuma relação definida com o índice de estratificação para as condições de ensaio.

Outro fator observado de importante influência sobre a estratificação térmica foi a operação da fonte auxiliar de calor. Normalmente instalada na base do reservatório de água quente, quando acionada tende a aquecer todo o volume armazenado de

forma homogênea acabando com a estratificação térmica que por ventura existir. Seu acionamento deve ser, sempre que possível, controlado, pois quando é acionada durante o dia, reduz a eficiência do aproveitamento da energia solar, quando é acionada a noite, precocemente em relação ao consumo, aumenta as perdas de calor para o ambiente. Porém para se ter eficiência neste controle é necessário ter o conhecimento exato da distribuição das vazões de consumo ao longo do dia ou corre-se o risco de não atender devidamente a necessidade de consumo.

A adoção de valores muito elevados para a diferença de temperatura entre a entrada e a saída do coletor ou entre a entrada e a saída do reservatório, utilizados como referência para a partida da bomba, retardaram demasiadamente o início da circulação da água e conduziram a grandes intervalos de tempo entre uma e outra partida no período diurno. Além de aumentar as perdas térmicas por manter o coletor em temperaturas mais elevadas, este acréscimo de tempo reduziu a oportunidade de aproveitamento da energia solar nos dias de grande variação da taxa de radiação, provocadas pela nebulosidade, principalmente no verão. Diferenças de temperaturas muito baixas reduziram demasiadamente a vazão aumentaram a temperatura no coletor, com conseqüente acréscimo nas perdas e também reduziram a eficiência ao longo do dia.

A circulação da água provocada pelo fenômeno de termossifão demonstrou estar, em todas as situações testadas, próxima do equilíbrio entre estas variáveis. Em outras palavras, o fluxo de massa, em uma temperatura inicial qualquer, que resultou em melhor aproveitamento da energia disponível nos coletores estudados estiveram sempre com uma ordem de grandeza variando entre uma e três vezes a vazão média que ocorreu no sistema com termossifão sob as mesmas condições.

Portanto, 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.

As vazões correspondentes às do escoamento por termossifão podem ser obtidas de duas formas. A primeira, com a simulação por modelos matemáticos como os apresentados por Morrison; Tran (1984); McGarity, Revelle; Chon (1984), Vaxman; Slokov (1986) e Klein; et al. (1996). A segunda, mais simples, pela limitação dos intervalos de temperatura que condicionam a vazão no circuito entre o reservatório e o coletor a ser semelhantes à do sistema passivo para a radiação solar disponível.

Este trabalho apresenta uma metodologia simples para determinar as vazões a partir dos fatores de remoção e de perda de calor levantados para regime quase permanente segundo metodologia proposta pela ABNT (1988-a) e a ASHRAE Standard, apud DUFFIE; BECKMAN (1991). Os dados necessários são: as vazões, a radiação solar, a temperatura do ar, as temperaturas da água na saída e na entrada do coletor e na saída e na entrada do reservatório. Como controle, é apresentado um conjunto de funções para ligar ou desligar a bomba e para abrir ou fechar o(s) registro(s) ou válvula(s). Os condicionantes para a operação dos sistemas são apresentados nos fluxogramas das Figuras 4.34 e 4.35 e no Quadro 4.10.

A metodologia proposta apresentou bons resultados nos ensaios realizados. As vazões previstas variam entre uma e três vezes a vazão que ocorreu no sistema com termossifão sob as mesmas condições.

É necessário o estudo do comportamento de outros reservatórios horizontais e verticais, com várias relações de altura e diâmetro, para que sejam determinados os valores do número de Richardson e da diferença de temperatura entre a entrada e a saída que favoreçam a estratificação térmica do reservatório. Este dado poderia ser fornecido pelo fabricante de acordo com as características dos reservatórios produzidos.

Outros estudos experimentais deverão ser efetuados na busca de medidas que aumentem a eficiência sem que impliquem em elevar significativamente o custo de implantação do sistema. Para tal sugerimos o estudo sobre o efeito da mudança da inclinação dos coletores planos para o ângulo de incidência dos raios solares à cada estação do ano e o estudo do efeito de refletores que redirecionem a insolação do entorno para o coletor como, por exemplo, a colocação de espelhos próximo aos coletores.

ANEXO A

Ensaio de calibração da instrumentação.

Nos ensaios de calibração, sempre que possível, foi utilizado o sistema de aquisição de dados implantado para esta pesquisa. Foram calibrados os seguintes instrumentos: piranômetro, sensores de temperatura, hidrômetro, anemômetro, sensor de chuva e reservatório de água quente. Os resultados e os métodos empregados estão descritos a seguir.

A.1 – Piranômetro

A radiação solar total (direta e difusa) foi medida pôr um piranômetro existente no Laboratório de Sistemas Prediais da Escola Politécnica da USP (Epply Black and White Pyranometer – Model 8-48) com uma constante de placa de $9,64 \times 10^{-6} \text{ V} / \text{m}^2$. Os piranômetros ou radiômetros são calibrados através de um piroheliômetro padrão, segundo Duffie; Beckman (1991).

A aferição foi efetuada comparando a radiação medida no instrumento a ser utilizado com a de outro radiômetro calibrado, existente no Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo. Ambos os instrumentos foram colocados sob a mesma inclinação do coletor solar ($33,3^\circ$), em um dia claro e com poucas nuvens e a comparação dos resultados estão plotados na Figura A.1.

A utilização do piranômetro na inclinação do plano que se quer conhecer a irradiação evita as aproximações de cálculo para corrigir os valores coletados no plano horizontal. Embora tal procedimento possa conduzir a pequenos erros na medida da radiação, ele é mais representativo porque revela melhor a influencia do entorno (albedo). Norris (1974), comparando medidas realizadas em laboratório para vários ângulos, encontrou distorções máximas de +1% neste tipo de aparelho, para inclinações entre 20° e 40° .

Figura A.1 – Aferição do piranômetro

A.2 – Termoresistências.

Os sensores de temperatura empregados são termoresistências de platina com resistência de 100 Ω a zero grau centígrado, também designados pôr RTD (*Resistance Temperature Detector*) de platina ou simplesmente PT100. Este tipo de sensor é largamente empregado em medidas remotas de temperatura de fluidos e sólidos, para intervalos de -259 $^{\circ}\text{C}$ a +961 $^{\circ}\text{C}$, ASHRAE (1997). Capunao et ali (1999) analisaram o desempenho dos instrumentos utilizados em sistemas de ar condicionados encontraram uma incerteza para os RTDs de platina de 0,15 $^{\circ}\text{C}$ + 0,002|T|, sendo T a temperatura em graus centígrados.

A variação da resistência à passagem da corrente elétrica com a temperatura segue uma expressão polinomial. As leituras dos instrumentos são processadas pelo software DasyLab 5.6 e convertidas em temperaturas de acordo com as normas DIN IEC 751. Como resposta de todos os instrumentos não são exatamente iguais, os

parâmetros do polinômio também variam tornando necessária uma aferição individual de cada sensor.

A aferição foi efetuada tendo como referencia um termômetro de mercúrio com escala e $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Os ensaios consistiram em mergulhar em água o sensor e o termômetro mercúrio em um recipiente com isolamento térmico e anotar as respectivas leituras. Os ensaios eram iniciados com a temperatura da água próxima a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, prosseguindo depois com a elevação gradual da temperatura pela adição de líquido mais quente e homogenização da mistura.

Nos Quadros A.1 à A.3 estão os dados coletados, o endereço do canal de entrada do sinal de cada sensor no sistema de aquisição de dados e a regressão linear resultante. Os valores dos coeficientes de correlação indicam que a estimativa linear se adapta bem aos valores calculados pelo software DasyLab 5.6.

Para os sensores que apresentaram resultados mais desfavoráveis (TR3-A e TR3-B) foram feitos outros ensaios corrigindo a leitura do software pela equação encontrada no teste de calibração. Nestes ensaios a divergência máxima de temperatura entre os instrumentos foi de $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e estão apresentados na Figura A.2.

A.3 – Hidrômetros.

O monitoramento das vazões foi feito, em intervalos de tempo de quinze segundos por dois modelos de hidrômetros eletrônicos, marca Hydrometer tipo ETHMO-2, classe metrológica C. O modelo de menor capacidade tem vazão nominal (Q_n) de $0,6\text{ m}^3/\text{h}$ e transmite um pulso elétrico a cada $0,005\text{ L}$. O modelo de maior capacidade tem $Q_n = 1,5\text{ m}^3/\text{h}$ e transmite um pulso a cada $0,01\text{ L}$.

Quadro A.1 - Aferição dos sensores de temperatura.

SENSOR: T1 - A		T2 - A		T3 - A		T4 - A		T5 - A	
End: DBK0 - Ch1		DBK0 - Ch2		DBK0 - Ch3		DBK0 - Ch4		DBK0 - Ch5	
T _{sensor} oC	T oC	T _{sensor} oC	T oC	T _{sensor} oC	T oC	T _{sensor} oC	T _{sensor} oC	T _{sensor} oC	T _{sensor} oC
-0,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3
2,1	2,8	3,5	3,8	3,2	3,2	3,3	3,3	2,9	2,8
10,6	11,4	11,9	11,2	11,1	11,2	11,6	11,5	11,6	11,3
15,6	16,8	16,8	16,9	17,1	17,0	17,0	16,8	17,2	16,9
21,0	21,9	21,8	21,9	22,0	22	22,0	21,9	22,2	22,0
29,7	31,1	31,2	31,2	31,2	31,2	30,7	30,7	31,2	30,9
32,5	33,4	34,0	34,1	33,8	33,8	33,8	33,9	33,8	33,7
39,7	41,0	40,3	40,4	41,3	41,2	40,2	40,3	40,7	40,8
46,1	47,8	49,0	49,0	47,9	47,9	48,3	48,3	48,6	48,5
47,6	48,3	49,7	49,5	50,2	50,1	50,1	51,0	49,0	49,0
Coeficientes da análise de regressão									
a =	1,0081	0,9997		0,9984		1,0098		1,0032	
b =	0,8629	-0,0131		0,0211		-0,1809		-0,2230	
R2 =	0,99986	0,99989		1,00000		0,99990		0,99998	

SENSOR: T6-A		T7-A		T8-A		T9 - A		TR1-A	
End: DBK0 - Ch6		DBK0 - Ch7		DBK1 - Ch0		DBK0 - Ch0		DBK1 - Ch1	
T _{sensor} oC	T oC	T _{sensor} oC	T oC	T _{sensor} oC	T oC	T _{sensor} oC	T oC	T _{sensor} oC	T oC
0,4	0,4	1,1	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,8	0,7
5,8	5,7	6,4	5,7	6,0	5,8	2,9	3,0	5,3	5,0
11,7	11,6	13,7	11,7	12,0	11,8	8,5	8,5	10,6	10,3
15,5	15,4	16,3	15,4	15,7	15,5	14,2	14,1	13,1	12,7
23,0	22,8	23,9	22,8	23,0	22,7	17,1	17,1	17,2	16,9
28,8	28,6	29,6	28,6	28,8	28,5	22,9	22,7	21,7	21,6
32,2	32,0	32,8	31,9	32,0	31,8	35,0	34,8	30,1	29,6
35,8	35,6	36,4	35,5	35,2	35,3	39,5	39,4	34,8	34,5
40,8	40,5	42,1	40,5	40,4	40,1	47,3	47,2	40,8	40,4
52,0	51,7	51,7	50,8	50,4	50,1	51,1	51,0	46,0	45,5
Coeficientes da análise de regressão									
a =	0,9943	0,9957		0,9984		0,9965		0,9945	
b =	-0,0336	-0,9510		-0,1607		0,0195		-0,1983	
R2 =	1,0000	0,99966		0,99997		0,99999		0,99997	

SENSOR: TR2-A		TR3-A		TR4-A		TR5 - A		TR6-A	
End: DBK1 - Ch2		DBK1 - Ch3		DBK1 - Ch4		DBK1 - Ch5		DBK1 - Ch6	
T _{sensor} oC	T oC	T _{sensor} oC	T oC	T _{sensor} oC	T oC	T _{sensor} oC	T oC	T _{sensor} oC	T oC
1,5	0,7	0,7	0,6	1,4	0,5	1,2	0,6	0,7	0,3
6,2	5,2	5,4	5,4	5,8	7,8	6,1	5,5	4,9	4,4
11,3	10,2	9,9	10,0	11,1	10,1	10,5	9,8	10,0	9,4
13,9	12,8	13	13,0	14	12,9	13,4	12,7	13,4	12,8
17,9	16,8	16,7	16,7	17,9	16,7	17,5	16,8	16,6	15,9
22,7	21,7	21,5	21,5	22,7	21,6	22,3	21,6	26,0	25,4
30,8	29,6	29,5	29,5	30,9	29,7	30,3	29,5	27,6	26,7
35,9	34,7	35,1	35,0	35,4	34,4	36,0	35,2	35,1	34,4
41,4	40,2	40,1	40,0	41,8	40,7	40,5	39,8	43,5	42,7
47,7	46,7	47,4	47,3	47,4	49,3	50,4	49,4	50,8	49,5
Coeficientes da análise de regressão									
a =	0,9956	0,9978		1,0075		0,9939		0,9872	
b =	-0,9686	0,0178		-0,6415		-0,5905		-0,4176	
R2 =	1,0000	0,99999		0,99671		0,99999		0,99997	

Quadro A.2 - Aferição dos sensores de temperatura

Sensor: TR7		T9-B		T1 - B		T2-B		T3-B	
End: DBK1 - Ch7		DBK2 - Ch0		DBK2 - Ch1		DBK2 - Ch2		DBK2 - Ch3	
Tsensor 0C	T 0C	Tsensor 0C	T 0C	Tsensor 0C	Tsensor 0C	Tsensor 0C	Tsensor 0C	Tsensor 0C	T 0C
0,9	0,3	0,3	0,3	0,1	0,3	1,0	0,3	0,0	0,5
5,2	4,4	3,0	3,0	6,2	6,5	7,0	6,7	3,8	4,1
10,2	9,4	8,5	8,5	12,5	11,9	12,5	12,0	7,6	8,1
13,6	12,8	17,2	17,1	15,0	11,9	16,1	15,6	12,4	12,7
16,7	15,9	20,0	19,9	22,6	22,7	23,2	22,7	20,5	20,8
26,1	25,2	22,7	22,8	28,3	28,4	29,0	28,4	29,3	29,6
27,5	26,7	34,8	35,2	31,4	31,6	32,2	31,6	33,9	34,2
35,1	34,3	39,4	39,1	35,0	35,2	35,6	35	37,6	37,8
43,2	42,3	47,2	47,6	39,8	39,7	40,2	39,7	43,4	43,7
49,7	48,7	51,0	50,5	50,2	49,4	49,5	48,9	48,3	48,4

Coefficientes da análise de regressão

a =	0,9949	0,9988	1,0029	0,9983	0,9947
b =	-0,7044	0,0194	-0,4201	-0,4990	0,4362
R2 =	1,0000	0,99988	0,99787	0,99998	0,99999

T4-B		T5-B		T6-B		T7 - B		T8-B	
DBK2 - Ch4		DBK2 - Ch7		DBK2 - Ch6		DBK2 - Ch7		DBK3 - Ch0	
Tsensor 0C	Tsensor 0C	Tsensor 0C	T 0C	Tsensor 0C	T 0C	Tsensor 0C	Tsensor 0C	Tsensor 0C	Tsensor 0C
0,3	0,4	0,9	0,5	-0,8	0,5	0,6	0,5	0,6	0,3
4,1	3,4	4,5	4,0	2,7	4,1	4,4	4,2	3,9	3,6
8,1	6,6	8,8	8,2	7,2	8,5	8,8	8,6	6,6	6,4
12,7	10,9	13,4	12,8	11,4	12,8	13,2	12,9	11	10,8
20,8	14,7	21,4	20,7	19,3	20,7	20,9	20,7	14,2	14,1
29,8	23,6	30,1	29,4	28,0	29,4	29,8	29,5	25,9	25,6
34,0	28,2	34,9	34,4	33,2	34,5	34,3	34,0	29,5	29,5
37,3	34,6	38,1	37,4	36,8	38,1	37,9	37,7	33,5	32,4
43,5	41,4	43,7	43,2	41,3	42,5	42,6	42,3	38,6	38,1
47,9	47,7	47,1	46,5	46,0	46,1	47,2	46,8	45,4	45,2

Coefficientes da análise de regressão

a =	0,9600	0,9979	0,9871	0,9963	0,9944
b =	-1,7463	-0,5290	1,4999	-0,1602	-0,2036
R2 =	0,9898	0,99998	0,99980	0,99999	0,99983

TR1-B		TR2-B		TR3-B		TR4 - B		TR5-B	
DBK3 - Ch1		DBK3 - Ch2		DBK3 - Ch3		DBK3 - Ch4		DBK3 - Ch5	
Tsensor 0C	Tsensor 0C	Tsensor 0C	T 0C	Tsensor 0C	T 0C	Tsensor 0C	Tsensor 0C	Tsensor 0C	Tsensor 0C
0,2	0,3	0,0	0,3	1,0	0,3	0,4	0,4	0,5	0,4
3,4	3,5	3,0	3,3	4,1	3,4	3,5	3,4	3,6	3,4
6,6	6,7	6,7	6,9	7,5	6,8	6,6	6,6	7,1	6,8
11	10,9	9,3	9,4	11,6	10,8	10,9	10,9	9,8	9,4
14,6	14,7	14,8	14,7	13,7	14,7	14,7	14,7	15,1	14,7
23,7	23,6	50,8	50,5	24,4	23,6	23,8	23,6	23,9	23,5
28,4	28,3	23,0	23,4	29,4	28,6	28,5	28,2	29,1	28,6
34,6	34,4	28,6	28,6	34,7	33,9	34,8	34,6	34,3	34,2
41,0	41,1	33,9	34,1	43,5	42,3	41,3	41,4	42,1	41,7
48,5	48,3	41,6	41,9	50,1	49,2	47,8	47,7	47,4	47,3

Coefficientes da análise de regressão

a =	0,9915	0,9940	0,9865	0,9995	0,9993
b =	0,1085	0,2801	-0,3561	-0,0593	-0,2618
R2 =	1,0000	0,99993	0,99918	0,99998	0,99996

Quadro A.3 - Aferição dos sensores de temperatura

SENSOR: TR6-B		T10		T11		TR3 - B		TR4 - A	
End.: DBK3 - Ch6		DBK3 - Ch7		DBK3 - Ch0		DBK3 - Ch3		DBK1 - Ch4	
Tsensor	T	Tsensor	T	Tsensor	T	Tsensor	T	Tsensor	T
0C	0C	0C	0C	0C	0C	0C	0C	0C	0C
0,8	0,3	1,2	0,3	0,5	0,4	0,7	0,5	0,1	0,3
4,4	3,6	4,3	3,7	3,8	3,7	4,0	3,7	4,3	4,4
6,8	6,6	7,4	6,6	6,7	6,6	6,6	6,1	9,2	9,3
11,8	10,8	11,7	10,7	11,0	10,7	11,2	10,9	12,7	12,8
14,6	14,1	14,8	14,1	14,2	14,1	14,2	14,2	15,8	15,9
26,3	25,6	26,3	25,5	25,6	25,5	25,8	25,7	25,5	25,6
30,3	29,6	30,6	29,7	29,9	29,7	29,5	29,6	26,6	26,6
33,5	32,9	34,0	33,2	33,3	33,2	33,1	33,1	34,3	34,5
40,7	38,9	39,2	38,5	38,6	38,5	39,0	39,1	43,0	43,1
46,2	45,7	47,4	46,8	46,9	46,8	47,7	47,5	50,0	49,9
Coeficientes da análise de regressão									
a =	0,9899	1,0026		1,0005		1,0070		0,9972	
b =	-0,5127	-0,8356		-0,1403		-0,2890		0,1523	
R2 =	0,99968	0,99997		0,99999		0,99995		0,99999

Figura A.2 - Resultados dos sensores TR3-B e TR4-A com o uso da equação de aferição.

A aferição dos hidrômetros foi realizada conforme a faixa de vazão. Para vazões abaixo de 60 L /hora, as leituras nos hidrômetros de menor capacidade foram comparadas com medidas diretas de massa e tempo. Para tanto foi utilizado um cronômetro e uma balança com precisão de 10 gr. A aferição das vazões acima de 60 L / hora foi efetuada com o auxílio de um medidor mássico marca Yokogawa, modelo: Rotomass CS1600, capaz de emitir 600 impulsos por kilograma de água, ou seja, um impulso a cada 0,00167Kg. Este instrumento mede a vazão da massa do fluido através da força de Corioli, por isto, embora tenha boa precisão, exija uma vazão mínima de partida maior que a dos hidrômetros.

Os dados coletados dos hidrômetros com vazão nominal de 1,5m³/h, estão apresentados no Quadro A.4 e Figura A.3, os demais no Quadro A.5 e Figura A.4, respectivamente. Também aqui a correção das medidas pôde ser feita por uma equação linear.

Quadro A.4 – Aferição dos Hidrômetros com vazão nominal de 1,5 m³/h.

Medidor Mássico		Frequência (2000Hz)		Medidor Mássico		Frequência (2000Hz)	
Vazão (kg/h)	Vazão (L/s)	HD-2A	HD-2B	Vazão (kg/h)	Vazão (L/s)	HD-2A	HD-2B
		Fr	Fr			Fr	Fr
61	0,0170	1,0	1,0	500	0,1393	12,5	13
89	0,0248	2,0	2,0	520	0,1448	13,0	13,5
120	0,0334	3,0	3,0	664	0,1849	17,0	17,5
177	0,0493	4,0	4,0	752	0,2094	19,0	20
229	0,0638	5,5	5,5	866	0,2412	22,0	23
253	0,0705	6,5	6,5	965	0,2688	25,0	25,5
312	0,0869	7,5	8,0	1053	0,2933	27,0	28
338	0,0941	8,5	9,0	1197	0,3334	31,0	32
383	0,1067	9,5	10,0	1443	0,4019	37,0	38
427	0,1189	10,5	11,0	1267	0,3529	32,0	34
465	0,1295	12,0	12,0	Temperatura da água = 21 °C

Figura A.3 – Hidrômetros com $Q_n = 1,5 \text{ m}^3 / \text{s}$ (Vazão x Frequência de pulsos)

Quadro A.5 – Aferição dos Hidrômetros com vazão nominal de $0,6 \text{ m}^3/\text{h}$.

Medidor Mássico		Método Direto			Frequência (2000Hz)	
Vazão (kg/h)	Vazão (L/s)	Massa (Kg)	Tempo (S)	Vazão (L/s)	HD-1A Fr	HD-1B Fr
0	0	0	0	0	0	0
0	0,0041	0,49	120	0,0041	1	1
0	0,0107	1,28	120	0,0107	2	2
0	0,0145	0,65	45	0,0145	3	3
74	0,0206	2,47	120	0,0206	4	3
95	0,0265	3,15	120	0,0263	5	5
125	0,0348	-	-	-	7	7
169	0,0471	-	-	-	9	9
194	0,0540	-	-	-	10	10
226	0,0629	-	-	-	12	12
285	0,0794	-	-	-	15	15
325	0,0905	-	-	-	17	18
348	0,0969	-	-	-	20	20
454	0,1264	-	-	-	25	26
505	0,1406	-	-	-	28	28
556	0,1548	-	-	-	30	31
612	0,1704	-	-	-	33	34
670	0,1866	-	-	-	36	37
710	0,1977	-	-	-	39	39
774	0,2156	-	-	-	43	43
839	0,2337	-	-	-	45	45
912	0,2540	-	-	-	50	51

Figura A.4 – Hidrômetros com $Q_n=0,6\text{m}^3/\text{s}$ (Vazão x Frequência de pulsos)

A.4 – Anemômetro.

O anemômetro utilizado foi do tipo copo que em conjunto com um barômetro, um higrômetro, um termômetro e um pluviômetro integram uma estação metereológica compacta, marca Huger. Esta estação faz as leituras dos instrumentos a cada 10 segundos e envia as informações para um PC. A faixa de operação do anemômetro é de 0 m/s a 56 m/s com uma resolução de 0,2 m/s.

A aferição foi realizada no túnel de vento do laboratório do departamento de Estruturas e Fundações da Escola Politécnica da USP. Um tubo de Pitot, conjugado com um manômetro, media a velocidade do vento simultaneamente com a mediada do anemômetro. A velocidade medida no Pitot é dada por (ASHRAE 1997):

$$V = C_v \sqrt{\frac{2 \cdot P}{\rho_{ar}}}^{0,5} \quad (\text{A.1})$$

Onde: V = velocidade do vento (m/s);

ΔP = pressão diferencial entre o Pitot e o manômetro (N /m²);

g = aceleração da gravidade (m/s²);

ρ_{ar} = massa específica do ar (kg/m³) e

C_v = coeficiente de velocidade.

A densidade do ar pode ser encontrada pela relação para gás ideal:

$$P = \rho_{ar} R T \quad (A.2)$$

Sendo: - R a relação entre a constante universal dos gases e a massa molecular, para o ar seco = 287 J / (kg. K) (McQuistan; Parquer 1977) e
- T a temperatura em Kelvins.

Os resultados da comparação estão no Quadro A.6 e na Figura A.5 abaixo.

Quadro A.6 – Velocidades calculadas para tubo de Pitot e lidas no anemômetro.

Dados ambientais:							
Temperaturas		inicial:	21,4°C		ρ_w :	997,2	kg/m ³
		final:	22,1°C		ρ_{ar} :	1,108	kg/m ³
Pressão barométrica:			703 mm Hg				
Umidade relativa:			57%				
Freqü.	ΔP Pitot	Veloc. Calculada	Veloc. Anemôm.	Freq.	ΔP Pitot	Veloc. Calculada	Veloc. Anemôm.
(Hz)	(mm.c.a)	(m/s)	(m/s)	(Hz)	(mm.c.a)	(m/s)	(m/s)
10,9	1	4,2	4,4	38,6	15	16,3	15,3
14,8	2	6,0	6,0	39,8	16	16,9	15,9
17,8	3	7,3	7,1	41,1	17	17,4	16,4
20,3	4	8,4	8,1	42,2	18	17,9	16,9
22,7	5	9,4	9,0	43,4	19	18,4	17,3
24,7	6	10,3	9,9	44,5	20	18,8	17,8
26,6	7	11,1	10,7	45,6	21	19,3	18,3
28,4	8	11,9	11,3	46,7	22	19,8	18,7
30,1	9	12,6	11,9	47,8	23	20,2	19,1
31,7	10	13,3	12,7	48,9	24	20,6	19,6
33,3	11	14,0	13,2	49,9	25	21,1	19,9
34,5	12	14,6	13,8	50,9	26	21,5	20,4
36,0	13	15,2	14,4	51,8	27	21,9	20,7
37,3	14	15,8	14,9

Figura A.5 – Correlação entre a velocidade no anemômetro (V_{an}) e a velocidade do ar no tubo de Pitot (V).

A.5 – Sensor de chuva.

Foi utilizado como sensor de chuva o pluviômetro integrante da estação meteorológica compacta, referida no item anterior. Como a medida da precipitação não seja contemplada pelo objetivo deste trabalho e sua área de captação de chuva ($78,54 \text{ cm}^2$) seja diferente da área dos pluviômetros utilizados em nosso país (200 cm^2), este instrumento serviu apenas para registrar os períodos das ocorrências das chuvas. A calibração foi feita colocando no recipiente de captação da chuva volumes de água conhecidos e comparando com os valores totais lidos no pluviômetro. Os resultados são mostrados no Quadro A.7.

Quadro A.7 – Altura da precipitação no pluviômetro e altura real medida

Pluviômetro	Medida	Pluviômetro	Medida
mm	mm	mm	mm
1,0	1,3	17	19,1
2,0	2,5	22,0	25,5
3,0	3,8	23,0	25,5
4,0	5,1	33,0	38,2
5,0	6,4	38,0	44,6
6,0	6,4	42,0	50,5
7,0	7,6	55,0	63,7
9,0	10,2	60,0	70,0
11,0	12,7	87,0	101,9
16,0	19,1		
Correlação:	$H_{real} = 1,17 H$		$R^2 = 0,9995$

A.6 – Reservatório de água quente

Neste item, objetivou-se verificar a posição de cada sensor de temperatura (H_i), o volume de água em torno do mesmo (V_i) e o volume total do reservatório, como esquematizado na Figura A.6.

Figura A.6 – Esquema da posição d sensores nos reservatórios de água quente.

Os dados foram obtidos com a pesagem do volume de água entre cada diferença de nível, a medição da temperatura da água e a medição das distâncias entre os sensores. Para isto foi utilizado: uma balança com escala de uma grama, trena metálica milimetrada e o termômetro de mercúrio usado como padrão na aferição dos sensores de temperatura. Os volumes foram calculados dividindo as massas pesadas pela massa específica da água, considerando a sua temperatura. No quadro A.8 está o resumo das dimensões encontradas.

Quadro A.8 - Dimensões e capacidades dos reservatórios de água quente.

RESERVATÓRIO "A"				RESERVATÓRIO "B"			
Sensor/	Altura	Massa	Volume	Sensor/	Altura	Massa	Volume
	(cm)	(g)	(L)		(cm)	(g)	(L)
TR-1	H1 = 22,7	43.570	V1 = 43,653	TR-1	H1 = 23,1	44.439	V1 = 44,524
TR-2	H2 = 19,0	34.317	V2 = 34,382	TR-2	H2 = 18,5	33.413	V2 = 33,477
TR-3	H3 = 19,9	35.942	V3 = 36,010	TR-3	H3 = 19,9	35.942	V3 = 36,010
TR-4	H4 = 20,0	36.122	V4 = 36,191	TR-4	H4 = 19,9	35.942	V4 = 36,010
TR-5	H5 = 19,3	34.858	V4 = 34,924	TR-5	H5 = 19,2	34.381	V5 = 34,447
TR-6	H6 = 17,1	33.455	V6 = 33,519	TR-6	H6 = 17,4	34.143	V6 = 34,208
Total	118,0	218.264	218,679	Total	118,00	218.260	218,676
hr = 12 cm				hr = 12 cm			
hr+hs = 90 cm				hr + hs = 90 cm			

ANEXO B

Apresentação dos dados

São apresentados a seguir os dados obtidos nos experimentos que são identificados pelo dia em que foi realizado. São valores médios e/ou globais do período de vinte quatro horas de duração do ensaio. Para melhor compreensão da apresentação dos dados, o primeiro quadro descreve o significado de cada parâmetro.

Quadro descritivo dos parâmetros apresentados para cada experimento.

Data do Experimento:		Data em que foi realizado o ensaio	
Observações:		Simulação de consumo: com ou sem mistura de água fria e estado da resistência: habilitada ou desligada	
Dados comuns	$T^* / \Delta T$ de ensaio (°C)	Temperatura de utilização	Temp. de partida da bomba
	Perfil de consumo	Tipo de perfil de simulação de consumo	
	Energia solar diária (kJ)	Total da energia solar incidente no dia	
	Var (m/s)	Velocidade do vento	
	Tar (média diária) (°C)	Temperatura média do ar atmosférico	
Sistemas		Identificação dos sistemas: A e B	
Uso de bomba		Tipo de escoamento nos coletores: por termosão ou forçado	
Abertura do registro		Tipo de controle de vazão: com abertura gradual ou total	
Vazão média no coletor (L/s)		Vazão média diária no coletor solar	
Volume total no coletor (L)		Volume total diário de água escoada no coletor	
Volume total abastecido (L)		Volume total diário de água consumida	
TR médio (°C)		Temperatura média diária da água no reservatório	
TR final - TR inicial (°C)		Variação da temperatura média no reservatório	
EAQ (kJ)		Energia térmica / entalpia da água quente consumida	
E'AF (kJ)		Entalpia da água fria de abastecimento do reservatório	
EAF (kJ)		Entalpia da água fria utilizada na mistura p/ consumo	
Temp média consumo (°C)		Temperatura média da água consumida	
ESc (kJ)		Energia obtida com a equação da eficiência do coletor	
EuSc (kJ)		Energia útil avaliada pelo aumento de temp. no coletor	
EuSR (kJ)		Energia solar líquida recebida pelo ao reservatório	
EEr (kJ)		Energia consumida pela resistência elétrica	
EuE (kJ)		Energia útil que a resistência elétrica fornece à água	
EEb (kJ)		Energia elétrica consumida pelo motor da bomba	
EFR = f(UR) (kJ)		Perda de calor do reservatório calculada pelo coef. global	
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		Perda de calor do reservatório obtido no balanço energético	
Erc (kJ)		Energia perdida na recirculação da água	
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		Energia utilizável	
η_o - Rendimento global (%)		Rendimento do sistema no aproveitamento da energia solar	
Rend máximo instantâneo (%)		Rendimento máximo do sistema alcançado no dia	
FS Fração solar (%)		Fração solar	
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		Fator de carga utilizável	
$\eta_{rel} = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		Relação entre o rendimento global e o fator de carga	
CMEU(T*,t) (%)		Coeficiente de melhoria da energia utilizável	
Ri	Média	Número médio de Richardson no dia	
	Valor máximo	Valor máximo atingido pelo número de Richardson	
	Valor p/ η_o máx	Número de Richardson no rendimento máximo	
Ped	Média	Número de Peclet médio no dia	
	Valor máximo	Valor máximo atingido pelo número de Peclet	
	Valor p/ η_o máx	Número de Peclet no rendimento máximo	
Fo	Média	Número de Fourier médio no dia	
	Valor máximo	Valor máximo atingido pelo número de Fourier	
	Valor p/ η_o máx	Número de Fourier no rendimento máximo	
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	Índice de estratificação médio no dia	
	Valor máximo	Valor máximo alcançado pelo índice de estratificação	
	Valor p/ η_o máx	Valor do índice de estratificação no rendimento máximo	
TRe - TRmédio (°C)	Média	Diferença de temperatura entre a água que entra no reserv.	
	Valor p/ η_o máx	(retorno do coletor) e a temperatura média do reservatório	
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	Razão entre a diferença da temperatura da água, na	
	Valor p/ η_o máx	entrada do coletor, e do ar pela radiação solar	
(Ts-Te) (°C)	Média	Ganho de temperatura da água entre a saída e a entrada	
	$\eta_{Tínic}$ do fluxo	do coletor. Valores médio e máximo no dia e valor no	
	$\eta_{Tmáx}$ (o máx)	momento de rendimento máximo	

Data do Experimento:		25/04/2002		26/04/2002	
Observações:		Com misturador e com resistência habilitada		Com misturador e com resistência habilitada.	
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	50	10	50	10
	Perfil de consumo	FG		FG	
	Energia solar diária (kJ)	58892,1		50908,5	
	Var (m/s)	0,74		0,3	
	Tar (média diária) (°C)	25,3		24,8	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Parcial	-	Parcial	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,1378	0,012	0,0989	0,0104
Volume total no coletor (L)		1612	349,8	1325,5	327,2
Volume total abastecido (L)		197,9	196,5	215,7	212,5
TR médio (°C)		53,7	53,6	51,3	52,3
TR final - TR inicial (°C)		-0,4	-1,0	-3,9	-2,1
EAO (kJ)		24167,5	30544,1	34712,9	32405,5
E'AF (kJ)		13448,6	14686,3	19472,8	15637,7
EAF (kJ)		11031,7	6292	5876,7	6862,3
Temp média consumo (°C)		41,5	45,5	46,1	45
ESc (kJ)		27136	28484,3	23239,5	23550,4
EuSc (kJ)		18730,2	22854,8	15809	19647,4
EuSR (kJ)		16953,1	19442	14821,7	16615,5
EEr (kJ)		7286,0	9082,4	8897,8	10182
EuE (kJ)		5593,7	7056,2	7040,3	8010,3
EEb (kJ)		706,2	-	600	-
EFR = f(UR) (kJ)		9866,9	12634,1	9243,4	12311
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		11809,8	11464,5	9838	9678,9
Erc (kJ)		371,1	59,9	234,8	39,1
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		9865,9	3353,6	4606,4	2297,4
η_o - Rendimento global (%)		28,2	32,9	28,7	32,6
Rend máximo instantâneo (%)		42,7	53,8	57,6	62,4
FS Fração solar (%)		75,2	73,4	68	67,6
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		16,8	5,7	9	4,5
$\eta = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		59,4	17,3	31,5	13,8
CMEU(T*,t) (%)		0,660		0,501	
Ri	Média	0,59	134,7	0,58	118
	Valor máximo	1,75	250,9	1,8	221,9
	Valor p/ η_o máx	1,14	7,5	1,07	26,5
Ped	Média	5082,8	483,2	5123,6	446
	Valor máximo	5806,3	606,8	6309,5	570,6
	Valor p/ η_o máx	4381,9	494,5	4595	423,4
Fo	Média	0,0000677	0,0000665	0,0000623	0,0000639
	Valor máximo	0,0000904	0,0000865	0,000077	0,0000769
	Valor p/ η_o máx	0,0000596	0,0000552	0,0000522	0,0000557
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,045	0,199	0,063	0,195
	Valor máximo	0,185	0,379	0,314	0,389
	Valor p/ η_o máx	0,058	0,379	0,168	0,357
TRe - TRmédio (°C)	Média	1,5	5,6	1,5	4,8
	Valor p/ η_o máx	1,8	5,2	1,3	4
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,033	0,024	0,033	0,026
	Valor p/ η_o máx	0,028	0,013	0,034	0,042
(Ts-Te) (°C)	Média	3,2	14,6	3,2	13,5
	η Tíncio do fluxo	14,1	8,7	11,7	9,2
	η Tmáx. (η_o máx)	3,8	19,8	6,4	12,3

Data do Experimento:		27/04/2002		28/04/2002	
Observações:		Com misturador e com resistência habilitada.		Com misturador e com resistência habilitada.	
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	50	12	50	10
	Perfil de consumo	FG		FG	
	Energia solar diária (kJ)	28748,1		37904,8	
	Var (m/s)	1,07		1,55	
	Tar (média diária) (°C)	22,7		21,6	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Parcial	-	Parcial	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,1376	0,0097	0,1395	0,0097
Volume total no coletor (L)		470,5	169	778,6	240,9
Volume total abastecido (L)		214	218,3	237,8	231,4
TR médio (°C)		51,6	51,4	51,7	52,8
TR final - TR inicial (°C)		6,4	8,9	-2,8	-3,8
EAO (kJ)		31532,1	33690,9	39865,1	38805,1
E'AF (kJ)		17714,1	16477,7	20077	16552,8
EAF (kJ)		6769,6	5534,6	4903,2	4500,9
Temp média consumo (°C)		43,5	43,8	44,9	44
ESc (kJ)		11882	12824,2	14668,9	14905
EuSc (kJ)		7045,1	10049,3	9972,2	13073,6
EuSR (kJ)		6477,2	8230,4	8435,2	10107,6
EEr (kJ)		30854,3	32835,5	27202,1	26925,1
EuE (kJ)		23899,2	24882,7	21718,9	20919,7
EEb (kJ)		227,4	-	363,2	-
EFR = f(UR) (kJ)		10052,9	12817,3	10886,5	14462,2
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		10580,2	7728,3	11930,2	12048
Erc (kJ)		324,9	322,6	903,7	67,4
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		831,0	263,7	4069,9	1948,9
η_o - Rendimento global (%)		21,4	27,5	19,9	26,5
Rend máximo instantâneo (%)		43,7	66,8	42,8	51,7
FS Fração solar (%)		21,2	24,7	28	32,7
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		2,9	0,9	10,7	5,1
$\eta_{TL} = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		13,5	3,3	54	19,4
CMEU(T*,t) (%)		0,683		0,571	
Ri	Média	0,5	162,7	0,44	321,9
	Valor máximo	1,33	264,8	0,71	385,1
	Valor p/ η_o máx	1,01	23,9	0,71	224,6
Ped	Média	4980,7	391,2	5104,5	391
	Valor máximo	6065,6	554,8	6393,2	590
	Valor p/ η_o máx	4543	387,2	5193,4	376
Fo	Média	0,000064	0,0000624	0,0000662	0,0000678
	Valor máximo	0,0000664	0,0000746	0,0000805	0,0000788
	Valor p/ η_o máx	0,0000518	0,0000484	0,0000664	0,0000682
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,086	0,21	0,13	0,193
	Valor máximo	0,388	0,385	0,462	0,444
	Valor p/ η_o máx	0,105	0,385	0,012	0,336
TRe - TRmédio (°C)	Média	0,8	2,6	1,2	2,3
	Valor p/ η_o máx	1,2	0,6	2,3	4
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,046	0,033	0,035	0,038
	Valor p/ η_o máx	0,032	0,023	0,036	0,034
(Ts-Te) (°C)	Média	4,3	11,8	3,4	11,7
	$\eta_{T\text{início}}$ do fluxo	12,0	8,4	10,1	9,6
	$\eta_{T\text{máx.}}$ (η_o máx)	12,0	21,6	4,2	13,8

Data do Experimento:		08/05/2002		10/05/2002	
Observações:		Com misturador e com resistência habilitada.		Com misturador e com resistência habilitada	
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	50	20	50	4
	Perfil de consumo	FG		FG	
	Energia solar diária (kJ)	45617,7		42888,4	
	Var (m/s)	0,74		1,19	
	Tar (média diária) (°C)	23		21,2	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Não	-	Sim	-
Abertura do registro		Total	-	Parcial	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,0114	0,0118	0,1177	0,0101
Volume total no coletor (L)		207,7	259,4	542	264,7
Volume total abastecido (L)		201,1	211,9	207,9	213,8
TR médio (°C)		52,3	52,3	54,7	50,7
TR final - TR inicial (°C)		-5,8	1,4	0,1	-1,0
EAO (kJ)		24791,3	32951,5	25268,6	32378,6
E'AF (kJ)		12059,2	14376	11773,3	13725,8
EAF (kJ)		9145	5337,8	9758,1	5146,4
Temp média consumo (°C)		42	43,4	41,5	42,6
ESc (kJ)		22336,4	20215,6	16386	20091,2
EuSc (kJ)		17355,8	14177	8391,6	16478,7
EuSR (kJ)		15309,6	11783,8	7795,1	14382,4
EEr (kJ)		6121,5	19827,5	24785,7	19288
EuE (kJ)		4582,3	14006,1	20453,8	14354,3
EEb (kJ)		0	-	313,5	-
EFR = f(UR) (kJ)		10238,4	13164,8	11673,5	13174,4
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		12283,8	6470,4	14635,9	10939
Erc (kJ)		0	91,3	29,1	26,1
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		1687,0	2227,5	4146,3	978,5
η_o - Rendimento global (%)		33,6	25,6	18,1	33,5
Rend máximo instantâneo (%)		51,1	46,9	36,4	58,1
FS Fração solar (%)		77,4	44,6	27,6	50,1
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		3,7	4,9	9,7	2,3
$\eta = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		11	19,1	53,4	6,8
CMEU(T*,t) (%)		-0,32		0,764	
Ri	Média	352,6	136,3	0,4	147,8
	Valor máximo	2160,69	229,8	0,98	460
	Valor p/ η_o máx	291,16	24,4	0,98	115,5
Ped	Média	461	475,3	4020,6	414,5
	Valor máximo	558,5	593,6	4894,3	575,4
	Valor p/ η_o máx	532,2	351,2	4534,1	430,3
Fo	Média	0,0000637	0,0000644	0,000071	0,0000606
	Valor máximo	0,0000767	0,0000811	0,0000897	0,0000671
	Valor p/ η_o máx	0,0000614	0,0000702	0,0000746	0,0000579
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,261	0,154	0,052	0,263
	Valor máximo	0,42	0,333	0,345	0,427
	Valor p/ η_o máx	0,234	0,333	0,013	0,35
TRe - TRmédio (°C)	Média	7,9	4,3	1,8	2,8
	Valor p/ η_o máx	9,8	2,5	0,9	1,9
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,022	0,032	0,04	0,026
	Valor p/ η_o máx	0,015	0,024	0,032	0,022
(Ts-Te) (°C)	Média	18,7	12,0	2,8	13,3
	η Tíncio do fluxo	23,4	10,8	8,5	9,1
	η Tmáx. (η_o máx)	22,2	11,8	3,3	15,5

Data do Experimento:		11/05/2002		12/05/2002	
Observações:		Com misturador e com resistência habilitada.		Com misturador e com resistência habilitada.	
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	50	14	50	16
	Perfil de consumo	FG		FG	
	Energia solar diária (kJ)	43898,9		45859,5	
	Var (m/s)	0,88		0,93	
	Tar (média diária) (°C)	22,3		22,6	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Não	-
Abertura do registro		Total	-	Total	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,1271	0,0114	0,0137	0,0116
Volume total no coletor (L)		377,5	254,7	239	260,8
Volume total abastecido (L)		221,9	216,4	229,3	212,2
TR médio (°C)		53,6	51,5	52,4	51,1
TR final - TR inicial (°C)		6,9	-6,7	2,3	2,6
EAO (kJ)		33089,5	32927	36054,4	32086,9
E'AF (kJ)		17047,5	14657,4	18667,3	14553,7
EAF (kJ)		8128,5	5640,3	8007,1	5776,3
Temp média consumo (°C)		45,6	43,4	47,8	44
ESc (kJ)		18208,3	19070,6	23267,8	21612,8
EuSc (kJ)		7903,5	14577,7	21346,4	17037,5
EuSR (kJ)		7254,6	12306,3	19372,7	14600,8
EEr (kJ)		29698,7	14383,8	22464,8	18006,7
EuE (kJ)		23702,5	10738	17528,9	12596,3
EEb (kJ)		183,4	-	0	-
EFR = f(UR) (kJ)		10903,4	13045,4	10358,3	12718,3
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		8828,2	10622,1	17497,5	7882,8
Erc (kJ)		0	85,1	0	0
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		2258,4	2175,9	1960,5	1701,1
η_o - Rendimento global (%)		16,5	27,8	42,2	31,8
Rend máximo instantâneo (%)		33,8	63	62,3	46,1
FS Fração solar (%)		23,3	53,7	52,4	52,6
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		5,1	5	4,3	3,7
$\eta_{TL} = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		31,2	17,8	10,1	11,7
CMEU(T*,t) (%)		0,037		0,132	
Ri	Média	0,6	187,2	177,11	175,9
	Valor máximo	1,02	272,8	707,65	781
	Valor p/ η_o máx	0,58	133,1	166,39	23,2
Ped	Média	3827,5	452,6	555,7	470,1
	Valor máximo	3917	576,9	621,9	590,7
	Valor p/ η_o máx	3917	307,6	572,1	458,2
Fo	Média	0,000068	0,0000621	0,0000632	0,000061
	Valor máximo	0,0000859	0,0000795	0,0000773	0,0000773
	Valor p/ η_o máx	0,000077	0,000069	0,0000608	0,0000525
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,086	0,179	0,339	0,251
	Valor máximo	0,397	0,39	0,488	0,422
	Valor p/ η_o máx	0,102	0,36	0,278	0,422
TRe - TRmédio (°C)	Média	1	4,7	9	4,6
	Valor p/ η_o máx	1,1	6,1	8,9	2,7
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,033	0,035	0,025	0,037
	Valor p/ η_o máx	0,049	0,03	0,014	0,015
(Ts-Te) (°C)	Média	3,6	12,2	20,2	14,2
	$\eta_{T\text{início}}$ do fluxo	14,1	8,4	18,8	9,2
	$\eta_{T\text{máx.}}$ (η_o máx)	1,1	10,1	22,5	19,3

Data do Experimento:		16/05/2002		26/05/2002	
Observações:		Com misturador e com resistência habilitada.		Com misturador e com resistência habilitada.	
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	50	8	50	8
	Perfil de consumo	FG		FG	
	Energia solar diária (kJ)	21755,0		59498,1	
	Var (m/s)	1,17		0,89	
	Tar (média diária) (°C)	21,7		17	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Parcial	-	Total	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,1191	0,0081	0,1262	0,0113
Volume total no coletor (L)		146,5	118,2	486,7	330,1
Volume total abastecido (L)		206,5	213,5	207	212,2
TR médio (°C)		51,9	50,1	54,7	51,1
TR final - TR inicial (°C)		6,7	4,3	0	0,4
EAO (kJ)		27786,4	33012,9	27061,7	32619,1
E'AF (kJ)		13702,4	14958,9	10842,1	11359,6
EAF (kJ)		7828	5151,1	7352,1	4041,3
Temp média consumo (°C)		40,5	43	41	42,6
ESc (kJ)		8447,3	7720,5	24417,8	27461,7
EuSc (kJ)		2423,2	5010,1	10953,3	20737,7
EuSR (kJ)		2307,5	3423	9328	17678,9
EEr (kJ)		35062,4	34043,4	20153,3	18218,1
EuE (kJ)		27721,5	27250,6	15390,9	14079,6
EEb (kJ)		83,6	-	239,7	-
EFR = f(UR) (kJ)		10472,3	12649,1	13105	15219,5
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		10034,6	8604,1	8482,4	10074,4
Erc (kJ)		19,2	212,7	17	74,6
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		444,7	441	2121,4	1379,4
η_o - Rendimento global (%)		10,5	14,8	15,6	29,6
Rend máximo instantâneo (%)		40	51,9	43,5	96,4
FS Fração solar (%)		7,6	11,1	37,7	55,6
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		2	2	3,6	2,3
$\eta = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		19,5	13,7	22,9	7,8
CMEU(T*,t) (%)		0,008		0,35	
Ri	Média	0,51	101,9	0,82	49,7
	Valor máximo	0,74	145,9	2,8	173,1
	Valor p/ η_o máx	0,04	34,1	1,07	23,5
Ped	Média	3013,9	327,8	3816,3	465,2
	Valor máximo	5204,2	496,8	3956,9	581,1
	Valor p/ η_o máx	853,9	272,4	3861,4	397,3
Fo	Média	0,0000634	0,0000592	0,0000708	0,0000614
	Valor máximo	0,0000732	0,0000696	0,0000822	0,0000727
	Valor p/ η_o máx	0,0000551	0,0000502	0,0000583	0,00005
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,176	0,19	0,111	0,245
	Valor máximo	0,408	0,386	0,432	0,499
	Valor p/ η_o máx	0,261	0,348	0,432	0,447
TRe - TRmédio (°C)	Média	1,1	1,7	1,5	3,7
	Valor p/ η_o máx	0,2	1,6	0,8	1,3
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,051	0,05	0,035	0,026
	Valor p/ η_o máx	0,025	0,026	0,052	0,061
(Ts-Te) (°C)	Média	5,3	9,0	4,4	14,6
	$\eta_{\text{início do fluxo}}$	15,7	7,8	9,9	10,6
	$\eta_{\text{Tmáx.}}(\eta_o \text{ máx})$	15,7	14,4	10	16,9

Data do Experimento:		27/05/2002		04/06/2002	
Observações:		Com misturador e com resistência habilitada.		Com misturador e com resistência habilitada.	
* Com timer					
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	50	8	50	10
	Perfil de consumo	FG		CC	
	Energia solar diária (kJ)	51325,6		50991,7	
	Var (m/s)	1,19		0,42	
	Tar (média diária) (°C)	17,5		20,7	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Não	-
Abertura do registro		Parcial	-	Total	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,1172	0,0111	0,0104	0,0109
Volume total no coletor (L)		768,2	300,1	263,5	317,6
Volume total abastecido (L)		205	218,6	202,8	205,5
TR médio (°C)		55	51	52,9	50,8
TR final - TR inicial (°C)		-0,2	-1,8	-10	-5,1
EAQ (kJ)		27902,9	34241,8	31050,3	34006,1
E'AF (kJ)		11365,3	12624,3	13893,5	13969,2
EAF (kJ)		7066,3	4163,8	6916,6	4211,5
Temp média consumo (°C)		42,9	42,6	45	44,3
ESc (kJ)		19753,7	23931,9	23887,4	23651,4
EuSc (kJ)		10502,8	19075,9	21695,5	21336,4
EuSR (kJ)		8691,2	16660,3	18704,7	18253,6
EEr (kJ)		23316,2	18770,4	4803,1	10394,5
EuE (kJ)		18139,4	14623,7	3391,3	7568,5
EEb (kJ)		449,4	-	0	-
EFR = f(UR) (kJ)		13026,8	14947,1	11193,1	13463,4
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		10034,9	11238,8	13758,7	10306,1
Erc (kJ)		433,2	9,1	0	2,5
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		4156	1090,4	2095,5	1915,6
η_o - Rendimento global (%)		16,1	32,4	36,7	36,2
Rend máximo instantâneo (%)		34	64,5	60,8	56,3
FS Fração solar (%)		32,4	53,3	85,5	70,9
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		8,1	2,1	4,1	3,8
$\eta_{?} = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		50,3	6,6	11,2	10,4
CMEU(T*,t) (%)		0,738		0,086	
Ri	Média	0,57	203,9	421,48	334,7
	Valor máximo	0,87	342,1	596,14	738,3
	Valor p/ η_o máx	0,87	172,9	98,07	81,7
Ped	Média	4066,8	456,1	423,8	445,7
	Valor máximo	5250,8	559,7	535,1	555,7
	Valor p/ η_o máx	3078	372,5	443,4	464,5
Fo	Média	0,0000717	0,0000612	0,0000646	0,0000603
	Valor máximo	0,0000847	0,0000702	0,0000798	0,0000757
	Valor p/ η_o máx	0,0000552	0,0000592	0,0000431	0,0000422
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,062	0,266	0,279	0,249
	Valor máximo	0,459	0,495	0,518	0,498
	Valor p/ η_o máx	0,281	0,399	0,496	0,494
TRe - TRmédio (°C)	Média	0,3	3,9	7,4	5,4
	Valor p/ η_o máx	1,1	5,8	8,4	5,8
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,041	0,023	0,022	0,027
	Valor p/ η_o máx	0,022	0,028	0,014	0,012
(Ts-Te) (°C)	Média	3,6	14,8	19,1	15,4
	η início do fluxo	14,8	10,6	13,7	10,4
	η Tmáx. (η_o máx)	9,6	14,1	24,7	21,3

Data do Experimento:		07/06/2002		08/06/2002	
Observações:		Com misturador e com resistência habilitada.		Com misturador e com resistência habilitada.	
*Com timer					
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	50	10	50	18
	Perfil de consumo	CC		CC	
	Energia solar diária (kJ)	53084,8		48355,9	
	Var (m/s)	0,95		0,44	
	Tar (média diária) (°C)	21		20,9	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Total	-	Parcial	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,0996	0,0107	0,128	0,0112
Volume total no coletor (L)		394,2	320,5	866,2	300,3
Volume total abastecido (L)		205,7	204,8	199,2	205,5
TR médio (°C)		52,8	50,1	53,1	50,4
TR final - TR inicial (°C)		-1,3	-1,5	-2,4	0
EAO (kJ)		34708,8	32791,7	32160,2	33738,9
E'AF (kJ)		16327,5	13634,2	15019,8	14013
EAF (kJ)		4801,1	4544,3	5452,4	4158,7
Temp média consumo (°C)		46,1	43,3	45,5	44
ESc (kJ)		25245,7	25349,8	20300,3	22667,8
EuSc (kJ)		15001,6	19533,8	10343,6	18419,7
EuSR (kJ)		13688,1	17113	8984,9	16278,1
EEr (kJ)		16947,4	12150,8	15762,2	15732
EuE (kJ)		13323,7	7783,8	11137,9	10354,7
EEb (kJ)		188,1	-	474,6	-
EFR = f(UR) (kJ)		11115,8	13032,3	11192	13165,9
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		9770	7925,2	4977,7	7742,2
Erc (kJ)		2,3	17,5	117,5	10,1
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		1061,8	1469,6	4155,5	1465,8
η_o - Rendimento global (%)		25,8	32,2	18,3	33,6
Rend máximo instantâneo (%)		44,9	53,6	45,5	99,9
FS Fração solar (%)		50,7	66,5	44,8	59,2
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		2	2,8	8,6	3,0
$\eta = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		7,8	8,6	47	9,0
CMEU(T*,t) (%)		-0,384		0,647	
Ri	Média	1,43	269,8	0,77	265,1
	Valor máximo	6,24	471,3	4,14	461,1
	Valor p/ η_o máx	6,24	97	4,07	69,1
Ped	Média	3888	447,9	4408,2	457,8
	Valor máximo	4033,1	559,5	5161,3	550,6
	Valor p/ η_o máx	3969,4	482,9	4020,7	333,9
Fo	Média	0,0000667	0,0000591	0,0000667	0,0000596
	Valor máximo	0,0000733	0,0000723	0,0000824	0,0000726
	Valor p/ η_o máx	0,0000429	0,0000399	0,0000465	0,0000478
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,177	0,223	0,082	0,234
	Valor máximo	0,522	0,477	0,518	0,5
	Valor p/ η_o máx	0,452	0,449	0,422	0,465
TRe - TRmédio (°C)	Média	2,1	4,7	0,7	5,2
	Valor p/ η_o máx	3,1	6,5	1,2	1,4
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,024	0,025	0,037	0,028
	Valor p/ η_o máx	0,007	0,01	0,019	0,028
(Ts-Te) (°C)	Média	6	13,9	3,7	14,0
	$\eta_{\text{Início do fluxo}}$	11,7	10,4	18,3	9,4
	$\eta_{\text{Tmáx.}}(\eta_o \text{ máx})$	13	20,6	18,3	20,4

Data do Experimento:		09/06/2002		10/06/2002	
Observações:		Com misturador e com resistência habilitada.		Com misturador e com resistência habilitada.	
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	50	8	50	8
	Perfil de consumo	CC		CC	
	Energia solar diária (kJ)	48240,2		31492,6	
	Var (m/s)	0,59		0,68	
	Tar (média diária) (°C)	21,4		21,7	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Não	-	Sim	-
Abertura do registro		Total	-	Total	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,0108	0,0110	0,1271	0,0096
Volume total no coletor (L)		242,6	296	238,4	204,7
Volume total abastecido (L)		162,5	203	146	204,4
TR médio (°C)		54,5	50,5	53	51,2
TR final - TR inicial (°C)		-1,8	-1,6	3,9	1,7
EAO (kJ)		23981,5	33022,3	23292,5	33446,7
E'AF (kJ)		10836,7	14132,1	11643,9	15292
EAF (kJ)		6108,1	4559,2	3765,2	4031,2
Temp média consumo (°C)		45	44	45,7	43,6
ESc (kJ)		22326,9	22749,4	13063,9	12879,3
EuSc (kJ)		19099,6	18454,4	5447,5	10644,7
EuSR (kJ)		15894,6	15881,1	4857,5	8788,3
EEr (kJ)		12244	13346,3	23305,1	25365,3
EuE (kJ)		9291,2	8244,8	18269,4	19867
EEb (kJ)		0	-	112,6	-
EFR = f(UR) (kJ)		11513,2	12976,9	10893,2	13167,3
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		13629,9	7499,8	8039,1	8895,8
Erc (kJ)		0	16,6	1,3	103,2
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		2225,1	1488,8	906,5	853,8
η_o - Rendimento global (%)		32,9	33,2	15,4	27,6
Rend máximo instantâneo (%)		63,7	56,8	31,8	54,8
FS Fração solar (%)		63,2	63,6	20,9	30,6
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		4,6	3,1	2,9	2,7
$\eta = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		14	9,3	18,7	9,8
CMEU(T*,t) (%)		0,331		0,058	
Ri	Média	319,95	276,1	0,85	48,8
	Valor máximo	2865,45	954,7	1,9	162,7
	Valor p/ η_o máx	74,28	71,4	1,9	62,9
Ped	Média	432,7	448,6	3992,5	391,2
	Valor máximo	545,1	578,8	4260,9	563
	Valor p/ η_o máx	461	470,5	3844,4	474,6
Fo	Média	0,000069	0,0000594	0,0000668	0,0000626
	Valor máximo	0,0000822	0,0000729	0,0000751	0,0000677
	Valor p/ η_o máx	0,0000518	0,0000425	0,0000511	0,0000501
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,249	0,228	0,126	0,159
	Valor máximo	0,476	0,466	0,399	0,432
	Valor p/ η_o máx	0,476	0,448	0,31	0,432
TRe - TRmédio (°C)	Média	6,6	4,7	1,7	3,4
	Valor p/ η_o máx	6,7	5,5	1,5	4,8
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,029	0,03	0,04	0,041
	Valor p/ η_o máx	0,025	0,014	0,024	0,019
(Ts-Te) (°C)	Média	18,1	13,7	5,7	11,2
	$\eta_{\text{início do fluxo}}$	12,2	10,5	15	10,7
	$\eta_{\text{Tmáx.}}(\eta_o \text{ máx})$	23,7	19,8	8,3	20

Data do Experimento:		13/06/2002		03/09/2002	
Observações:		Com misturador e com resistência habilitada.		Com misturador e com resistência desligada.	
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	50	10	50	12
	Perfil de consumo	CC		OO	
	Energia solar diária (kJ)	45598,5		64823,2	
	Var (m/s)	0,61		0,9	
	Tar (média diária) (°C)	22,2		15,1	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Parcial	-	Parcial	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,1323	0,0102	0,0231	0,0114
Volume total no coletor (L)		791,8	299,5	458,1	375,7
Volume total abastecido (L)		207,4	205,4	94,1	93,1
TR médio (°C)		53,2	49	36	37,2
TR final - TR inicial (°C)		-0,9	9	3,2	4,2
EAO (kJ)		38972,5	34841,9	16697,1	16215,1
E'AF (kJ)		20087,4	16838,7	7380,9	6199,5
EAF (kJ)		3523,3	3830,7	318,3	554,7
Temp média consumo (°C)		49,3	45,1	44,1	44,5
ESc (kJ)		19008,2	21472,3	32650	33722,5
EuSc (kJ)		9972	18454,1	28943,7	28794,1
EuSR (kJ)		9627,4	16323,6	27157	26854,4
EEr (kJ)		23002,6	21369,3	0	0
EuE (kJ)		17769,2	16925,5	0	0
EEb (kJ)		407,4	-	982,7	-
EFR = f(UR) (kJ)		10758,9	11968,8	7282,1	9859,9
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		9207,4	7274,8	14952,2	13043,6
Erc (kJ)		92,5	4,7	2,9	9,6
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		3749,3	1051	393,7	833,1
η_o - Rendimento global (%)		20,9	35,8	41,9	41,4
Rend máximo instantâneo (%)		44	83,7	56	52,3
FS Fração solar (%)		35,2	48,8	100	99,9
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		8,2	2,3	0,6	1,3
$\eta_{\text{f}} = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		39,3	6,4	1,4	3,1
CMEU(T*,t) (%)		0,72		-1,116	
Ri	Média	0,63	312,3	146,4	585
	Valor máximo	1,06	769,5	309,41	916,7
	Valor p/ η_o máx	0,65	70,7	100,2	466,2
Ped	Média	4435,4	419,3	949,8	480,8
	Valor máximo	5534,6	540	1393,8	610,9
	Valor p/ η_o máx	3471,8	325,6	1103,5	514,3
Fo	Média	0,0000671	0,0000568	0,0000336	0,0000355
	Valor máximo	0,000079	0,0000664	0,000057	0,0000603
	Valor p/ η_o máx	0,0000501	0,0000427	0,0000248	0,0000260
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,087	0,224	0,157	0,197
	Valor máximo	0,517	0,443	0,269	0,287
	Valor p/ η_o máx	0,439	0,42	0,212	0,287
TRe - TRmédio (°C)	Média	1	5,1	8,9	10
	Valor p/ η_o máx	0,9	0,1	10,7	14,2
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,038	0,024	0,013	0,014
	Valor p/ η_o máx	0,018	0,023	0,004	0,005
(Ts-Te) (°C)	Média	3,5	13,9	13,4	17
	$\eta_{\text{início}}$ do fluxo	9,3	9,8	13,2	5,9
	$\eta_{\text{máx.}}$ (η_o máx)	10,8	20,1	17,2	23

Data do Experimento:		14/10/2002		16/10/2002	
Observações:		Com misturador e com resistência desligada.		Com misturador e com resistência desligada.	
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	60	4	45	8
	Perfil de consumo	OO		OO	
	Energia solar diária (kJ)	56080,3		54231,8	
	Var (m/s)	0,94		0,67	
	Tar (média diária) (°C)	26,7		27	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Não	-
Abertura do registro		Parcial	-	Total	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,0207	0,0115	0,0102	0,0109
Volume total no coletor (L)		426,2	370,4	317,8	367,4
Volume total abastecido (L)		140,9	146,1	144,6	139,8
TR médio (°C)		44,4	43,2	43,6	43,6
TR final - TR inicial (°C)		2	2,4	2,2	2,8
EAO (kJ)		27293,4	29101,1	27821,5	27666,6
E'AF (kJ)		16073,6	16240,3	16992,1	15740,8
EAF (kJ)		1774,5	924,7	1850,2	1145,1
Temp média consumo (°C)		50,3	50,2	50	50,9
ESc (kJ)		30742,3	30153,7	29385,9	29129,4
EuSc (kJ)		26980,9	27170,9	26124,8	26175,4
EuSR (kJ)		24666,1	24900,4	23194,7	23359,8
EEr (kJ)		0	0	0	0
EuE (kJ)		0	0	0	0
EEb (kJ)		1018,9	-	0	-
EFR = f(UR) (kJ)		6160,6	7371,8	5781,2	7432
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		11635,9	9851,2	10391,1	8907,7
Erc (kJ)		16,3	32,6	0	12,9
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		64,6	140,1	1839	1957
η_o - Rendimento global (%)		44	44,3	42,8	43,1
Rend máximo instantâneo (%)		58,2	55,6	55,4	52,5
FS Fração solar (%)		99,9	99,9	99,9	99,9
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		0,1	0,2	3,4	3,6
$\eta_{\text{f}} = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		0,3	0,6	7,9	8,4
CMEU(T*,t) (%)		-1,167		-0,064	
Ri	Média	200,27	484,2	1123,07	650,9
	Valor máximo	388,84	889,6	1480,79	1033,2
	Valor p/ η_o máx	215,46	427,5	439,18	415,3
Ped	Média	837,7	477,4	426	465,1
	Valor máximo	1369	582,4	563,1	585,6
	Valor p/ η_o máx	792,6	582,4	541,3	565,1
Fo	Média	0,000048	0,0000471	0,0000465	0,0000473
	Valor máximo	0,0000769	0,0000744	0,000073	0,0000751
	Valor p/ η_o máx	0,0000543	0,0000509	0,0000411	0,0000423
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,134	0,151	0,182	0,162
	Valor máximo	0,182	0,208	0,237	0,211
	Valor p/ η_o máx	0,163	0,206	0,235	0,197
TRe - TRmédio (°C)	Média	8,9	10,4	10,1	9,4
	Valor p/ η_o máx	10,3	14,4	15,2	14,5
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,014	0,013	0,01	0,013
	Valor p/ η_o máx	0,01	0,007	0,001	0,003
(Ts-Te) (°C)	Média	12,8	15,9	17,9	15,6
	$\eta_{\text{início}}$ do fluxo	6,9	5,2	9,8	4,9
(°C)	$\eta_{\text{máx.}}$ (η_o máx)	16,9	22,0	24,1	21,6

Data do Experimento:		26/10/2002		27/10/2002	
Observações:		Com misturador e com resistência desligada.		Com misturador e com resistência desligada.	
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	50	4	45	4
	Perfil de consumo	OO		OO	
	Energia solar diária (kJ)	45845,1		58351,3	
	Var (m/s)	1,33		1,51	
	Tar (média diária) (°C)	23,1		23,1	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Parcial	-	Parcial	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,0287	0,0104	0,0186	0,0122
Volume total no coletor (L)		547,9	341,1	451,3	400
Volume total abastecido (L)		141,7	142,7	151,1	151,1
TR médio (°C)		34,4	35,1	41,1	41
TR final - TR inicial (°C)		6,7	5,7	1,5	0,8
EAQ (kJ)		23687,3	24157,7	28657,3	28486,9
E'AF (kJ)		13582,3	13928,7	13894,9	13982
EAF (kJ)		791,5	754,7	1141,5	1168
Temp média consumo (°C)		41,7	42,6	47,9	48
ESc (kJ)		26098	25232,3	31859,5	31443,3
EuSc (kJ)		22262,3	23846,8	27582,4	29465,2
EuSR (kJ)		22359,8	22369,8	26968,6	26917,6
EEr (kJ)		0	0	0	0
EuE (kJ)		0	0	0	0
EEb (kJ)		1024,1	-	1252,4	-
EFR = f(UR) (kJ)		3932,2	5356,3	6273,9	7996,2
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		6202,1	6978,1	10855,4	11665,5
Erc (kJ)		0	15,7	0	26,5
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		168,6	357,7	2841,2	3274
η_o - Rendimento global (%)		48,8	48,8	46,2	46,1
Rend máximo instantâneo (%)		66,7	62,7	58,1	55,9
FS Fração solar (%)		100	100	100	100
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		0,4	0,8	4,9	5,6
$\eta = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		0,8	1,6	10,5	12,2
CMEU(T*,t) (%)		-1,122		-0,152	
Ri	Média	130,63	462,1	257,97	455,1
	Valor máximo	287,16	1993,1	614,71	981,6
	Valor p/ η_o máx	43,28	1993,1	158,39	375,5
Ped	Média	1152,4	439,5	771,4	508,9
	Valor máximo	2648,7	590,6	1020,5	631,9
	Valor p/ η_o máx	1233	245,4	833,3	594,6
Fo	Média	0,0000329	0,0000335	0,0000426	0,0000424
	Valor máximo	0,0000497	0,0000506	0,0000709	0,0000711
	Valor p/ η_o máx	0,0000293	0,00005	0,0000393	0,0000347
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,096	0,127	0,142	0,155
	Valor máximo	0,157	0,215	0,179	0,2
	Valor p/ η_o máx	0,151	0,151	0,153	0,195
TRe - TRmédio (°C)	Média	9,4	10,7	10,1	10,5
	Valor p/ η_o máx	7,5	3	11,2	15,4
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,016	0,014	0,016	0,014
	Valor p/ η_o máx	0,005	0,025	0,010	0,005
(Ts-Te) (°C)	Média	9,2	14	13,4	16,2
	η Início do fluxo	3,5	4,5	7,7	3,2
	η Tmáx. (η_o máx)	16,8	23,0	19,1	22,2

Data do Experimento:		28/10/2002		29/10/2002	
Observações:		Com misturador e com resistência desligada.		Com misturador e com resistência desligada.	
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	55	4	60	4
	Perfil de consumo	OO		OO	
	Energia solar diária (kJ)	50097,7		53152,8	
	Var (m/s)	1,61		1,19	
	Tar (média diária) (°C)	23,4		25,5	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Parcial	-	Parcial	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,0249	0,0115	0,0219	0,0113
Volume total no coletor (L)		452,2	327,5	469,1	374,9
Volume total abastecido (L)		152,3	149,7	152,5	151,2
TR médio (°C)		40,6	40	41,3	41,2
TR final - TR inicial (°C)		-1	-0,5	2,2	2
EAQ (kJ)		28119,4	27342,7	28990,2	28127,6
E'AF (kJ)		14467,6	14181,4	15142,2	14706
EAF (kJ)		1070,2	1091,8	1121,3	1657
Temp média consumo (°C)		46,5	46,1	47,9	48
ESc (kJ)		26966,5	27461,9	29744,2	29223,6
EuSc (kJ)		22825,6	24405	25197,3	26835,2
EuSR (kJ)		21698,8	22459,2	24323,7	24731,2
EEr (kJ)		0	0	0	0
EuE (kJ)		0	0	0	0
EEb (kJ)		907,7	-	1060,1	-
EFR = f(UR) (kJ)		5987,4	7411,5	5491,5	7030,3
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		8947,3	9737,6	8495,9	9502,4
Erc (kJ)		0	10,5	0	7,1
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		201,8	390	0	35,2
η_o - Rendimento global (%)		43,3	44,8	45,8	46,5
Rend máximo instantâneo (%)		55,6	54,1	60,8	61,8
FS Fração solar (%)		100	100	100	100
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		0,4	0,8	0	0,1
$\eta_{\text{f}} = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		0,9	1,7	0	0,1
CMEU(T*,t) (%)		-0,933		1,000	
Ri	Média	208,31	477,8	164,5	552,9
	Valor máximo	453,53	923,3	395,12	1045
	Valor p/ η_o máx	60,59	598	78,77	480,3
Ped	Média	934,8	479,8	892,6	471,2
	Valor máximo	3600,9	593,6	1546,9	598,1
	Valor p/ η_o máx	1253,6	502,7	974,7	431,5
Fo	Média	0,0000404	0,0000396	0,0000427	0,0000425
	Valor máximo	0,0000648	0,0000648	0,0000696	0,0000699
	Valor p/ η_o máx	0,0000273	0,0000563	0,0000318	0,0000309
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,134	0,162	0,131	0,157
	Valor máximo	0,186	0,212	0,175	0,203
	Valor p/ η_o máx	0,186	0,175	0,145	0,203
TRe - TRmédio (°C)	Média	8,3	10,9	8,6	10,4
	Valor p/ η_o máx	7,5	9,4	6,3	9,3
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,018	0,013	0,014	0,013
	Valor p/ η_o máx	0,006	0,019	0,003	0,002
(Ts-Te) (°C)	Média	11,1	16,5	11,4	15,8
	$\eta_{\text{início}}$ do fluxo	6,1	5,7	7,9	5,9
	$\eta_{\text{máx.}}$ (η_o máx)	11,5	16,7	10,2	15,7

Data do Experimento:		08/11/2002		09/11/2002	
Observações:		Com misturador e com resistência desligada.		Com misturador e com resistência desligada.	
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	45	4	45	8
	Perfil de consumo	OO		OO	
	Energia solar diária (kJ)	56580,5		57839,5	
	Var (m/s)	2,06		1,43	
	Tar (média diária) (°C)	18,1		22,3	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Parcial	-	Parcial	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,0213	0,0111	0,0183	0,0114
Volume total no coletor (L)		595,1	359,6	228,9	368,5
Volume total abastecido (L)		152,2	149,7	152,4	149,2
TR médio (°C)		32,0	32,3	36,9	37,4
TR final - TR inicial (°C)		6,0	5,4	5,2	5,6
EAO (kJ)		23621,2	24349,1	26928,9	27356,1
E'AF (kJ)		11198,1	11154,2	14118	13585,5
EAF (kJ)		1351,1	898,1	1680	1544,3
Temp média consumo (°C)		39,8	41,0	45,9	47,1
ESc (kJ)		31881,9	31382,5	32441,3	32423,5
EuSc (kJ)		29180	30122,2	28819	29540,8
EuSR (kJ)		27318,7	27408,9	26609,2	26824,8
EEr (kJ)		0	0	0	0
EuE (kJ)		0	0	0	0
EEb (kJ)		1430,5	-	569,8	-
EFR = f(UR) (kJ)		4816,6	6332,5	5068,9	6763,4
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		9447,7	9297,7	9100	7992,9
Erc (kJ)		10,5	23,8	4,3	7,4
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		801,1	1151,2	1938,9	2208,6
η_o - Rendimento global (%)		48,3	48,4	46	46,4
Rend máximo instantâneo (%)		74,2	73,5	63,9	55,4
FS Fração solar (%)		100	100	100	99,9
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		1,4	2,0	3,4	3,8
$\eta = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		2,9	4,2	7,3	8,2
CMEU(T*,t) (%)		-0,437		-0,139	
Ri	Média	185,81	598,0	392,43	595,4
	Valor máximo	390,7	1183,9	851,89	1106,1
	Valor p/ η_o máx	380,23	1183,9	123,59	483,3
Ped	Média	908,2	474,7	754	479,5
	Valor máximo	1158,6	594,5	3396,8	589,4
	Valor p/ η_o máx	609,8	332,2	1030,3	553,9
Fo	Média	0,0000298	0,0000296	0,0000358	0,0000367
	Valor máximo	0,000053	0,000052	0,0000616	0,0000631
	Valor p/ η_o máx	0,000053	0,000052	0,0000405	0,0000273
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,122	0,153	0,179	0,163
	Valor máximo	0,183	0,217	0,275	0,22
	Valor p/ η_o máx	0,077	0,124	0,211	0,217
TRe - TRmédio (°C)	Média	8,6	12,3	7,3	11,6
	Valor p/ η_o máx	0,9	1,9	6,7	16,8
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,014	0,013	0,015	0,01
	Valor p/ η_o máx	0,08	0,097	0,004	0,002
(Ts-Te) (°C)	Média	11,1	18,1	16,7	17,5
	$\eta_{\text{início do fluxo}}$	4,2	6,8	7,8	6,8
	$\eta_{\text{máx.}}(\eta_o \text{ máx})$	18,3	25,9	12,8	24,1

Data do Experimento:		10/11/2002		11/11/2002	
Observações:		Com misturador e com resistência desligada.		Com misturador e com resistência desligada.	
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	45	8	45	10
	Perfil de consumo	OO		OO	
	Energia solar diária (kJ)	38773,1		32388,8	
	Var (m/s)	1,75		1,78	
	Tar (média diária) (°C)	24,5		23	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Total	-	Total	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,03	0,0095	0,0237	0,0082
Volume total no coletor (L)		367,4	300,7	290,9	279,4
Volume total abastecido (L)		149,8	152,1	152,2	149
TR médio (°C)		37,3	38	33,9	34,5
TR final - TR inicial (°C)		-1,6	-1,7	-1,5	-1,1
EAO (kJ)		24270,9	22956,2	22680,9	21634,3
E'AF (kJ)		14504,2	13154,1	15018,1	13593
EAF (kJ)		1098,2	2483	960,8	1515,2
Temp média consumo (°C)		41,1	41	37,6	37,7
ESc (kJ)		21552,4	20741,3	16932,4	15735,3
EuSc (kJ)		14139	18387,6	10586,5	15305,7
EuSR (kJ)		13329,2	16168,9	10198,5	12947,7
EEr (kJ)		0	0	0	0
EuE (kJ)		0	0	0	0
EEb (kJ)		598,3	-	621,5	-
EFR = f(UR) (kJ)		4464,9	6066	3786,3	5162,1
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		5004,8	7888,1	3889,5	5832,2
Erc (kJ)		0	10,6	0	66,5
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		564,8	849,8	28,5	119,5
η_o - Rendimento global (%)		34,4	41,7	31,5	39,8
Rend máximo instantâneo (%)		59,1	60,2	67,9	58
FS Fração solar (%)		100	100	100	100
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		1,5	2,2	0,1	0,4
$\eta_{\text{f}} = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		4,2	5,3	0,3	0,9
CMEU(T*,t) (%)		-0,505		-3,193	
Ri	Média	82,08	571	47,76	577,6
	Valor máximo	255,56	1509,7	72,92	1271,9
	Valor p/ η_o máx	36,62	539,8	16,66	467,9
Ped	Média	1227,3	400,2	996,3	345,8
	Valor máximo	2793,7	544,3	1602,8	556,7
	Valor p/ η_o máx	1278,2	381,5	1602,8	467,1
Fo	Média	0,000035	0,0000359	0,00003	0,0000308
	Valor máximo	0,0000506	0,0000529	0,0000403	0,000042
	Valor p/ η_o máx	0,00004	0,0000317	0,0000266	0,0000273
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,128	0,137	0,098	0,105
	Valor máximo	0,241	0,202	0,168	0,178
	Valor p/ η_o máx	0,09	0,199	0,168	0,165
TRe - TRmédio (°C)	Média	6,2	7,6	6,1	5,9
	Valor p/ η_o máx	6,3	7	5,7	13,4
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,02	0,022	0,024	0,023
	Valor p/ η_o máx	0,009	0,002	0,006	0,003
(Ts-Te) (°C)	Média	10	13,1	8,4	11,2
	$\eta_{\text{início}}$ do fluxo	10,8	5,2	10,0	4,6
	$\eta_{\text{máx.}}$ (η_o máx)	8,8	14,2	11,0	22,9

Data do Experimento:		19/11/2002		23/11/2002	
Observações:		Com misturador e com resistência desligada.		Com misturador e com resistência desligada.	
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	45	8	50	5
	Perfil de consumo	OO		OO	
	Energia solar diária (kJ)	45096,3		36213,5	
	Var (m/s)	1,66		1,22	
	Tar (média diária) (°C)	24,3		23,3	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Parcial	-	Parcial	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,0195	0,010	0,0216	0,0086
Volume total no coletor (L)		357,6	314,3	306,2	310,5
Volume total abastecido (L)		152,6	150,9	151,9	152,1
TR médio (°C)		37,0	37,8	34,3	34,8
TR final - TR inicial (°C)		1,8	1,6	2	2
EAO (kJ)		26200,2	24486,7	24323,9	23677,9
E'AF (kJ)		15674,7	14049,7	15466,2	14578,1
EAF (kJ)		1114	2106,5	920,9	1271
Temp média consumo (°C)		43,5	42,8	40,1	39,9
ESc (kJ)		24403,5	24040,2	18315,9	18335,7
EuSc (kJ)		21980,4	22559,3	18461,2	19628,2
EuSR (kJ)		20317	20405,4	16887,7	17259,6
EEr (kJ)		0	0	0	0
EuE (kJ)		0	0	0	0
EEb (kJ)		917	-	785,9	-
EFR = f(UR) (kJ)		4415,4	6037,3	3830,5	5140,5
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		8147	8493,2	6211,5	6292,7
Erc (kJ)		21,4	33,4	12,9	62
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		325	619,3	54,7	205,3
η_o - Rendimento global (%)		45	45,2	46,6	47,5
Rend máximo instantâneo (%)		59	56,8	65,6	67,3
FS Fração solar (%)		100	100	100	100
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		0,7	1,4	0,2	0,6
$\eta_{\text{m}} = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		1,6	3	0,3	1,2
CMEU(T*,t) (%)		-0,905		-2,756	
Ri	Média	168,41	521,6	136,7	588,2
	Valor máximo	324,74	1745,2	225,34	1105,5
	Valor p/ η_o máx	73,76	471	42,87	836,3
Ped	Média	820,6	422	916,2	364
	Valor máximo	943,9	595,8	1246	548,7
	Valor p/ η_o máx	933,9	514,7	1226,7	366,8
Fo	Média	0,0000364	0,0000372	0,0000315	0,0000319
	Valor máximo	0,0000545	0,000056	0,0000454	0,0000463
	Valor p/ η_o máx	0,0000263	0,0000393	0,0000255	0,0000463
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,108	0,12	0,108	0,119
	Valor máximo	0,157	0,193	0,148	0,172
	Valor p/ η_o máx	0,121	0,192	0,144	0,112
TRe - TRmédio (°C)	Média	8,7	10	8,4	7,7
	Valor p/ η_o máx	9	13,1	6,9	4,7
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,018	0,017	0,023	0,019
	Valor p/ η_o máx	0,006	0,005	0,003	0,074
(Ts-Te) (°C)	Média	10,8	15,1	9	12,7
	$\eta_{\text{início}}$ do fluxo	7,2	5,7	5,5	4,7
	$\eta_{\text{máx.}}$ (η_o máx)	10,5	20,7	10,3	11,9

Data do Experimento:		27/11/2002		28/11/2002	
Observações:		Com misturador e com resistência desligada.		Com misturador e com resistência desligada.	
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	50	8	50	6
	Perfil de consumo	OO		OO	
	Energia solar diária (kJ)	44170,1		45991,3	
	Var (m/s)	1,74		1,17	
	Tar (média diária) (°C)	24,9		24,7	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Parcial	-	Parcial	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,0178	0,0101	0,0164	0,0102
Volume total no coletor (L)		279,1	306,3	158,9	321,5
Volume total abastecido (L)		152,1	149,9	150,5	151,6
TR médio (°C)		34,1	35	38,1	38,9
TR final - TR inicial (°C)		5,5	5,4	1	0,3
EAO (kJ)		24489,4	25048,5	26138,3	26774,3
E'AF (kJ)		15199	14908,6	14955,1	14841,6
EAF (kJ)		1269,4	892,3	1203,8	1067,4
Temp média consumo (°C)		41,1	41,8	44,1	44,5
ESc (kJ)		24847,8	24445,6	25259,1	25040,8
EuSc (kJ)		21607,9	22582,4	22730,3	23130,1
EuSR (kJ)		20435,3	20533,9	20924	20810,8
EEr (kJ)		0	0	0	0
EuE (kJ)		0	0	0	0
EEb (kJ)		815,2	-	457,9	-
EFR = f(UR) (kJ)		3197,6	4493,6	4671,7	6351,2
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		6172,1	5483,8	8830,5	8571,6
Erc (kJ)		3	33,2	8,9	36,1
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		146,2	320,8	510,1	807,8
η_o - Rendimento global (%)		46,3	46,4	45,5	45,2
Rend máximo instantâneo (%)		63,1	62,9	57,7	56,5
FS Fração solar (%)		100	100	100	100
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		0,3	0,7	1,1	1,8
$\eta_{TL} = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		0,7	1,6	2,4	3,9
CMEU(T*,t) (%)		-1,194		-0,583	
Ri	Média	247,62	596,7	282,57	581,5
	Valor máximo	454,61	1381,5	353,89	1496,3
	Valor p/ η_o máx	92,5	549	277,42	687,2
Ped	Média	750,3	430,1	676,6	429,4
	Valor máximo	950,4	556	786	566,8
	Valor p/ η_o máx	950,4	389,9	657,8	435,1
Fo	Média	0,000032	0,0000329	0,0000373	0,0000382
	Valor máximo	0,0000489	0,0000504	0,0000587	0,0000606
	Valor p/ η_o máx	0,0000223	0,0000237	0,0000312	0,0000497
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,128	0,134	0,151	0,139
	Valor máximo	0,193	0,191	0,243	0,194
	Valor p/ η_o máx	0,167	0,145	0,237	0,177
TRe - TRmédio (°C)	Média	9,3	11,5	6,5	10
	Valor p/ η_o máx	10,2	10,4	9,4	8,3
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,023	0,026	0,016	0,016
	Valor p/ η_o máx	0,002	0,001	0,001	0,012
(Ts-Te) (°C)	Média	11,6	14,8	13,6	15,3
	η Tíncio do fluxo	7,9	8	5,3	4,7
	η Tmáx. (η_o máx)	14,5	14,8	21,7	15,7

Data do Experimento:		04/12/2002		13/12/2002	
Observações:		Sem misturador e com resistência habilitada.		Sem misturador e com resistência habilitada.	
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	50	12	50	15
	Perfil de consumo	CC		FG	
	Energia solar diária (kJ)	47764,4		37131,8	
	Var (m/s)	1,6		0,8	
	Tar (média diária) (°C)	24,6		23,4	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Parcial	-	Parcial	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,0100	0,0100	0,0221	0,0093
Volume total no coletor (L)		242	294,0	182,8	233,0
Volume total abastecido (L)		209,7	206,4	220,1	215,8
TR médio (°C)		49,6	51,3	49,4	48,1
TR final - TR inicial (°C)		-3,6	0,3	-5,6	0,5
EAO (kJ)		45720,7	44722,3	47016,3	42397,6
E'AF (kJ)		22825,7	20388	24104,1	21323,1
EAF (kJ)		0	0	0	0
Temp média consumo (°C)		51,5	52,9	49,9	47,9
ESc (kJ)		21236,2	21196,7	16526,7	18370,7
EuSc (kJ)		16749,3	19738,9	13704,5	16697,2
EuSR (kJ)		15515,4	15970,1	12554,8	14548,6
EEr (kJ)		16984,8	23816,1	22044	21989,3
EuE (kJ)		11861,3	16850,8	16637,9	16208,8
EEb (kJ)		225,1	-	386,7	-
EFR = f(UR) (kJ)		8691,9	11900,2	9040,9	11053,4
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		6980,3	8981,1	11275	9232,8
Erc (kJ)		0	147,5	11,7	8,3
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		2013,4	2277	1476	542,8
η_o - Rendimento global (%)		32,5	33,1	33,8	39,2
Rend máximo instantâneo (%)		51,9	56,7	58,3	61,2
FS Fração solar (%)		59,3	47,3	43,9	47,3
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		4,2	4,8	4	1,5
$\eta_{TL} = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		13	14,4	11,8	3,7
CMEU(T*,t) (%)		-0,101		0,632	
Ri	Média	119,69	285,7	42,62	133
	Valor máximo	150,7	491,9	63,11	279,8
	Valor p/ η_o máx	41,95	238,1	11,92	84
Ped	Média	697,1	404,5	892,9	384,1
	Valor máximo	1041	575,2	1587,6	492,8
	Valor p/ η_o máx	1041	508,2	961,2	450,3
Fo	Média	0,0000576	0,0000617	0,0000571	0,0000556
	Valor máximo	0,0000743	0,0000774	0,0000691	0,0000595
	Valor p/ η_o máx	0,0000464	0,0000636	0,0000625	0,0000447
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,188	0,171	0,17	0,225
	Valor máximo	0,484	0,47	0,417	0,361
	Valor p/ η_o máx	0,484	0,247	0,174	0,354
TRe - TRmédio (°C)	Média	9,2	5	5,9	6,1
	Valor p/ η_o máx	7,5	8,3	0,7	9,10
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,032	0,036	0,036	0,022
	Valor p/ η_o máx	0,008	0,002	0,028	0,005
(Ts-Te) (°C)	Média	15,3	14,4	11,8	15,7
	$\eta_{T\text{início}}$ do fluxo	12,3	9,7	16,1	7,9
	$\eta_{T\text{máx.}}$ (η_o máx)	24,9	22,9	7,8	22,6

Data do Experimento:		15/12/2002		18/12/2002	
Observações:		Sem misturador e com resistência habilitada*.		Sem misturador e com resistência habilitada.	
*Com timer					
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	50	10	50	10
	Perfil de consumo	FG		AA	
	Energia solar diária (kJ)	35707,8		53240,4	
	Var (m/s)	1,42		1,61	
	Tar (média diária) (°C)	23,3		22,3	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Total	-	Total	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,0272	0,0081	0,0174	0,0097
Volume total no coletor (L)		160,7	228,5	433,2	315,1
Volume total abastecido (L)		220,5	216,1	223,9	225
TR médio (°C)		46	46,1	51,3	49,6
TR final - TR inicial (°C)		0,3	-2,6	-6,1	-8,2
EAO (kJ)		47000,9	40237,8	49588,3	45405,9
E'AF (kJ)		23846,6	22144,7	22136,1	20770,9
EAF (kJ)		0	0	0	0
Temp média consumo (°C)		46,7	40,3	50	49,9
ESc (kJ)		16110,9	14985,6	22847,8	23522,4
EuSc (kJ)		6702,7	13218,7	20961,9	20946,1
EuSR (kJ)		6695,2	10366,2	17584,1	16818,9
EEr (kJ)		27585,5	59993,9	22534,9	19532,6
EuE (kJ)		22783,1	47334,1	18187,4	15199,3
EEb (kJ)		300	-	889,8	-
EFR = f(UR) (kJ)		7883,1	10167,7	10060,8	12167,3
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		6057,6	42721,6	15243,1	14614,4
Erc (kJ)		0	151,6	0	35,7
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		200,8	528,9	3470,3	2690,1
η_o - Rendimento global (%)		18,7	28,6	33,0	31,5
Rend máximo instantâneo (%)		52,9	61	64,1	60,0
FS Fração solar (%)		22,7	17,7	48,1	52,8
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		0,6	1,5	6,5	5,1
$\eta_{TL} = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		3	5,2	19,8	16,0
CMEU(T*,t) (%)		-1,634		0,225	
Ri	Média	31,89	182	68,53	334,4
	Valor máximo	52,6	473,6	120,38	629,6
	Valor p/ η_o máx	15,67	277,5	27,35	276,1
Ped	Média	1113,3	336,3	888,4	430,1
	Valor máximo	1606,1	464,9	1231,3	573,2
	Valor p/ η_o máx	1120,2	360,6	1064,2	504,1
Fo	Média	0,0000498	0,0000521	0,0000615	0,0000577
	Valor máximo	0,0000668	0,0000638	0,0000818	0,0000767
	Valor p/ η_o máx	0,00005	0,0000301	0,0000723	0,0000597
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,177	0,142	0,228	0,225
	Valor máximo	0,438	0,378	0,333	0,407
	Valor p/ η_o máx	0,289	0,069	0,159	0,407
TRe - TRmédio (°C)	Média	2,8	4,2	5,1	6,7
	Valor p/ η_o máx	2,3	8,5	0,1	6,6
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,034	0,027	0,035	0,029
	Valor p/ η_o máx	0,05	0,025	0,026	0,014
(Ts-Te) (°C)	Média	10,4	12,7	9,4	14,6
	$\eta_{T\text{início}}$ do fluxo	11,5	9,0	10,6	8,8
	$\eta_{T\text{máx.}}$ (η_o máx)	7,7	13,4	8,6	23,2

Data do Experimento:		19/12/2002		07/01/2003	
Observações:		Sem misturador e com resistência habilitada*.		Sem misturador e com resistência habilitada.	
* Com timer - **Valor inicial					
Dados comuns	T* / ? T de ensaio (°C)	50	8**	50	7**
	Perfil de consumo	AA		AA	
	Energia solar diária (kJ)	49400,1		56592,7	
	Var (m/s)	1,39		0,89	
	Tar (média diária) (°C)	24,2		24,4	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Parcial	-	Parcial	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,0218	0,0095	0,0205	0,0091
Volume total no coletor (L)		339,2	286,4	533,4	287,4
Volume total abastecido (L)		220,3	223,9	222,7	221,8
TR médio (°C)		48	49,9	52,5	50,7
TR final - TR inicial (°C)		3,5	2	-1,3	-4,6
EAO (kJ)		48551,7	45916,5	49008,3	46415,5
E'AF (kJ)		22821,4	22036,1	22927,2	22118,9
EAF (kJ)		0	0	0	0
Temp média consumo (°C)		49,9	50,4	42,2	47,3
ESc (kJ)		24479,1	21600,2	25231,7	25134,3
EuSc (kJ)		15036,9	18791,6	23082,6	23043,5
EuSR (kJ)		14661,3	15280,5	19468,9	19228,4
EEr (kJ)		19977,3	26589,9	22833,5	19087,7
EuE (kJ)		14226,4	20298,9	18637,6	14864,7
EEb (kJ)		585,9	-	1038,5	-
EFR = f(UR) (kJ)		8235,1	11440,5	9760,6	11741,5
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		4275,9	9890,9	13166,7	13847,5
Erc (kJ)		0	29,2	9,3	19,4
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		1732,6	2328,4	4897,9	3228,9
? o - Rendimento global (%)		29,7	30,9	34,4	33,9
Rend máximo instantâneo (%)		87,5	51,3	51,6	51,4
FS Fração solar (%)		49,8	42,9	51,1	51,6
? L - Fator de carga utiliz. (%)		3,5	4,7	8,7	5,7
?? = (? o / ? L) (%)		11,8	15,3	25,2	16,8
CMEU(T*,t) (%)		-0,344		0,341	
Ri	Média	29,53	497,7	101,14	316,8
	Valor máximo	49,52	800,4	312,18	547,7
	Valor p/ ? o máx	32,24	514,1	53,39	264,4
Ped	Média	1053,4	396,4	974,5	389
	Valor máximo	1688,6	496,5	2780,6	501,5
	Valor p/ ? o máx	767,2	431,5	1076,9	456,5
Fo	Média	0,0000535	0,0000584	0,0000652	0,0000599
	Valor máximo	0,0000705	0,0000754	0,0000877	0,0000808
	Valor p/ ? o máx	0,0000705	0,0000641	0,000077	0,0000603
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,215	0,147	0,208	0,221
	Valor máximo	0,469	0,383	0,311	0,427
	Valor p/ ? o máx	0,074	0,287	0,108	0,427
TRe - TRmédio (°C)	Média	4,1	7,2	5,2	9,8
	Valor p/ ? o máx	3,2	7,1	1,0	10,9
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,023	0,031	0,034	0,027
	Valor p/ ? o máx	0,057	0,016	0,021	0,007
(Ts-Te) (°C)	Média	11,1	15,0	8,9	17,7
	? Tíncio do fluxo	12,4	7,9	11,4	5,6
	? Tmáx.(? o máx)	6,0	21	7,6	27,4

Data do Experimento:		09/01/2003		11/01/2003	
Observações:		<i>Sem misturador e com resistência habilitada.</i>		<i>Sem misturador e com resistência habilitada *.</i>	
* Com Timer - ** Valor inicial					
Dados comuns	T* / ? T de ensaio (°C)	50	10	50	7**
	Perfil de consumo	BB		BB	
	Energia solar diária (kJ)	54240,7		54048,4	
	Var (m/s)	1,1		1,32	
	Tar (média diária) (°C)	27,2		25,1	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Parcial	-	Parcial	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,0268	0,0083	0,0222	0,0077
Volume total no coletor (L)		574,4	305,4	515,3	288,7
Volume total abastecido (L)		212,8	221,9	206,8	222,6
TR médio (°C)		48,6	47	47,6	48,8
TR final - TR inicial (°C)		0,8	-0,9	-1,4	3,3
EAQ (kJ)		49266,7	47909,7	47247,9	47483,4
E'AF (kJ)		26006	26004,6	23037,5	23263,5
EAF (kJ)		0	0	0	0
Temp média consumo (°C)		51,3	53,0	49,7	52,4
ESc (kJ)		26708,7	26029,6	24781,5	23431,9
EuSc (kJ)		20674,9	23592	18283,7	19666,2
EuSR (kJ)		19355	19917,7	18021,7	15543,5
EEr (kJ)		11772,2	13589,1	16063,9	27664,8
EuE (kJ)		8546,4	8791,6	12454,4	21141,9
EEb (kJ)		1014,9	-	1103,5	-
EFR = f(UR) (kJ)		7448,7	8838,9	7810,7	10552,2
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		10144,9	8470,1	13300,3	9297,4
Erc (kJ)		0	99,9	0	236,2
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		3454,6	2550,1	3352,8	2531
? o - Rendimento global (%)		35,7	36,5	33,3	28,3
Rend máximo instantâneo (%)		62,4	61,4	62,2	56
FS Fração solar (%)		65	67,2	54,9	42,3
? L - Fator de carga utiliz. (%)		6,4	4,7	6,2	4,7
?? = (? o / ? L) (%)		17,8	12,9	18,6	16,5
CMEU(T*,t) (%)		0,262		0,245	
Ri	Média	34,21	488,2	38,97	353,7
	Valor máximo	74,94	837,3	92,82	500,3
	Valor p/? o máx	19,18	434,1	24,74	275,7
Ped	Média	1106,8	388,7	956,3	364,4
	Valor máximo	2784,5	532,9	1211,5	523,9
	Valor p/? o máx	1033,9	453,3	1042	478,4
Fo	Média	0,0000538	0,0000505	0,0000524	0,0000558
	Valor máximo	0,0000807	0,000077	0,0000806	0,0000784
	Valor p/? o máx	0,0000702	0,0000599	0,0000701	0,0000618
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,17	0,221	0,154	0,163
	Valor máximo	0,431	0,387	0,321	0,396
	Valor p/? o máx	0,128	0,353	0,115	0,327
TRe - TRmédio (°C)	Média	5,1	7,6	4,5	5,6
	Valor p/? o máx	1,6	10,1	2,3	10,7
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,027	0,021	0,031	0,03
	Valor p/? o máx	0,019	0,008	0,018	0,011
(Ts-Te) (°C)	Média	8,8	15,8	8,5	14
	? Tinício do fluxo	10,3	5,9	10,5	9,2
	? Tmáx.(? o máx)	14,2	27,0	8,7	25,5

Data do Experimento:		17/01/2003		27/01/2003	
Observações:		Sem misturador e com resistência habilitada *.		Sem misturador e com resistência habilitada *.	
* Com timer					
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	50	12	50	7
	Perfil de consumo	BB		AA	
	Energia solar diária (kJ)	41242,4		16993,2	
	Var (m/s)	1		1,28	
	Tar (média diária) (°C)	23,6		21,0	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Parcial	-	Parcial	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,0274	0,0078	0	0,0031
Volume total no coletor (L)		359,6	205,2	0	11,2
Volume total abastecido (L)		214,3	222,8	219,2	224,7
TR médio (°C)		47	56,1	46,8	55,8
TR final - TR inicial (°C)		-5,2	-0,4	-11,2	-1,1
EAQ (kJ)		45317,7	50404	45106,1	50072,1
E'AF (kJ)		22862,2	22644,3	21040,8	20574,8
EAF (kJ)		0	0	0	0
Temp média consumo (°C)		45,4	50,5	45,8	49
ESc (kJ)		18421,9	15163,8	5716,6	5549,2
EuSc (kJ)		13416,3	12032,6	0	524,3
EuSR (kJ)		12796	8656,5	0	128
EEr (kJ)		18694,4	39870,7	27433,3	54016,8
EuE (kJ)		11124,6	31931,5	15289,2	43120
EEb (kJ)		628,8	-	0	-
EFR = f(UR) (kJ)		8137,4	14539,8	8941,7	15516,8
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		6087	13033,2	1168,7	14447
Erc (kJ)		0	146,8	0	271,3
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		1617,5	2054,7	0	0
η_o - Rendimento global (%)		31	20,6	0	-0,8
Rend máximo instantâneo (%)		66,8	51,7	0	7,2
FS Fração solar (%)		53,7	21,3	0	0,3
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		3,9	5	0	0
$\eta_{Te} = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		12,7	24,2	0	0
CMEU(T*,t) (%)		-0,27		1,0	
Ri	Média	24,13	193,1	0	0
	Valor máximo	44,72	264,7	0	0
	Valor p/ η_o máx	19,71	164,8	0	0
Ped	Média	1112,8	313,5	0	0
	Valor máximo	1537,5	481	0	0
	Valor p/ η_o máx	1058,5	435,1	0	0
Fo	Média	0,0000533	0,0000732	0,0000527	0,000073
	Valor máximo	0,0000664	0,0000886	0,0000677	0,0000885
	Valor p/ η_o máx	0,0000635	0,0000764	0,000059	0,0000588
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,111	0,179	0,209	0,138
	Valor máximo	0,251	0,498	0,432	0,467
	Valor p/ η_o máx	0,129	0,333	0,432	0,351
TRe - TRmédio (°C)	Média	4,8	2,1	-	-
	Valor p/ η_o máx	3,9	6,4	-	-
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,037	0,042	0,054	0,045
	Valor p/ η_o máx	0,031	0,03	0,034	0,025
(Ts-Te) (°C)	Média	8,9	13,4	-	10,6
	$\eta_{T\text{início}}$ do fluxo	13,1	10,1	-	7,6
	$\eta_{T\text{máx.}}$ (η_o máx)	13,6	24,8	-	12,7

Data do Experimento:		04/02/2003		05/02/2003	
Observações:		<i>Sem misturador e com resistência desligada.</i>		<i>Sem misturador e com resistência desligada.</i>	
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	50	8	50	15
	Perfil de consumo	OO		OO	
	Energia solar diária (kJ)	56875,1		55937,1	
	Var (m/s)	1,04		1,44	
	Tar (média diária) (°C)	27,6		27,8	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Parcial	-	Parcial	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,0369	0,0082	0,1397	0,0087
Volume total no coletor (L)		683,7	309	392,2	296,4
Volume total abastecido (L)		150,6	148,9	150,2	150,9
TR médio (°C)		38,5	39,6	41,7	42,9
TR final - TR inicial (°C)		5,3	5,4	0,4	-0,2
EAO (kJ)		28972,2	29244,6	29803	30400,1
E'AF (kJ)		17884,1	17781,1	18089,6	17550,4
EAF (kJ)		0	0	0	0
Temp média consumo (°C)		43,3	46,2	45,8	49,5
ESc (kJ)		30819,2	29529,1	26380,3	28100,1
EuSc (kJ)		22018,1	24873,5	18325,4	23349,4
EuSR (kJ)		21015,3	21846,3	18325,9	20096,5
EEr (kJ)		0	0	0	0
EuE (kJ)		0	0	0	0
EEb (kJ)		576,9	-	175,6	-
EFR = f(UR) (kJ)		3785,7	5354,2	4839,8	6730
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		5128,6	5501,8	6147,7	7389,7
Erc (kJ)		27,2	22,7	105,7	36,5
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		507,4	1170,4	1246	1536,1
η_o - Rendimento global (%)		36,9	38,4	32,6	35,9
Rend máximo instantâneo (%)		55,7	57	47,9	56,5
FS Fração solar (%)		99,9	99,9	100	100
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		0,9	2,1	2,2	2,7
$\eta_{\text{f}} = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		2,4	5,4	6,8	7,6
CMEU(T*,t) (%)		-1,307		-0,233	
Ri	Média	5,81	464,1	7,41	753,9
	Valor máximo	11,28	765	12,22	1456,4
	Valor p/ η_o máx	4,74	432,4	7,55	1023,7
Ped	Média	2499,7	356	3795,2	361
	Valor máximo	2945,2	482,1	4555,7	478,6
	Valor p/ η_o máx	2650,1	413,4	3513,8	324,2
Fo	Média	0,0000398	0,0000408	0,0000437	0,0000447
	Valor máximo	0,0000581	0,0000601	0,0000648	0,0000665
	Valor p/ η_o máx	0,0000362	0,0000415	0,0000479	0,0000513
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,075	0,143	0,08	0,16
	Valor máximo	0,099	0,241	0,173	0,228
	Valor p/ η_o máx	0,063	0,238	0,068	0,213
TRe - TRmédio (°C)	Média	5,8	11,2	6,3	10
	Valor p/ η_o máx	5,4	13,7	6,4	6,2
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,013	0,009	0,016	0,012
	Valor p/ η_o máx	0,006	0,002	0,011	0,016
(Ts-Te) (°C)	Média	7,6	17	7,4	16,6
	$\eta_{\text{início}}$ do fluxo	8,9	7,2	15,1	5,0
	$\eta_{\text{máx.}}$ (η_o max)	9,7	28,3	7,6	15,6

Data do Experimento:		06/02/2003		08/02/2003	
Observações:		Sem misturador e com resistência desligada.		Sem misturador e com resistência desligada.	
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	50	10	50	12
	Perfil de consumo	OO		OO	
	Energia solar diária (kJ)	55943,4		55776,9	
	Var (m/s)	1,34		1,26	
	Tar (média diária) (°C)	27,5		26,8	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Parcial	-	Parcial	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,0363	0,0094	0,015	0,009
Volume total no coletor (L)		639,2	300,3	344,9	320,9
Volume total abastecido (L)		157,4	149,9	148,2	148,9
TR médio (°C)		42,9	43	39,8	40
TR final - TR inicial (°C)		-0,4	0,2	4,3	3,9
EAO (kJ)		32246,5	30654,1	29860,2	29018,2
E'AF (kJ)		18785,8	17274	17445,4	16536,7
EAF (kJ)		0	0	0	0
Temp média consumo (°C)		46,3	49,5	46,6	47,5
ESc (kJ)		29968,6	28968,3	29603,2	29495,2
EuSc (kJ)		21206,8	24256,2	22974,1	25639,9
EuSR (kJ)		20485,1	21276,7	21759	22628,5
EEr (kJ)		0	0	0	0
EuE (kJ)		0	0	0	0
EEb (kJ)		996,6	-	1240	-
EFR = f(UR) (kJ)		5336,5	6890,7	4521,2	5895,5
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		7374,3	7699,7	5475,2	6625,6
Erc (kJ)		9,3	17,3	0	11,8
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		1344,8	1711,1	1184,7	1295,8
η_o - Rendimento global (%)		36,6	38	39	40,5
Rend máximo instantâneo (%)		53,9	56	56,7	55,7
FS Fração solar (%)		100	100	99,9	99,9
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		2,4	3,1	2,1	2,3
$\eta_{T^*} = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		6,6	8	5,4	5,7
CMEU(T*,t) (%)		-0,272		-0,094	
Ri	Média	21,81	749,3	275,64	806,8
	Valor máximo	52,94	1379,9	416,55	1680,7
	Valor p/ η_o máx	14,81	895,5	180,81	1137,8
Ped	Média	1484,2	391,4	625,5	376,9
	Valor máximo	1755	500,3	702,3	526,6
	Valor p/ η_o máx	1580,7	376,3	618,7	351,4
Fo	Média	0,0000457	0,0000449	0,0000405	0,0000407
	Valor máximo	0,0000702	0,0000687	0,0000638	0,0000632
	Valor p/ η_o máx	0,0000323	0,0000585	0,0000315	0,0000589
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,094	0,164	0,147	0,156
	Valor máximo	0,187	0,223	0,208	0,212
	Valor p/ η_o máx	0,16	0,192	0,203	0,199
TRe - TRmédio (°C)	Média	4,8	11	10,5	10,7
	Valor p/ η_o máx	2,5	6,7	8	6,3
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,017	0,012	0,01	0,009
	Valor p/ η_o máx	0,005	0,034	0,001	0,018
(Ts-Te) (°C)	Média	7,4	17,8	12,8	17,2
	η_{T^*} início do fluxo	8,1	4,7	14,3	5,0
(°C)	η_{T^*} máx. (η_o max)	6	16,4	12,7	15,4

Data do Experimento:		09/02/2003		10/02/2003	
Observações:		<i>Sem misturador e com resistência desligada.</i>		<i>Sem misturador e com resistência desligada.</i>	
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	50	10	50	12
	Perfil de consumo	OO		OO	
	Energia solar diária (kJ)	55719,9		56651,7	
	Var (m/s)	0,97		0,96	
	Tar (média diária) (°C)	27,6		28,8	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Parcial	-	Parcial	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,0761	0,0096	0,0220	0,0094
Volume total no coletor (L)		684,1	303,9	515,3	318,6
Volume total abastecido (L)		155,6	150,4	149,8	150,9
TR médio (°C)		42,9	43	44,2	43,8
TR final - TR inicial (°C)		1	0,9	1,5	1,1
EAO (kJ)		31926,3	31123,7	32606,1	31893
E'AF (kJ)		18726,4	17541,4	18604,2	17942,4
EAF (kJ)		0	0	0	0
Temp média consumo (°C)		47,4	50,2	50,2	51,5
ESc (kJ)		26530,5	29641,8	30937,9	29698,9
EuSc (kJ)		20578,5	25349,3	22085,6	25589,7
EuSR (kJ)		20662,4	22516,9	21621,5	22578,8
EEr (kJ)		0	0	0	0
EuE (kJ)		0	0	0	0
EEb (kJ)		550,6	-	1309,5	-
EFR = f(UR) (kJ)		5292,9	6856,9	5349,2	6709,6
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		6564,6	8091,7	6274,7	7608,2
Erc (kJ)		0,2	34,7	0	33
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		1567,8	1924,5	2154,5	2169
η_o - Rendimento global (%)		37,1	40,3	38,2	39,8
Rend máximo instantâneo (%)		50,2	55,3	66,3	78,6
FS Fração solar (%)		100	100	99,9	100
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		2,8	3,5	3,8	3,8
$\eta_{TL} = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		7,6	8,6	10	9,6
CMEU(T*,t) (%)		-0,228		-0,007	
Ri	Média	11,08	727,6	61,16	725,4
	Valor máximo	19,67	1630	95,41	978,7
	Valor p/ η_o máx	12,52	736,7	69,57	978,7
Ped	Média	2987,1	399,5	903,7	387,2
	Valor máximo	3329,6	517,3	980,9	521,7
	Valor p/ η_o máx	2857,3	418,2	761	238,5
Fo	Média	0,0000456	0,0000452	0,0000479	0,0000466
	Valor máximo	0,00007	0,000071	0,0000747	0,0000721
	Valor p/ η_o máx	0,0000477	0,0000437	0,0000317	0,0000374
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,083	0,172	0,122	0,167
	Valor máximo	0,132	0,224	0,166	0,211
	Valor p/ η_o máx	0,056	0,22	0,166	0,211
TRe - TRmédio (°C)	Média	5,2	11,4	7,3	10,5
	Valor p/ η_o máx	5,9	13,4	5,9	3,7
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,017	0,011	0,014	0,009
	Valor p/ η_o máx	0,012	0,004	0,009	0,005
(Ts-Te) (°C)	Média	6,3	18	9,6	17,5
	$\eta_{T\text{início}}$ do fluxo	11,0	4,7	11,4	4,7
	$\eta_{T\text{máx.}}$ (η_o max)	5,8	21,3	8,9	10,5

Data do Experimento:		11/02/2003		12/02/2003	
Observações:		Sem misturador e com resistência desligada.		Sem misturador e com resistência desligada.	
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	50	12	50	18
	Perfil de consumo	OO		OO	
	Energia solar diária (kJ)	60198,3		46049,1	
	Var (m/s)	1,17		0,86	
	Tar (média diária) (°C)	28,8		28,4	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Parcial	-	Parcial	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,005	0,0095	0,0491	0,0093
Volume total no coletor (L)		155,6	326,6	188	261,3
Volume total abastecido (L)		150,6	150,2	147,5	150,5
TR médio (°C)		42,9	44,6	41,2	43,4
TR final - TR inicial (°C)		-2	0,3	-1,8	-2,3
EAO (kJ)		32367,2	32148	29003,1	29954,5
E'AF (kJ)		18894,9	18147,6	17571,6	17261,4
EAF (kJ)		0	0	0	0
Temp média consumo (°C)		50,4	52	45,8	48,3
ESc (kJ)		28532,3	31075,6	23996,6	24335,7
EuSc (kJ)		21900,6	25665,9	17683	20864,6
EuSR (kJ)		20092,6	22308,9	16548,6	18507,2
EEr (kJ)		0	0	0	0
EuE (kJ)		0	0	0	0
EEb (kJ)		1758,7	-	214	-
EFR = f(UR) (kJ)		4925,9	7065,8	4454,2	6694,6
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		8413,9	8015,8	6734,2	7866
Erc (kJ)		0	23,7	0	12,1
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		2245,9	2177,3	1093,1	1433,3
η_o - Rendimento global (%)		33,4	37	35,9	40,2
Rend máximo instantâneo (%)		47,5	51,9	57,4	58,6
FS Fração solar (%)		100,1	100	100,1	100,1
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		3,7	3,6	2,4	3,1
$\eta_{TL} = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		11,2	9,8	6,6	7,7
CMEU(T*,t) (%)		0,031		-0,311	
Ri	Média	4198,61	728,7	26,8	714,6
	Valor máximo	6971,7	969	34,93	2418,3
	Valor p/ η_o máx	4212,75	622,3	27,34	1151,8
Ped	Média	208,4	392,9	1870,1	387,1
	Valor máximo	290,8	489,6	2286,4	510,3
	Valor p/ η_o máx	230	452,1	2082,6	317,3
Fo	Média	0,0000421	0,0000481	0,0000407	0,000045
	Valor máximo	0,0000575	0,0000729	0,0000582	0,0000675
	Valor p/ η_o máx	0,0000367	0,0000424	0,0000301	0,0000603
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,316	0,164	0,201	0,172
	Valor máximo	0,426	0,224	0,267	0,23
	Valor p/ η_o máx	0,314	0,223	0,18	0,183
TRe - TRmédio (°C)	Média	24,6	10,4	17	11
	Valor p/ η_o máx	36,5	15,3	20,7	5
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,004	0,01	0,01	0,013
	Valor p/ η_o máx	0,004	0,002	0,005	0,022
(Ts-Te) (°C)	Média	33,9	17,4	16,8	17,3
	$\eta_{T\text{início}}$ do fluxo	15,3	5,0	18,7	6,2
(°C)	$\eta_{T\text{máx.}}$ (η_o max)	43,5	23,5	15,2	13,3

Data do Experimento:		13/02/2003		19/02/2003	
Observações:		Sem misturador e com resistência desligada.		Sem misturador e com resistência desligada.	
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	50	15	50	24
	Perfil de consumo	OO		OO	
	Energia solar diária (kJ)	53484,6		48962,0	
	Var (m/s)	1,44		0,82	
	Tar (média diária) (°C)	26,3		25,3	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Parcial	-	Parcial	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,0436	0,0093	0,047	0,0092
Volume total no coletor (L)		251,8	297	310,1	266,8
Volume total abastecido (L)		151,4	149,9	0,1504	0,1542
TR médio (°C)		40,2	41,7	35,8	37,3
TR final - TR inicial (°C)		-1,4	-1,5	3,7	3,2
EAO (kJ)		29588,2	29317,6	28271,5	28982,3
E'AF (kJ)		16413,2	15580,6	17347	16924,4
EAF (kJ)		0	0	0	0
Temp média consumo (°C)		44,9	46,8	41,8	44,4
ESc (kJ)		31010,4	28057,7	28727,9	26674,1
EuSc (kJ)		18610,2	23778	18837,9	23144,3
EuSR (kJ)		18223	20764,8	18642,4	20759,9
EEr (kJ)		0	0	0	0
EuE (kJ)		0	0	0	0
EEb (kJ)		325,8	-	380,4	-
EFR = f(UR) (kJ)		4825,9	6904,4	3631,5	5321,2
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		6307,6	8351,2	4288,9	5761,2
Erc (kJ)		0	25	0	53,5
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		1023,5	1426,7	549,3	776,2
η_o - Rendimento global (%)		34,1	38,8	38,1	42,3
Rend máximo instantâneo (%)		57,1	55,9	61,2	58,7
FS Fração solar (%)		100	100	100,4	100
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		1,9	2,7	1,1	1,6
$\eta_{TL} = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		5,6	6,9	2,9	3,7
CMEU(T*,t) (%)		-0,394		-0,413	
Ri	Média	25,74	772,3	17,8	831,1
	Valor máximo	37,86	1131,6	28	2298,4
	Valor p/ η_o máx	21,78	843,8	15,97	967,3
Ped	Média	1722,8	385,6	1901,2	386,3
	Valor máximo	1918,7	498,9	2383,3	490,8
	Valor p/ η_o máx	1721,8	370,8	1996,6	370,3
Fo	Média	0,0000397	0,0000427	0,0000339	0,0000363
	Valor máximo	0,0000584	0,0000649	0,0000516	0,000057
	Valor p/ η_o máx	0,0000518	0,000054	0,0000296	0,0000421
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,165	0,158	0,137	0,160
	Valor máximo	0,221	0,23	0,221	0,242
	Valor p/ η_o máx	0,182	0,196	0,214	0,228
TRe - TRmédio (°C)	Média	14	10,9	11,6	12,8
	Valor p/ η_o máx	13	6,6	11,2	10,1
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,009	0,011	0,013	0,017
	Valor p/ η_o máx	0,014	0,018	0	0,004
(Ts-Te) (°C)	Média	13,0	17,4	11,9	17,7
	$\eta_{T\text{início}}$ do fluxo	13,4	5,1	29,7	7,1
	$\eta_{T\text{máx.}}$ (η_o max)	10,5	16,3	12,8	18,8

Data do Experimento:		20/02/2003		22/02/2003	
Observações:		Sem misturador e com resistência desligada.		Sem misturador e com resistência desligada.	
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	50	15	50	15
	Perfil de consumo	OO		OO	
	Energia solar diária (kJ)	45250,2		45217,8	
	Var (m/s)	0,46		1,82	
	Tar (média diária) (°C)	25,5		25,4	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Parcial	-	Parcial	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,0206	0,0084	0,0179	0,0085
Volume total no coletor (L)		347,7	289,8	323,9	306,9
Volume total abastecido (L)		161,5	161	3,8	159,7
TR médio (°C)		37,3	37,9	39,2	38,8
TR final - TR inicial (°C)		1	1	12	-1,2
EAO (kJ)		29677,8	29385,9	740,6	28968,1
E'AF (kJ)		18237,3	17589,9	369,8	16645
EAF (kJ)		0	0	0	0
Temp média consumo (°C)		42,8	44,7	47,4	46,2
ESc (kJ)		24932,5	22998,7	24505,5	22734,8
EuSc (kJ)		17871,2	21281,5	19033,2	21910,2
EuSR (kJ)		17219,8	18475,9	18260,6	18875,1
EEr (kJ)		0	0	0	0
EuE (kJ)		0	0	0	0
EEb (kJ)		956,4	-	981,6	-
EFR = f(UR) (kJ)		4130,1	5563,3	4778,6	5966,8
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		4878,6	5747,4	7152,8	7606,6
Erc (kJ)		0	31,8	0	25,7
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		305,3	613,2	766,6	761,9
η_o - Rendimento global (%)		37,8	40,5	40,4	41,7
Rend máximo instantâneo (%)		58,8	74	99,5	79,7
FS Fração solar (%)		100	100	99,3	100
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		0,7	1,3	1,7	1,7
$\eta_{f,s} = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		1,8	3,3	4,2	4
CMEU(T*,t) (%)		-1,008		0,006	
Ri	Média	73,55	767,4	113,84	708,8
	Valor máximo	133,65	1088,6	180,45	1127
	Valor p/ η_o máx	54,69	846,8	67,86	637,4
Ped	Média	859,2	354,3	746,6	356,4
	Valor máximo	1045,6	508,3	839,1	520,9
	Valor p/ η_o máx	1045,6	358,2	798,6	420,2
Fo	Média	0,0000356	0,0000365	0,0000385	0,0000377
	Valor máximo	0,0000514	0,0000527	0,0000551	0,0000549
	Valor p/ η_o máx	0,0000285	0,0000435	0,0000265	0,0000383
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,137	0,14	0,147	0,137
	Valor máximo	0,172	0,196	0,183	0,182
	Valor p/ η_o máx	0,17	0,193	0,17	0,162
TRe - TRmédio (°C)	Média	9,2	9,8	10,5	9
	Valor p/ η_o máx	9,9	6,7	6,4	11,1
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,013	0,012	0,012	0,013
	Valor p/ η_o máx	0,007	0,025	0,008	0,02
(Ts-Te) (°C)	Média	10,4	15,8	12,3	15,5
	$\eta_{T\text{início}}$ do fluxo	14	4,9	17,2	5,1
(°C)	$\eta_{T\text{máx.}}$ (η_o max)	11	15,9	8,1	19,4

Data do Experimento:		23/02/2003		24/02/2003	
Observações:		Sem misturador e com resistência desligada.		Sem misturador e com resistência desligada.	
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	50	12	50	12
	Perfil de consumo	OO		OO	
	Energia solar diária (kJ)	52639,3		51720,8	
	Var (m/s)	1,29		0,92	
	Tar (média diária) (°C)	25,7		26,1	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Parcial	-	Parcial	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,0128	0,0094	0,0153	0,0091
Volume total no coletor (L)		330,5	328,1	329,3	298,1
Volume total abastecido (L)		164,3	159,6	80,6	150
TR médio (°C)		47,9	39,9	41,2	40,2
TR final - TR inicial (°C)		-10,5	1,2	7	1,5
EAO (kJ)		35571,5	30874,5	17887	29668,1
E'AF (kJ)		18483,6	17058,9	9336	16234
EAF (kJ)		0	0	0	0
Temp média consumo (°C)		48,9	45	53,3	50,9
ESc (kJ)		24728,1	27150,3	28199,5	27271
EuSc (kJ)		25293,7	26188,6	23611	25852,6
EuSR (kJ)		22427	23022,9	22465,5	23096,7
EEr (kJ)		0	0	0	0
EuE (kJ)		0	0	0	0
EEb (kJ)		1404,7	-	1182,3	-
EFR = f(UR) (kJ)		7723,5	6348,5	5247,6	6273
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		14729,1	8082,2	7643,5	8257,7
Erc (kJ)		0	44,7	0	56
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		3061,9	1398,5	1662,9	1650,2
η_o - Rendimento global (%)		42,6	43,7	43,4	44,5
Rend máximo instantâneo (%)		76,9	61,6	58,3	71,6
FS Fração solar (%)		100,5	100	99,7	100
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		5,8	2,7	3,2	3,2
$\eta_{TL} = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		13,7	6,1	7,4	7,2
CMEU(T*,t) (%)		0,543		0,008	
Ri	Média	328,21	368,5	275,61	651,1
	Valor máximo	1379,11	568,1	466,25	2267,6
	Valor p/ η_o máx	361,59	526,6	82,94	729,6
Ped	Média	524,6	393,5	652,4	404,4
	Valor máximo	803	553,2	874,7	552,8
	Valor p/ η_o máx	466,7	364,5	647,2	247,7
Fo	Média	0,0000558	0,0000403	0,0000404	0,0000395
	Valor máximo	0,0000755	0,0000626	0,0000677	0,0000674
	Valor p/ η_o máx	0,0000455	0,0000279	0,0000634	0,0000627
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,155	0,149	0,19	0,166
	Valor máximo	0,232	0,212	0,232	0,231
	Valor p/ η_o máx	0,101	0,148	0,22	0,195
TRe - TRmédio (°C)	Média	12,5	10,8	12,6	11,2
	Valor p/ η_o máx	15,1	12,2	7,7	6,6
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,024	0,011	0,018	0,015
	Valor p/ η_o máx	0,025	0,004	0,04	0,065
(Ts-Te) (°C)	Média	17,4	17,1	16	18,1
	$\eta_{T\text{início}}$ do fluxo	11,9	4,2	10,1	4,9
	$\eta_{T\text{máx.}}(\eta_o \text{ max})$	18,7	17,0	9,3	9,1

Data do Experimento:		25/02/2003		26/02/2003	
Observações:		Sem misturador e com resistência desligada.		Sem misturador e com resistência desligada.	
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	50	12	50	19
	Perfil de consumo	OO		OO	
	Energia solar diária (kJ)	58351,7		63282,4	
	Var (m/s)	0,78		0,7	
	Tar (média diária) (°C)	27,6		27,5	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Parcial	-	Parcial	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,0174	0,0107	0,0169	0,0105
Volume total no coletor (L)		439,1	329,7	404,9	350,2
Volume total abastecido (L)		77,6	157,1	120,8	202
TR médio (°C)		47,4	42,5	51,3	43,9
TR final - TR inicial (°C)		19,4	21,7	20,5	21,9
EAO (kJ)		0	0	0	0
E'AF (kJ)		0	0	0	0
EAF (kJ)		0	0	0	0
Temp média consumo (°C)		55,6	55,2	61,9	54,6
ESc (kJ)		31370	31392	32863,3	32822
EuSc (kJ)		22853	28581,2	24069,2	29463,1
EuSR (kJ)		21695,6	25753,7	22441,3	26055,7
EEr (kJ)		0	0	0	0
EuE (kJ)		0	0	0	0
EEb (kJ)		1341,4	-	1200,3	-
EFR = f(UR) (kJ)		5401,9	5228	6462,2	5672,2
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		8111,3	6459,3	9873,9	6546,9
Erc (kJ)		0	11,6	0	81,8
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		4074,6	2643,2	4977,1	3051,3
η_o - Rendimento global (%)		37,2	44,1	35,5	41
Rend máximo instantâneo (%)		66,2	53,8	51,1	52,7
FS Fração solar (%)		155	98,6	159,9	98,5
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		14	4,5	15,7	4,8
$\eta = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		37,5	10,3	44,3	11,8
CMEU(T*,t) (%)		0,351		0,387	
Ri	Média	215,69	655,3	212,09	564,9
	Valor máximo	433,2	1557,7	320,43	1215,6
	Valor p/ η_o máx	90,76	525	124,95	530,5
Ped	Média	713	444,2	691,3	433,1
	Valor máximo	849,5	550,2	777,3	547,7
	Valor p/ η_o máx	701,8	523,3	776,9	521,7
Fo	Média	0,0000523	0,0000441	0,000056	0,0000453
	Valor máximo	0,0000826	0,0000778	0,0000913	0,0000816
	Valor p/ η_o máx	0,0000369	0,0000407	0,0000406	0,0000432
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,197	0,177	0,236	0,172
	Valor máximo	0,248	0,223	0,304	0,225
	Valor p/ η_o máx	0,206	0,22	0,302	0,218
TRe - TRmédio (°C)	Média	13,7	12,4	13,6	11,1
	Valor p/ η_o máx	7,7	17,5	14,5	17,6
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,017	0,011	0,02	0,013
	Valor p/ η_o máx	0,014	0,002	0,01	0,004
(Ts-Te) (°C)	Média	18,8	19,5	19,9	18,6
	$\eta_{\text{início do fluxo}}$	13	4,7	20,3	7,1
(°C)	$\eta_{\text{Tmáx.}}(\eta_o \text{ max})$	13	25,5	14,6	25,6

Data do Experimento:		27/02/2003		28/02/2003	
Observações:		Sem misturador e com resistência desligada.		Sem misturador e com resistência desligada.	
*Com timer					
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	50	20	50	20
	Perfil de consumo	OO		OO	
	Energia solar diária (kJ)	62308,3		61681,4	
	Var (m/s)	1,02		1,09	
	Tar (média diária) (°C)	27,3		27,3	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Parcial	-	Parcial	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,0197	0,0116	0,0186	0,0114
Volume total no coletor (L)		272,8	388,1	315	387
Volume total abastecido (L)		189,5	190,1	192	191
TR médio (°C)		48	41,7	41,4	42,1
TR final - TR inicial (°C)		18,8	22,5	-0,4	0,3
EAO (kJ)		0	0	42241,7	40448,5
E'AF (kJ)		0	0	23560	22337,3
EAF (kJ)		0	0	0	0
Temp média consumo (°C)		53,1	51,4	53	54
ESc (kJ)		33427,1	32729	35172,8	32329,9
EuSc (kJ)		24884,2	28442,8	25292,7	28317,1
EuSR (kJ)		23353,5	25692,3	23994	25631,3
EEr (kJ)		0	0	0	0
EuE (kJ)		0	0	0	0
EEb (kJ)		747,1	-	944,2	-
EFR = f(UR) (kJ)		5715,8	5110,3	4891,4	6612
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		11001,6	5596,6	5671,9	7170
Erc (kJ)		0	89,2	0	80,3
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		3335,5	2371,1	2664,3	2499,5
η_o - Rendimento global (%)		37,5	41,1	38,9	41,4
Rend máximo instantâneo (%)		58,6	53,2	63	53,3
FS Fração solar (%)		154,9	98,6	100	100
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		10,7	3,8	4,3	4,1
$\eta_{\text{f}} = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		28,6	9,3	11,1	9,8
CMEU(T*,t) (%)		0,289		0,062	
Ri	Média	139,71	491,2	176,87	506,6
	Valor máximo	232,18	806,4	295,93	838,2
	Valor p/ η_o máx	123,99	375	173,67	402,7
Ped	Média	789,6	477,4	761,7	470,6
	Valor máximo	891,2	592,4	883,5	593,5
	Valor p/ η_o máx	810,6	553	755,8	537,9
Fo	Média	0,00005	0,0000431	0,0000408	0,0000437
	Valor máximo	0,0000799	0,000077	0,0000701	0,0000782
	Valor p/ η_o máx	0,0000645	0,0000338	0,0000334	0,0000346
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,242	0,143	0,214	0,146
	Valor máximo	0,271	0,198	0,292	0,197
	Valor p/ η_o máx	0,269	0	0,259	0,182
TRe - TRmédio (°C)	Média	16,4	10	17,2	9,9
	Valor p/ η_o máx	14,9	0	16,4	15,6
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,015	0,012	0,009	0,012
	Valor p/ η_o máx	0,014	0,003	0,003	0,003
(Ts-Te) (°C)	Média	21,5	16	21,4	16,1
	$\eta_{\text{início}}$ do fluxo	19,2	4,7	22,7	5,1
	$\eta_{\text{máx.}}$ (η_o max)	22,5	21,2	20,8	21,4

Data do Experimento:		12/03/2003		13/03/2003	
Observações: * Com Timer		Sem misturador e com		Sem misturador e com	
** A resistência B não funcionou		resistência habilitada. *		resistência habilitada. **	
Dados comuns	T* / ? T de ensaio (°C)	50	15	50	10
	Perfil de consumo	BB		OO	
	Energia solar diária (kJ)	22373,1		44508,6	
	Var (m/s)	1,21		1,23	
	Tar (média diária) (°C)	23,2		24,0	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Parcial	-	Parcial	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,0249	0,0061	0,0458	0,0089
Volume total no coletor (L)		24,6	108	262,5	275,9
Volume total abastecido (L)		186,3	264,7	189,9	189,8
TR médio (°C)		48,5	52,6	45,2	42,8
TR final - TR inicial (°C)		-6,3	-9,8	-9,5	-11,6
EAO (kJ)		41660,5	55555	37824,5	36379,9
E'AF (kJ)		19530,2	26375,2	19351,5	19636,3
EAF (kJ)		0	0	0	0
Temp média consumo (°C)		49,6	47,6	43,2	43,4
ESc (kJ)		9597,5	6739,3	21865,2	20870,7
EuSc (kJ)		1489,3	4859,1	14572	18746,2
EuSR (kJ)		1209,8	2955	13782,2	15992,2
EEr (kJ)		29557,6	36871,1	6045,7	0
EuE (kJ)		20395,3	28357,4	3241,2	0
EEb (kJ)		53,5	-	331,7	-
EFR = f(UR) (kJ)		8791,3	13142,5	7369,9	8398,8
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		5053,1	10710,3	7036	9601,9
Erc (kJ)		0	125,1	0	61,1
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		175,3	106,3	1406,9	1268,3
? o - Rendimento global (%)		5,4	12,6	31	35,8
Rend máximo instantâneo (%)		44,1	76,1	55,5	51,4
FS Fração solar (%)		5,6	9,5	81,5	100
? L - Fator de carga utiliz. (%)		0,8	0,5	3,2	2,8
?? = (? o / ? L) (%)		14,5	3,8	10,2	8
CMEU(T*,t) (%)		0,394		0,099	
Ri	Média	35,21	111,5	14,26	223,1
	Valor máximo	46	180,1	26,09	332,1
	Valor p/ ? o máx	46	19,2	14,28	266,1
Ped	Média	899,4	248,4	1809,7	365,3
	Valor máximo	1026,8	359,4	1968,5	569,5
	Valor p/ ? o máx	889,4	150,8	1770,7	437,2
Fo	Média	0,0000561	0,0000655	0,0000496	0,0000426
	Valor máximo	0,0000811	0,0000778	0,0000628	0,000063
	Valor p/ ? o máx	0,0000717	0,0000577	0,0000525	0,0000499
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,093	0,208	0,118	0,179
	Valor máximo	0,171	0,392	0,145	0,271
	Valor p/ ? o máx	0,093	0,392	0,131	0,194
TRe - TRmédio (°C)	Média	5,6	2,0	9,5	6
	Valor p/ ? o máx	8	3,3	8,8	9,7
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,03	0,05	0,033	0,033
	Valor p/ ? o máx	0,042	0,092	0,018	0,013
(Ts-Te) (°C)	Média	15,5	9,3	11,2	13,8
	? T início do fluxo	15,9	8,9	14,5	7,2
	? T máx. (? o max)	19,9	14,1	39,6	24,4

Data do Experimento:		14/03/2003		15/03/2003	
Observações:		Sem misturador e com resistência desligada.		Sem misturador e com resistência desligada.	
* Valor inicial					
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	50	15	50	12*
	Perfil de consumo	OO		OO	
	Energia solar diária (kJ)	56767,8		49842,6	
	Var (m/s)	1,05		1,18	
	Tar (média diária) (°C)	24,2		24,6	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Parcial	-	Parcial	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,0279	0,0104	0,0277	0,0098
Volume total no coletor (L)		259,4	341,8	326,1	313,4
Volume total abastecido (L)		205,9	199,4	202	201,7
TR médio (°C)		40,9	37,7	35,9	37
TR final - TR inicial (°C)		-6,1	0,5	-0,4	0,1
EAO (kJ)		42446,9	37703,7	37461,6	36801,7
E'AF (kJ)		22774,8	20901,6	22881,2	21847,2
EAF (kJ)		0	0	0	0
Temp média consumo (°C)		46,9	43	43,5	42,1
ESc (kJ)		31329,1	29702,3	28118,6	25940,2
EuSc (kJ)		23987,3	27733,8	22832,4	24516,6
EuSR (kJ)		22418,5	24902,1	21010,3	21561,7
EEr (kJ)		229,3	0	0	0
EuE (kJ)		23,3	0	0	0
EEb (kJ)		541,7	-	623,5	-
EFR = f(UR) (kJ)		5858,2	6084,2	3962,7	5563,2
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		8258,5	7557	6790,7	6443,7
Erc (kJ)		0	92	0	73,2
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		2120,9	1450,8	928,9	882,5
η_o - Rendimento global (%)		39,5	43,7	42,2	43,1
Rend máximo instantâneo (%)		63,8	61,3	92,8	62,1
FS Fração solar (%)		100	100	100	100
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		3,7	2,6	1,9	1,8
$\eta = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		9,5	5,8	4,4	4,1
CMEU(T*,t) (%)		0,316		0,05	
Ri	Média	1034,78	331,1	103,99	309,2
	Valor máximo	89,96	545,9	589,97	521,9
	Valor p/ η_o máx	77,3	384,7	148,46	178,4
Ped	Média	1081,9	432,4	1059	411,4
	Valor máximo	2267,8	561,3	2662,7	558,3
	Valor p/ η_o máx	1115,1	468,4	960,9	387,7
Fo	Média	0,0000403	0,0000363	0,0000332	0,0000353
	Valor máximo	0,0000655	0,0000645	0,0000542	0,00006
	Valor p/ η_o máx	0,00004	0,0000301	0,0000236	0,0000521
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,223	0,152	0,154	0,139
	Valor máximo	0,243	0,224	0,226	0,228
	Valor p/ η_o máx	0,242	0,207	0,12	0,195
TRe - TRmédio (°C)	Média	16	11,5	11,4	10,3
	Valor p/ η_o máx	18,8	14,9	14,1	5,5
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,014	0,012	0,012	0,015
	Valor p/ η_o máx	0,008	0,003	0,007	0,025
(Ts-Te) (°C)	Média	18,4	17,2	15	16,3
	η Tíncio do fluxo	14,7	5,6	14,3	4,4
	η Tmáx. (η_o max)	34,8	26,6	38,8	26,1

Data do Experimento:		16/03/2003		17/03/2003	
Observações:		Sem misturador e com resistência desligada.		Sem misturador e com resistência habilitada. *	
* Com Timer ** Valor inicial					
Dados comuns	T* / ? T de ensaio (°C)	50	7**	50	7**
	Perfil de consumo	OO		OO	
	Energia solar diária (kJ)	55861,7		20261,5	
	Var (m/s)	1,00		1,43	
	Tar (média diária) (°C)	25,5		21,7	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Não	-
Abertura do registro		Parcial	-	Total	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,0264	0,0101	0,0068	0,0074
Volume total no coletor (L)		292,2	339,6	74,3	161,2
Volume total abastecido (L)		198,6	200,2	106,8	107,7
TR médio (°C)		37,4	38,4	30,2	30,9
TR final - TR inicial (°C)		1,1	0,8	-3,7	9,2
EAO (kJ)		38936,2	38093,8	16329,9	15047,4
E'AF (kJ)		22840,8	21870,4	9562,2	9185,4
EAF (kJ)		0	0	0	0
Temp média consumo (°C)		43	43,2	31,7	33,0
ESc (kJ)		31275,1	29217,2	9734,4	9924,3
EuSc (kJ)		23621,1	26668,1	8581,8	9308,9
EuSR (kJ)		21865,1	23531,1	7436,6	7559,4
EEr (kJ)		0	0	0	0
EuE (kJ)		0	0	0	0
EEb (kJ)		628,3	-	0	-
EFR = f(UR) (kJ)		4125,8	5760,5	3009,1	4159,9
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		4777,6	6483,9	4040,2	3647,8
Erc (kJ)		0	102,6	5,7	158,4
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		1287	1412,6	98,6	25,4
? o - Rendimento global (%)		39,1	41,9	36,7	36,5
Rend máximo instantâneo (%)		69,3	63,8	79,5	79,5
FS Fração solar (%)		100	100	99,6	42
? L - Fator de carga utiliz. (%)		2,3	2,5	0,5	0,1
?? = (? o / ? L) (%)		5,9	6	1,3	0,3
CMEU(T*,t) (%)		-0,098		0,742	
Ri	Média	104,83	316,6	695,22	329,7
	Valor máximo	161,19	524,1	1955,81	453,2
	Valor p/ ? o máx	34,52	150,1	1328,68	293,2
Ped	Média	1032,9	421,6	288,5	319,4
	Valor máximo	2195	567,8	412,8	556,3
	Valor p/ ? o máx	1268,8	206,5	207,2	189,8
Fo	Média	0,0000358	0,0000376	0,0000241	0,0000257
	Valor máximo	0,0000604	0,0000644	0,0000302	0,0000313
	Valor p/ ? o máx	0,0000323	0,0000578	0,0000267	0,0000275
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,155	0,147	0,121	0,085
	Valor máximo	0,252	0,226	0,206	0,146
	Valor p/ ? o máx	0,252	0,179	0,178	0,138
TRe - TRmédio (°C)	Média	9,3	10,4	10,7	6,7
	Valor p/ ? o máx	8,9	4,2	0,3	0,9
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,012	0,014	0,025	0,024
	Valor p/ ? o máx	0,002	0,025	0,018	0,024
(Ts-Te) (°C)	Média	15,4	16,5	12,1	9,8
	? T início do fluxo	8,8	4,0	7,5	4,0
(°C)	? T máx.(? o max)	26,4	25,8	8,5	6,8

Data do Experimento:		18/03/2003		20/03/2003	
Observações:		Sem misturador e com resistência habilitada		Sem misturador e com *resistência "A" habilitada	
* Com Timer ** Valor inicial					
Dados comuns	T* / ? T de ensaio (°C)	50	7**	50	7**
	Perfil de consumo	CC		OO	
	Energia solar diária (kJ)	29695,2		53690,9	
	Var (m/s)	1,09		0,71	
	Tar (média diária) (°C)	20,7		24,5	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Parcial	-	Parcial	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,0152	0,0062	0,0142	0,0096
Volume total no coletor (L)		48,7	161,8	327,4	313,7
Volume total abastecido (L)		186,7	185,9	188,3	191,9
TR médio (°C)		44,8	52,1	39,6	40,1
TR final - TR inicial (°C)		12,5	13,4	-1,4	-3,3
EAO (kJ)		40140,6	38658,8	38646,1	38032,5
E'AF (kJ)		17356,5	16192,3	21340,3	21100,8
EAF (kJ)		0	0	0	0
Temp média consumo (°C)		47,6	46,2	46,7	45,5
ESc (kJ)		8330	7520,7	28230,9	27848,3
EuSc (kJ)		7688,5	6716,5	25510,1	25067,2
EuSR (kJ)		5102,9	3200,1	23814,7	22181,8
EEr (kJ)		43809,4	53836,3	430,6	0
EuE (kJ)		36546,8	43786,1	127,1	0
EEb (kJ)		183,3	-	1030,9	-
EFR = f(UR) (kJ)		8377,8	13999	5266,5	6995,4
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		7495,9	12021,9	7896,4	8155,1
Erc (kJ)		128,2	611,2	0	65,4
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		414,9	463,3	1576,2	1541
? o - Rendimento global (%)		16,8	8,7	44,4	41,2
Rend máximo instantâneo (%)		71,5	50,2	66,4	58,5
FS Fração solar (%)		12,2	6,8	99,5	100
? L - Fator de carga utiliz. (%)		1,4	1,6	2,9	2,9
?? = (? o / ? L) (%)		8,3	17,9	6,6	7
CMEU(T*,t) (%)		-0,117		0,022	
Ri	Média	93,36	109	160,78	290,5
	Valor máximo	124,1	240,2	545,39	424,5
	Valor p/ ? o máx	60,52	60	55,65	207,3
Ped	Média	608,1	252	738,3	442,3
	Valor máximo	750,7	430,3	1344,8	579,5
	Valor p/ ? o máx	704,2	244,4	1109,6	439,8
Fo	Média	0,0000496	0,0000649	0,0000385	0,000039
	Valor máximo	0,0000722	0,000073	0,0000659	0,0000682
	Valor p/ ? o máx	0,0000474	0,0000409	0,0000403	0,0000441
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,178	0,134	0,182	0,174
	Valor máximo	0,505	0,486	0,196	0,208
	Valor p/ ? o máx	0,421	0,269	0,179	0,165
TRe - TRmédio (°C)	Média	3,8	2,1	12,1	10,9
	Valor p/ ? o máx	4,4	2	13,2	9,5
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,05	0,057	0,015	0,015
	Valor p/ ? o máx	0,044	0,03	0,015	0,029
(Ts-Te) (°C)	Média	9,9	9,1	17,1	17,2
	? T início do fluxo	7,1	11,4	9,2	6,7
	? T máx. (? o max)	16,1	14,6	20,5	25,5

Data do Experimento:		25/03/2003		27/03/2003	
Observações:		Sem misturador e com resistência desligada.		Sem misturador e com resistência desligada.	
* Valor inicial					
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	50	5*	50	7*
	Perfil de consumo	OO		OO	
	Energia solar diária (kJ)	37999,6		40011,0	
	Var (m/s)	0,87		0,69	
	Tar (média diária) (°C)	20,5		21,3	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Parcial	-	Parcial	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,0137	0,008	0,0164	0,0089
Volume total no coletor (L)		257,7	259,3	218	258,6
Volume total abastecido (L)		188,7	192,6	189,9	190,1
TR médio (°C)		33,8	34,4	32	31,9
TR final - TR inicial (°C)		-4,6	-6,2	-0,5	-0,1
EAO (kJ)		32212,7	30768,8	31937,6	29767,7
E'AF (kJ)		17520,5	17065,1	17799,4	17032,9
EAF (kJ)		0	0	0	0
Temp média consumo (°C)		36,7	35,8	36,1	35,3
ESc (kJ)		19012	18688,8	21137	21158,6
EuSc (kJ)		17888,5	18285	20369	20087,7
EuSR (kJ)		16220,4	15605,3	18738,2	17907,6
EEr (kJ)		0	0	0	0
EuE (kJ)		0	0	0	0
EEb (kJ)		1157,1	-	771	-
EFR = f(UR) (kJ)		4618,5	6174,5	3699,1	4728
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		5676,8	7451,7	5052,3	5235,6
Erc (kJ)		6,5	46,1	0	27,7
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		215,5	303,5	138,5	143,4
η_o - Rendimento global (%)		42,7	40,9	46,8	44,7
Rend máximo instantâneo (%)		120,1	87,8	75,4	69,8
FS Fração solar (%)		100	100,1	100	100
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		0,6	0,8	0,3	0,4
$\eta_{TL} = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		1,3	2	0,7	0,8
CMEU(T*,t) (%)		-4,09		-0,036	
Ri	Média	299,47	334,8	283,55	419,4
	Valor máximo	714,47	600,3	483,1	618,6
	Valor p/ η_o máx	451,53	218,6	188,58	288,5
Ped	Média	545,1	340,2	692,9	379,1
	Valor máximo	1145,8	549,8	967,9	540,2
	Valor p/ η_o máx	291,2	226,2	821,6	172
Fo	Média	0,0000281	0,0000285	0,0000273	0,0000272
	Valor máximo	0,0000466	0,0000465	0,0000458	0,0000454
	Valor p/ η_o máx	0,0000226	0,0000235	0,000045	0,0000454
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,17	0,163	0,162	0,145
	Valor máximo	0,233	0,217	0,199	0,215
	Valor p/ η_o máx	0,206	0,181	0,166	0,146
TRe - TRmédio (°C)	Média	8,9	7,5	12,2	10,5
	Valor p/ η_o máx	3,6	1,9	7,2	6,5
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,018	0,017	0,016	0,015
	Valor p/ η_o máx	0,014	0,027	0,025	0,021
(Ts-Te) (°C)	Média	12	14,4	14,5	16,1
	$\eta_{T\text{início}}$ do fluxo	5,9	5,4	8,5	4,9
	$\eta_{T\text{máx.}}$ (η_o max)	22,8	28,2	22	26,6

Data do Experimento:		28/03/2003		29/03/2003	
Observações: * Valor inicial		Sem misturador e com resistência desligada.		Sem misturador e com resistência desligada.	
Dados comuns	T* / ΔT de ensaio (°C)	50	7*	50	7*
	Perfil de consumo	OO		OO	
	Energia solar diária (kJ)	35997,2		53386,1	
	Var (m/s)	0,62		1,21	
	Tar (média diária) (°C)	20,9		21,7	
Sistemas		Sistema A	Sistema B	Sistema A	Sistema B
Uso de bomba		Sim	-	Sim	-
Abertura do registro		Parcial	-	Parcial	-
Vazão média no coletor (L/s)		0,0127	0,0078	0,0152	0,0093
Volume total no coletor (L)		197,9	269,4	182,3	315,5
Volume total abastecido (L)		188,4	191,3	186,7	191,7
TR médio (°C)		30,2	30,2	33,1	33,3
TR final - TR inicial (°C)		-0,9	-0,7	4,3	1,8
EAO (kJ)		29572	28014,9	33813,6	32132,6
E'AF (kJ)		17396,5	16870,1	18286,7	17721,7
EAF (kJ)		0	0	0	0
Temp média consumo (°C)		34	33,1	41,1	41,4
ESc (kJ)		17923	17878	27834,8	27882
EuSc (kJ)		18373,8	17367,4	26100	25388,1
EuSR (kJ)		16442,6	14973,7	22970,8	22313,4
EEr (kJ)		0	0	0	0
EuE (kJ)		0	0	0	0
EEb (kJ)		931,2	-	659,1	-
EFR = f(UR) (kJ)		3219,9	4127,5	3968	5205,6
EFR (calculado pelo balanço) (kJ)		5076,5	4446,4	7318,9	6208,8
Erc (kJ)		5,2	15,8	2,9	65,7
EU(T*)-Energia utilizável (kJ)		6	62,3	446,1	441,5
η_o - Rendimento global (%)		45,7	41,6	43,0	41,7
Rend máximo instantâneo (%)		84,9	67,6	61,1	58,6
FS Fração solar (%)		100	100	91,8	100
η_L - Fator de carga utiliz. (%)		0	0,2	0,8	0,8
$\eta_{\text{m}} = (\eta_o / \eta_L)$ (%)		0	0,4	1,9	2,0
CMEU(T*,t) (%)		-0,938		0,01	
Ri	Média	346,61	420,1	367,65	651,9
	Valor máximo	546,3	740,5	610,83	1460,7
	Valor p/ η_o máx	339,91	417,6	271,29	786,6
Ped	Média	541,6	333,4	645	395
	Valor máximo	1041,3	571,4	702,4	575,1
	Valor p/ η_o máx	340,2	359,6	702,4	448,2
Fo	Média	0,0000247	0,0000249	0,000029	0,0000298
	Valor máximo	0,0000369	0,0000362	0,0000503	0,0000515
	Valor p/ η_o máx	0,0000188	0,0000266	0,0000226	0,0000419
Índice de estratificação (°C/cm)	Média	0,141	0,117	0,178	0,148
	Valor máximo	0,183	0,175	0,284	0,23
	Valor p/ η_o máx	0,114	0,156	0,263	0,189
TRe - TRmédio (°C)	Média	10,7	8,5	14,9	10,3
	Valor p/ η_o máx	5,5	9,3	17,8	10,9
(Te-Tar)/G (°C/W)	Média	0,015	0,012	0,013	0,015
	Valor p/ η_o máx	0,014	0,008	0,001	0,012
(Ts-Te) (°C)	Média	11,9	14	16,9	17,0
	$\eta_{\text{início}}$ do fluxo	7,2	7,9	7,6	7,0
	$\eta_{\text{máx.}}$ (η_o máx)	22,2	28,9	32,5	27,3

ANEXO C

Valores das vazões e temperaturas do sistema de aquecimento por termossifão.

Diferenças de temperaturas entre a entrada e a saída da água no coletor e vazões do escoamento por termossifão.

Data do ensaio	Temperaturas (Ts-Te)			Vazões (L/min.m2)				Volume diário (L)
	Média (°C)	Inicial (°C)	No rend. máximo (°C)	QF-1B média	QF-1B inicial	QF-1B no rend. máximo	QF-1B máxima	
25/04/02	14,6	8,7	19,8	0,26	0,02	0,26	0,32	349,6
26/04/02	13,5	9,2	12,3	0,22	0,05	0,17	0,30	327,2
27/04/02	11,8	8,4	21,6	0,29	0,02	0,20	0,29	169,0
28/04/02	11,7	9,6	13,8	0,21	0,02	0,20	0,31	240,9
08/05/02	12,0	10,8	11,8	0,25	0,02	0,18	0,31	259,4
10/05/02	13,3	9,1	15,5	0,21	0,02	0,22	0,30	264,7
11/05/02	12,2	8,4	10,1	0,24	0,03	0,12	0,30	254,7
12/05/02	14,2	9,2	19,3	0,25	0,03	0,24	0,21	260,8
16/05/02	9,0	7,8	14,4	0,26	0,02	0,14	0,26	118,2
26/05/02	14,5	10,6	16,9	0,24	0,02	0,20	0,30	330,1
27/05/02	14,8	10,6	14,1	0,24	0,07	0,19	0,29	300,1
04/06/02	15,4	10,4	21,3	0,23	0,03	0,24	0,29	317,6
07/06/02	13,9	10,4	20,6	0,23	0,03	0,25	0,29	320,5
08/06/02	14,0	9,4	20,4	0,24	0,03	0,17	0,29	300,3
09/06/02	13,9	10,5	19,8	0,23	0,03	0,24	0,30	299,5
10/06/02	11,2	10,7	20,0	0,20	0,02	0,24	0,29	204,7
13/06/02	13,9	9,8	21,1	0,22	0,03	0,17	0,28	299,5
03/09/02	17,0	5,9	23,0	0,24	0,02	0,25	0,31	375,7
14/10/02	15,9	5,2	22,0	0,25	0,03	0,30	0,30	370,4
16/10/02	15,6	4,9	21,6	0,23	0,03	0,29	0,30	367,4
26/10/02	14,0	4,5	23,0	0,22	0,06	0,26	0,30	341,1
27/10/02	16,2	3,2	22,2	0,26	0,02	0,30	0,33	400,0
28/10/02	16,5	5,7	16,7	0,25	0,05	0,26	0,30	327,5
29/10/02	15,8	5,9	15,7	0,24	0,09	0,22	0,31	374,9
08/10/02	18,1	6,8	25,9	0,24	0,06	0,17	0,30	359,6
09/11/02	17,5	6,8	24,1	0,24	0,09	0,28	0,30	368,5
10/11/02	13,1	5,2	14,2	0,20	0,02	0,19	0,28	300,7
11/11/02	11,2	4,6	22,9	0,17	0,06	0,23	0,28	279,4
19/11/02	15,1	5,7	20,7	0,21	0,06	0,26	0,30	314,3
23/11/02	12,7	4,7	11,9	0,18	0,04	0,19	0,28	310,5
27/11/02	14,8	8,0	14,8	0,22	0,09	0,19	0,28	306,5
28/11/02	15,3	4,7	15,7	0,22	0,04	0,22	0,29	321,5
04/12/02	14,4	9,7	22,9	0,21	0,04	0,27	0,30	294,0
13/12/02	15,7	7,9	22,6	0,20	0,02	0,23	0,25	233,0
15/12/02	12,7	9,0	13,4	0,17	0,02	0,18	0,24	228,5
18/12/02	14,6	8,8	23,2	0,20	0,09	0,26	0,30	315,1
19/12/02	15,0	7,9	21,0	0,20	0,07	0,23	0,26	286,4
07/01/03	17,7	5,6	27,4	0,19	0,03	0,24	0,26	287,4
09/01/03	15,8	5,9	27,0	0,17	0,02	0,24	0,28	305,4
11/01/03	14,0	9,2	25,5	0,16	0,05	0,25	0,27	288,7
17/01/03	13,4	10,1	24,8	0,17	0,07	0,23	0,26	205,2
04/02/03	17,0	7,2	28,3	0,17	0,08	0,21	0,24	309,0

(continuação)

Data do ensaio	Temperaturas (Ts-Te)			Vazões (L/min.m2)				Volume diário (L)
	Média (°C)	Inicial (°C)	No rend. máximo (°C)	QF-1B média	QF-1B inicial	QF-1B no rend. máximo	QF-1B máxima	
05/02/03	16,6	5,0	15,6	0,19	0,04	0,17	0,24	296,4
06/03/03	17,8	4,7	16,4	0,20	0,04	0,20	0,24	300,3
08/02/03	17,2	5,0	15,4	0,19	0,06	0,18	0,27	320,9
09/02/03	18,0	4,7	21,3	0,20	0,04	0,21	0,27	303,9
10/02/03	17,5	4,7	10,5	0,20	0,04	0,12	0,27	318,6
11/02/03	17,4	5,0	23,5	0,20	0,04	0,23	0,25	326,6
12/02/03	17,3	6,2	13,3	0,20	0,08	0,17	0,26	261,3
13/02/03	17,4	5,1	16,3	0,20	0,08	0,19	0,26	297,0
19/02/03	17,7	7,1	18,1	0,20	0,08	0,19	0,25	266,8
20/02/03	15,8	4,9	15,9	0,18	0,05	0,18	0,26	289,8
22/02/03	15,5	5,1	19,4	0,18	0,06	0,21	0,26	306,9
23/02/03	17,1	4,2	17,0	0,20	0,03	0,18	0,28	328,1
24/02/03	18,1	4,9	9,1	0,19	0,03	0,13	0,28	298,1
25/02/03	19,5	4,7	25,8	0,23	0,04	0,27	0,28	329,7
26/02/03	18,6	7,1	25,6	0,22	0,09	0,27	0,28	350,2
27/02/03	16,0	4,7	21,2	0,25	0,03	0,28	0,30	388,1
28/02/03	16,1	5,1	21,4	0,24	0,06	0,27	0,31	387,0
12/03/03	9,3	8,9	14,1	0,13	0,04	0,15	0,19	108,0
13/03/03	13,8	7,2	24,4	0,19	0,07	0,23	0,28	275,9
14/03/03	17,2	5,6	26,6	0,22	0,06	0,23	0,29	341,8
15/03/03	16,3	4,4	26,1	0,21	0,03	0,20	0,28	313,4
16/03/03	16,5	4,0	25,8	0,21	0,02	0,25	0,29	339,6
17/03/03	9,8	4,0	6,8	0,16	0,02	0,09	0,28	161,2
18/03/03	9,1	11,4	14,6	0,13	0,05	0,12	0,23	161,8
20/03/03	17,2	6,7	25,5	0,20	0,05	0,22	0,30	313,7
25/03/03	14,4	5,4	28,2	0,17	0,04	0,11	0,28	259,8
27/03/03	16,1	4,9	26,6	0,19	0,06	0,17	0,27	258,6
28/03/03	14,0	7,9	28,9	0,17	0,09	0,18	0,28	269,4
29/03/03	17,0	7,0	27,3	0,20	0,07	0,23	0,29	315,5
Resumo								
Média	15,0	6,9	19,8	0,21	0,05	0,21	0,28	295,4
Desvio padrão	2,4	2,2	5,4	0,03	0,02	0,05	0,03	58,9

ANEXO D

Modelo de controle da operação da fonte auxiliar de calor.

D.1 – Descrição do modelo de controle do acionamento da resistência elétrica.

O modelo proposto tem por finalidade habilitar ou não a resistência elétrica ao funcionamento baseado no consumo previsto para as quatro horas seguintes, na temperatura média da água no reservatório e na temperatura do ar. O tempo necessário para que a resistência elétrica seja acionada para aquecer o volume previsto é então calculado e comparado com o tempo que falta para o início da primeira descarga.

O tempo necessário para o aquecimento é encontrado fazendo:

$$? \quad (\text{Potência útil da resistência} - \text{fluxo de perda de calor do reservatório}) \times (T_{\text{prev}}) = \\ [(\text{Massa a ser aquecida}) \times (\text{Calor específico do líquido}) \times (\text{Temperatura de} \\ \text{utilização} - \text{Temperatura média no reservatório})] + (\text{tempo para que a resistência} \\ \text{alcance seu rendimento máximo}) + (\text{tempo de provável variação da hora prevista} \\ \text{para o consumo}).$$

A resistência elétrica também é acionada quando se verifica que há uma inversão do perfil térmico dentro do reservatório e durante os períodos em que ocorre uma descarga para o consumo e, ao mesmo tempo, a temperatura média do reservatório se encontra abaixo da temperatura de utilização.

D.2 – Variáveis utilizadas

- ? C_p : Calor específico da água à pressão constante (kJ/kg.°C);
- ? Q_{F2} : vazão de consumo lida no instante i (m³/s);
- ? $R=0$: resistência elétrica não habilitada;
- ? $R=5$: resistência elétrica habilitada;
- ? Vol_i : Volume de água previsto para ser consumida no instante i (m³);
- ? T_{ar} : Temperatura do ar (°C);
- ? T^* : Temperatura de utilização da água (°C);
- ? $\bar{T}_R$: Temperatura média do reservatório (°C);

- ? TR_7 : Temperatura de saída da água de consumo do reservatório ($^{\circ}\text{C}$);
- ? TR_s : Temperatura na parte inferior do reservatório, medida no ponto de saída da água para os coletores ($^{\circ}\text{C}$);
- ? t_i : Intervalo de tempo entre a leitura de dados e o início da primeira descarga de consumo (s);
- ? t_f : Tempo no final do intervalo de quatro horas a partir do instante t (s);
- ? t_{prev} : Intervalo de tempo previsto para a aquecer o volume Vol_i (s);
- ? $?t$: Intervalo de tempo de aquisição de dados (s);
- ? $?t_s$: Variação admitida do horário do consumo previsto (s);
- ? U_R : coeficiente global de transferência de calor do reservatório ($\text{W}/^{\circ}\text{C}$);
- ? $?$: massa específica da água.

Figura C.1 – Fluxograma de controle de acionamento da resistência.

^(a) Verificação da existência de inversão térmica.

LISTA DE REFERÊNCIAS

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Coletores solares planos para líquidos – determinação do rendimento térmico – NBR 10184**. Rio de Janeiro, 1988-a.

_____. **Reservatórios térmicos para líquidos destinados a sistemas de energia solar – determinação de desempenho térmico – NBR 10185**. Rio de Janeiro, 1988-b.

ALIZADEH, S. *An experimental and numerical study of thermal stratification in a horizontal cylindrical solar storage*. **Solar Energy**, v. 66, n. 6, p. 409-421, 1999.

AMER, E.H.; NAYAK, J. K; SHARMA, G. K. *Transient test methods for flat-plate collectors: review and experimental evaluation*. **Solar Energy**, v.60, n. 5, p. 229-243, 1997.

ASHJAEI, M.; ROOMINA, M. R.; GHAFOURI-AZAR, R. *Estimating direct, diffuse, and global solar radiation for various cities in Iran by two methods and their comparison with the measured data*. **Solar Energy**, v. 50, n. 5, p. 441-445, 1993.

ASHRAE handbook: heating, ventilating and air-conditioning applications. SI ed. Atlanta: ASHRAE, 1999. cap 32.

_____. heating, ventilating and air-conditioning systems and equipment. IP ed. Atlanta: ASHRAE, 1997. cap. 14.

_____. heating, ventilating and air-conditioning systems and equipment. IP ed. Atlanta: ASHRAE, 1996. cap. 33.

ASHRAE: Active solar thermal design manual. New York, cap. 5, 1986.

AUBINET, M. *Longwave sky radiation parameterizations*. **Solar Energy**, v. 53, n. 2, p. 147-154, 1994.

BATLLES, F. J.; OLMO, F. J.; ALADOS-ARBOLEDAS, L. *On shadow band correction methods for diffuse irradiance measurements*. **Solar Energy**, v. 54, n. 2, p. 105-114, 1995.

BECKMAN, W. A.; THORNTON, J.; LONG, S.; WOOD, B. D. *Control problems in solar domestic hot water systems*. **Solar Energy**, v. 53, n. 3, p. 233 – 236, 1994.

BEZERRA, A. M. **Aplicações térmicas da energia solar**. 3.ed. João Pessoa, Ed. Universitária / UFPB, 1998.

- BOSANAC, M.; NIELSEN, J. E. *In situ check of collector performance*. **Solar Energy**, v. 59, n. 4-6; p. 135-142, 1997.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Normais climatológicas (1961-1990)**, Brasília: Depto Nacional de Metereologia, 1992.
- BOYLE, G. (ed.) **Renewable Energy: Power a Sustainable Future**, Open University, Oxford, 1996
- CAMPS, J.; SOLER, M. R. *Estimation of diffuse solar irradiation on a horizontal surface for cloudless days – a approach*. **Solar Energy**, v. 49, n. 1, p. 53-63, 1992.
- CAPUANO, A.; DELL'ISOLA, M.; MASSAROTTI, N.; VANOLI, L. – *A metrological analysis of a (Direct Digital Control) DDC – based air conditioning system*. **Energy Buildings**, v. 29, p. 155-166, 1999.
- CHENDO, M. A. C.; MADUEKWE, A. A. L. *Hourly global and diffuse radiation of Lagos, Nigeria – Correlation with some atmospheric parameters*. **Solar Energy**, v.52, n. 3, p. 247-251,1994.
- CHURCHILL, S. W.; BERNSTEIN, M. *A correlating equation for forced convection from gases and liquids to a circular cylinder in crossflow*. **Journal of Heat Transfer**. v. 99, p. 300 – 306, may 1977.
- DAHLM, J.; et al. *Evaluation of storage configurations with internal heat exchanges*. **Solar Energy**, v. 62, n. 6, p. 407 – 417, 1998.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, J. **Solar engineering of thermal processes**. 2.ed. John Wiley & Sons, 1991.
- FESTA, R.; RATTO, C. F. *Proposal of numerical procedure to select reference years*. **Solar Energy**, v. 50, n. 1, p. 9-17, 1993.
- FREEBORNE, W. E. *Control design deficiencies in HUD solar demonstration projects*. **ASHRAE Transactions**, v. 91, part 2B, p. 147 –155, 1985.
- GUEYMARD, C. *Analysis of monthly average solar radiation and bright sunshine for different thresholds at Cape Canaveral, Florida*. **Solar Energy**, v. 51, n. 2, p. 139-145, 1993-a.
- GUEYMARD, C. *Critical analysis and performance assessment of clear sky solar irradiance model using theoretical and measuring data*. **Solar Energy**, v. 51, n. 2, p. 121-138, 1993 - b.
- GUL, M. S.; MUNEER, T.; KAMBEZIDIS, H. D. *Models for obtaining solar radiation from other meteorological data*. **Solar Energy**, v. 64, n. 1-3, p. 99-108, 1998.

- HAHNE, E.; CHEN, Y. *Numerical study of flow and heat transfer characteristics in hot water stores*. **Solar Energy**, v. 64, n. 1-3, p. 9-18, 1998.
- HALOUANI, N.; NGUYEN, C. T.; VO-NGOC, D. *Calculation of monthly average global solar radiation on horizontal surfaces using daily hours of bright sunshine*. **Solar Energy**, v. 50, n. 3, p. 247-258, 1993.
- HELLSTROM, B.; et al. *The impact of optical and thermal properties on the performance of flat plate solar collectors*. **Renewable Energy**, n. 28, p. 331-344, 2003.
- HILMER, F.; et al. *Numerical solution and validation of a dynamic model of solar collectors working with varying fluid flow rate*. – **Solar Energy**, v.65, n. 5, p. 305–321, 1999.
- HOLMAN, J. P. – **Transferência de calor**. Trad. Luiz Fernando Milanez. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1983.
- HOTTEL, H. C. *A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres*. **Solar Energy**, v.18, p. 129-134, 1976.
- HUANG, B. J. *Similarity theory of solar water heater with natural circulation*. **Solar Energy**, v. 25, p. 105 – 116, 1980.
- HUANG, B. J.; HSIEH, C. T. *Simulation method for solar thermosyphon collector*. **Solar Energy**, v. 35, n. 1, p. 31-43, 1985.
- HUDSON, L.G.; MARKELL, J. **Solar technology**. Reston: Reston Publishing Company, 1985.
- ILHA, M. S. **Estudo dos parâmetros relacionados com a utilização de água quente em edifícios residenciais**. 1991.185p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- INCROPERA, F. P.; WITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de calor e massa**. 3.ed. Guanabara Koogan, 1992.
- KALOGIROU, S. A.; PANTELIOU, S.; DENTSORAS, A. *Modeling of solar domestic heating systems using artificial neural networks*. **Solar Energy**, v. 65, n. 6, p. 335-342, 1999.
- KAMEL, M. A.; SHALABY, S. A.; MOSTAFA, S. S. *Solar radiation over Egypt: comparison of predicts and measured meteorological data*. **Solar Energy**, v. 50, n. 2, p. 463-467, 1993.
- KLEIN, S. A. et al. **TRNSYS 14.2 Reference Manual**. 14.2 ed. Madison; Solar Energy Laboratory - University of Wisconsin, Madison, 1996.

- KREIDER, J. F.; KREITH, F. *Solar Heating and cooling: active and passive design*. Hemisphere Publishing Corp. 2^a ed., 1982.
- KREITH, FRANK. **Princípios da transmissão de calor**. Cord. Trad. Remi Benedito Silva. São Paulo, Edgard Blucher Ltda, 1973.
- JANJAI, S.; ESPER, A.; MÜHLBAUER, W. *Modelling the performance of a large area plastic solar collector*. **Renewable Energy**, n. 21, p. 363-367, 2000.
- JONCICH, D. M. *Active solar thermal energy systems in the U. S. Army standardization for maximum performance and reliability*. **ASHRAE Transactions**, v. 97, part 1, p. 189 –193, 1991
- LITTLEFAIR, P.J. *The luminous efficacy of daylight: a review*. **Lighting Research & Technology, CIBSE**. v.17, n. 4, p. 162-182, 1985.
- MARSHALL, R. *A generalized steady state collector model including pipe losses, heat exchangers, and pump powers*. **Solar Energy**, v. 66, n. 6, p. 469 – 477, 1999.
- MATAFS, R. R.; FAGA, M. T. W. *Aquecimento de água no setor residencial*. In: VII Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro, 1996. **Anais**. Rio de Janeiro, v. IV, p.2125-2133, 1996.
- McGARITY, A. E.; REVELLE, C. S.; COHON, J. L. *Analytical simulation models for heating system design*. **Solar Energy**, v. 32, n. 1, p. 85-97, 1984.
- McQUISTAN, F. C.; PARKER, J. D. **Heating, ventilating and air conditioning, analysis and design**. John Wiley & Sons, 1977.
- MOHANDES, M.; et al. *Use of radial basis functions for estimating mean daily solar radiation*. **Solar Energy**, v. 68, n. 2, p. 161-168, 2000.
- MONTENEGRO, A.de ALBUQUERQUE (Ed.). **Fontes não convencionais de energia: as tecnologias solar, eólica e de biomassa**. 3^o ed., Florianópolis, Labsolar/INCTS Universidade de Sta. Catarina, 2000.
- MORIARTY, W. W. *Estimation of diffuse from measured global solar radiation*. **Solar Energy**, v.47, n. 2, p. 75-82, 1991.
- MORRISON, G. L.; TRAN, H. N. *Simulation of the long-term performance of thermosyphon solar water heaters*. **Solar Energy**, v. 33, n. 6, p. 515-526, 1984.
- NAKAI, S; OKAZAKI, T. *Heat transfer from a horizontal circular wire at small Reynolds and Grashof numbers* - **Int. J. Heat Mass Transfer**. v. 18, p. 387 – 396, 1975.

- NAYAK, J. K.; AMER, E. H. *Experimental and theoretical evaluation of dynamic test procedures for solar flat-plate collectors*. **Solar Energy**, v. 69, n. 5, p. 377-401, 2000.
- NIRENBERG, M. *Atividades solarimétricas do Instituto Nacional de Meteorologia*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE ENERGIA SOLAR, II, São Paulo, 1981. **Anais**. São Paulo: ACIESP, n. 28, p.107-130, 1981.
- NORRIS, D. J. – Technical Note: *Calibration of piranometers in inclined an inverted position*. **Solar Energy**, v. 16, p. 53-55, 1974.
- ORPHELIN, M.; ADNOT, J.; *Electric storage Water heaters: from laboratory measurements to field electricity consumption*. **ASHRAE Transactions**. v. 103, part 2, p. 82-89, 1997.
- PETRUCCI, A. L. **Modelo para previsão do comportamento de aquecedores de acumulação em sistemas de água quente**. 1998, 167p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- PRADO, R. T. A. **Efeito de sombreamento automático no desempenho energético de sistemas prediais**. 1996, 269p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- PRADO, R. T. A.; GONÇALVES, O. M. **Gerenciamento de demanda e consumo de energia para aquecimento de água em habitações de interesse social**. São Paulo, PCC/EPUSP, 1992 (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, BT/PCC/59).
- PSILOGLOU, B. E.; SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D. N. *On the atmospheric water vapor transmission function for solar radiation models*. **Solar Energy**, v. 53, n. 5, p. 445-453, 1994.
- REMUND, J.; SALVISBERG, E.; KUNZ, S. *On the generation of hourly short wave radiation data on tilted surfaces*. **Solar Energy**, V. 62, N. 5, P. 331-344, 1998.
- SFETOS, A.; COONICK, A. H. *Univariate and multivariate forecasting of hourly solar radiation with artificial intelligence techniques*. **Solar Energy**, v. 68, n. 2, p. 169-178, 2000.
- SHARIAH, A. M.; LOF, G.°G. *Effects of auxiliary heater on annual performance of thermosyphon solar water heater simulated under variable operating conditions*. **Solar Energy**, vol. 60, p. 119-127, 1997.
- SCHULTZ, W. W.; GOLDSCHMIDT, V. W. *Distribution efficiency and characteristics of start-up and shutdown of flow in hot water distribution lines*. In: **Transactions of ASHRAE semiannual meeting**, v. 89, Part. 1B, p. 42-60, 1983.

- SOKOLOV, M; ARBEL, A. *Conditioning of utilizable energy by a thermostatic control of the thermosyphonic flow in solar systems.* **Solar Energy**, v. 49, n. 3, p.181-189, 1992.
- SOLER, A. *Dependence on solar elevation and the daily sunshine fraction of the correlation between monthly-average-hourly diffuse and global radiation.* **Solar Energy**, v. 48, n. 4, p. 221-225, 1992.
- SPIRKL, M; et al. *In situ characterization of solar flat plate collector under intermittent operation.* **Solar Energy**, v. 61, n. 3, p.147–152, 1997.
- STONE, R. J. *Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models.* **Solar Energy**, v.51, n. 4, p. 289-291, 1993.
- VAXMAN, M.; SOKOLOV, M. *Effects of connecting pipes in thermosyphonic solar systems.* **Solar Energy**, v. 37, n. 5, p. 323 – 330, 1986.
- YOO, H.; KIM, CHARN-JUNG; KIM, C. W. *Approximate analytical solutions for stratified thermal storage under variable inlet temperature.* **Solar Energy**, v. 66, n. 1, p. 47-56, 1999.