



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

CAMPUS DE BAURU

FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU

CRISTIANO PANSANATO

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM SISTEMA
ACOPLADO DE COLETORES SOLARES PLANOS**

Bauru SP

2016

CRISTIANO PANSANATO

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM SISTEMA
ACOPLADO DE COLETORES SOLARES PLANOS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Bauru, no programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, na Área de Fenômenos de Transporte, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Vicente Luiz Scalon

Bauru, SP

2016

Pansanato, Cristiano.

Análise experimental do desempenho térmico de um sistema acoplado de coletores solares planos /

Cristiano Pansanato, 2016

60 f. : il.

Orientador: Vicente Luiz Scalon

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2016

1. Energia solar. 2. Sistema solar de aquecimento de água. 3. Análise experimental. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE CRISTIANO PANSANATO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA.

Aos 16 dias do mês de dezembro do ano de 2016, às 14:30 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. VICENTE LUIZ SCALON - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. ISMAEL DE MARCHI NETO do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Prof. Dr. GERALDO LUIZ PALMA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de CRISTIANO PANSANATO, intitulada **ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM SISTEMA ACOPLADO DE COLETORES SOLARES PLANOS**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. VICENTE LUIZ SCALON

Prof. Dr. ISMAEL DE MARCHI NETO

Prof. Dr. GERALDO LUIZ PALMA

Dedico este trabalho à minha família, em especial a minha esposa, que me incentivou na decisão de voltar aos estudos. Sem seu apoio nas horas mais difíceis esse momento não teria ocorrido.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo a Deus, que é responsável por todas as coisas e me permitiu trilhar o caminho que eu escolhi.

Aos meus pais Sérgio (*in memoriam*) e Angela que me criaram e educaram em um ambiente de amor e respeito, sempre incentivando a ser uma pessoa boa e que perseguisse meus sonhos e ideais.

Aos meus irmãos que sempre foram meus guias, servindo de exemplo para as caminhadas que escolhi.

A Unesp e todos os professores e colaboradores, instituição na qual eu trilhei minha vida acadêmica.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido.

A empresa Solis, que por meio do seu diretor de engenharia Leonardo, cedeu diversos componentes para a realização desse trabalho.

Ao meu orientador Vicente, quem eu considero muito mais que um orientador, podendo chamar de um verdadeiro amigo.

Aos meus amigos, em especial Elson, Guilherme e Rafael que me ajudaram muito no desenvolvimento e concretização desse estudo.

A minha esposa Vívian que esteve comigo em todos os momentos dessa etapa da minha vida, ajudando a transformar uma ideia e um desejo em planejamento e execução, para enfim concretização de um sonho.

PANSANATO, C. Análise Experimental do Desempenho Térmico e um Sistema Acoplado de Coletores Solares Planos. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, 2016.

RESUMO

A busca mundial por fontes de energia que garantam um crescimento sustentável tem marcado o século XXI. Nesse cenário, o Brasil é beneficiado, com diversas fontes de energias viáveis nas condições atuais e outras promissoras num cenário de médio e longo prazo. A utilização da energia solar convertida em energia térmica ou elétrica apresenta-se como uma destas alternativas. Explorar a energia solar de forma viável economicamente e melhorar a eficiência de captação e transformação são os grandes desafios que se apresentam. Neste contexto, este estudo se propôs a analisar experimentalmente o desempenho de um Sistema Acoplado, composto por coletores planos com e sem cobertura. O objetivo é reduzir o custo de implantação de um sistema de aquecimento, uma vez que os coletores sem cobertura são mais baratos. Além disso, dependendo das características de implantação, é ainda possível aumentar a eficiência global do sistema através de um pré-aquecimento da água no coletor sem cobertura, aproveitando a maior eficiência térmica para temperaturas de operação próximas a do ambiente. Para estudo do Sistema Acoplado, um outro sistema composto apenas por coletores com cobertura foi montado e denominado Sistema Simples. Desta forma, com os dois aparatos montados e devidamente instrumentados foi possível obter resultados para as mesmas condições ambientais de teste. Assim, diversos esquemas de controle também puderam ser testados e analisados tanto na operação do Sistema Acoplado como do Sistema Simples. Resultados comparativos avaliando as condições de saída, energia útil e armazenada e eficiências térmicas foram apresentados e comparados para os dois sistemas.

Palavras-chave: Energia Solar, Sistema Solar de Aquecimento de Água, Análise Experimental.

PANSANATO, C. Experimental Analysis of a Coupled System of Solar Flat-Plates Collectors. Master's Thesis (Master of Science in Mechanical Engineering) – Engineering College of Bauru, Post-Graduation Program, UNESP/FEB, 2016.

ABSTRACT

The global search for energy sources that ensure sustainable growth has marked the 21st century. In this scenario, Brazil is benefited, with several viable sources of energy under current conditions and other promising sources in a medium and long-term scenario. The use of solar energy converted into thermal or electric ones presents itself as one of these alternatives. Using solar energy in a cost-effective way and improving the performance for capturing and transforming are the major challenges nowadays. In this context, this study proposed to analyze experimentally the performance of a Coupled System, composed by glazed and unglazed flat collectors. The purpose of this system is to reduce the installation costs of a heating system, since the unglazed collectors are less expensive. In addition, depending on its implementation characteristics, it is possible to increase the overall efficiency of the system by preheating the water in an unglazed collector, taking advantage of its higher thermal efficiency at nearby operating and ambient temperatures. For analysis of Coupled System, another system composed only of glazed collectors was assembled and denominated as Simple System. In this way, with the two devices mounted and instrumented some results can be obtained for the same environmental test conditions. Thus, several control schemes could also be tested and analyzed in the operation of both systems. Comparative results evaluating the output conditions, useful and stored energy and thermal performances are presented and compared for the systems.

Keywords: Solar Energy, Solar Hot Water System (SHWS), Experimental analysis.

Sumário

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTAS DE TABELAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. Coletores solares	6
2.2. Coletores solares não-metálicos.....	8
3. OBJETIVOS	12
4. MATERIAIS E MÉTODOS	13
4.1. Materiais utilizados na montagem do aparato	13
4.2. Materiais utilizados na instrumentação e controle.....	15
4.3. Análise de incertezas	18
4.4. Calibração e procedimento de medidas dos sensores implantados.....	19
4.4.1. Anemômetro.....	19
4.4.2. Sensor de vazão.....	19
4.4.3. Radiômetro.....	21
4.5. Descrição dos sistemas	23
4.5.1. Sistema Simples	23
4.5.2. Sistema Acoplado	24
4.6. Procedimento de teste	27
4.7. Análise térmica	27
4.7.1. Fluxo de absorção de energia térmica útil	27
4.7.2. Energia térmica útil acumulada.....	27
4.7.3. Eficiência térmica	28
4.8. Cálculo das incertezas.....	28
4.8.1. Temperatura	28

4.8.2. Vazão	28
4.8.3. Irradiação	28
4.8.4. Fluxo de absorção de energia térmica útil	29
4.8.5. Energia térmica útil absorvida	29
4.8.6. Eficiência térmica	29
5. RESULTADOS.....	30
5.1. Teste 1 – Ensaio preliminar	30
5.2. Teste 2 – Ensaio com ajuste no controle da operação do coletor sem cobertura	34
5.3. Teste 3 – Ensaio com vazão reduzida nos coletores com cobertura	40
5.4. Teste 4 – Ensaio com alterações na temperatura de controle e no tempo de operação	44
5.5. Teste 5 – Ensaio com aumento da vazão e das temperaturas de controle	49
5.6. Considerações adicionais	53
6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	56
REFERÊNCIAS	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Potencial de redução do consumo de eletricidade até 2020.....	3
Figura 2 – Componentes de um coletor solar de placa plana.	4
Figura 3 – Coletor solar sem cobertura.	4
Figura 4 – Eficiência de coletores solares.	5
Figura 5 – Coletor solar com cobertura.	13
Figura 6 – Coletor solar sem cobertura.	14
Figura 7 – Reservatório térmico.	14
Figura 8 – Bomba hidráulica de recirculação.	15
Figura 9 – Sensor de vazão de efeito Hall.	15
Figura 10 – Sensor de temperatura.	15
Figura 11 – Anemômetro.....	16
Figura 12 – Radiômetro.	16
Figura 13 – Arduino Mega.	16
Figura 14 – Módulo cartão SD.	17
Figura 15 – Módulo relógio.....	17
Figura 16 – Módulo relé.	18
Figura 17 – Dispositivo de para calibração do sensor de vazão.	20
Figura 18 – Pontos experimentais para a calibração do sensor de vazão.	20
Figura 19 – Pontos experimentais para a calibração do radiômetro.	21
Figura 20 – Curva calibrada do radiômetro.	22
Figura 21 – Minimização do erro padrão na calibração do radiômetro.....	22
Figura 22 – Curva calibrada do radiômetro com média móvel.	23
Figura 23 – Diagrama esquemático do sistema solar de aquecimento de água simples.	24
Figura 24 – Sistema simples de aquecimento de água instalado.	24
Figura 25 – Diagrama esquemático do sistema solar de aquecimento de água acoplado.	25
Figura 26 – Sistema acoplado de aquecimento de água instalado.....	26
Figura 27 – Aparato experimental.	26
Figura 28 – Esquema lógico de acionamento das bombas.	31
Figura 29 – Teste 1: Distribuição de temperatura e vazão volumétrica do Sistema Simples.	32

Figura 30 – Teste 1: Distribuição de temperatura e vazão volumétrica do coletor sem cobertura - Sistema Acoplado.	33
Figura 31 – Teste 1: Distribuição de temperatura e vazão volumétrica do coletor com cobertura - Sistema Acoplado.	33
Figura 32 – Método de acionamento da bomba do coletor sem cobertura.....	34
Figura 33 – Teste 2: Condições ambientais. Radiação, velocidade do ar e temperatura ambiente.	35
Figura 34 – Teste 2: Distribuição de temperaturas e vazão volumétrica do Sistema Simples.....	36
Figura 35 – Teste 2: Distribuição de temperatura e vazão volumétrica do coletor com cobertura - Sistema Acoplado.	37
Figura 36 – Teste 2: Distribuição de temperatura e vazão volumétrica do coletor sem cobertura - Sistema Acoplado.	37
Figura 37 – Teste 2: Energia útil absorvida.....	38
Figura 38 – Teste 2: Eficiência térmica.....	39
Figura 39 – Teste 3: Condições ambientais. Radiação, velocidade do vento e temperatura ambiente.	40
Figura 40 – Teste 3: Distribuição de temperaturas e vazão volumétrica do Sistema Simples.....	41
Figura 41 – Teste 3: Distribuição de temperatura e vazão volumétrica do coletor com cobertura - Sistema Acoplado.	42
Figura 42 – Teste 3: Distribuição de temperatura e vazão volumétrica do coletor sem cobertura - Sistema Acoplado.	43
Figura 43 – Teste 3: Energia útil absorvida.....	43
Figura 44 – Teste 3: Eficiência térmica.....	44
Figura 45 – Fluxograma para atualização da temperatura de referência.	45
Figura 46 – Teste 4: Condições ambientais. Radiação, velocidade do vento e temperatura ambiente.	46
Figura 47 – Teste 4: Distribuição de temperaturas e vazão volumétrica do Sistema Simples.....	46
Figura 48 – Teste 4: Distribuição de temperaturas e vazão volumétrica do coletor com cobertura – Sistema Acoplado.....	47
Figura 49 – Teste 4: Distribuição de temperaturas e vazão volumétrica do coletor sem cobertura – Sistema Acoplado.....	48

Figura 50 – Teste 4: Energia útil absorvida.....	48
Figura 51 – Teste 4: Eficiência térmica.....	49
Figura 52 – Teste 5: Condições ambientais. Radiação, velocidade do vento e temperatura ambiente.	50
Figura 53 – Teste 5: Distribuição de temperaturas e vazão volumétrica do Sistema Simples.	50
Figura 54 – Teste 5: Distribuição de temperaturas e vazão volumétrica do coletor com cobertura – Sistema Acoplado.....	51
Figura 55 – Teste 5: Distribuição de temperaturas e vazão volumétrica do coletor sem cobertura – Sistema Acoplado.....	52
Figura 56 – Teste 5: Energia útil absorvida.....	52
Figura 57 – Teste 5: Eficiência térmica.....	53
Figura 58 – Rendimento térmico coletor com cobertura.	54
Figura 59 – Rendimento térmico coletor sem cobertura.	55

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 – Meta de aproveitamento da energia solar no estado de São Paulo em 2020. .	2
Tabela 2 – Vazões utilizadas no Teste 1.....	30
Tabela 3 – Vazões utilizadas no Teste 3.....	40
Tabela 4 – Eficiência térmica acumulada.....	54

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLOS

A_e : Área externa do coletor [m^2];

c : Calor específico da água [J/kg.K];

c_{D1} : Coeficiente de arrasto frontal do anemômetro;

c_{D2} : Coeficiente de arrasto traseiro do anemômetro;

E_{abs} : Energia absorvida pelo coletor [J/m^2];

EP : Erro padrão;

EP_{ref} : Erro padrão do instrumento de referência;

EP_T : Erro padrão total;

f : Frequência de rotação do anemômetro [Hz];

F_R : Fator de remoção de calor;

G : Irradiação [W/m^2];

IC : Intervalo de confiança;

k_d : Fator de forma do anemômetro;

n : Número de pontos da amostra;

q_u : Fluxo de absorção de energia térmica [W/m^2];

R : Raio do anemômetro [m];

s : Desvio padrão da amostra;

T_a : Temperatura ambiente [$^{\circ}\text{C}$];

T_e : Temperatura de entrada no coletor [$^{\circ}\text{C}$];

T_r : Temperatura reduzida [$^{\circ}\text{C}$];

T_s : Temperatura de saída do coletor [$^{\circ}\text{C}$];

t_s : Distribuição “t” de student;

U_p : Coeficiente global de perdas de calor [W/m².K];

V : Vazão volumétrica [m³/s];

V_{ar} : Velocidade do ar externo [m/s];

$\bar{Y}$: Média de uma amostra;

Y_i : Valor de um indivíduo da amostra;

SÍMBOLOS GREGOS

α : Absortividade;

δ : Limite de confiança da medida;

η : Eficiência térmica;

ρ : Densidade da água [kg/m³];

τ : Transmissividade;

Δt : Intervalo de tempo [s];

ΔT : Diferença de temperatura entre a entrada e saída do coletor [°C];

1. INTRODUÇÃO

O século XXI será marcado pela busca mundial de fontes de energia que possam atender ao crescimento da demanda de forma economicamente viável e, ao mesmo tempo, garantir um desenvolvimento sustentável. Nesse sentido o Brasil é um país privilegiado tendo à disposição uma diversidade de fontes energéticas consolidadas e outras consideradas como promissoras no cenário de médio e longo prazo.

A energia solar, abundante no Brasil, tem merecido bastante atenção nas diversas formas de seu aproveitamento. A transformação dessa energia para aplicação térmica ou elétrica se apresenta como grande oportunidade para composição desse recurso na matriz energética. A utilização dessa forma de energia tem experimentado grande crescimento em função de uma maior conscientização mundial da necessidade de utilização de fontes renováveis de produção sustentável.

O programa “Energia Solar Paulista - Levantamento do Potencial” (2013) evidencia que o Brasil e o estado de São Paulo podem se beneficiar muito desse cenário, pois apresentam condições favoráveis para o seu desenvolvimento, devido às condições climáticas, extensão territorial, características de seu sistema elétrico, disponibilidade de recursos naturais e pela infraestrutura já existente. Os valores de irradiação solar incidente em qualquer região brasileira são superiores aos da maioria dos países da união europeia, como Alemanha, França e Espanha, onde projetos para aproveitamento dessa energia são amplamente disseminados contando com fortes incentivos governamentais.

Com a utilização da energia solar, pode-se destacar diversos benefícios como a redução do consumo de energia elétrica nos horários de pico e a geração de empregos.

Segundo o “Atlas Solarimétrico do Brasil : banco de dados solarimétricos” (2000), estima-se que na produção anual de 1 milhão de m² de coletores, gera-se aproximadamente 30 mil empregos, sendo 8 mil na indústria, 14 mil em empresas de instalação, 4 mil no comércio e 4 mil na manutenção dos equipamentos. Além disso, a cada m² de coletor solar instalado para aquecimento de água, utilizado durante um ano, equivale a 56 m² de área inundada (hidrelétricas), 215 quilos de lenha, 66 litros de diesel e 55 quilogramas de gás.

De acordo com o “Plano Paulista de Energia - PPE 2020” (2012), o Estado de São Paulo pretende atingir um aproveitamento energético equivalente a 1.000MW em energia solar. A Tabela 1 apresenta a composição dessa meta por segmentos e usos finais.

Tabela 1 – Meta de aproveitamento da energia solar no estado de São Paulo em 2020.

Cenário	Segmento	Potência (MW)
Atual	Todos os setores	207
	Hotéis e similares	162
Expansão	Habitações populares – CDHU	170
	Outras habitações	170
	Construções eficientes	100
	Usinas de geração elétrica	50
	Localidades isoladas	20
	Comércio, pequena e média indústria	60
	Estabelecimentos de saúde e ensino	60
Total		1000

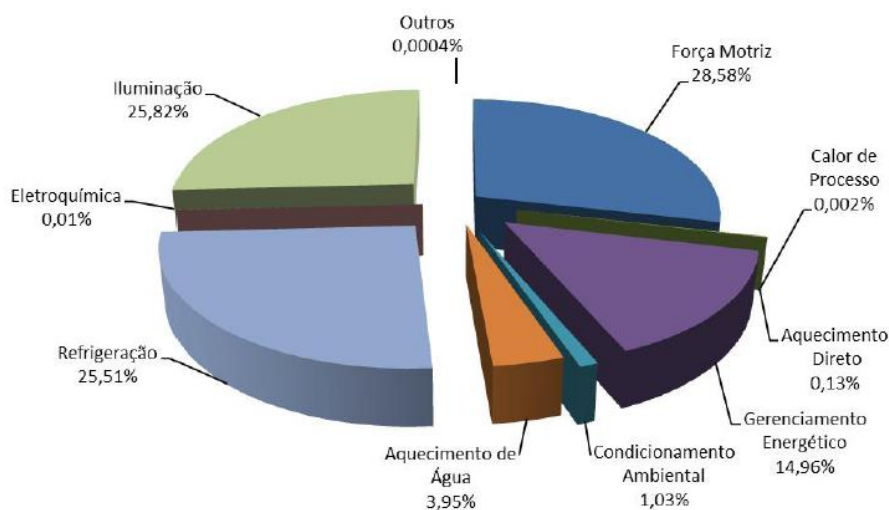
Fonte: “Plano Paulista de Energia - PPE 2020” (2012).

Ainda segundo o PPE-2020 estima-se que 70% dos domicílios do Brasil com acesso à energia elétrica, utilizam o chuveiro elétrico para o aquecimento da água, contribuindo de forma significativa para o pico de carga, na medida em que são utilizados quase que simultaneamente pelos domicílios durante o período de demanda máxima (18 a 21 horas). A escolha pelo chuveiro elétrico como forma de aquecimento de água, pela maior parte dos domicílios brasileiros, deve-se principalmente ao seu baixo custo inicial e facilidade de instalação e operação. Estima-se um potencial de economia de energia elétrica de 535,6 GWh, somente com o aquecimento de água, o que representa 3,95% do potencial total estimado de economia (Figura 1).

Os sistemas mais comuns utilizados para absorção da energia térmica solar são os coletores de placa plana utilizados para aquecimento da água (Nikolić e Lukić, 2013).

Os coletores solares de placa plana são aqueles que recebem radiação solar através de uma superfície plana absorvedora superior na qual a água circula por meio de dutos.

As maiores limitações para o aumento do uso de coletores convencionais são a sua eficiência média relativamente baixa e, principalmente, o alto custo de investimento.



Fonte: “Plano Paulista de Energia - PPE 2020” (2012)

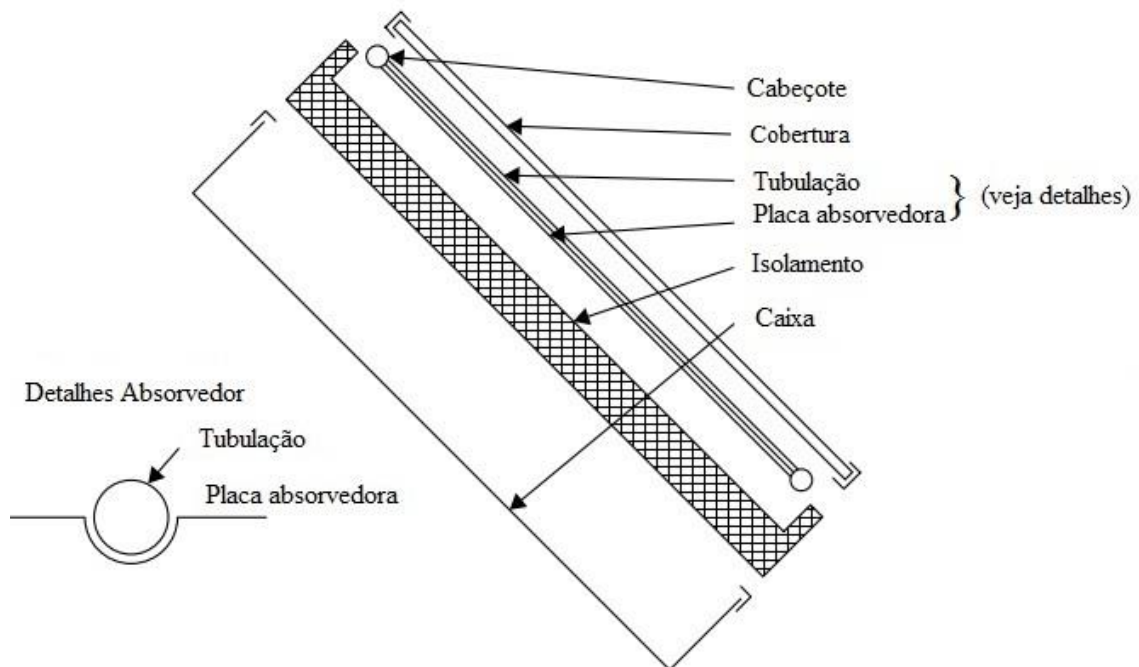
Figura 1 – Potencial de redução do consumo de eletricidade até 2020.

De acordo com Martinopoulos et al. (2010), o aumento da utilização de sistemas de aquecimento solar a partir de coletores solares é analisado segundo sua viabilidade econômica em comparação com os sistemas convencionais, além de avaliar sua simplicidade de fabricação e de utilização. Assim, com o intuito de minimizar o custo de produção com os coletores, novos materiais de baixo custo e ambientalmente mais amigáveis surgem com o intuito de substituir os que são empregados atualmente, com pequenas variações da eficiência do coletor.

Os coletores de placa plana típicos consistem basicamente de uma caixa metálica isolada com uma cobertura de vidro ou plástico e uma placa absorvedora de cor escura. A placa absorvedora possui dutos por onde passa o fluido a ser aquecido (Figura 2). Assim, a eficiência do coletor depende de vários fatores de projeto, tais como o tipo e espessura do isolamento, o número e tipo de coberturas da placa e o espaçamento entre o coletor e o vidro.

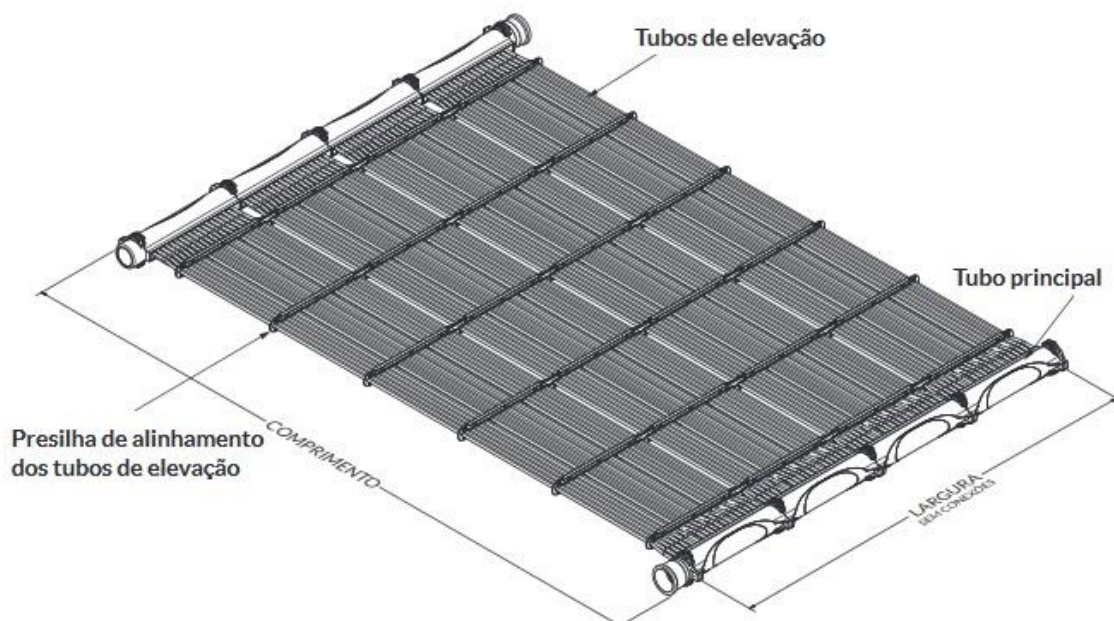
Uma categoria particular desses coletores, conhecidos como coletores sem cobertura, tem grande aplicação para sistemas de aquecimento solar de água de piscina e também para preaquecimento da água para usos domésticos e industriais (Kalogirou, 2009). Esse coletor é composto basicamente por uma estrutura modular de PVC com tubos de PVC fixados em ambos lados (Figura 3). A ausência de cobertura nesse tipo de

coletor reduz as perdas ópticas causadas pela reflexão da irradiação na cobertura, aumentando a energia térmica absorvida. Em contrapartida aumenta as perdas térmicas convectivas, pois o ar ambiente estará em contato direto com o material absorvedor.



Fonte: Adaptado de Kalogirou (2009)

Figura 2 – Componentes de um coletor solar de placa plana.



Fonte: “Solis Aquecedor Solar” (2016)

Figura 3 – Coletor solar sem cobertura.

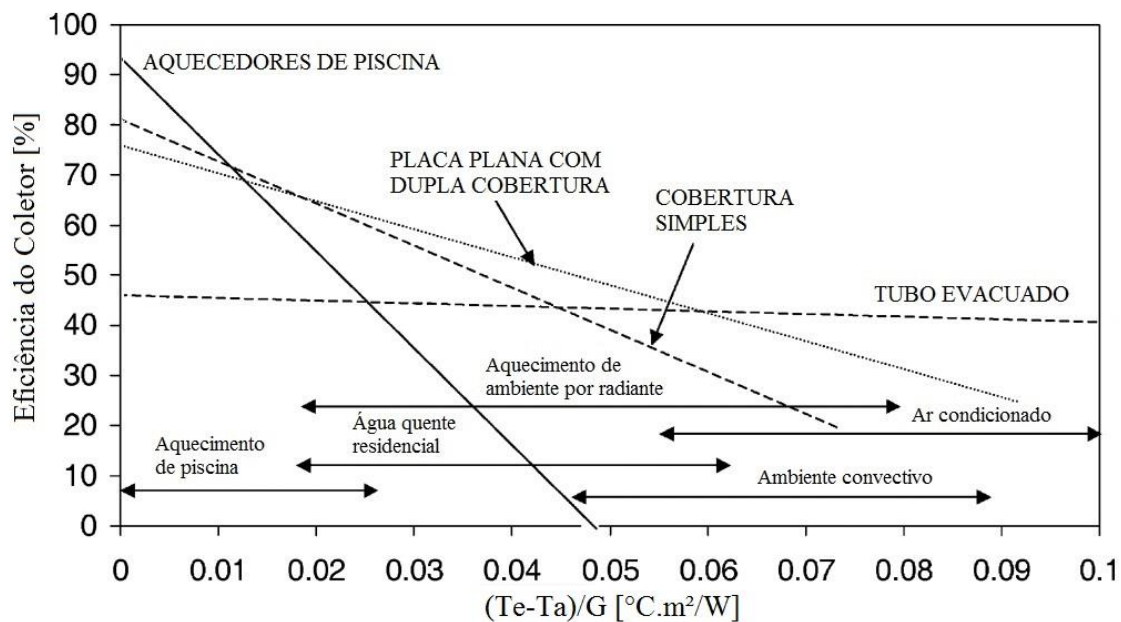
Assim, a eficiência térmica dos coletores sem cobertura será maior que a dos com cobertura para temperaturas de operação próximas a do ambiente. Entretanto, conforme a temperatura de operação aumenta e se distancia da temperatura ambiente, a eficiência térmica diminui de forma mais acentuada nos coletores sem cobertura.

Esse comportamento linear para a eficiência térmica de coletores está ilustrado na Figura 4. A eficiência máxima está associada ao parâmetro $F_R(\tau\alpha)_n$ e a taxa com a qual a eficiência diminui com o aumento da temperatura de operação com o parâmetro $F_R U_P$. Dessa forma, pode-se estimar o valor da eficiência utilizando-se a equação a seguir,

$$\eta = F_R(\tau\alpha)_n - F_R U_P \left(\frac{T_e - T_a}{G} \right) \quad (1)$$

Onde o termo entre parênteses é denominado como temperatura reduzida, ou seja,

$$T_r = \left(\frac{T_e - T_a}{G} \right) \quad (2)$$



Fonte: Traduzido de Kalogirou (2004)

Figura 4 – Eficiência de coletores solares.

Devido à simples construção e utilização de matérias-primas de menor custo (PVC comparado com cobre), os coletores sem cobertura são mais baratos que os coletores com cobertura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As tecnologias que propiciam a captação da energia proveniente do sol estão em constante desenvolvimento, permitindo assim sua utilização, com relativo sucesso, em várias situações e empreendimentos. O aumento da eficiência energética e a constante redução dos custos dessas tecnologias são necessários para garantir essa tendência de crescimento de sua inserção na matriz energética paulista e brasileira de forma consistente e duradoura.

A busca de novos sistemas e seu dimensionamento adequado são o caminho para o desenvolvimento de sistemas específicos a cada aplicação. A principal utilização da energia solar no Brasil tem sido para aquecimento de água para uso residencial.

2.1. Coletores solares

Henden et al. (2002) compararam computacionalmente dois coletores com curvas de eficiência com diferentes inclinações. Concluíram que para pequenos ganhos de temperatura, a fração solar não apresenta diferenças significativas.

Ogueke et al. (2009) fizeram uma revisão sobre sistemas solares de aquecimento de água. Destacaram que sistemas ativos (bombeados) são de 35-80% mais eficientes que sistemas passivos (termossifão) e são mais utilizados em aplicações industriais, onde a demanda de água quente é alta. Afirmam ainda que os sistemas passivos são mais baratos e por isso são mais utilizados em aplicações domésticas onde a demanda é menor.

Armenta et al. (2011) estudaram a influência da utilização de superfícies refletivas no desempenho de arranjo contendo 124 m² de coletores de placas planas e 110 m² de coletores de tubo evacuados. Com uma orientação apropriada a energia total absorvida aumentou, porém a taxa de absorção máxima não se alterou. Neste sentido, um estudo teórico e experimental foi realizado por Nikolić e Lukić (2015), onde um coletor plano duplamente exposto, ou seja, ambas as superfícies, tanto superior quanto a inferior, são capazes de captar a radiação. Para isso, é necessária a utilização de refletor para direcionar a radiação para a superfície inferior.

García et al. (2013) avaliaram experimentalmente dois coletores solares de placas planas sujeitos as mesmas condições de operação. Um dos coletores foi modificado inserindo uma bobina de fio em torno dos tubos de elevação num padrão helicoidal. O coletor modificado apresentou eficiência entre 14-31% maiores do que o padrão.

Del Col et al. (2013) avaliaram experimentalmente coletores solares onde a placa absorvedora é feita utilizando a tecnologia *roll-bond*, que é muito comum em trocadores de calor como no caso dos evaporadores de refrigeradores. O uso dessa tecnologia permite a criação das tubulações na placa absorvedora com qualquer *layout* desejado, suavizando o escoamento do fluido de trabalho, quando comparado com os coletores padrão. Resultados experimentais mostram que o coletor construído com a tecnologia *roll-bond* apresenta eficiência maior que do coletor de placa plana padrão.

Ihaddadene et al. (2014) avaliaram a influência de diversas camadas de cobertura em coletores de placa plana. Verificou-se que o aumento do número de coberturas diminui a eficiência térmica dos coletores, pois age como uma resistência a propagação da energia solar transmitida por radiação.

Shojaeizadeh et al. (2014) analisaram o efeito da vazão mássica de fluido de trabalho e da adição de propileno glicol na água, como aditivo anticongelamento. Afirmam que o aumento da vazão aumenta a transferência de calor entre a placa absorvedora e o fluido de trabalho, diminuindo a diferença de temperatura entre a placa absorvedora e o ambiente, reduzindo a transferência de calor para o ambiente. Esses efeitos combinados contribuem para um aumento da energia útil absorvida. A adição de propileno glicol, reduz o adimensional $F_R(\tau\alpha)_n$ e a eficiência térmica para pequenos valores de T_r , diminuindo o parâmetro $F_R U_P$ e a perda de eficiência conforme o aumento de T_r .

Suman et al. (2015) revisaram sobre coletores solares e concluíram que modificações na geometria das placas absorvedoras, como o uso de superfícies estendidas, resultam em aumento da eficiência e devem ser selecionadas de acordo com as exigências de temperatura de saída do fluido de trabalho.

Hossain et al. (2016) analisaram térmica e economicamente um coletor modificado que consiste de dois ramos paralelos de tubos de cobre em forma de serpentina montados em uma placa de alumínio. O experimento foi realizado para condições climáticas típicas da Malásia e os resultados mostraram picos de eficiência de 81,26 e 80,20% e valores médios de 70,24 e 70,96% para os meses de junho e julho, respectivamente. A análise econômica resultou em um retorno do investimento de 5 anos quando comparado com sistemas elétricos de aquecimento.

2.2. Coletores solares não-metálicos

No sentido de utilizar coletores não metálicos, O'Brien-Bernini; McGowan (1984) modelaram o desempenho de diversos coletores não-metálicos e mostraram a possibilidade de obter os mesmos níveis de desempenho ou até mesmo exceder os limites dos coletores convencionais de metal para faixas de temperatura de baixa a média.

Lenel; Mudd (1984) relataram sobre materiais para uso em sistema de aquecimento doméstico. Afirmam que polímeros e borrachas apresentam baixas condutividades térmicas, e por isso as paredes devem ser finas e o fluido de trabalho deve escoar em contato com a maior área possível. Esse tipo de coletor é resistente a degradação causada pela água e outros fluidos, porém altas temperaturas são um desafio.

Herce-Vigil; Suarez (1991) afirmam que como a pressão de trabalho nos coletores é baixa, plásticos apresentam ser bons materiais para sua construção. Desta forma, analisou um coletor constituído de placas de copolímero de polietileno e polipropileno formando canais por onde a água escoa. Esta geometria proporciona uma boa área de contato entre o fluido de trabalho e a placa absorvedora. Os resultados mostraram que esse material pode ser utilizado na fabricação de coletores solares, reduzindo o peso dos equipamentos e os custos de fabricação.

Van Niekerk; Scheffler (1993) analisaram experimentalmente um coletor solar para aquecimento de água utilizando tubos de polipropileno espaçados como absorvedor, montado em uma caixa padrão, com isolamento e cobertura, de coletores solares. Foi avaliado a influência da distância entre tubos e distância para o isolamento inferior. Alcançou-se um aumento na eficiência em 12.9% diminuindo o espaçamento entre tubos, porém, a distância para o fundo mostrou-se não influenciar.

Sopian et al. (1994) e Sopian et al. (2002) realizaram testes em coletores domésticos com tubos de borracha natural termoplástica como absorvedor, montados em uma caixa de alumínio com isolamento inferior de fibra de vidro e com simples cobertura de vidro. O teste consistiu em operar o sistema durante o período de um dia com luz solar incidente, alimentando o reservatório térmico antes do início de cada operação com água a temperatura ambiente. Obtiveram aumento de temperatura da água no interior do reservatório entre 15 e 30°C após cada dia de ensaio.

Nábilek et al. (1999) estudaram um sistema simples de aquecimento de água. O sistema consistia de um absorvedor sem cobertura feito de um plástico-têxtil e de um reservatório sem isolamento térmico feito de plástico operando em termossifão. Concluíram que para dias calmos de verão e com temperaturas ambientes entre 22 e 31,5°C a eficiência térmica se aproxima dos coletores metálicos e que é vantajoso quando um pequeno aumento de temperatura é requerido, como em aquecimento de piscina ou preaquecimento.

Tsilingiris (2000) afirmou que polímeros tem mostrado ser potenciais matérias para fabricação em larga escala de coletores solares de baixo custo. Em seu estudo, avaliou teoricamente um coletor de placas paralelas de polímero com absorção pela placa superior e constatou que a maior limitação dos polímeros como material de absorvedor solar é a baixa condutividade térmica. Posteriormente, Tsilingiris (2002) afirma que para superar o problema da baixa condutividade térmica, um bom projeto deve ser efetuado de forma a aumentar a superfície de contato do fluido de trabalho com o absorvedor. Nesse estudo, avaliou o desempenho de um coletor de placas paralelas de polímero com absorção pela placa inferior. Os resultados comparados com o coletor com absorção pela placa superior, mostrou aumento de 14% na eficiência térmica, considerando uma ampla faixa de condições operacionais.

A placa absorvedora fabricada de polímeros deve atender aos seguintes requisitos: proteção de raios ultravioleta, condutividade térmica, resistência à água, boa faixa de temperatura de operação, resistência mecânica e estabilidade química (Cristofari et al., 2003).

Zaheed e Jachuck (2004) relatam sobre alguns polímeros disponíveis para fabricação de absorvedores tais como, fluoreto de polivinilideno (PVDF), politetrafluoretileno (PTFE) ou popularmente conhecido como Teflon®, polipropileno (PP), polietileno (PE), policarbonato (PC), sulfeto de polifenileno (PPC) e óxido de polifenileno (PPO). Em adicional, Chen et al. (2015), cita: polimetilmetacrilato (PMMA), polisulfona (PSU), polietersulfona (PSE), polieteramida, poliamida (PA), polímeros de celulose e polimetilpenteno (PMP).

Dorfling et al. (2010) analisaram experimentalmente em laboratório um coletor solar fabricado de filme microcapilar, que consiste em um filme extrudado e flexível de plástico, com uma matriz de capilares ocos disposta paralelamente ao longo de seu

comprimento. Os resultados indicaram que a magnitude da energia térmica absorvida por esse coletor equipara aos coletores disponíveis no mercado. Além disso, validaram numericamente um método para dimensionamento de um sistema utilizando esses coletores, mostrando ser viável sua utilização apresentando as vantagens de ser um sistema solar de aquecimento de água de baixo custo, pouco peso sem abrir mão das vantagens dos sistemas tradicionais.

Martinopoulos et al. (2010) desenvolveram uma placa absorvedora em formato de favo de mel fabricada em polímero transparente e que utiliza um fluido escuro para absorver e transportar a energia. Seu comportamento foi avaliado experimentalmente e por um modelo utilizando dinâmica dos fluidos computacionais. A eficiência obtida foi similar à de coletores planos de baixo custo comercialmente disponíveis.

Chen et al. (2015) compararam um coletor com absorvedor em formato de favo de mel fabricado em policarbonato com dois coletores metálicos, um de alumínio e outro de cobre. Afirmam que apesar da eficiência do coletor polimérico testado ser um pouco inferior (8-15%) dos coletores metálicos, seu peso é em torno de 35% menor. Além disso, o tempo de retorno do investimento é menor para o coletor polimérico, apresentando 3,8 anos, enquanto que os coletores de alumínio e de cobre apresentam 8,3 e 6,1 anos, respectivamente.

Kim et al. (2016) projetaram e analisaram uma placa absorvedora polimérica de um coletor solar feita com nanotubos de carbono. Concluíram que, baseado nos experimentos e em uma análise matemática de transferência de calor, foi possível obter um coletor de baixo custo e com eficiência térmica similar aos coletores solares planos convencionais com cobertura.

O acoplamento de coletores planos poliméricos sem cobertura a coletores de placa plana com cobertura pode possibilitar um armazenamento de energia térmica próximo ao de sistemas convencionais de aquecimento de água para banho, porém com um custo de implantação menor (Iceri, 2014). Nesse sistema o coletor polimérico é responsável pelo preaquecimento da água e o coletor com cobertura pelo aquecimento até a temperatura de demanda.

Com base nos dados experimentais, este trabalho se propõe a avaliar a utilização do Sistema Acoplado. Para tanto, foi montado um aparato experimental, de acordo com a proposta, ao lado de outro aparato constituído apenas por coletores com cobertura,

representando um sistema de aquecimento típico. Com ambos os sistemas em funcionamento este trabalho pretende analisar uma série de parâmetros de operação e verificar a sua viabilidade técnica.

3. OBJETIVOS

O presente trabalho visa operacionalizar dois sistemas de aquecimento de água para banho, sendo um sistema de referência composto apenas de coletores metálicos de placa plana com cobertura e um sistema proposto onde foi substituído um dos coletores metálicos por outro de material polimérico sem cobertura.

De forma a atingir a meta proposta é necessário:

- Construir um aparato experimental de um Sistema Simples, composto apenas por coletores solares com cobertura;
- Construir um aparato experimental de um Sistema Acoplado, composto por coletores solares com e sem cobertura;
- Desenvolver a instrumentação e controle de ambos os sistemas;
- Avaliar os seus parâmetros de teste identificando possíveis problemas e, quando possível, propor soluções que viabilizem o seu funcionamento;
- Analisar experimentalmente o desempenho térmico do sistema, comparando-o com um sistema convencional;

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a análise do sistema proposto e comparação com o sistema tradicional foram montados aparatos experimentais de teste. Nesta montagem foram utilizados tanto materiais para o aparato como componentes para instrumentação e controle. Estes componentes encontram-se listados nas seções seguintes, separados de acordo com finalidade.

4.1. Materiais utilizados na montagem do aparato

Para a construção dos dois sistemas de aquecimento de água e sua instrumentação para medir os parâmetros de interesse, foram utilizados os seguintes materiais:

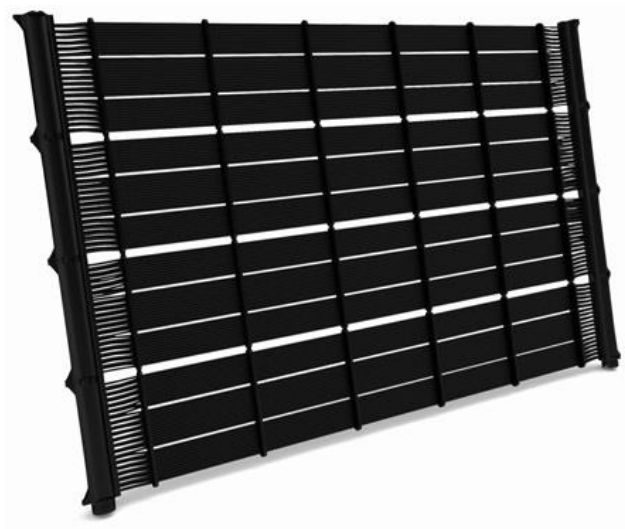
Coletor solar com cobertura: placa absorvedora de alumínio e tubulação de cobre com dimensões de 2,0 x 1,0 m e área externa de 2,0 m², sendo a área transparente de 1,984 m², como mostrado na Figura 5. Este coletor obteve nos testes de padronização $F_R(\tau\alpha)_n = 0,760$ e $F_R U_P = 6,93$.



Fonte: “Solis Aquecedor Solar” (2016)

Figura 5 – Coletor solar com cobertura.

Coletor solar sem cobertura: placa absorvedora de polipropileno com dimensões de 2,0 x 1,0 m e área externa: 2,0 m², como mostrado na Figura 6. Este coletor obteve nos testes de padronização $F_R(\tau\alpha)_n = 0,880$ e $F_R U_P = 25,737$.



Fonte: “Solis Aquecedor Solar” (2016)

Figura 6 – Coletor solar sem cobertura.

Reservatório térmico: dimensões de $\varnothing 0,53 \times 1,550$ m, capacidade de 200 L, com corpo de aço inox e isolamento em poliuretano expandido, como mostrado na Figura 7.



Fonte: “Solis Aquecedor Solar” (2016)

Figura 7 – Reservatório térmico.

Suportes para coletor solar: fabricado internamente com cantoneiras de aço carbono, com inclinação regulável para 22 e 32°.

Suporte para reservatório térmico: fabricado com tubos de aço carbono.

Bomba hidráulica: modelo BAV1118-01UC do fabricante Robertshaw com voltagem de 127 V e potência de 34 W, como mostrado na Figura 8.



Fonte: “Robertshaw” (2016)

Figura 8 – Bomba hidráulica de recirculação.

4.2. Materiais utilizados na instrumentação e controle

Sensor de vazão: sensor tipo turbina de Efeito Hall sendo o modelo YF-S201 com tensão de alimentação de 5 – 24 V e corrente máxima de 15 mA. O sensor opera numa faixa de medição: 1 – 30 L/min, pressão máxima de 2,0 MPa e temperatura de trabalho de –25 a 80°C com precisão de 10%, como mostrado na Figura 9.



Fonte: “FILIPEFLOP Componentes Eletrônicos” (2016).

Figura 9 – Sensor de vazão de efeito Hall.

Sensor de temperatura: sensor Dallas DS18B20 que opera com tensão de 3 – 5,5 V e tem uma faixa de medição de –55 a 125°C com precisão de $\pm 0,5^\circ\text{C}$, como mostrado na Figura 10.



Fonte: “FILIPEFLOP Componentes Eletrônicos” (2016)

Figura 10 – Sensor de temperatura.

Anemômetro de conchas: feito de alumínio com rolamento blindado e utilizando sensor tipo *reed switch* para contagem de pulsos, como mostrado na Figura 11.



Figura 11 – Anemômetro.

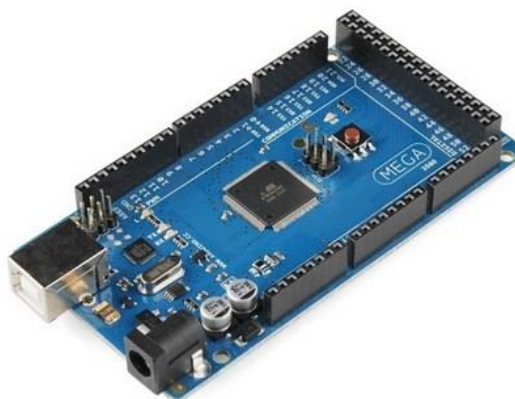
Radiômetro: modelo SIR do tipo fotodiodo de silício abrangendo um espectro de 400 a 1100 nanômetros, como mostrado na Figura 12.



Fonte: “Fascitec Controladores Eletônicos” (2016)

Figura 12 – Radiômetro.

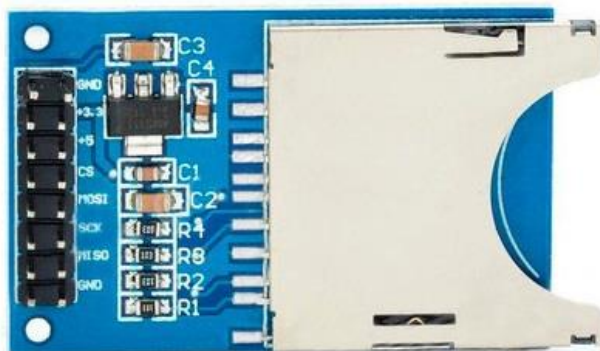
Placa de aquisição de dados: Arduino Mega com microcontrolador ATmega2560 de frequência de 16 MHz e operando com voltagem de 5 V com 54 pinos digitais para I/O e 16 pinos de entrada analógicos capaz de operar com corrente contínua por pino I/O de 40 mA e possuindo memória flash interna de 256 KB, conforme Figura 13. Foi utilizada tanto para o controle de dispositivos do sistema como as bombas, quanto para realização das medidas em diversos sensores.



Fonte: “FILIPEFLOP Componentes Eletrônicos” (2016)

Figura 13 – Arduino Mega.

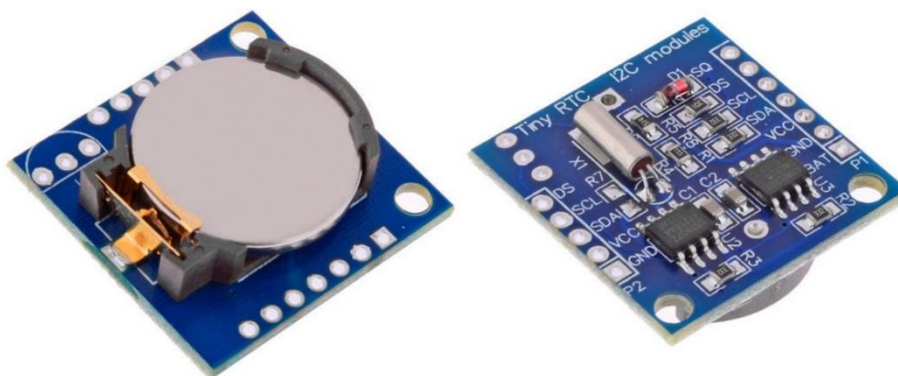
Módulo cartão SD: para acoplamento ao Arduíno com tensão de entrada de 5 V ou 3,3 V com interface SPI tipos MOSI, SCK, MISO e CS e capaz de operar com memórias formatadas em FAT16 ou FAT32, como mostrado na Figura 14. Utilizado para armazenamento das medidas realizadas pelo sistema ao longo do dia.



Fonte: “FILIPEFLOP Componentes Eletrônicos” (2016)

Figura 14 – Módulo cartão SD.

Módulo relógio: Real time clock RTC DS1307 utilizando chip DS1307 com interface I2C e circuito de detecção de falha de energia e capaz de operar numa faixa de temperatura de -40 a 85°C , como mostrado na Figura 15. Utilizado para controlar o tempo de acionamento dos sistemas e o horário de leitura das medidas.



Fonte: “FILIPEFLOP Componentes Eletrônicos” (2016)

Figura 15 – Módulo relógio.

Módulo relé: modelo SRD-05VDC-SL-C com tensão de operação de 5 VDC com corrente típica de operação de 15 – 20 mA com LED indicador de status, tempo de resposta: 5 – 10 ms e pinagem normal aberto/fechado. Permite controlar tensões de até 220 VAC com tensão de saída de 30 VDC a 10A ou 250 VAC a 10A, como mostrado na Figura 16. Foi utilizado no aparato para realizar a operação liga/desliga das 3 bombas de recirculação do sistema.



Fonte: “FILIPEFLOP Componentes Eletrônicos” (2016)

Figura 16 – Módulo relé.

4.3. Análise de incertezas

Segundo Anderson; Whitcomb (2015), em trabalhos experimentais é fundamental uma análise das incertezas decorrentes dos erros de leitura e imprecisões instrumentais. Esta análise permite verificar os seus impactos nos resultados finais. Para isso, é exposto abaixo alguns conceitos básicos estatísticos utilizados no desenvolvimento desse trabalho.

O cálculo da média de uma amostra é dado por,

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \quad (3)$$

O desvio padrão da amostra medida é obtida a partir da equação,

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n - 1}} \quad (4)$$

O erro padrão em uma amostra é representado por,

$$EP = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

Na calibração de um instrumento, além dos erros originados por análises estatísticas, existem os erros inerentes associados aos instrumentos de referência, EP_{ref} . Para encontrar o erro combinado desses efeitos, utiliza-se a equação,

$$EP_T = \sqrt{EP^2 + EP_{ref}^2} \quad (6)$$

Dessa forma, o intervalo de confiança é obtido,

$$IC = \bar{Y} \pm \delta\bar{Y} = \bar{Y} \pm t_s \times EP \quad (7)$$

Algumas grandezas nas aplicações de engenharias são determinadas utilizando medições diretas, como é o caso da temperatura. Grandezas indiretas, são obtidas através de cálculos envolvendo outros parâmetros, que podem ser de medidas diretas ou até mesmo de outras grandezas indiretas.

Para esses casos é importante conhecer como os desvios desses parâmetros influenciam no resultado final. Ismail (2000) descreve a acumulação e propagação de erros nas operações envolvendo dados experimentais, como sendo,

$$\delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} \delta x_n\right)^2} \quad (8)$$

4.4. Calibração e procedimento de medidas dos sensores implantados

4.4.1. Anemômetro

A velocidade do ar que escoia sobre as superfícies dos coletores foi estimada por um anemômetro tipo concha. Alimentado por uma fonte de tensão contínua, esse dispositivo gera um pulso quando um ímã localizado em seu eixo de rotação passa sobre um sensor do tipo *reed switch*. A frequência de pulsos é relacionada teoricamente com a velocidade do ar em movimento segundo o modelo apresentado por Pindado et al. (2014).

$$V_{ar} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot R \cdot \frac{K_d + 1}{K_d - 1} \quad (9)$$

O fator K_d é obtido utilizando os coeficientes de arrasto frontal e traseiro da concha, $c_{D1} = 1.42$ e $c_{D2} = 0.38$, respectivamente, que estão disponíveis em Young (2011).

$$K_d = \sqrt{\frac{c_{D1}}{c_{D2}}} \quad (10)$$

4.4.2. Sensor de vazão

Os sensores de vazão utilizados foram calibrados em laboratório interno com temperatura controlada de 25°C. Utilizando-se um dispositivo de alimentação a pressão

constante (Figura 17), ajustou-se o escoamento para a menor vazão volumétrica que obteve resposta do sensor. Após a estabilização da resposta do sensor, o volume escoado pelo sensor durante 1 minuto foi coletado com uma cuba graduada, enquanto a resposta do sensor era registrada. Esse procedimento foi repetido, aumentando-se a vazão volumétrica até seu maior valor de operação.

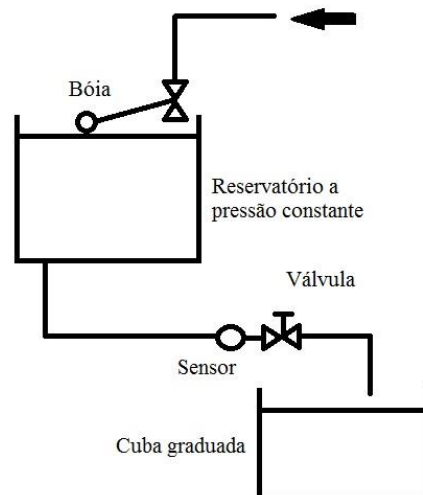


Figura 17 – Dispositivo de para calibração do sensor de vazão.

A Figura 18 apresenta o resultado das medições de 28 pontos. A curva calibrada foi encontrada aplicando-se uma regressão linear que resultou na Eq. 11, com erro padrão de 0,0106 L/min. ,

$$V \text{ [L/min]} = 0,1424 \times \text{Resposta [Pulsos/s]} + 0,1637 \quad (11)$$

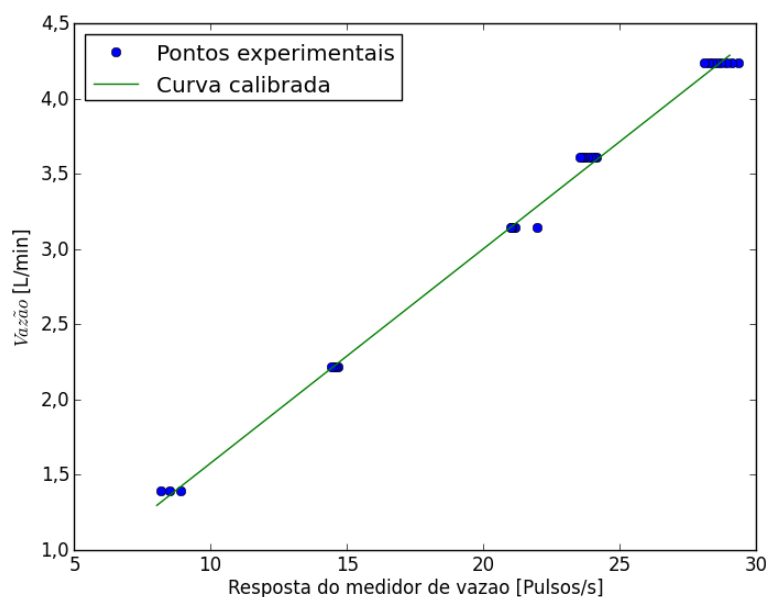


Figura 18 – Pontos experimentais para a calibração do sensor de vazão.

4.4.3. Radiômetro

O dispositivo utilizado para medida da intensidade solar é do fabricante FASCITEC modelo SIR, que utiliza um fotodiodo como elemento sensor, espectro de medida de 400 a 1100 nm e sinal de saída de 0 a 2,5 V.

A calibração do equipamento foi realizada utilizando como referência um sensor térmico desenvolvido por Avallone et al. (2016), que apresenta intervalo de confiança de 4,35 W/m² com confiabilidade de 99%. Foram realizadas medições a cada 15 segundos durante um dia, utilizando ambos os equipamentos sob mesmas condições.

A Figura 19 contém 1749 pontos experimentais, referente as medidas de ambos os sensores. Aplicando-se uma regressão linear, obtém-se a curva de calibrada com equação,

$$G \text{ [W/m}^2\text{]} = 0,3982 \times \text{Voltagem [mV]} + 27,632 \quad (12)$$

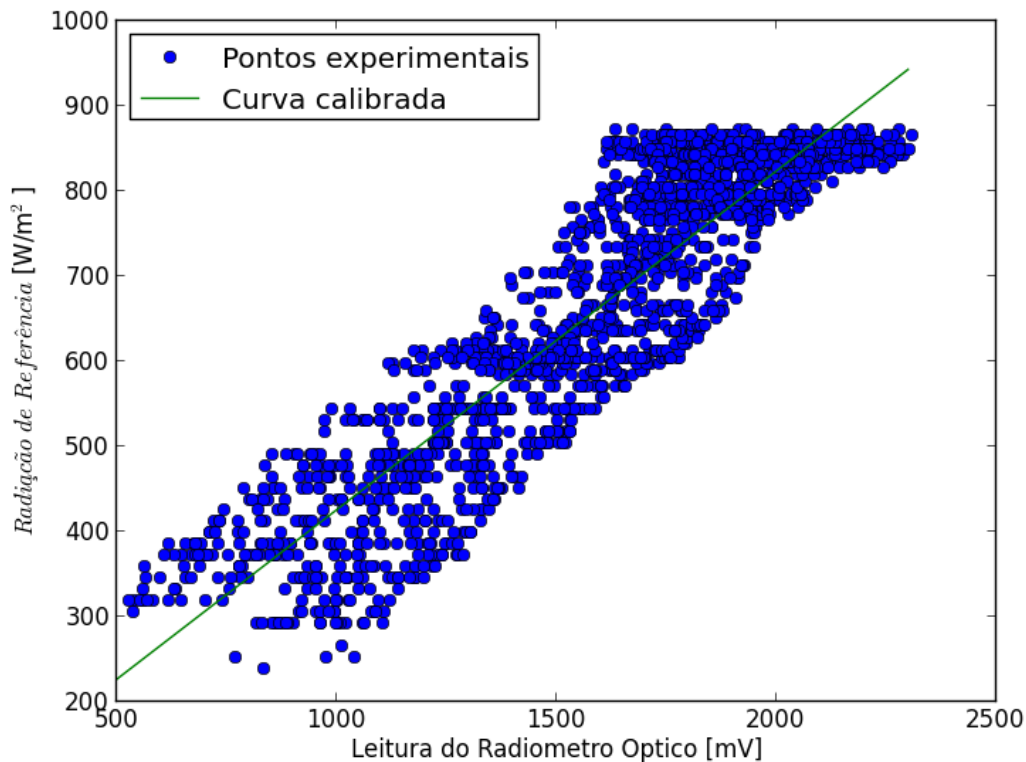


Figura 19 – Pontos experimentais para a calibração do radiômetro.

Para visualização da calibração do equipamento, foi gerada a Figura 20 contendo a curva do sensor óptico obtida com a Equação 12 em comparação com a curva do sensor térmico.

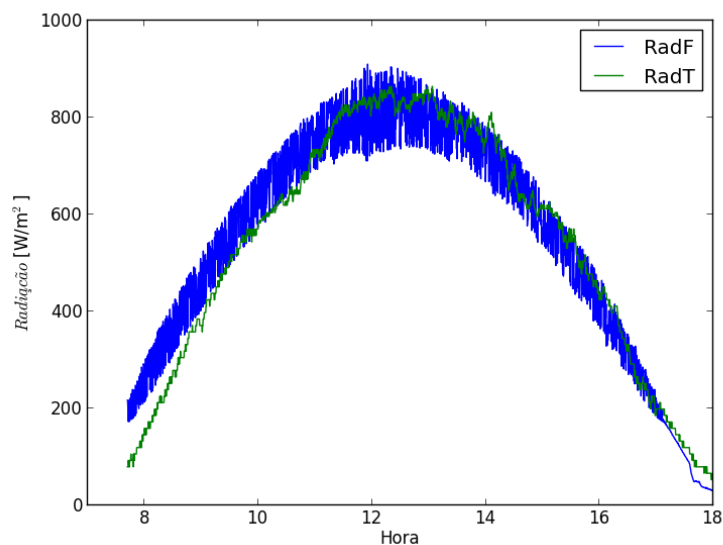


Figura 20 – Curva calibrada do radiômetro.

A resposta do sensor óptico apresenta grandes flutuações, com erro padrão de $1,44 \text{ W/m}^2$ em relação ao sensor térmico. Para minimizar esse erro, uma média móvel dos resultados foi utilizada em substituição aos dados originais. A Figura 21 ilustra o comportamento do erro padrão em função do número de pontos utilizados no cálculo da média móvel, onde o menor valor foi $1,24 \text{ W/m}^2$ para 7 pontos.

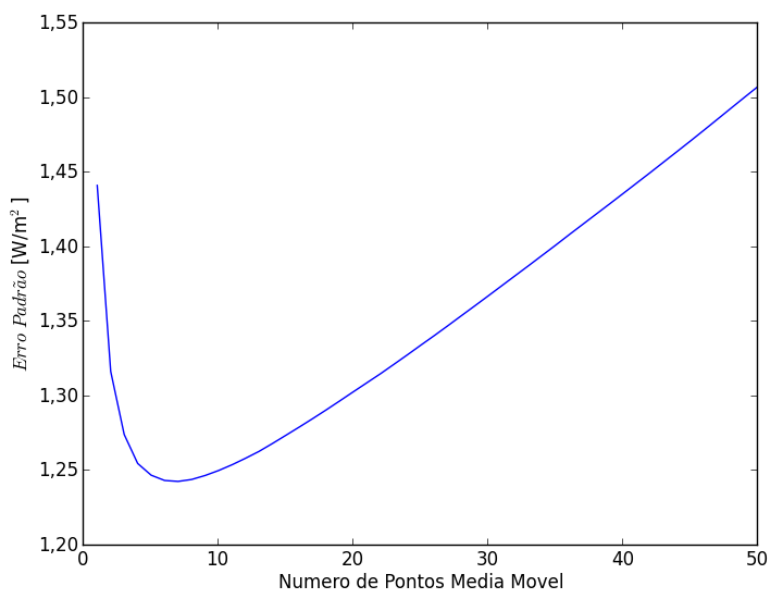


Figura 21 – Minimização do erro padrão na calibração do radiômetro.

A Figura 22 apresenta a curva de radiação ajustada com a média móvel com 7 pontos em comparação com o radiômetro térmico. Observa-se que a flutuação diminuiu, em comparação com a Figura 20, mantendo suas características.

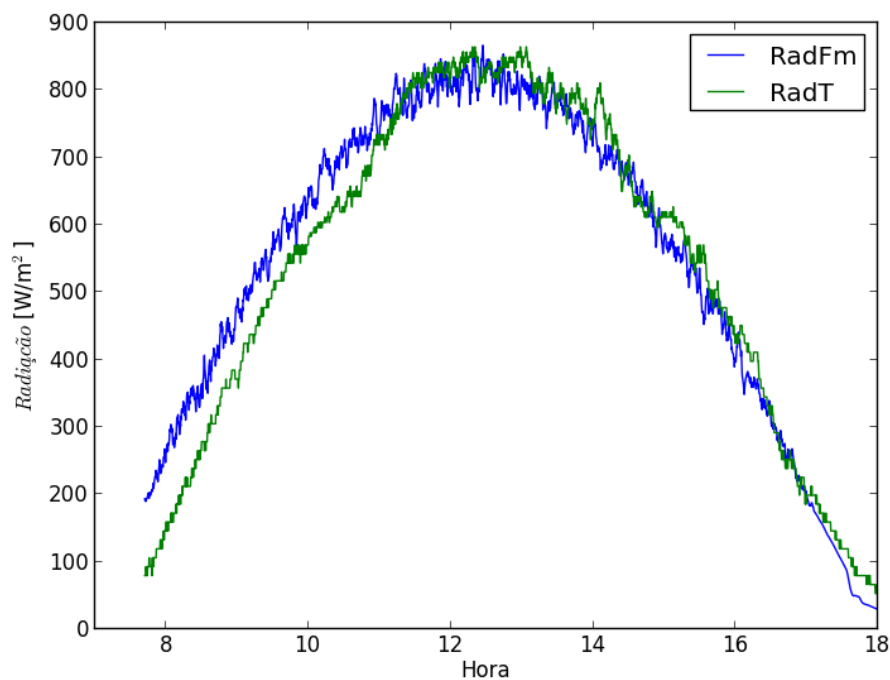


Figura 22 – Curva calibrada do radiômetro com média móvel.

4.5. Descrição dos sistemas

Com o intuito de avaliar experimentalmente o sistema proposto inicialmente no presente projeto, foram elaborados dois sistemas solares de aquecimento de água, denominados como Sistema Simples e Sistema Acoplado.

4.5.1. Sistema Simples

Consiste de dois coletores metálicos de placa plana com cobertura (Figura 23 e Figura 24) e foi utilizado como referência. O sistema é abastecido por uma caixa d'água pela região inferior do reservatório térmico (linha 1), o qual deve estar permanentemente cheio. Os coletores são alimentados em um circuito fechado por uma tubulação (linha 2) que liga a região inferior do reservatório térmico à região inferior do coletor. Nessa linha estão presentes um medidor de vazão, uma bomba, uma válvula de controle de vazão e um medidor de temperatura. Os coletores são ligados em paralelo conectando-se os canais inferiores e superiores, formando uma única bateria. O retorno da água aquecida para o reservatório é feito por uma tubulação (linha 3) que liga a região superior do coletor à região superior do reservatório e fechando o circuito. Nessa linha também está presente um medidor de temperatura. A linha 4 fornece água quente para o uso e permanece fechada durante o experimento para acumular energia térmica no reservatório.

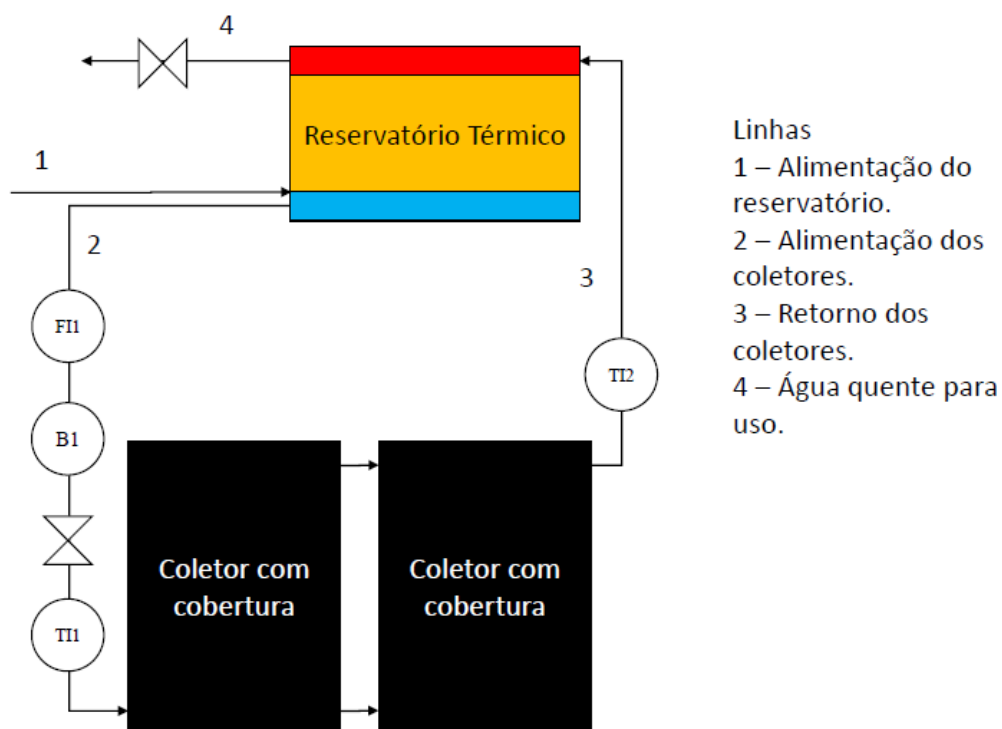


Figura 23 – Diagrama esquemático do sistema solar de aquecimento de água simples.



Figura 24 – Sistema simples de aquecimento de água instalado.

4.5.2. Sistema Acoplado

Esse sistema foi obtido pela substituição de um coletor metálico de placa plana com cobertura do Sistema Simples, por um coletor polimérico plano sem cobertura (Fig. 25 e Fig. 26). Para um melhor aproveitamento de suas características, as ligações dos coletores são independentes, formando-se duas baterias e permitindo que eles trabalhem

com vazões de água diferentes. Em virtude disso, foi necessária uma modificação no reservatório térmico, inserindo uma entrada e uma saída na sua região central. O sistema é abastecido por uma caixa d'água pela região inferior do reservatório térmico (linha 5), o qual deve estar permanentemente cheio. O coletor sem cobertura é alimentado em um circuito fechado por uma tubulação (linha 6) que liga a região inferior do reservatório térmico à região inferior do coletor. Nessa linha estão presentes um medidor de vazão, uma bomba, uma válvula de controle de vazão e um medidor de temperatura. A saída do coletor sem cobertura é ligada à região intermediária do reservatório (linha 7), fechando esse circuito. Um medidor de temperatura também está presente nessa linha. O coletor com cobertura é alimentado em outro circuito fechado por uma tubulação (linha 8) que liga a região central do reservatório térmico à região inferior do coletor. Nessa linha estão presentes um medidor de vazão, uma bomba, uma válvula de controle de vazão e um medidor de temperatura. O retorno da água aquecida para o reservatório é feito por uma tubulação (linha 9) que liga a região superior do coletor à região superior do reservatório que fecha o circuito. Nessa linha está presente mais um medidor de temperatura. A linha 10 fornece água quente para o uso e permanece fechada durante o experimento para acumular energia térmica no reservatório.

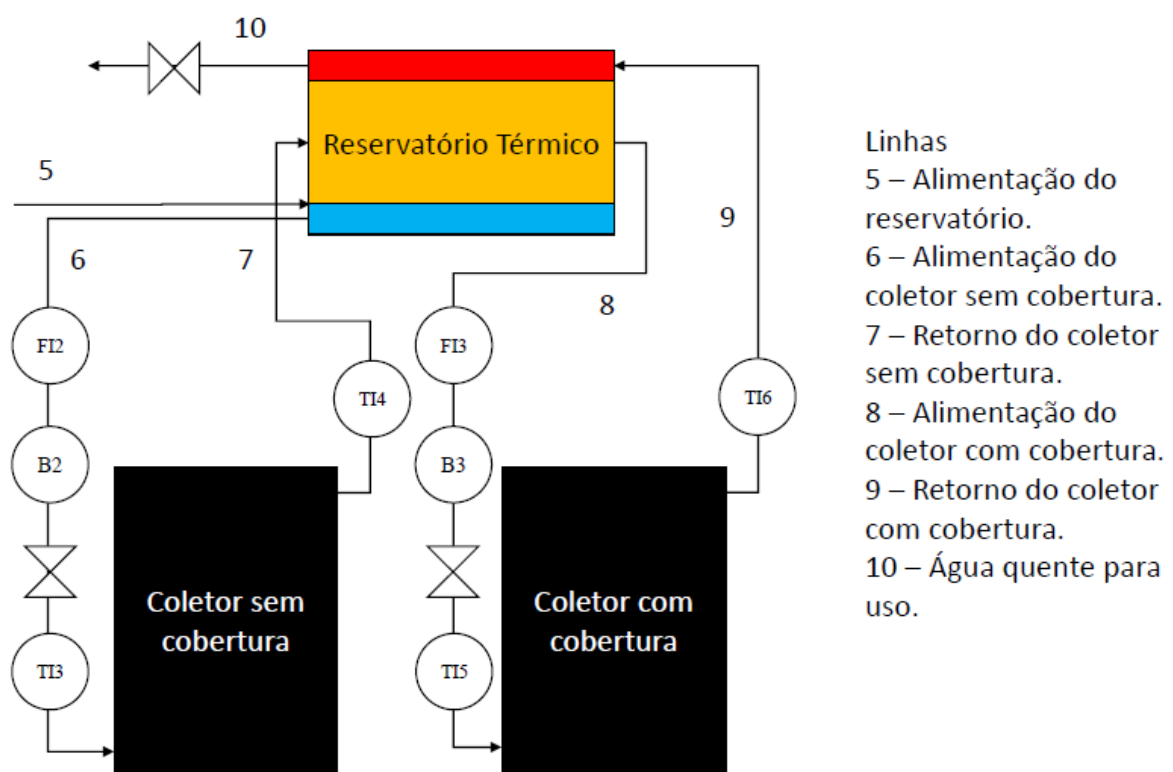


Figura 25 – Diagrama esquemático do sistema solar de aquecimento de água acoplado.



Figura 26 – Sistema acoplado de aquecimento de água instalado.

A Figura 27 mostra os dois sistemas que estão instalados no campus da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” na Faculdade de Engenharia de Bauru (latitude $22^{\circ}21'05''\text{S}$ e longitude $49^{\circ}02'06''\text{W}$) com inclinação de 32° em relação a horizontal e orientados para o norte geográfico. Cada sistema apresenta área de absorção de 4 m^2 e reservatório térmico de 200 litros.



Figura 27 – Aparato experimental.

4.6. Procedimento de teste

Os testes para avaliar o desempenho do sistema foram baseados na metodologia utilizada por Sopian et al. (1994). Os reservatórios térmicos foram alimentados com água na temperatura ambiente antes do início da operação, funcionando durante o dia. Ao final, os reservatórios foram descarregados.

Ambos os sistemas funcionaram simultaneamente sob as mesmas condições de radiação, temperatura ambiente e velocidade do ar, possibilitando a comparação dos resultados. Para cada teste, a vazão foi ajustada no início da operação e a bomba foi acionada segundo um método liga/desliga.

4.7. Análise térmica

Para a análise térmica dos sistemas propostos é de fundamental importância os cálculos das energias térmicas útil absorvida e acumulada além da eficiência térmica de cada sistema.

4.7.1. Fluxo de absorção de energia térmica útil

O fluxo de absorção de energia térmica é calculada a partir da Primeira Lei da Termodinâmica para cada instante de tempo, resultando na equação,

$$q_u = \frac{\rho \cdot V \cdot c(T_s - T_e)}{A_e} \quad (13)$$

A densidade e o calor específico foram considerados constantes e iguais a 990,2 kg/m³ e 4180 J/Kg.K, respectivamente. Esses valores foram obtidos, considerando a temperatura média estimada de operação igual a 45°C. Para o Sistema Simples as temperaturas são medidas diretamente na entrada e saída do banco de coletores e, conseqüentemente, permitem o uso direto da expressão. Para o Sistema Acoplado, por sua vez, o fluxo de absorção de energia térmica é obtida somando as contribuições de cada coletor calculada individualmente.

4.7.2. Energia térmica útil acumulada

A energia térmica útil acumulada pelos coletores será calculada através da relação,

$$E_{abs} = \sum_i^n E_{abs,i} = \sum_i^n q_{u,i} \Delta t_i \quad (14)$$

4.7.3. Eficiência térmica

A eficiência térmica dos sistemas será obtida pela relação,

$$\eta = \frac{q_u}{G} \quad (15)$$

4.8. Cálculo das incertezas

4.8.1. Temperatura

A temperatura é obtida de forma direta e apresenta intervalo de confiança fixo, fornecido pelo fabricante, ou seja,

$$\delta T = 0,5^\circ\text{C} \quad (16)$$

Para cálculos de erro da diferença de temperatura entre a entrada e saída do coletor, utiliza-se a Equação 8.

$$\delta \Delta T = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta T}{\partial T_s} \delta T_s\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T}{\partial T_e} \delta T_e\right)^2} \quad (17)$$

Como $\delta T_s = \delta T_e = \delta T$, temos,

$$\delta \Delta T = \delta T \sqrt{2} = 0,707^\circ\text{C} \quad (18)$$

4.8.2. Vazão

O intervalo de confiança na medição da vazão é obtido, aplicando-se a Equação (7), com o erro padrão encontrado pela curva de calibração apresentada no item 4.4.2 e $t_s = 2,467$ para 28 pontos e confiabilidade de 99%.

$$\delta V = 2,467 \times 0,0106 = 0,0262 \text{ L/min} \quad (19)$$

4.8.3. Irradiação

Aplica-se a Equação (7), com erro padrão encontrado no item 4.4.3 e $t_s = 2,326$ para 1749 pontos e confiabilidade de 99% para encontrar o intervalo de confiança na medição em relação ao radiômetro térmico utilizado como referência. Na sequência utiliza-se esse resultado na Equação (6) para encontrar o intervalo de confiança combinado.

$$\delta G = \sqrt{(2,326 \cdot 1,24)^2 + 4,35^2} = 5,22 \text{ W/m}^2 \quad (20)$$

4.8.4. Fluxo de absorção de energia térmica útil

O intervalo de confiança no cálculo da taxa de energia térmica útil absorvida é obtido aplicando-se a Equação 8. Foram considerados nulos as incertezas associadas aos parâmetros de tempo, massa e calor específico, resultando em:

$$\delta q_{u,i} = |q_{u,i}| \sqrt{\left(\frac{\delta V}{V_i}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta T}{\Delta T_i}\right)^2} \quad (21)$$

4.8.5. Energia térmica útil absorvida

O intervalo de confiança da energia térmica útil absorvida é obtida por,

$$\delta E_{abs} = \sqrt{\sum_i^n (\delta q_{u,i} \cdot \Delta t_i)^2} \quad (22)$$

4.8.6. Eficiência térmica

Analogamente, aplica-se a Equação 8 para obter o intervalo de confiança no cálculo da eficiência.

$$\delta \eta = \eta \sqrt{\left(\frac{\delta E_{abs}}{E_{abs}}\right)^2 + \left(\frac{\delta G}{G}\right)^2} \quad (23)$$

5. RESULTADOS

Os sistemas anteriormente propostos foram ensaiados para diversas condições de operação descritas em cinco testes, realizados em dias distintos no período de agosto a outubro de 2016.

Cada teste foi realizado por três dias e foram ajustadas as condições operacionais entre eles. A análise foi realizada para o dia com condições ambientais mais favoráveis.

Os testes são descritos resumidamente:

- Teste 1: vazão volumétrica de 1,2 L/min.m² e acionamento das bombas de recirculação pela diferença de temperatura entre a entrada e saída;
- Teste 2: proposta de um novo método de acionamento da bomba de recirculação do coletor sem cobertura;
- Teste 3: redução da vazão nos coletores com cobertura para 0,6 L/min.m²;
- Teste 4: ajustes nos métodos de acionamento das bombas de recirculação;
- Teste 5: vazão para os coletores com cobertura reestabelecida em 1,2 L/min e aumentada a diferença de temperatura para o acionamento das bombas de recirculação;

Os detalhes de operação são descritos na introdução de cada teste.

5.1. Teste 1 – Ensaio preliminar

Para o primeiro ensaio, as vazões dos coletores com cobertura foram ajustadas para 0,02 kg/s.m² = 1,2 L/min.m², conforme Kalogirou (2009). A vazão no coletor sem cobertura do Sistema Acoplado foi ajustada em de 50% superior ao utilizado nos coletores com cobertura. A Tabela 2 mostra os valores de vazão ajustados para cada coletor.

Tabela 2 – Vazões utilizadas no Teste 1.

Sistema	Coletor	Área [m ²]	Vazão [L/min]
Simplex	Com cobertura	4	4,8
Acoplado	Com cobertura	2	2,4
	Sem cobertura	2	3,6

A Figura 28 mostra um diagrama de blocos que representa o método liga/desliga para ser utilizado no acionamento das bombas, onde as diferenças de temperatura utilizadas para ligar e desligar a bomba são de 4°C e 1°C, respectivamente.

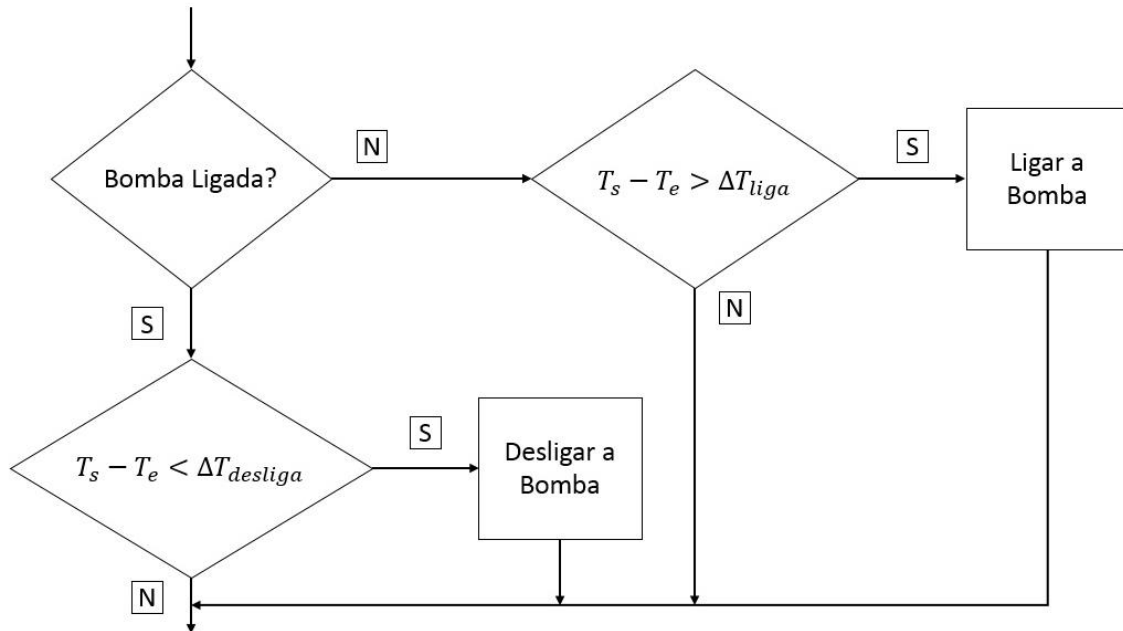


Figura 28 – Esquema lógico de acionamento das bombas.

A Figura 29 mostra a distribuição de temperaturas de entrada e saída e a distribuição de vazão volumétrica em função do tempo do Sistema Simples. Com o gráfico da vazão, verifica-se o acionamento/desligamento da bomba, indicada por valores positivos ou nulos, respectivamente. Todos os gráficos apresentam as incertezas das medições realizadas.

O gráfico de distribuição de temperaturas indica um aquecimento do sistema, enquanto mantém uma diferença de temperatura maior que 1°C, necessária para manter a bomba acionada até as 14h30m. A partir desse tempo, a diferença de temperatura diminuiu devido a um problema operacional que resultou na entrada de água fria no reservatório e por decorrência o desligamento da bomba. O equipamento retornou ao seu funcionamento normal até às 15h30m, atingindo uma condição de saturação térmica (quando a energia absorvida por radiação é menor ou igual a energia térmica perdida para o ambiente).

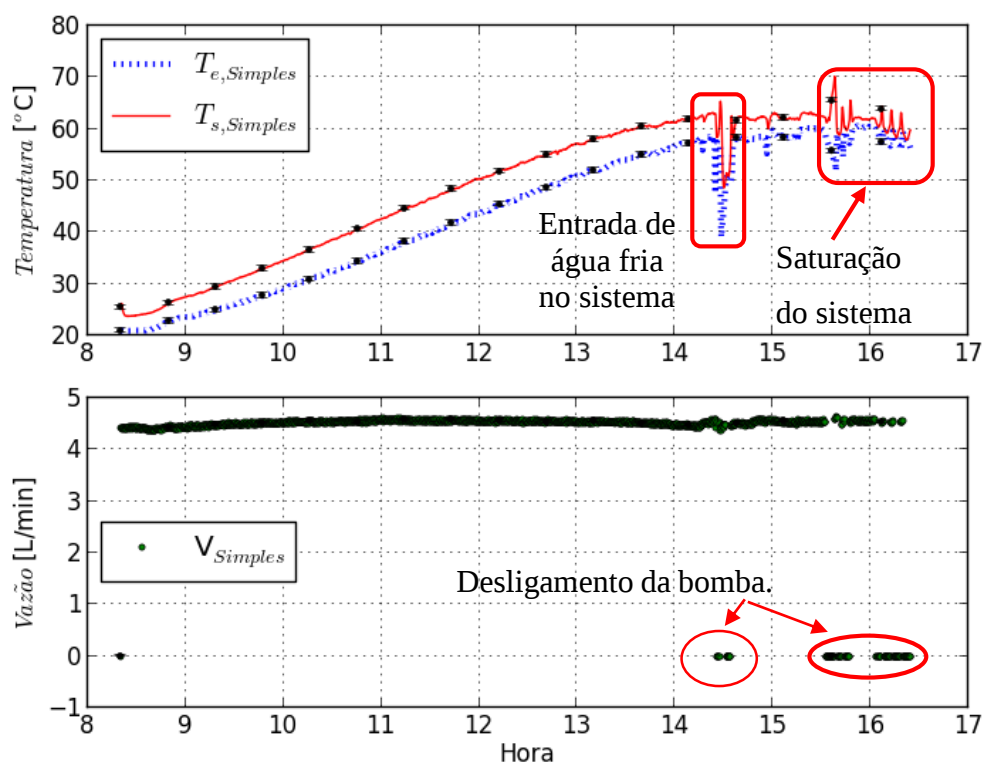


Figura 29 – Teste 1: Distribuição de temperatura e vazão volumétrica do Sistema Simples.

A Figura 30 ilustra a operação do coletor sem cobertura do Sistema Acoplado, onde os gráficos de distribuição de temperatura e vazão são análogos aos da Figura 29. Observa-se que a bomba não foi acionada em nenhum momento do dia, embora o sistema apresente aquecimento, devido a diferença entre a temperatura de entrada e saída não ter superado 4°C, condição necessária para o seu acionamento. Como esse modelo de coletor apresenta tubos de elevação com diâmetros interno pequenos, a perda de carga excessiva impede a circulação da água por termossifão.

Desta forma, a água na região do sensor de saída também não circula e permanece praticamente inalterada ao longo do dia. Desta forma, o sistema de circulação forçada para este coletor não seria acionado como pretendido. Este comportamento indica que a proposta de controle do acionamento/desligamento da bomba para o coletor sem cobertura é inadequada e uma nova proposta precisaria ser implementada.

A Figura 31 apresenta a operação do coletor com cobertura do Sistema Acoplado. Os gráficos de distribuição de temperaturas e de vazão volumétrica são análogos ao da Figura 29. Pode-se observar também, o mesmo problema operacional ocorrido as

14h30m. Nota-se também que, mesmo sem a contribuição energética do coletor sem cobertura, a saturação térmica do sistema ocorreu pouco tempo após as 16h.

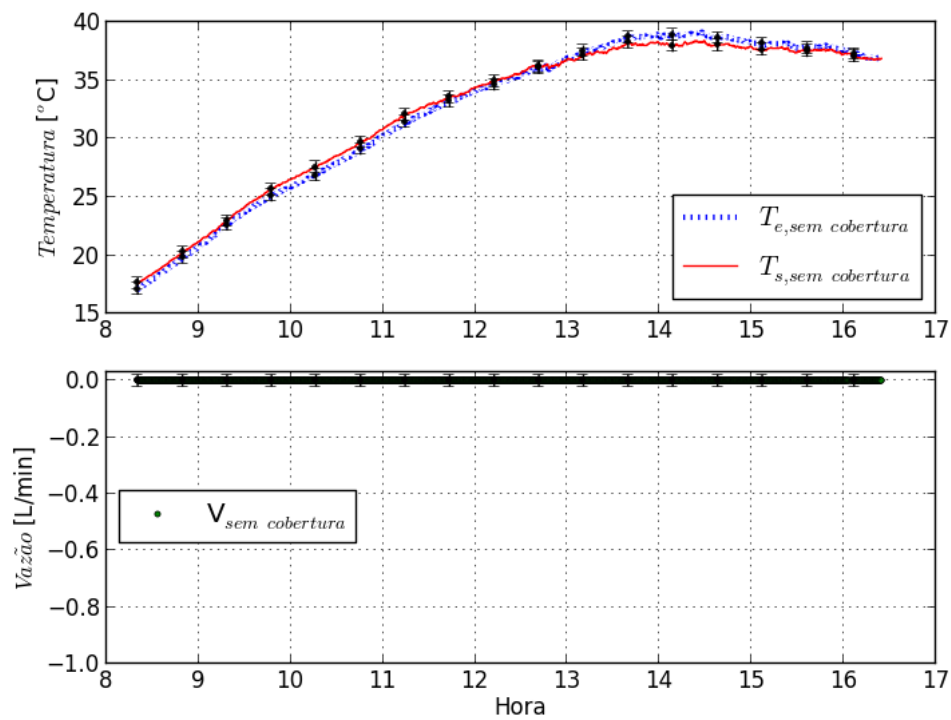


Figura 30 – Teste 1: Distribuição de temperatura e vazão volumétrica do coletor sem cobertura - Sistema Acoplado.

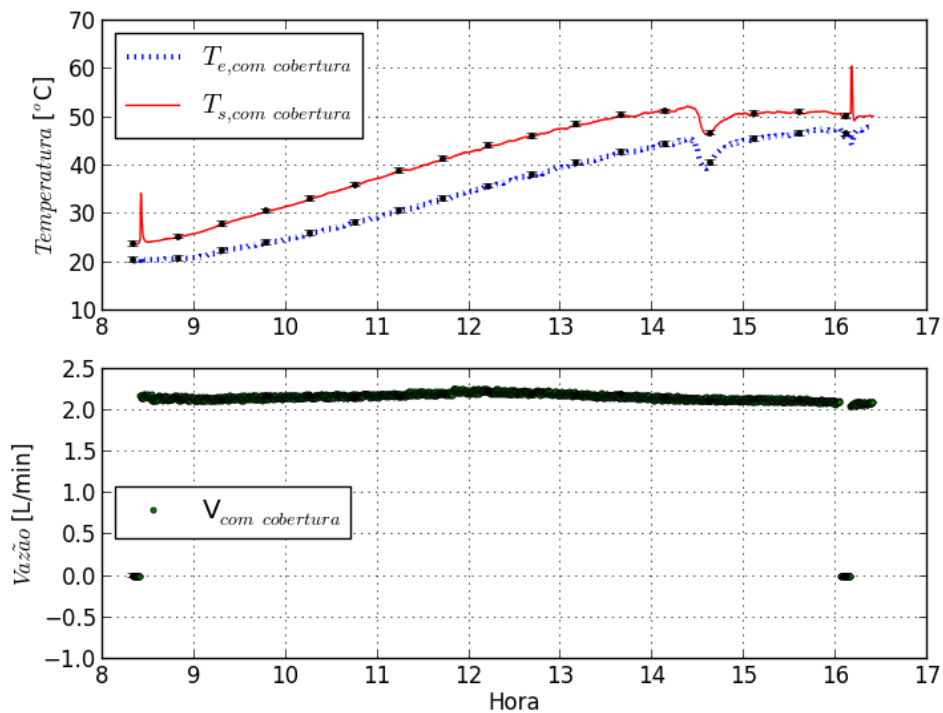


Figura 31 – Teste 1: Distribuição de temperatura e vazão volumétrica do coletor com cobertura - Sistema Acoplado.

Em função do funcionamento inadequado do Sistema Acoplado, não foram feitas maiores análises deste teste. Entretanto, a sua realização foi fundamental para mostrar a necessidade de mudança no modo de operação do coletor sem cobertura.

5.2. Teste 2 – Ensaio com ajuste no controle da operação do coletor sem cobertura

Em função dos problemas associados à estagnação do fluxo identificados no Teste 1, foi alterada a metodologia de controle de acionamento da bomba do coletor sem cobertura do Sistema Acoplado. A Figura 32 ilustra o novo método proposto para a realização deste controle específico. As outras bombas de acionamento permaneceram com o mesmo esquema usado no teste anterior. Os valores ajustados de vazão foram os mesmos do Teste 1 fornecidos pela Tabela 2.

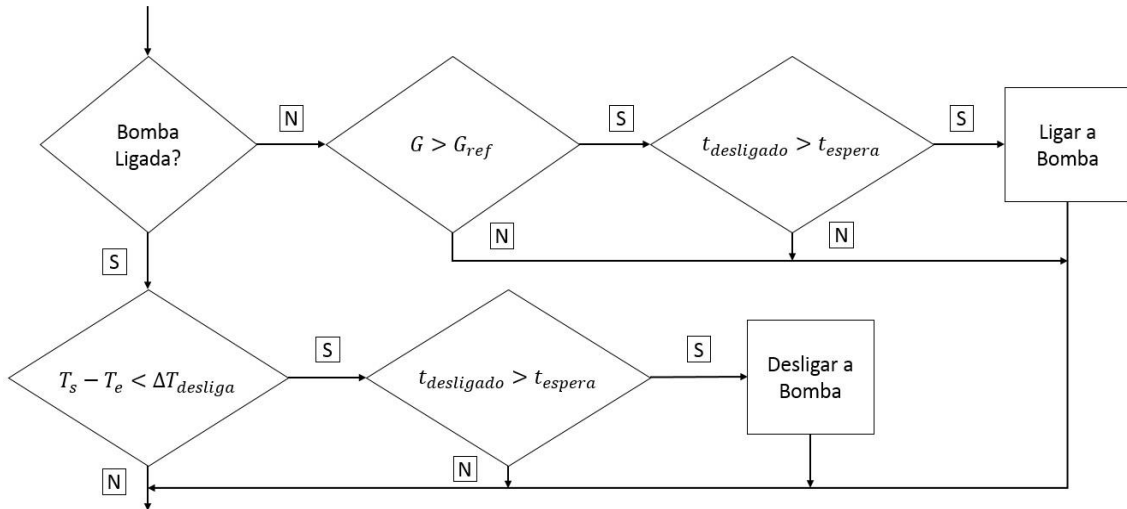


Figura 32 – Método de acionamento da bomba do coletor sem cobertura.

Para o novo método, a diferença de temperatura entre entrada e saída continuou sendo o parâmetro principal, mas para níveis de irradiação superiores à um valor de referência ($G_{ref} = 200 \text{ W/m}^2$) a bomba é ligada para realizar uma recirculação. Assim sendo, quando o nível de radiação é superior ao valor estabelecido, a bomba liga por um tempo determinado mínimo, após este tempo ela só permanecerá ligada se um aumento mínimo na temperatura da água é atingido ($\Delta T_{desliga} = 1^\circ\text{C}$). Caso esta condição imposta não seja atingida, a bomba desliga e volta a ligar novamente para realizar um novo teste após um determinado tempo de espera ($t_{espera} = 60\text{s}$).

Com essa metodologia, se a bomba estiver desligada por um tempo maior que t_{espera} e o nível de irradiação for maior que G_{ref} , a bomba é ligada forçando a circulação

da água aquecida que estava estagnada no interior do coletor, permitindo que escoe através do sensor de temperatura da saída. Se a bomba estiver ligada, verifica-se se a há um ganho de temperatura maior que $\Delta T_{desliga}$ e caso negativo, se a bomba estiver ligada por um tempo maior que t_{espera} , ela é desligada. O tempo de espera é necessário para garantir que a água estagnada no interior do coletor circule através do sensor de temperatura da saída.

A Figura 33 apresenta as distribuições dos parâmetros ambientais irradiação, velocidade do ar e temperatura, utilizados para o cálculo da eficiência de cada coletor.

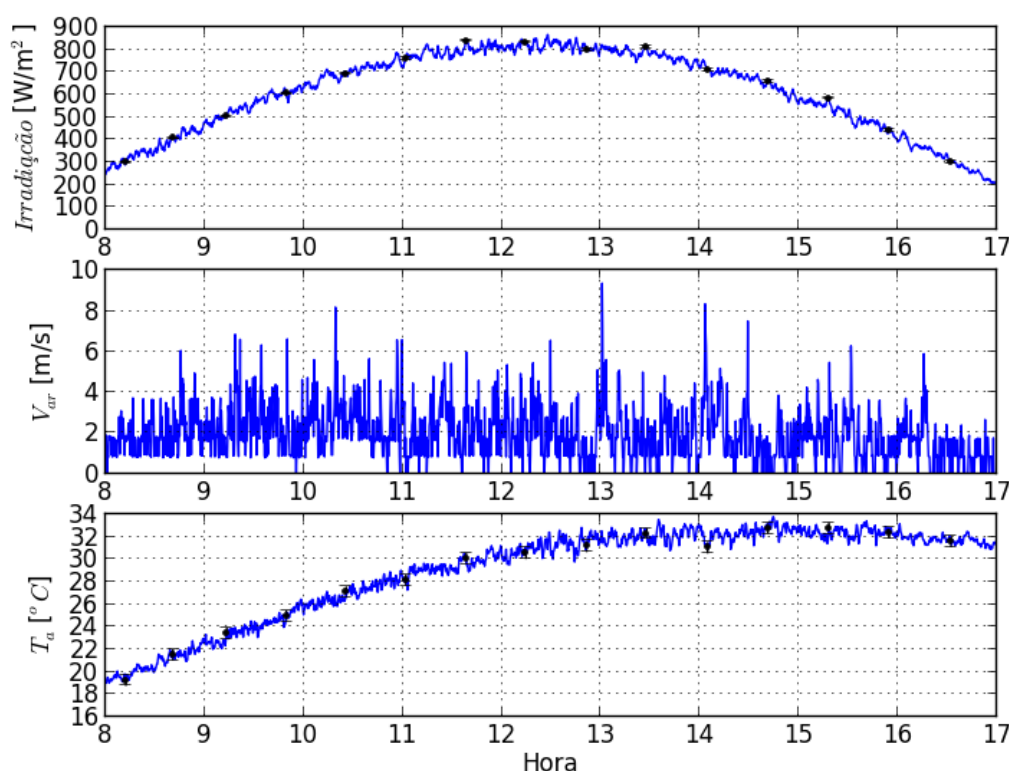


Figura 33 – Teste 2: Condições ambientais. Radiação, velocidade do ar e temperatura ambiente.

A Figura 34 ilustra a operação do Sistema Simples, onde a saturação ocorreu por volta das 16h, fazendo com que o sistema deixasse de acumular energia. É importante destacar que o acionamento intermitente da bomba de recirculação após esse período se deve à redução da temperatura de entrada do coletor devido às suas perdas para o ambiente durante o tempo sem circulação. Desta forma, a circulação durante este período é indesejável, pois a temperatura de saída do coletor é inferior à encontrada no reservatório.

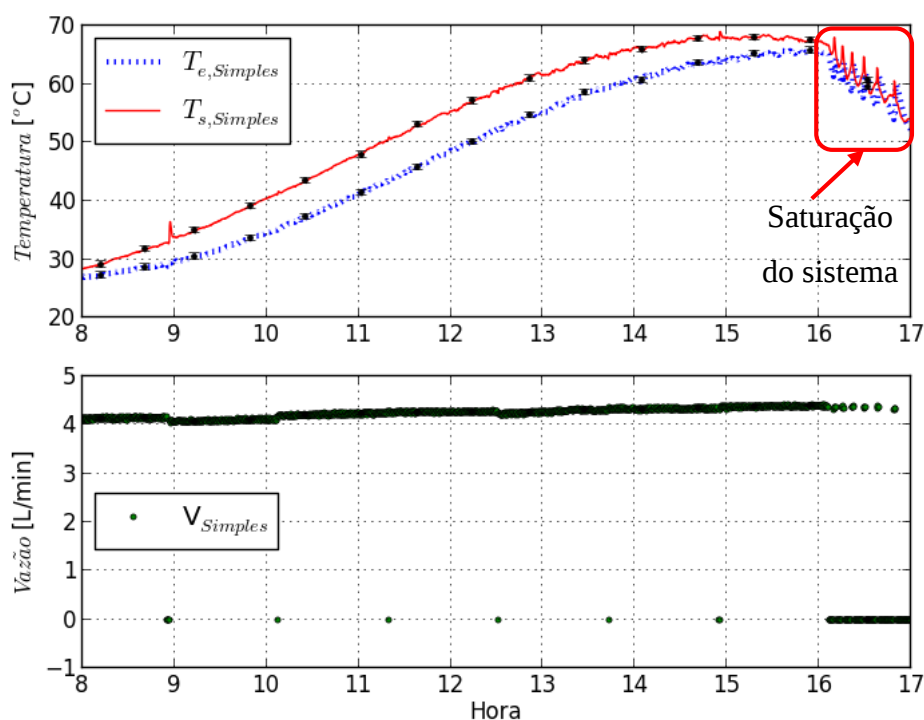


Figura 34 – Teste 2: Distribuição de temperaturas e vazão volumétrica do Sistema Simples.

A Figura 35 apresenta a operação do coletor com cobertura do Sistema Acoplado. Neste sistema nota-se que não houve saturação do coletor durante o período exposto no gráfico. Os picos observados na distribuição de temperatura associados a valores nulos de vazão volumétrica com intervalos regulares são decorrentes da reinicialização do sistema de medição devido a um problema com o radiômetro térmico, utilizado na calibração do radiômetro óptico.

A água aquecida nos coletores retorna para a região superior do reservatório térmico, enquanto que a água na região inferior realimenta os coletores. Devido a relação entre a vazão adotada e o volume dos reservatórios, todo o volume de água presente nos sistemas recircula pelos coletores a cada 50 minutos. Este fato tem um impacto importante no seu funcionamento pois, praticamente, elimina a estratificação térmica e promove um aumento significativo na temperatura de entrada nos coletores.

A Figura 36 ilustra a operação do coletor sem cobertura do Sistema Acoplado, onde a bomba permaneceu ligada a maior parte do período da manhã apresentando temperatura de saída maior que de entrada. Observa-se, no entanto, que a partir das 12h a bomba passou a operar de modo intermitente. Isto se deve ao fato que, neste período, a temperatura de saída desse coletor permaneceu inferior à da entrada e este deixou de contribuir para o acúmulo de energia no sistema. Entretanto, é importante ressaltar que a

temperatura de entrada continuou aumentando nesse período, uma vez que o coletor com cobertura continuava em operação e ligado ao mesmo reservatório.

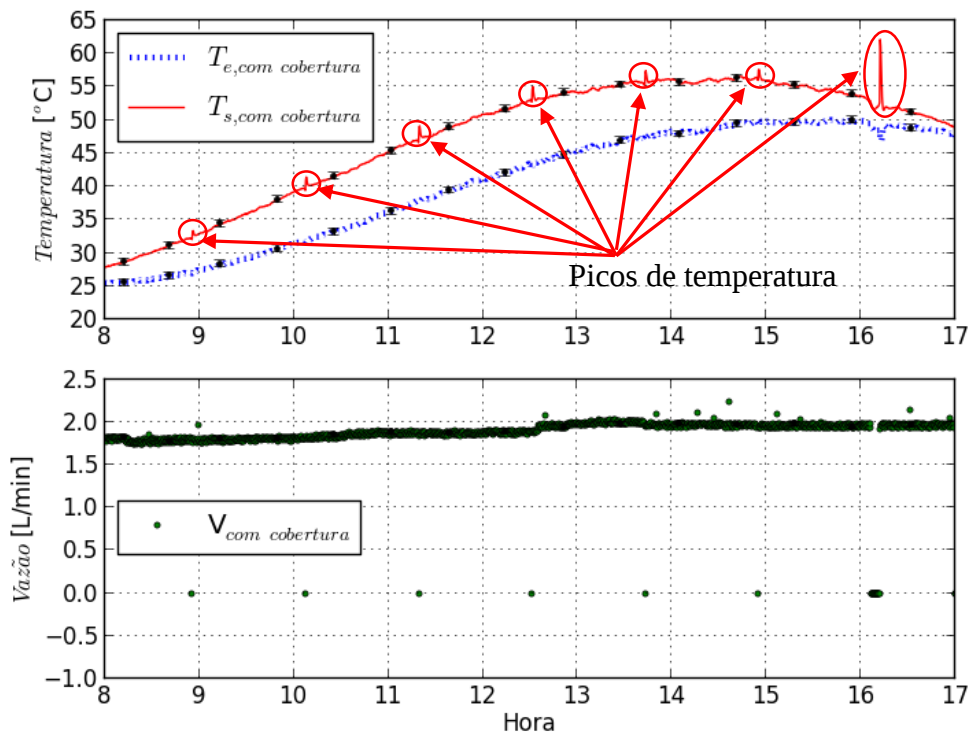


Figura 35 – Teste 2: Distribuição de temperatura e vazão volumétrica do coletor com cobertura - Sistema Acoplado.

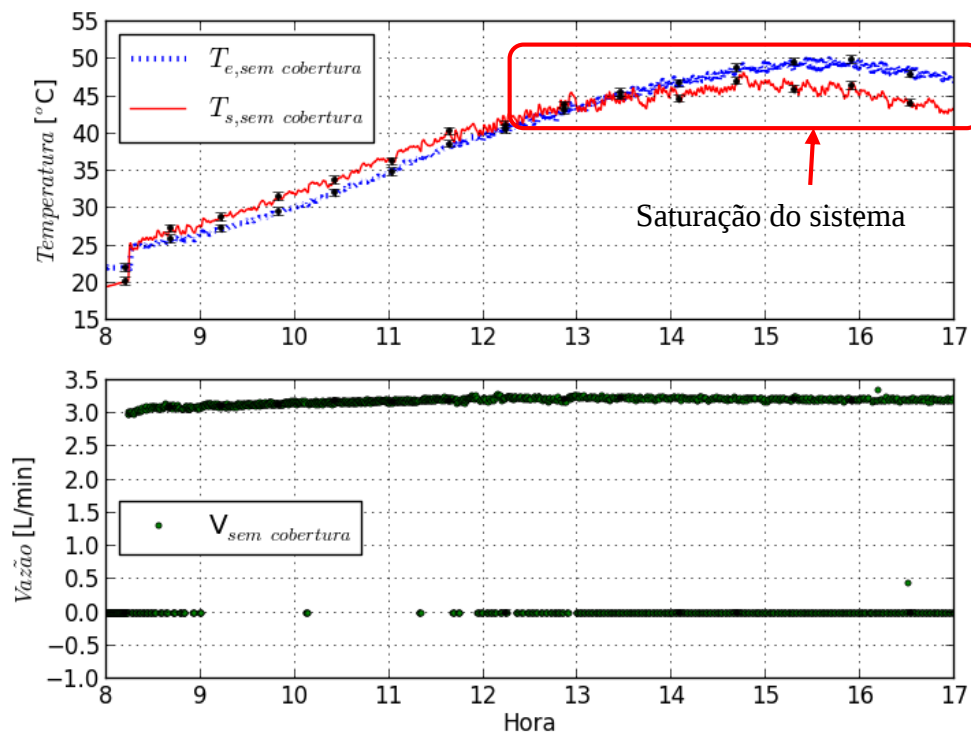


Figura 36 – Teste 2: Distribuição de temperatura e vazão volumétrica do coletor sem cobertura - Sistema Acoplado.

Pode-se observar na operação de todos os coletores (Figura 34, Figura 35 e Figura 36) que a vazão medida foi sempre inferior a ajustada no início do teste. Este comportamento pode ter ocorrido devido às folgas no regulador de vazão, variação de pressão ou outros fatores intrínsecos do sistema.

A Figura 37 mostra a energia térmica absorvida tanto para os coletores como para os sistemas calculada a partir da Equação 14. Observando-se a figura nota-se que até às 13 horas, a energia solar captada pelo coletor sem cobertura é maior que as suas perdas para o ambiente, implicando em uma acumulação de energia. Após esse horário, devido à elevação da temperatura do reservatório e consequentemente da entrada do coletor, as perdas térmicas para o ambiente aumentam significativamente e superam a energia solar absorvida, provocando uma dissipação da energia térmica acumulada.

Analisando ainda a Figura 37, verifica-se que a energia absorvida por unidade de área pelo coletor com cobertura do Sistema Acoplado é maior que a do Sistema Simples. Este fato deve-se principalmente ao comportamento inadequado do coletor sem cobertura no período da tarde. Por conta disso, a temperatura do reservatório fica mais baixa e desloca o ponto de operação do coletor na sua curva de eficiência. Também devido fundamentalmente a este fato, o Sistema Acoplado absorveu uma quantidade menor de energia térmica que o Sistema Simples.

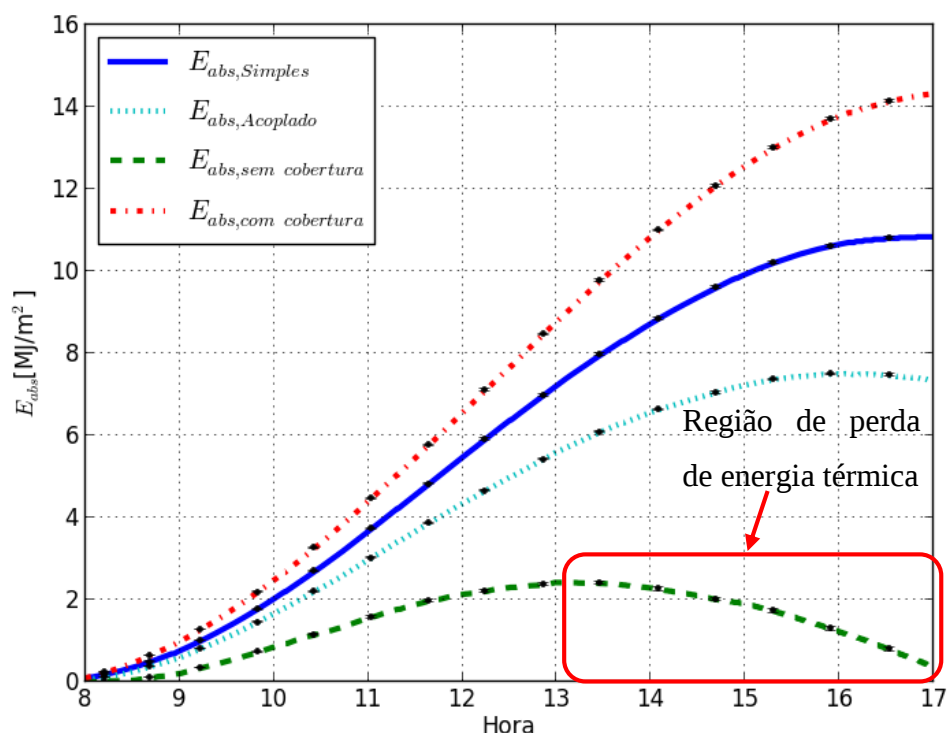


Figura 37 – Teste 2: Energia útil absorvida.

A Figura 38 apresenta as curvas de eficiência térmica instantânea para cada sistema. Para análise do gráfico é importante destacar que no início da operação, uma parcela da energia térmica é utilizada para o aquecimento do coletor. Este aquecimento transiente do coletor é responsável por uma redução da energia térmica transferida para a água.

No que se refere à eficiência térmica do coletor sem cobertura a saturação ocorrida a partir das 13 horas também se destaca. A partir deste momento, verifica-se uma operação intermitente da bomba. Durante o período de funcionamento da bomba a eficiência assume valores negativos e, por outro lado, apresenta valores nulos, quando a bomba está desligada.

O coletor com cobertura, por sua vez, apresenta eficiência estável com tendência de queda ao final do dia, devido ao problema da saturação térmica. Os picos de eficiência com intervalos regulares são decorrentes da reinicialização do sistema, como já discutido anteriormente.

O Sistema Acoplado representa os efeitos combinados dos coletores com e sem cobertura, apresentando duas tendências influenciadas pelo coletor sem cobertura. O Sistema Simples tem comportamento análogo ao do coletor com cobertura do Sistema Acoplado, porém apresenta saturação térmica após as 16 horas.

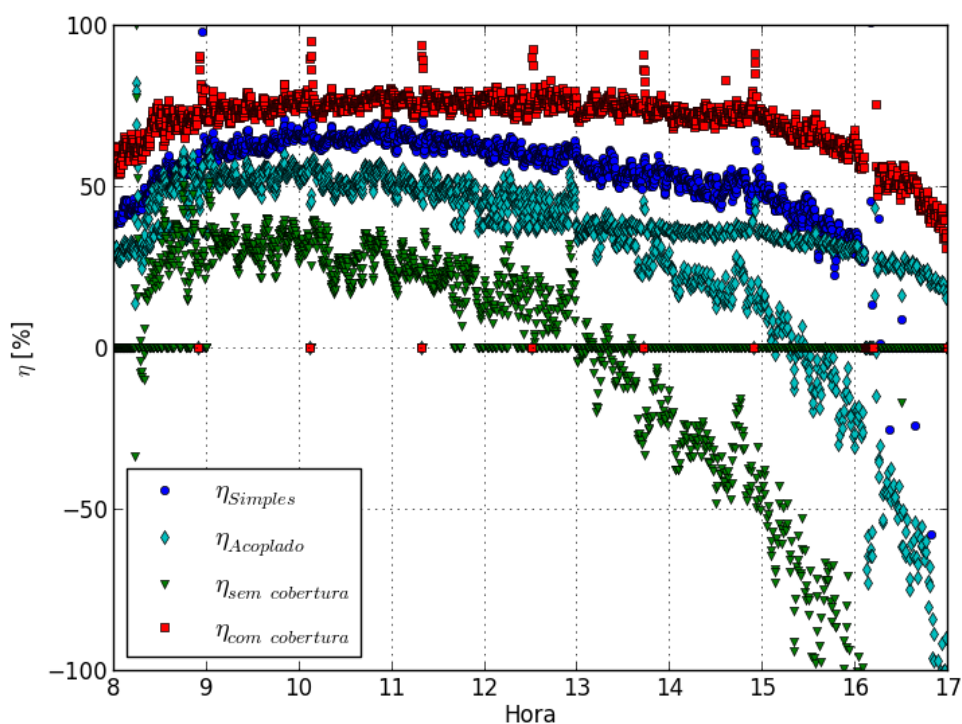


Figura 38 – Teste 2: Eficiência térmica.

5.3. Teste 3 – Ensaio com vazão reduzida nos coletores com cobertura

Em função da alta taxa de recirculação no reservatório e para melhorar a estratificação térmica, novas mudanças foram implantadas. A principal medida tomada neste teste foi a diminuição do valor da vazão volumétrica utilizada para os coletores com cobertura, reduzindo a frequência que o volume total do reservatório circula. O valor adotado foi metade do utilizado nos testes anteriores, ou seja, 0,6 L/min.m². A Tabela 3 resume os valores de vazões adotados para o Teste 3.

Tabela 3 – Vazões utilizadas no Teste 3.

Sistema	Coletor	Área [m ²]	Vazão [L/min]
Simplex	Com cobertura	4	2,4
Acoplado	Com cobertura	2	1,2
	Sem cobertura	2	3,6

A Figura 39 apresenta as distribuições dos parâmetros ambientais, irradiação, velocidade do ar e temperatura, utilizados para o cálculo da eficiência de cada coletor.

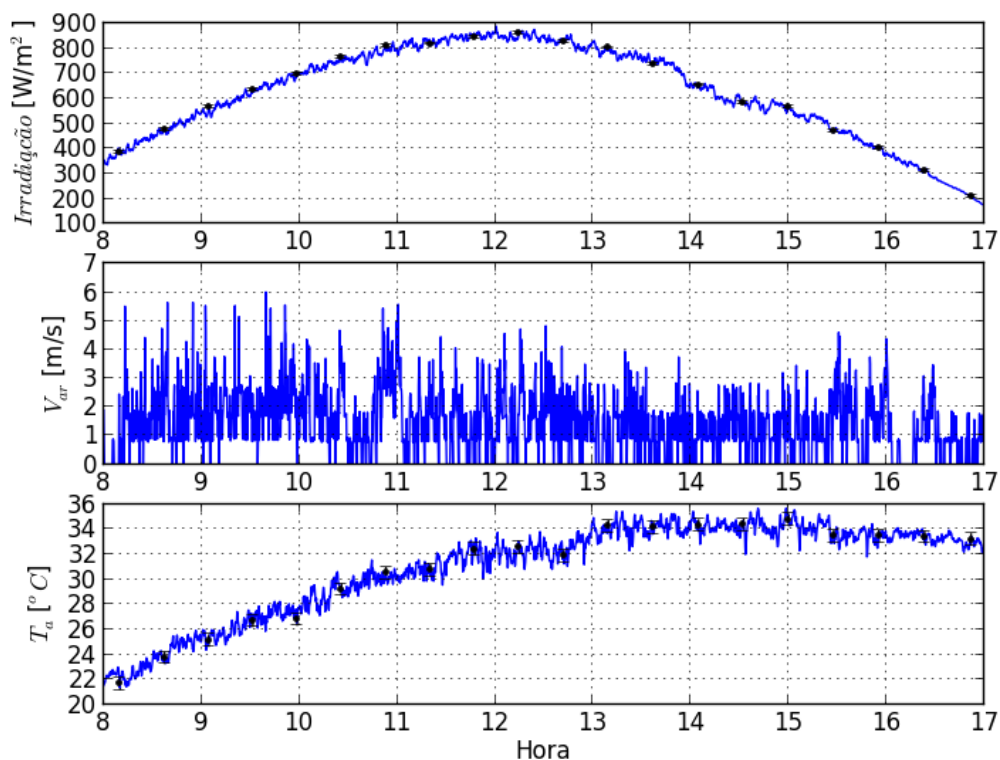


Figura 39 – Teste 3: Condições ambientais. Radiação, velocidade do vento e temperatura ambiente.

A Figura 40 ilustra a operação do Sistema Simples. Observa-se que a diferença entre as temperaturas de entrada e saída aumentou em comparação ao teste 2 (Figura 34), devido a menor vazão na bomba. Nota-se que no intervalo de tempo das 8 – 10 horas, a temperatura de entrada do coletor se manteve-se sem alterações significativas, decorrente da não circulação de toda a massa de água do reservatório pelo coletor.

A partir das 10 horas, verifica-se a elevação da temperatura de entrada do coletor, decorrente da circulação da água previamente aquecida e armazenada no reservatório. A temperatura de saída do coletor atinge seu valor máximo por volta das 14 horas, enquanto que a temperatura de entrada apresenta crescimento até aproximadamente às 16 horas, quando atinge a condição de saturação térmica do sistema. Após as 16 horas houve circulação indesejada de água, conforme já destacado na descrição do Teste 2.

Ainda na Figura 40, a curva de vazão apresenta uma queda no seu patamar no início da operação. Dois fatores avaliados podem justificar o fato: sujeira na tubulação ou empenamento do eixo da bomba causado pelo excesso de funcionamento em alta temperatura.

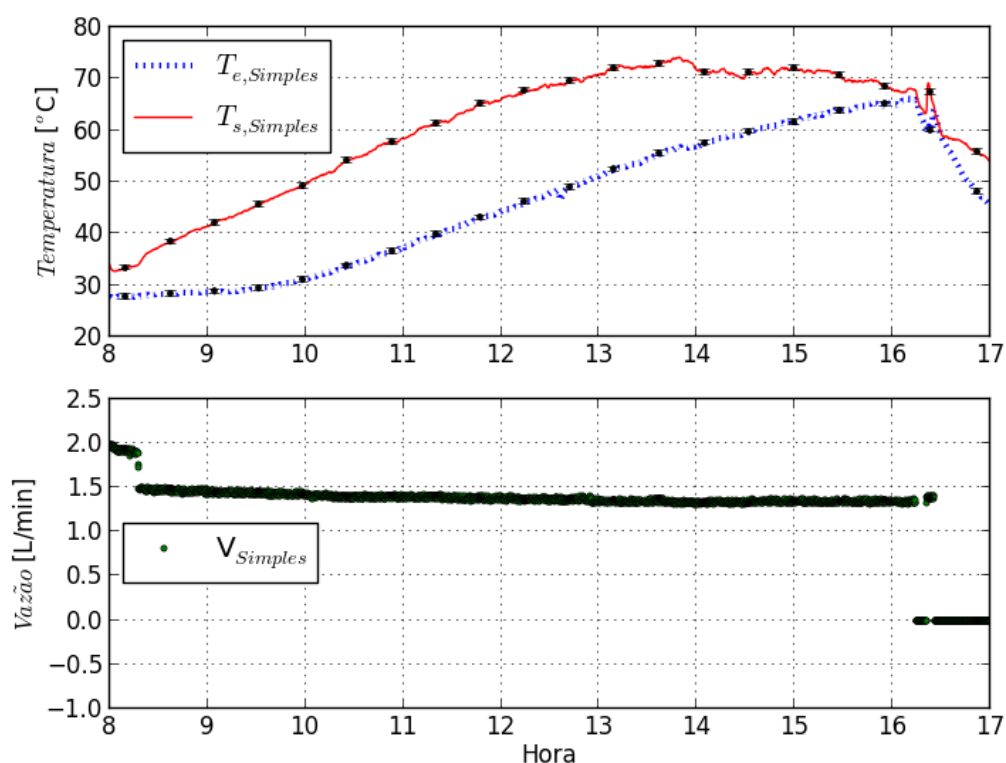


Figura 40 – Teste 3: Distribuição de temperaturas e vazão volumétrica do Sistema Simples.

A temperatura de saída do coletor com cobertura do Sistema Acoplado (Figura 41) apresenta aumento no decorrer do dia, atingindo seu valor máximo às 14 horas, enquanto que a temperatura de entrada apresenta crescimento durante toda a operação até atingir a saturação térmica próximo as 17 horas, onde também houve circulação indesejada de água.

A operação do coletor sem cobertura do Sistema Acoplado (Figura 42) é contínua até as 12h30m, quando a temperatura de entrada no coletor se iguala a de saída, atingindo a saturação térmica. Após esse horário, a temperatura de entrada continua aumentando, devido a operação do coletor com cobertura, ultrapassando a temperatura de saída e provocando uma operação intermitente da bomba de recirculação.

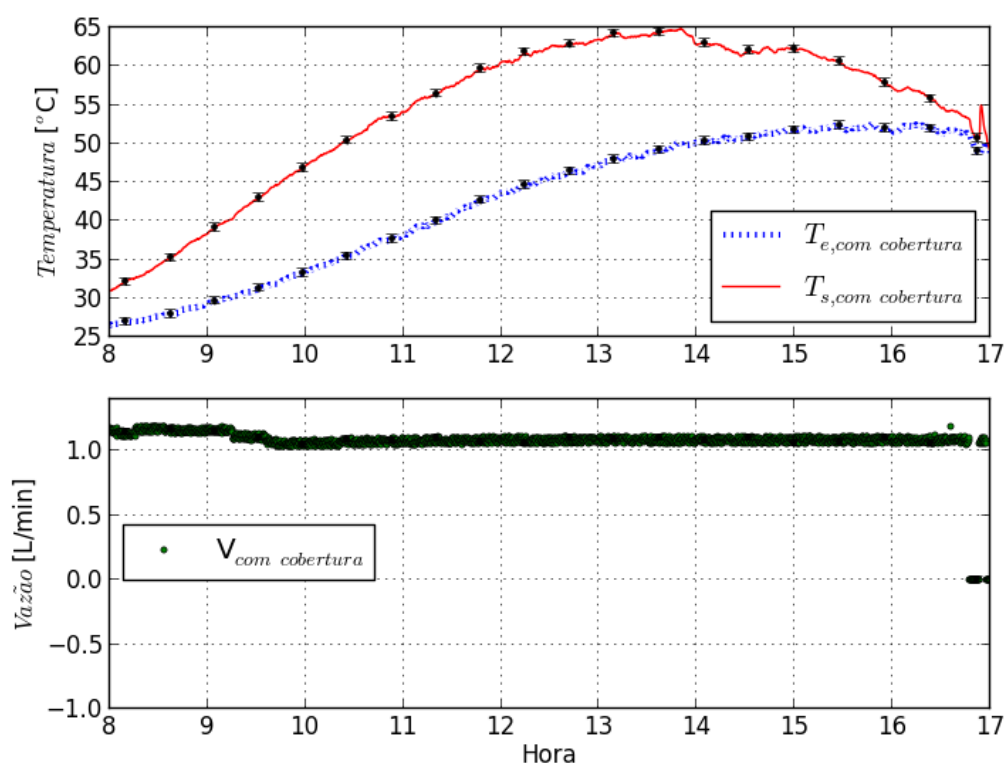


Figura 41 – Teste 3: Distribuição de temperatura e vazão volumétrica do coletor com cobertura - Sistema Acoplado.

A análise da Figura 43 mostra que o comportamento dos sistemas é análogo ao do teste 2, porém o coletor sem cobertura apresentou uma melhora em relação ao Teste 2 (Figura 37), sem diferenças significativas no Sistema Simples e no coletor com cobertura do Sistema Acoplado. Isso ocorreu, devido a melhor estratificação térmica do reservatório, proporcionando que o coletor sem cobertura operasse com uma temperatura de entrada menor por um período maior de tempo.

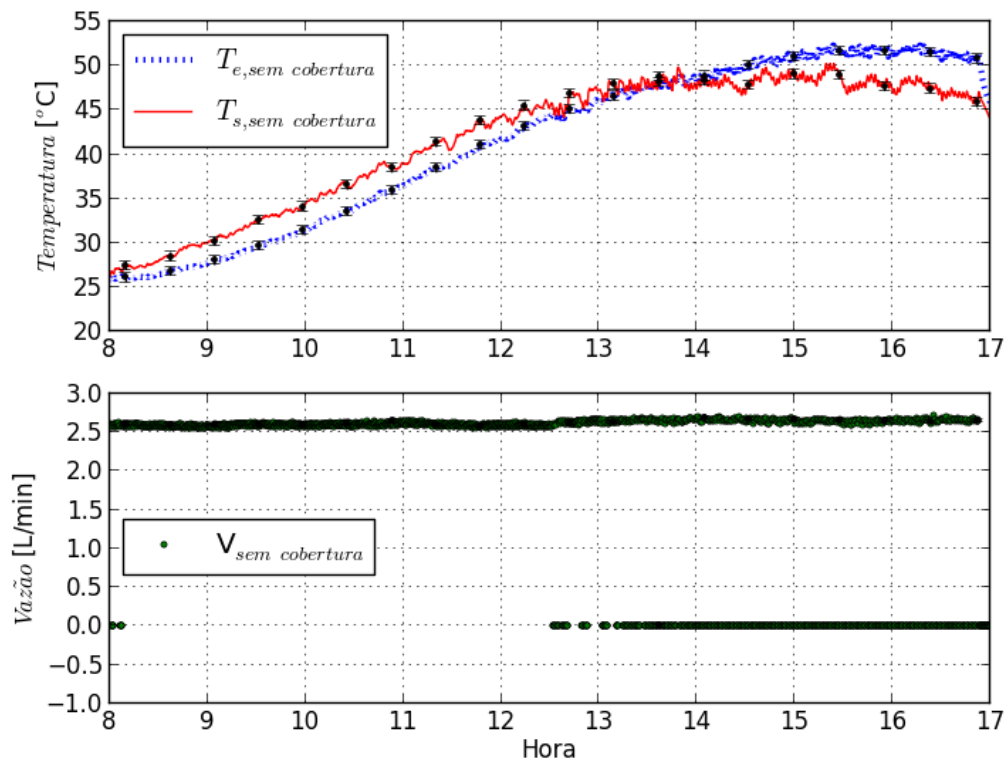


Figura 42 – Teste 3: Distribuição de temperatura e vazão volumétrica do coletor sem cobertura - Sistema Acoplado.

Apesar do aumento na energia térmica absorvida pelo coletor sem cobertura, o Sistema Acoplado continua inferior ao do Sistema Simples.

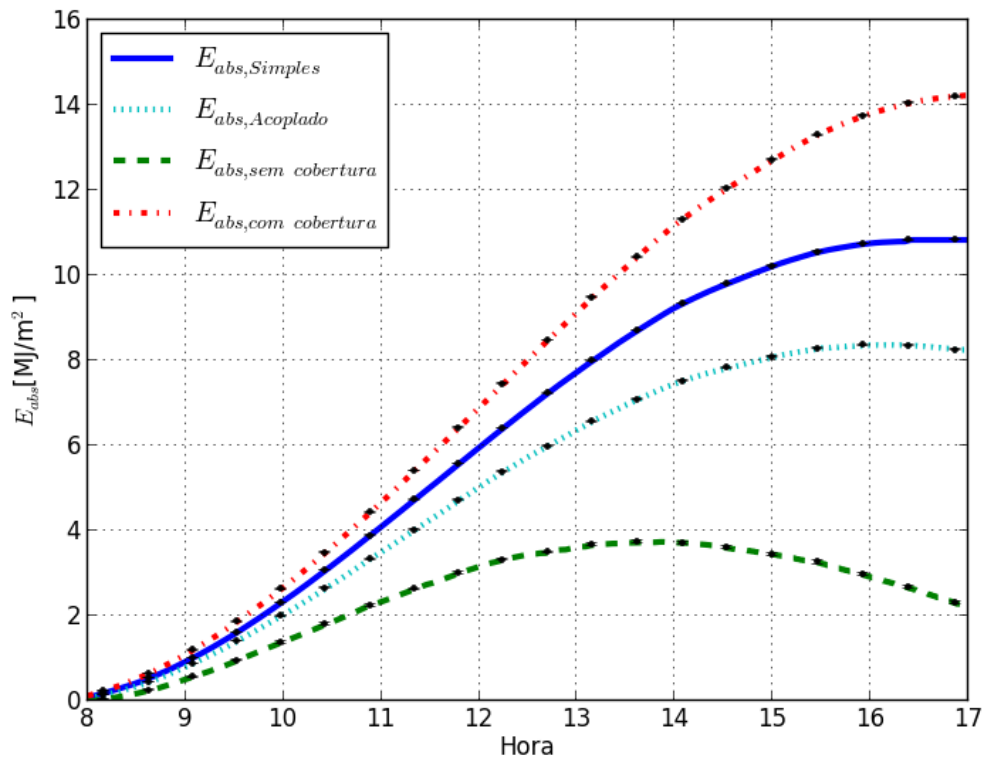


Figura 43 – Teste 3: Energia útil absorvida.

A Figura 44 apresenta as eficiências térmicas para cada sistema, onde o há um comportamento análogo ao observado no Teste 2 (Figura 38), porém com uma melhora na eficiência do coletor sem cobertura.

Os picos de eficiência para o coletor com cobertura no Sistema Acoplado e no Sistema Simples no final da operação são enganosos. Neste período, o coletor com cobertura só é capaz de aquecer a água depois dela perder uma quantidade de energia significativa e, mesmo assim, ainda a injeta no tanque numa temperatura inferior à do reservatório.

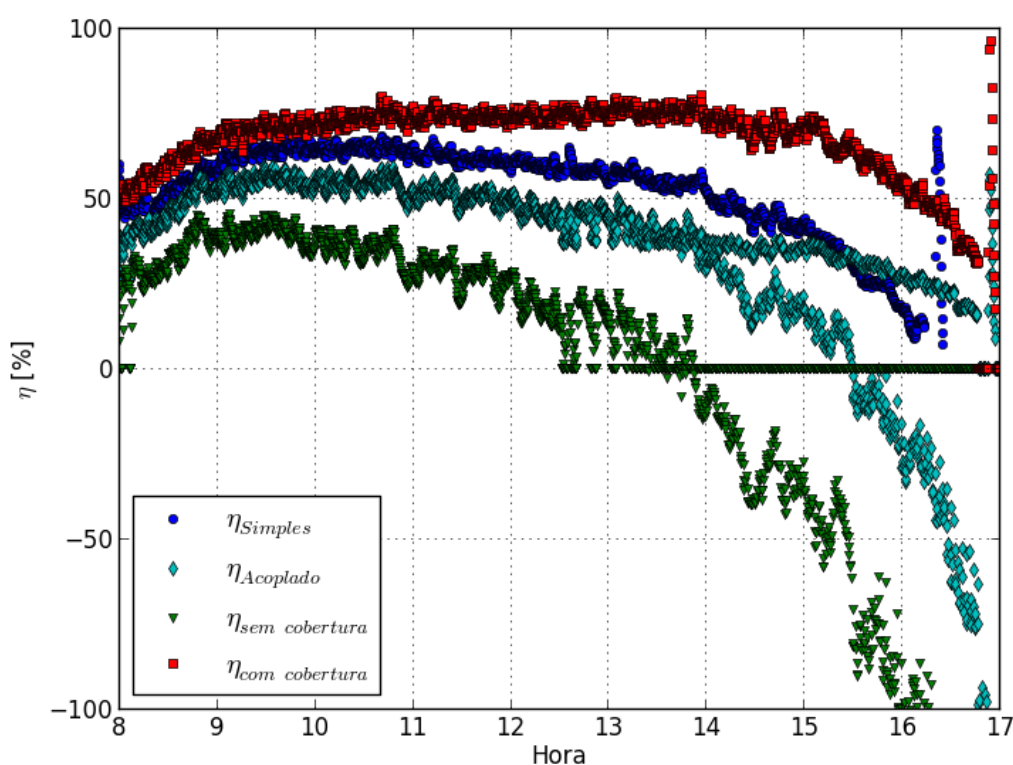


Figura 44 – Teste 3: Eficiência térmica.

5.4. Teste 4 – Ensaio com alterações na temperatura de controle e no tempo de operação

Os valores de vazões adotados no Teste 3 foram mantidos para o Teste 4. Para diminuir a perda de energia apresentada no coletor sem cobertura nos testes 2 e 3 aumentou-se o tempo que a bomba fica desligada. O intervalo de tempo ajustado foi de 5 minutos desligado. O tempo de recirculação foi mantido em 1 minuto.

Para solucionar o problema relatado no Sistema Simples nos Testes 2 e 3 foi ajustado o método de acionamento das bombas dos coletores com cobertura, ilustrado na Figura 28, que consiste na substituição da temperatura de entrada por uma temperatura de referência. O valor da temperatura de referência é adotado como o valor da temperatura de entrada quando o sistema de controle é ligado e atualizado durante todo o tempo em que a bomba estiver ligada. Quando a bomba é desligada, este valor deixa de ser atualizado e mantém como referência o último valor armazenado.

A Figura 46 apresenta as distribuições dos parâmetros ambientais, irradiação, velocidade do ar e temperatura, utilizados para o cálculo da eficiência de cada coletor.

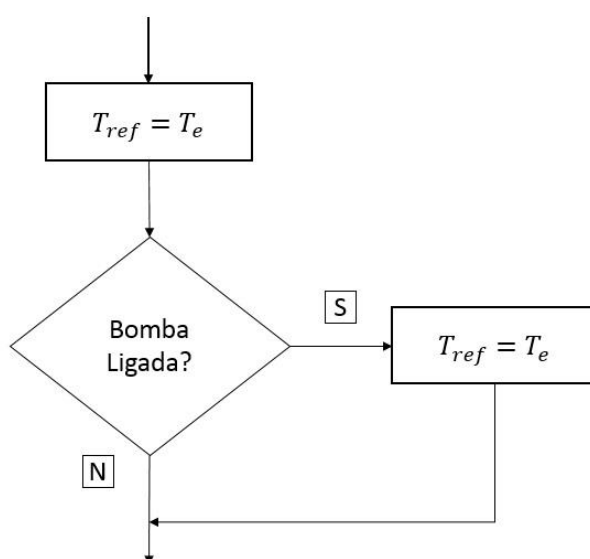


Figura 45 – Fluxograma para atualização da temperatura de referência.

A Figura 47 ilustra a operação do Sistema Simples, onde no início do dia a bomba estava desligada e o sistema operava em termossifão. Após atingir a diferença de temperatura de 4°C entre a entrada e saída do coletor, a bomba foi acionada. O comportamento das curvas de temperatura de entrada e saída do coletor é análogo ao apresentado no Teste 3 (Figura 40). Observa que a curva de vazão apresentou diversos patamares decrescentes, oriundo de defeito na bomba, já citados anteriormente no teste 3, que causou o seu travamento por volta das 15 horas.

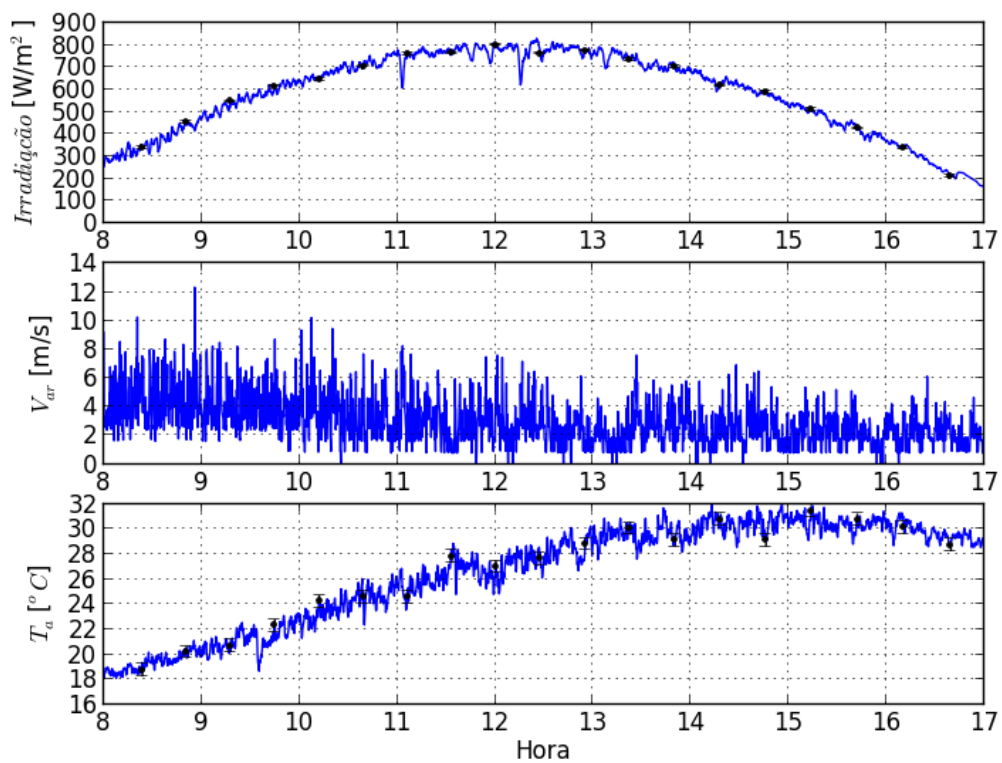


Figura 46 – Teste 4: Condições ambientais. Radiação, velocidade do vento e temperatura ambiente.

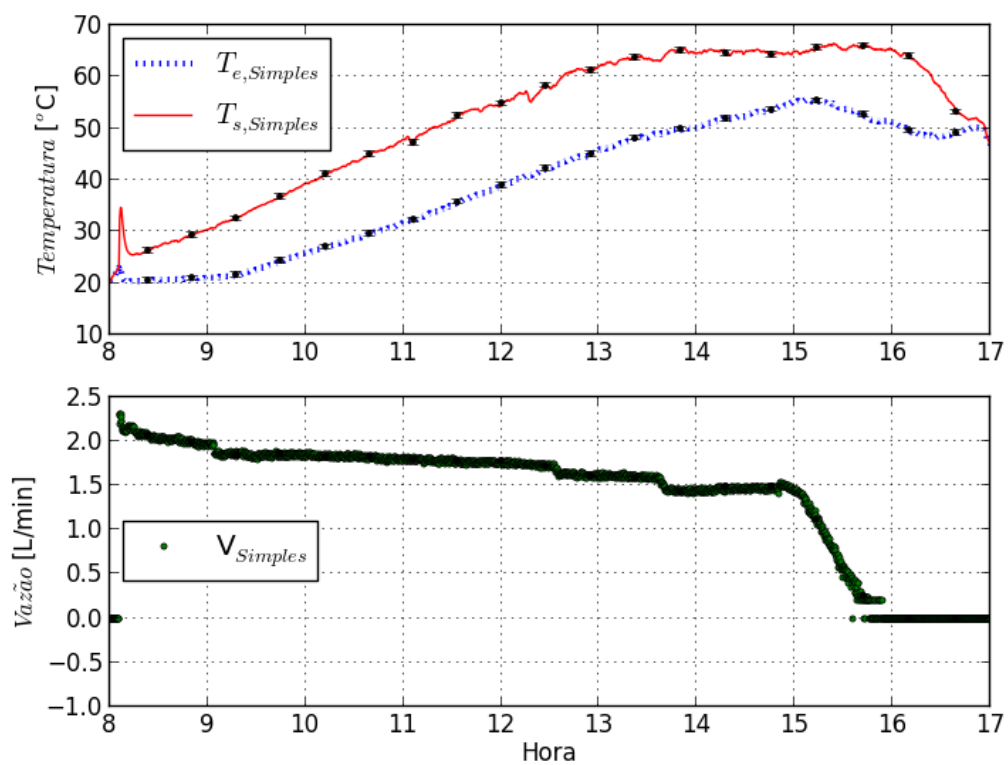


Figura 47 – Teste 4: Distribuição de temperaturas e vazão volumétrica do Sistema Simplex.

A Figura 48 ilustra a operação do coletor com cobertura do Sistema Acoplado que é análoga ao do teste 3 (Figura 41).

A Figura 49 ilustra a operação do coletor sem cobertura do Sistema Acoplado, apresentando funcionamento contínuo até as 12 horas. No período das 12h às 13h30m, operou de modo intermitente, com temperatura de saída do coletor superior a de entrada, invertendo esse comportamento após esse horário.

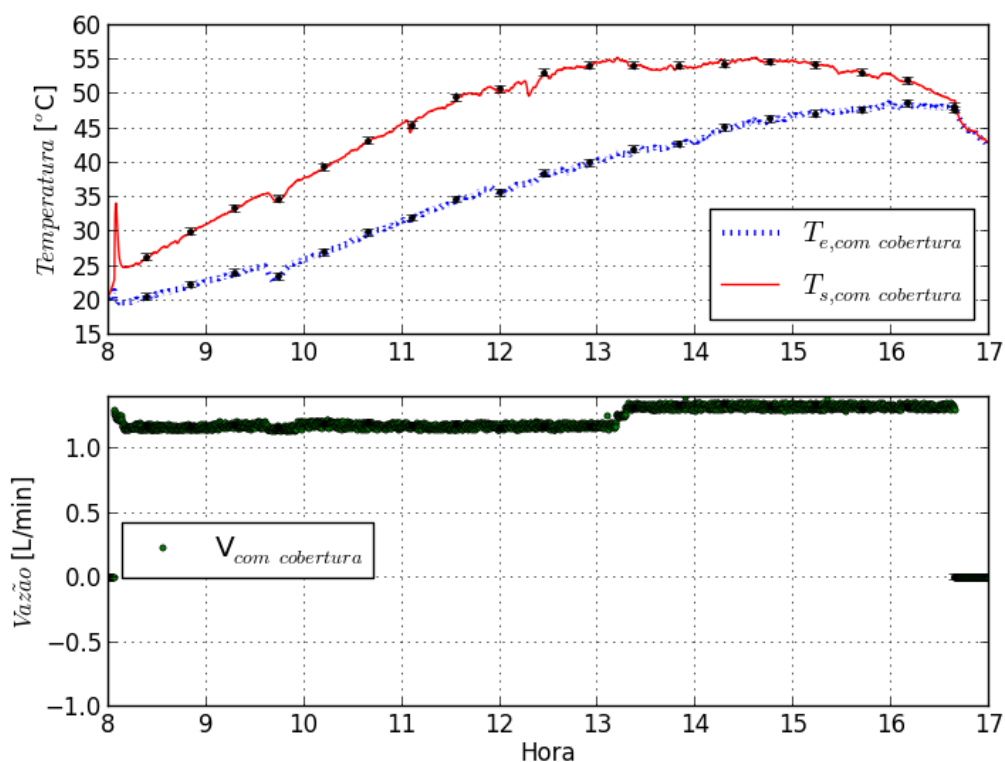


Figura 48 – Teste 4: Distribuição de temperaturas e vazão volumétrica do coletor com cobertura – Sistema Acoplado.

Observa-se na Figura 50 que após a saturação térmica do coletor sem cobertura por volta das 13h30m, a energia térmica acumulada apresentou menores perdas, se comparada às apresentadas nos Testes 2 e 3 (Figura 37 e Figura 43). Isso ocorreu devido ao ajuste no tempo de acionamento da bomba, proporcionando que o período desligado seja superior ao ligado durante a operação intermitente.

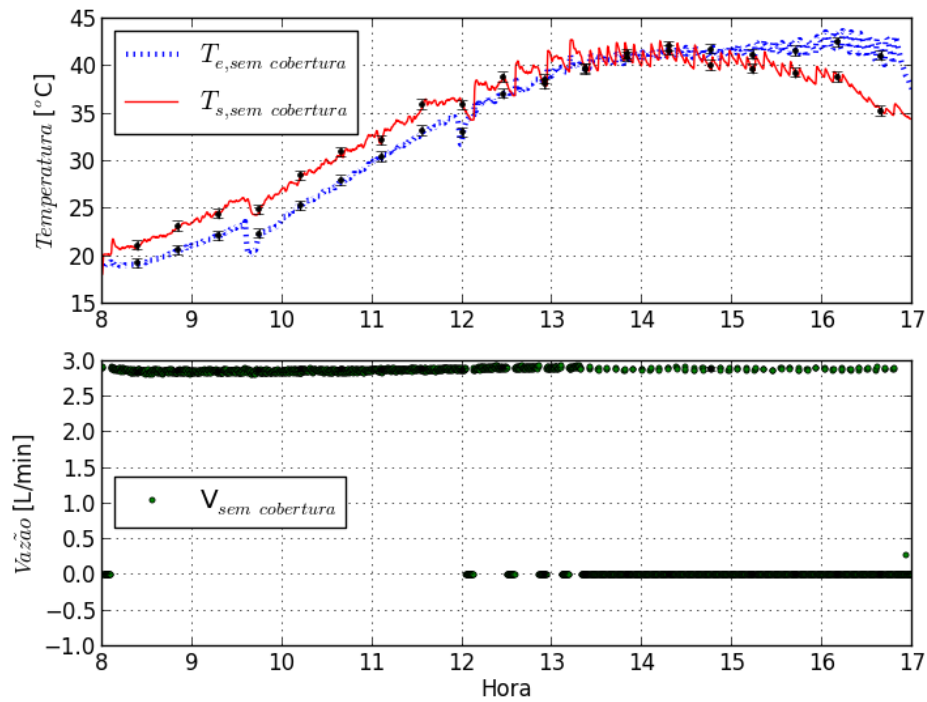


Figura 49 – Teste 4: Distribuição de temperaturas e vazão volumétrica do coletor sem cobertura – Sistema Acoplado.

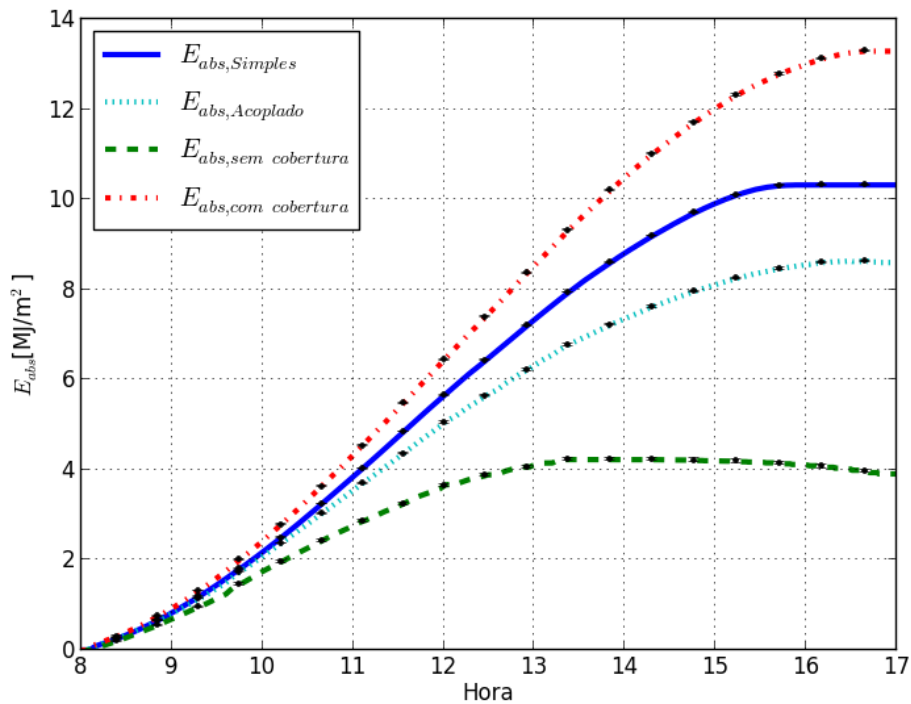


Figura 50 – Teste 4: Energia útil absorvida.

A Figura 51 apresenta as eficiências térmicas para os sistemas, onde observa-se, para o coletor sem cobertura, que a frequência de pontos após a saturação com valores negativos é bem menor que os de valores nulos, reduzindo assim as perdas de energia até então verificadas.

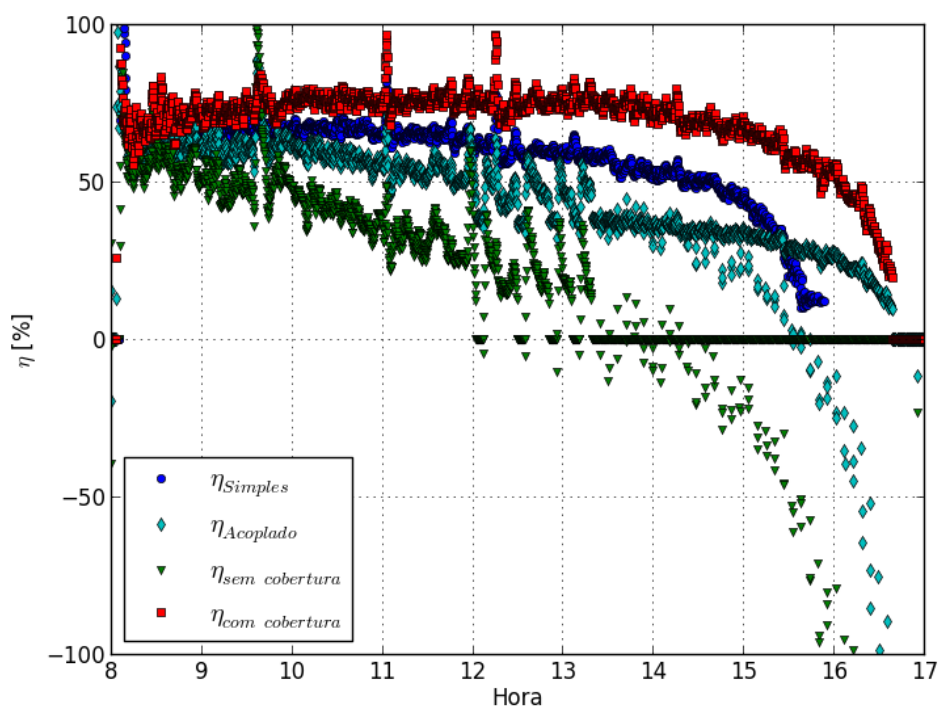


Figura 51 – Teste 4: Eficiência térmica.

5.5. Teste 5 – Ensaio com aumento da vazão e das temperaturas de controle

Uma forma alternativa para melhorar a estratificação térmica no reservatório é aumentar a diferença de temperatura necessária para o acionamento/desligamento da bomba, descritos no método apresentado no teste 1 e ilustrado pela Figura 28. Os valores utilizados foram $\Delta T_{liga} = 10^{\circ}\text{C}$ e $\Delta T_{desliga} = 3^{\circ}\text{C}$ e as vazões foram ajustadas para os mesmos valores apresentados na Tabela 2.

A Figura 52 apresenta as condições ambientais, irradiação, velocidade do ar e temperatura. Observa-se na curva de irradiação uma queda de nível por volta das 12h40m provocado pela passagem de nuvens. Verifica-se ainda, que após as 13 horas seu valor apresenta grandes flutuações causadas pelo mesmo fenômeno.

No início da operação do Sistema Simples (Figura 53) a bomba está desligada e o sistema funciona em termossifão, até atingir a diferença de temperatura de referência e de saída do coletor, necessária para o acionamento. O sistema opera continuamente até as 12h40m, quando uma queda no nível de irradiação provocou uma diminuição na temperatura de saída. No período entre 13 e 15 horas, houve diversos acionamentos intermitentes da bomba, decorrentes das flutuações na irradiação incidente. Após esse

período, a diferença entre a temperatura de saída e a de referência não atingiu o valor necessário para o acionamento da bomba.

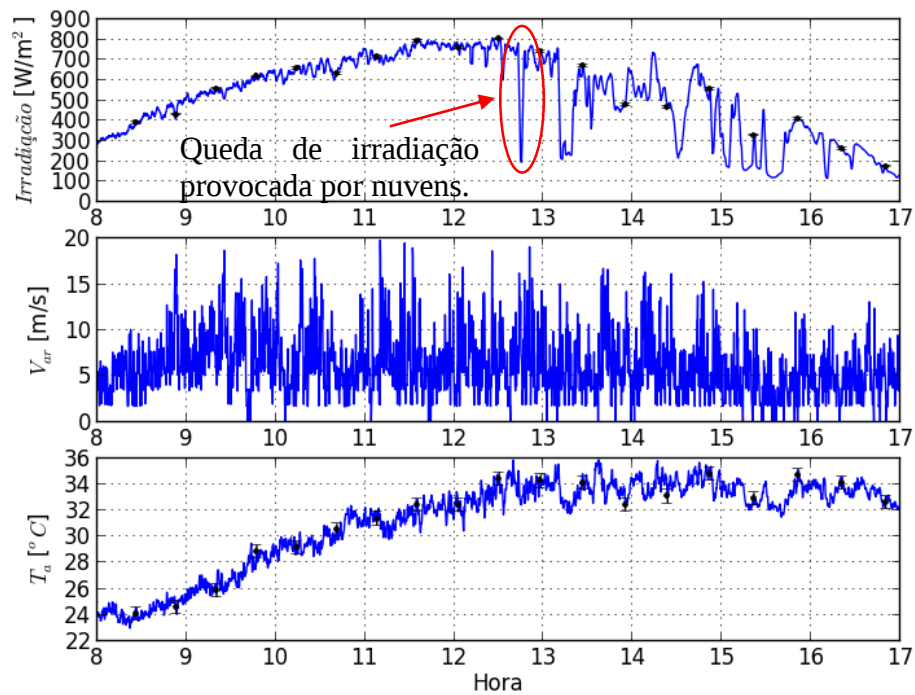


Figura 52 – Teste 5: Condições ambientais. Radiação, velocidade do vento e temperatura ambiente.

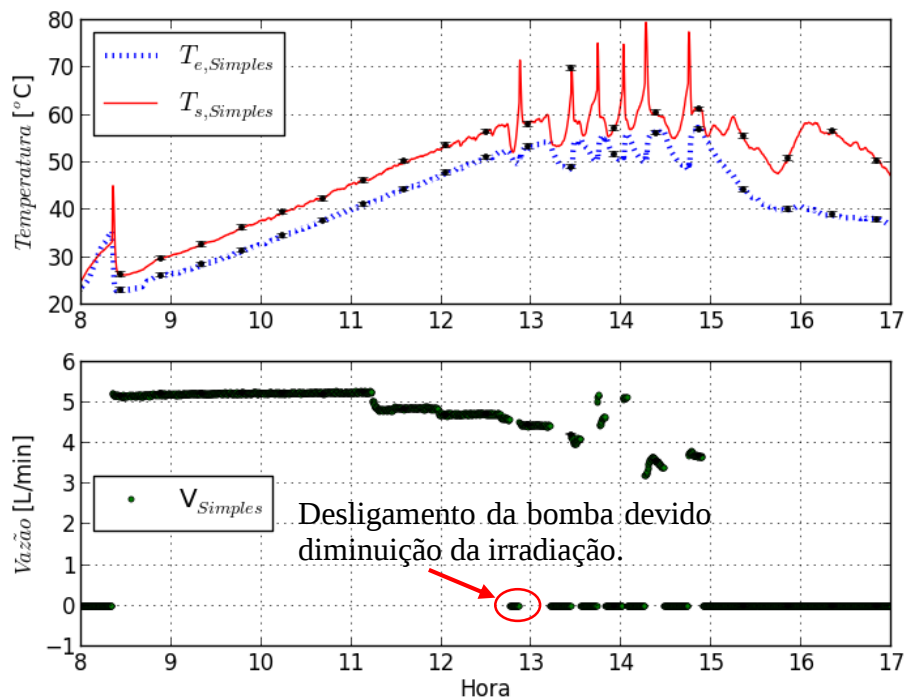


Figura 53 – Teste 5: Distribuição de temperaturas e vazão volumétrica do Sistema Simples.

A Figura 54 ilustra a operação do coletor com cobertura do Sistema Acoplado, que tem comportamento muito análogo ao do Sistema Simples.

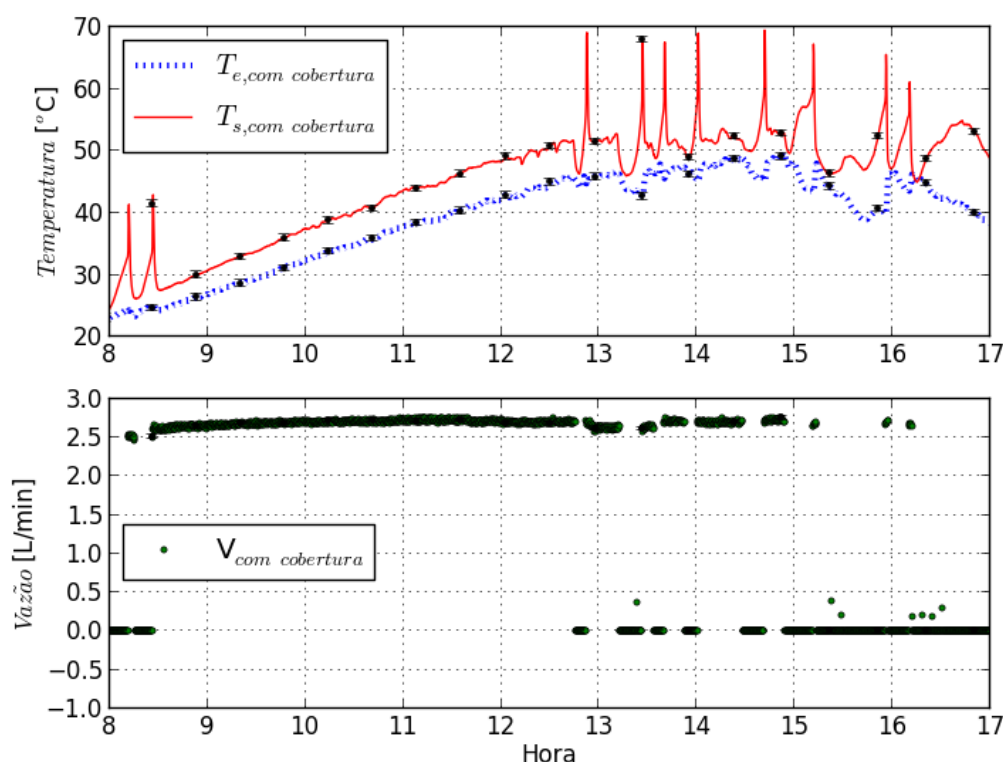


Figura 54 – Teste 5: Distribuição de temperaturas e vazão volumétrica do coletor com cobertura – Sistema Acoplado.

A Figura 55 mostra a operação do coletor sem cobertura do Sistema Acoplado, que operou continuamente até as 11 horas. No período das 11 às 12h40m operou de modo intermitente com temperatura de saída maior que a de entrada. Após esse horário, devido as flutuações na irradiação, a temperatura de saída ficou abaixo da de entrada e a bomba operou de forma intermitente.

A Figura 56 apresenta a energia útil absorvida para cada sistema e seus componentes. Nota-se que a energia térmica absorvida pelo coletor sem cobertura do Sistema Acoplado, no início da operação, é levemente superior aos demais, devido a menor temperatura no reservatório e também pelo retardo no acionamento das bombas dos demais coletores, necessário para atingir uma maior diferença de temperatura.

Os patamares evidenciados na Figura 56 indicam o não armazenamento de energia térmica, decorrente do desligamento da bomba causado pelas flutuações na irradiação, já comentadas anteriormente. A menor disponibilidade de irradiação solar implicou neste caso em menores níveis de energias térmicas absorvidas para todos os coletores.

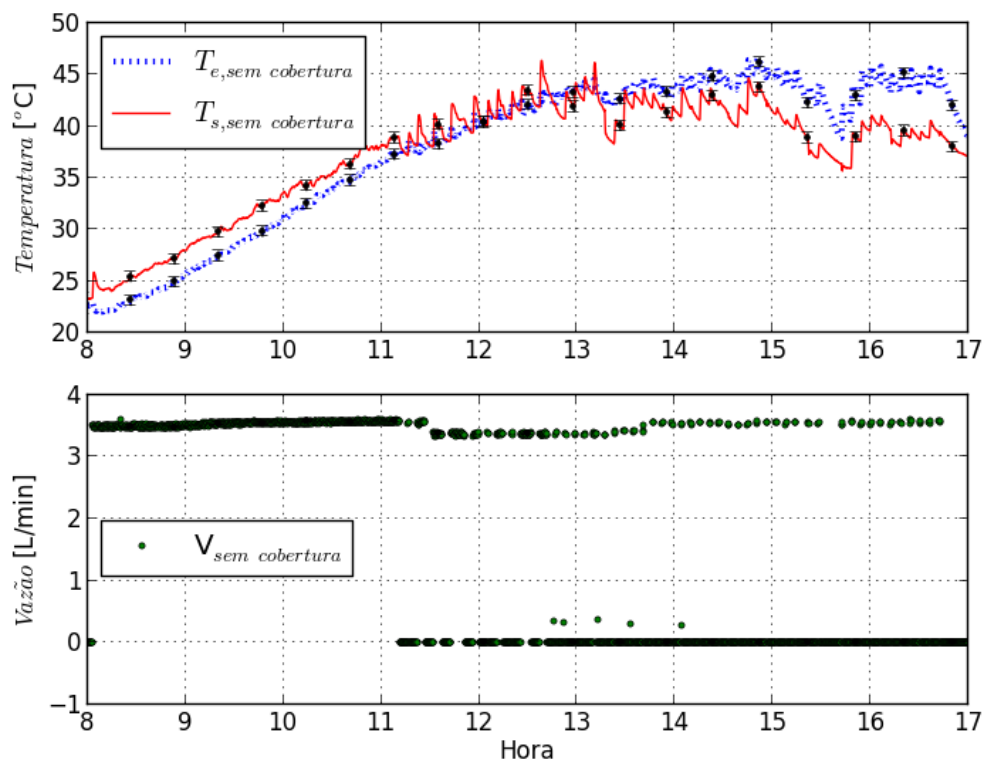


Figura 55 – Teste 5: Distribuição de temperaturas e vazão volumétrica do coletor sem cobertura – Sistema Acoplado.

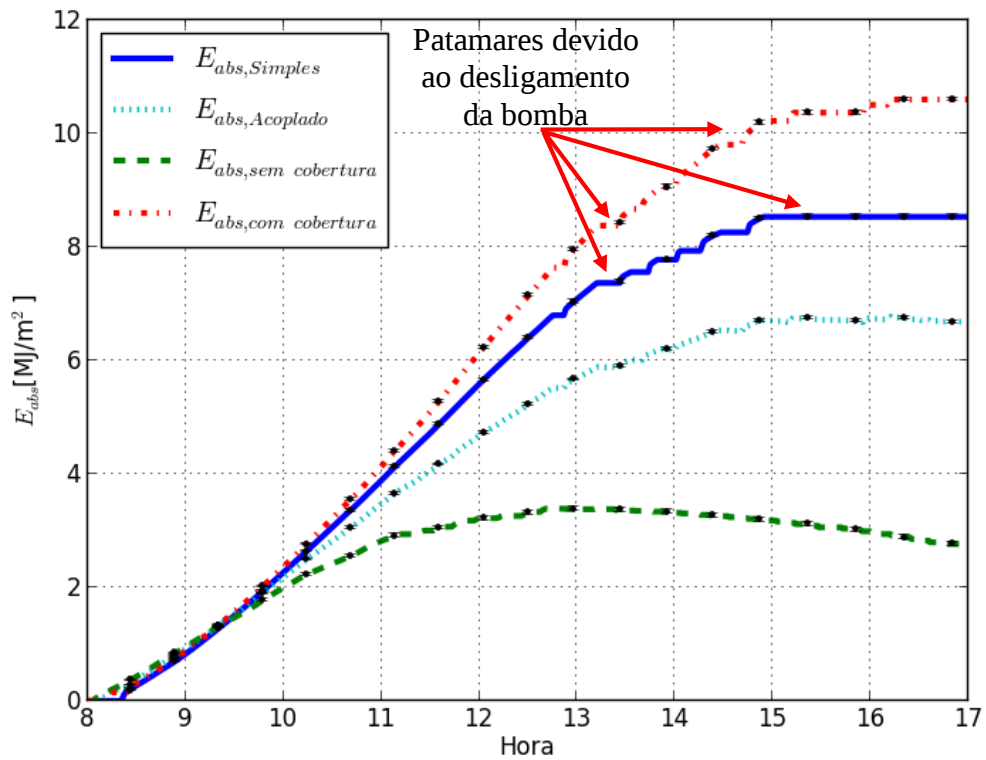


Figura 56 – Teste 5: Energia útil absorvida.

Na Figura 57, observa-se que a eficiência máxima do coletor sem cobertura ocorreu no início da operação, e foi decorrente da baixa temperatura do reservatório devido a não operação do coletor com cobertura nesse período, apresentando valores nulos.

As flutuações na irradiação no período da tarde também impactaram negativamente na eficiência térmica dos sistemas, promovendo grandes dispersões em seus valores.

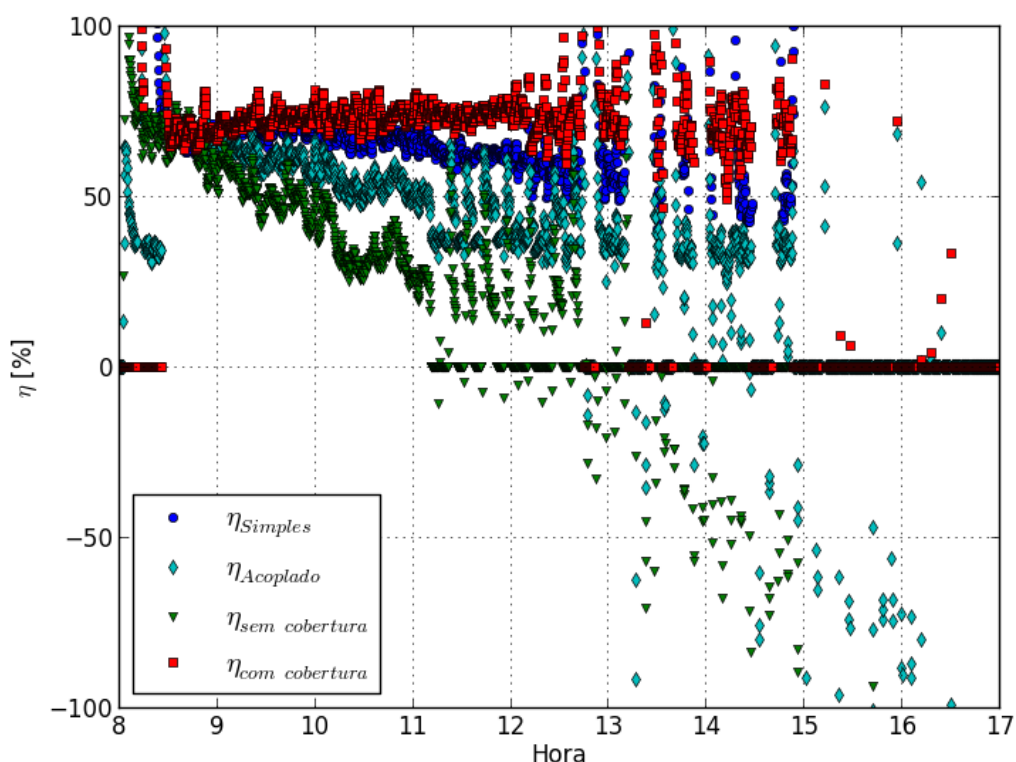


Figura 57 – Teste 5: Eficiência térmica.

5.6. Considerações adicionais

A Tabela 4 apresenta um resumo dos resultados obtidos de eficiência térmica acumulada ao final da operação para cada teste. Para o Teste 1 não foram calculados os valores de eficiência devido ao não acionamento da bomba do coletor sem cobertura. Nota-se que houve um aumento expressivo da eficiência para o coletor sem cobertura do Sistema Acoplado entre os Teste 2 e 3, devido a melhor estratificação térmica alcançada pela redução na vazão do coletor com cobertura. A alteração realizada no acionamento da bomba do coletor sem cobertura, entre os Testes 3 e 4, promoveu um aumento significativo na eficiência.

A Figura 58 apresenta os dados de eficiência do coletor com cobertura em função do parâmetro $T_e - T_a / G$ para todos os testes. Aplicando uma regressão linear obteve-se a curva operacional de eficiência. A curva de referência foi construída utilizando-se os parâmetros $F_R(\tau\alpha)_n$ e $F_R U_p$ fornecidos pelo fabricante. Percebe-se neste caso uma excelente concordância entre as curvas de operação e de referência, mesmo com a utilização de diferentes vazões.

Tabela 4 – Eficiência térmica acumulada.

	$\eta_{diária} [\%]$			
	2	3	4	5
Sistema Simples	$53,1 \pm 0,2$	$52,4 \pm 0,1$	$53,1 \pm 0,1$	$49,5 \pm 0,2$
Sistema Acoplado	$35,9 \pm 0,2$	$40,0 \pm 0,1$	$44,2 \pm 0,1$	$38,8 \pm 0,2$
Coletor sem cobertura	$1,6 \pm 0,2$	$11,0 \pm 0,2$	$20,1 \pm 0,2$	$16,0 \pm 0,2$
Coletor com cobertura	$70,1 \pm 0,2$	$68,8 \pm 0,1$	$68,3 \pm 0,1$	$61,5 \pm 0,2$

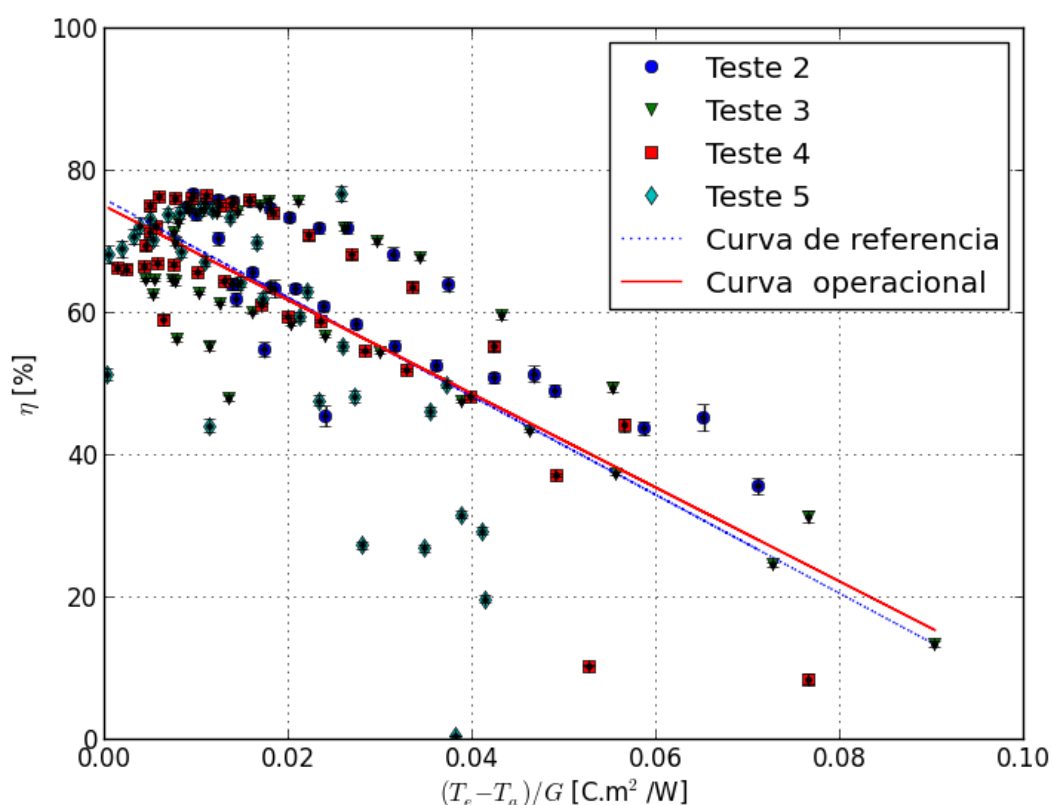


Figura 58 – Rendimento térmico coletor com cobertura.

Analogamente, a Figura 59 apresenta os dados de eficiência do coletor sem cobertura, onde verifica-se grandes desvios entre a curva de referência e a obtida em condições de operação. Dentre as razões que permitem justificar este desvio pode-se destacar o fato do coletor estar exposto ao ar ambiente nas superfícies inferior e superior e também a grande exposição ao vento local. Nos testes, somente a superior fica exposta, e com baixas condições de corrente de ar (testes *indoors*) o que aumentou significativamente as perdas de energia por convecção.

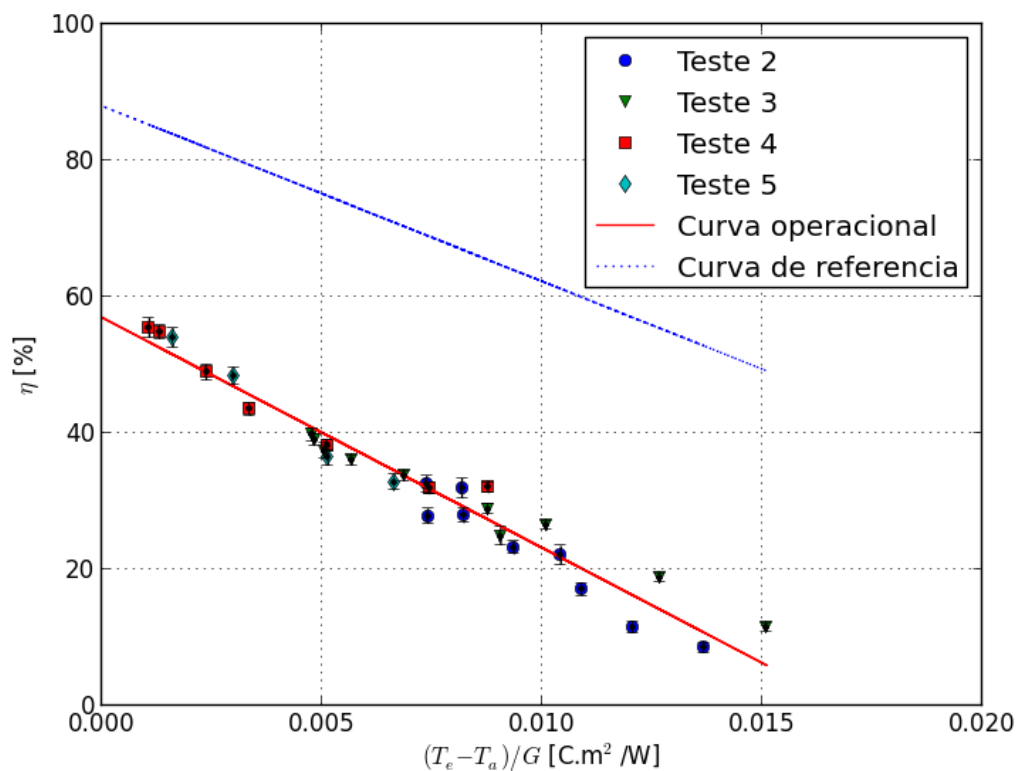


Figura 59 – Rendimento térmico coletor sem cobertura.

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O trabalho apresentado, de caráter experimental, avaliou a utilização de diversos parâmetros operacionais, tais como: método de acionamento da bomba de circulação de água, vazão volumétrica e diferenças de temperatura. O desenvolvimento do trabalho permitiu concluir que:

- A plataforma Arduino, utilizada para aquisição de dados e controle de operação dos sistemas, é de baixo custo, fácil implementação e flexível na programação;
- O método de acionamento da bomba inicialmente pensado, utilizando apenas a diferença de temperatura entre entrada e saída do coletor, mostrou-se totalmente ineficaz para o coletor sem cobertura. Nesta situação, devido ao diâmetro reduzido das tubulações não permitir a circulação por termossifão da água aquecida a temperatura de saída permanecia próxima a de entrada durante todo o dia;
- Um novo esquema de acionamento da bomba do coletor sem cobertura foi realizado, considerando um nível de irradiação ambiental e permitindo que a água aquecida recirculasse pelo sensor de temperatura de saída, permitindo assim, a sua operação com resultados satisfatórios;
- Em função da excessiva dissipação da energia armazenada no coletor sem cobertura nos períodos onde o tanque armazenador encontra-se a temperatura mais elevadas, concluiu-se que o tempo de operação da bomba em recirculação deve ser muito menor que o tempo de espera no sistema de controle;
- A redução da vazão nos coletores com cobertura proporcionou uma elevação na temperatura de saída do coletor o que melhorou a disponibilidade de energia no tanque (maior estratificação) e também a operação do coletor sem cobertura.
- O esquema de controle utilizando a temperatura de referência (T_{ref}) foi capaz de reduzir significativamente as perdas térmicas no final da tarde verificadas pela circulação nos coletores com cobertura, tornando-se assim um esquema interessante até mesmo para aplicação em sistemas comerciais.
- O coletor sem cobertura operou no sistema com eficiências térmicas muito abaixo do esperado pela sua curva de padronização, o que prejudicou significativamente o desempenho do Sistema Acoplado;

De maneira geral pode-se concluir que o Sistema Acoplado testado não foi capaz de superar o Sistema Simples em praticamente nenhuma condição de operação.

Entretanto, a sua utilização ainda não pode ser totalmente descartada antes de um maior estudo visando a melhoria das condições de operação do coletor sem cobertura de forma que trabalhe mais próximo das suas condições teóricas. Com eficiências maiores e algumas outras alterações, este conceito proposto pode vir a ser adequado em situações de alta demanda de energia associada a uma pequena área disponível.

Como foi destacado, este trabalho não esgota os estudos sobre o tema e, desta forma, propõe que o estudo deva continuar com trabalhos futuros em:

- Avaliar novos esquemas de controle tanto para Sistema Acoplados como Simples;
- Novos testes com reservatórios de maior capacidade proporcionaria uma melhora na estratificação térmica, podendo melhorar a eficiência dos coletores (principalmente o sem cobertura) e a eficiência Global dos Sistemas;
- A utilização de reservatórios independentes, no Sistema Acoplado para os coletores com e sem cobertura, com objetivo de evitar a redução da eficiência ao longo do dia. Neste caso, o abastecimento do reservatório do coletor com cobertura seria feito com água do reservatório do sem cobertura.
- Implementar esquemas capazes de aproximar o coletor sem cobertura das suas condições de teste de padronização incluindo no sistema, por exemplo, barreiras de vento, placa impermeável no fundo do coletor ou outros esquemas para este fim. Este procedimento é de fundamental importância para o sucesso do Sistema Acoplado, uma vez que o coletor sem cobertura deveria obedecer a premissa de operar com eficiências térmicas superiores ao de cobertura na faixa de temperaturas de entrada próximas às do ambiente.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, M. J.; WHITCOMB, P. J. **DOE simplified: practical tools for effective experimentation**. Third edition ed. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.

ARMENTA, C.; VOROBIEFF, P.; MAMMOLI, A. Summer off-peak performance enhancement for rows of fixed solar thermal collectors using flat reflective surfaces. **Solar Energy**, v. 85, n. 9, p. 2041–2052, 2011.

Atlas Solarimétrico do Brasil : banco de dados solarimétricos. ., 2000. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=publicacoes&task=livro&cid=2>>. Acesso em: 11/7/2016.

AVALLONE, E.; MIORALLI, P. C.; SCALON, V. L.; PADILHA, A. Thermal pyranometer using the arduino platform for data acquisition. Contemporary Problems of Thermal Engineering. **Anais...** , 044. v. 1, p.303–311, 2016. Katowice, Poland: Politechnika Slaska - ITC.

CHEN, G.; DOROSHENKO, A.; KOLTUN, P.; SHESTOPALOV, K. Comparative field experimental investigations of different flat plate solar collectors. **Solar Energy**, v. 115, p. 577–588, 2015.

CRISTOFARI, C.; NOTTON, G.; POGGI, P.; LOUCHE, A. Influence of the flow rate and the tank stratification degree on the performances of a solar flat-plate collector. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 42, n. 5, p. 455–469, 2003.

DEL COL, D.; PADOVAN, A.; BORTOLATO, M.; DAI PRÈ, M.; ZAMBOLIN, E. Thermal performance of flat plate solar collectors with sheet-and-tube and roll-bond absorbers. **Energy**, v. 58, p. 258–269, 2013.

DORFLING, C.; HORNUNG, C. H.; HALLMARK, B.; et al. The experimental response and modelling of a solar heat collector fabricated from plastic microcapillary films. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 94, n. 7, p. 1207–1221, 2010.

Energia Solar Paulista - Levantamento do Potencial. ., 2013. Disponível em: <<http://www.energia.sp.gov.br/portal.php/atlas-solar>>. Acesso em: 11/7/2016.

Fascitec Controladores Eletônicos. .Disponível em: <<http://www.facel.ind.br/>>. Acesso em: 15/7/2016.

FILIFELOP Componentes Eletrônicos. .Disponível em: <<http://www.filieflop.com/>>. Acesso em: 14/7/2016.

GARCÍA, A.; MARTIN, R. H.; PÉREZ-GARCÍA, J. Experimental study of heat transfer enhancement in a flat-plate solar water collector with wire-coil inserts. **Applied Thermal Engineering**, v. 61, n. 2, p. 461–468, 2013.

HENDEN, L.; REKSTAD, J.; MEIR, M. Thermal performance of combined solar systems with different collector efficiencies. **Solar Energy**, v. 72, n. 4, p. 299–305, 2002.

HERCE-VIGIL, J. L.; SUAREZ, R. Analysis of a plastic solar collector. **Energy Conversion and Management**, v. 31, n. 3, p. 243–254, 1991.

HOSSAIN, M. S.; PANDEY, A. K.; TUNIO, M. A.; et al. Thermal and economic analysis of low-cost modified flat-plate solar water heater with parallel two-side serpentine flow. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 123, n. 1, p. 793–806, 2016.

ICERI, D. M. **Análise da relação desempenho/custo de alguns coletores solares comerciais**, 2014. Bauru: Universidade Estadual Paulista. Disponível em: <<http://www2.feb.unesp.br/pos/bibliotecavirtual/documento.php?COD=b3967a0e938dc2a6340e258630febd5a#>>. .

IHADDADENE, N.; IHADDADENE, R.; MAHDI, A. Effect of glazing number on the performance of a solar thermal collector. . p.1–6, 2014. IEEE. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6826912>>. Acesso em: 8/7/2016.

ISMAIL, K. A. R. **Técnicas experimentais em fenômenos de transferência**. Campinas: Ed. do autor, 2000.

KALOGIROU, S. **Solar energy engineering : processes and systems**. 1st ed. United States of America: Elsevier Inc, 2009.

KALOGIROU, S. A. Solar thermal collectors and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 30, n. 3, p. 231–295, 2004.

KIM, S. IN; KISSICK, J.; SPENCE, S.; BOYLE, C. Design, analysis and performance of a polymer–carbon nanotubes based economic solar collector. **Solar Energy**, v. 134, p. 251–263, 2016.

LENEL, U. R.; MUDD, P. R. A review of materials for solar heating systems for domestic hot water. **Solar Energy**, v. 32, n. 1, p. 109–120, 1984.

MARTINOPOULOS, G.; MISSIRLIS, D.; TSILINGIRIDIS, G.; YAKINTHOS, K.; KYRIAKIS, N. CFD modeling of a polymer solar collector. **Renewable Energy**, v. 35, n. 7, p. 1499–1508, 2010.

NÁBÌLEK, B.; KIRAN, E.; TÜRKSÖY, F.; YAZAR, A. Performance of an unglazed textile-plastic solar absorber. **Renewable Energy**, v. 16, n. 1, p. 635–638, 1999.

NIKOLIĆ, N.; LUKIĆ, N. A mathematical model for determining the optimal reflector position of a double exposure flat-plate solar collector. **Renewable Energy**, v. 51, p. 292–301, 2013.

NIKOLIĆ, N.; LUKIĆ, N. Theoretical and experimental investigation of the thermal performance of a double exposure flat-plate solar collector. **Solar Energy**, v. 119, p. 100–113, 2015.

O'BRIEN-BERNINI, F. C.; MCGOWAN, J. G. Performance modeling of non-metallic flat plate solar collectors. **Solar Energy**, v. 33, n. 3–4, p. 305–319, 1984.

OGUEKE, N. V.; ANYANWU, E. E.; EKECHUKWU, O. V. A review of solar water heating systems. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 1, n. 4, 2009.

PINDADO, S.; CUBAS, J.; SORRIBES-PALMER, F. The Cup Anemometer, a Fundamental Meteorological Instrument for the Wind Energy Industry. Research at the IDR/UPM Institute. **Sensors**, v. 14, n. 11, p. 21418–21452, 2014.

Plano Paulista de Energia - PPE 2020. ., 2012. Disponível em: <http://www.energia.sp.gov.br/portal.php/plano_paulista_ppe>. Acesso em: 11/7/2016.

Robertshaw. .Disponível em: <<https://www.robertshaw.com/pt-BR/>>. Acesso em: 14/7/2016.

SHOJAEIZADEH, E.; VEYSI, F.; YOUSEFI, T.; DAVODI, F. An experimental investigation on the efficiency of a Flat-plate solar collector with binary working fluid: A case study of propylene glycol (PG)–water. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 53, p. 218–226, 2014.

Solis Aquecedor Solar. .Disponível em: <<http://www.solis.ind.br/>>. Acesso em: 14/7/2016.

SOPIAN, K.; SAHARI, J.; MOHD. YUSOF HJ. OTHMAN; ACHMAD ZULKIFLY LUBIS. Performance monitoring of a thermosyphon solar hot water heater with a parallel thermoplastic natural rubber tube absorber. **Renewable Energy**, v. 4, n. 5, p. 561–577, 1994.

SOPIAN, K.; ZULKIFLI, R.; SAHARI, J.; OTHMAN, M. Y. Thermal performance of thermoplastic natural rubber solar collector. **Journal of Materials Processing Tech.**, v. 123, n. 1, p. 179–184, 2002.

SUMAN, S.; KHAN, M. K.; PATHAK, M. Performance enhancement of solar collectors—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 192–210, 2015.

TSILINGIRIS, P. T. Heat transfer analysis of low thermal conductivity solar energy absorbers. **Applied Thermal Engineering**, v. 20, n. 14, p. 1297–1314, 2000.

TSILINGIRIS, P. T. Back absorbing parallel plate polymer absorbers in solar collector design. **Energy Conversion and Management**, v. 43, n. 1, p. 135–150, 2002.

VAN NIEKERK, W. M. K.; SCHEFFLER, T. B. Measured performance of a solar water heater with a parallel tube polymer absorber. **Solar Energy**, v. 51, n. 5, p. 339–347, 1993.

YOUNG, D. F. (ORG.). **A brief introduction to fluid mechanics**. 5th ed ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2011.

ZAHEED, L.; JACHUCK, R. J. J. Review of polymer compact heat exchangers, with special emphasis on a polymer film unit. **Applied Thermal Engineering**, v. 24, n. 16, p. 2323–2358, 2004.