

**ADONIS MENEZES**

**CONVERSÃO FOTOTÉRMICA EM NANOFLUIDOS  
UTILIZANDO COLETOR PLANO MONTADO EM  
POSICIONADOR SOLAR**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

**2015**

**ADONIS MENEZES**

**CONVERSÃO FOTOTÉRMICA EM NANOFLUIDOS UTILIZANDO  
COLETOR PLANO MONTADO EM POSICIONADOR SOLAR**

**Dissertação** apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título **de MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Transferência de calor e Mecânica dos fluidos

Orientador: Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho

**UBERLÂNDIA - MG**

**2015**

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

---

M543c      Menezes, Adonis,  
2015      Conversão fototérmica em nanofluidos utilizando coletor plano  
montado em posicionador solar / Adonis Menezes. - 2015.  
76 f. : il.

Orientador: Enio Pedone Bandarra Filho.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.  
Inclui bibliografia.

1. Engenharia Mecânica - Teses. 2. Nanofluidos – Teses. I. Bandarra  
Filho, Enio Pedone. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

---

*Ao Deus pai todo poderoso, por me  
agraciar com uma família, Tanise, Laura e Leila,  
minhas alegrias de viver;*

*Aos meus pais pelo exemplo de vida e  
humildade.*

*Arqonís Menezes*

## AGRADECIMENTOS

Ao Deus pai todo poderoso, por me dar força e saúde em mais esta empreitada.

A minha família, minha esposa Tanise, minhas filhas Laura e Leila, por estarem sempre ao meu lado e por me auxiliarem nos momentos difíceis, sendo minhas fontes de inspiração e motivação.

Aos meus pais, Maria e Miguel, pelo amor incondicional.

Ao Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho pela orientação e apoio no desenvolvimento desta dissertação.

Ao grupo do Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e nanotecnologia, LEST-Nano, por toda a ajuda técnica e acadêmica na elaboração deste documento, em especial ao casal Abdul e Elena que contribuíram imensamente no desenvolvimento deste trabalho.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pelo apoio à pesquisa e ao financiamento na participação de congressos nacionais.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina – Campus Chapecó, por possibilitar mediante afastamento integral das minhas atividades de professor, no período de dezessete meses a realização deste curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo apoio financeiro.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pelo apoio à pesquisa e ao financiamento na participação de congressos nacionais.

A todos os professores e funcionários da Universidade Federal de Uberlândia e da Coordenação da Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, que direta e indiretamente contribuíram para a realização desta dissertação de mestrado.

Aos técnicos de laboratório da FEMEC, Eurípedes Balsanulfo Alves, Lázaro Henrique Alves Vieira, Renato Franco da Silva e Reinaldo Tomé Paulino, pelo grande auxílio na construção e montagem do aparato experimental.

Ao Engenheiro Mecânico da FEMEC, Luis Antonio, por conseguir um local excelente para realização dos testes, depois de um árduo período de tratativas.

MENEZES, A. **Conversão Fototérmica em Nanofluidos Utilizando Coletor Plano Montado em Posicionador Solar**. 2015. 94 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

### Resumo

Este trabalho investigou experimentalmente a conversão fototérmica em nanofluidos de prata/água, com diferentes concentrações de nanopartículas dispersas no fluido base. Nanofluidos estáveis foram obtidos com homogeneizador de alta pressão e os experimentos foram realizados sob radiação solar direta durante diferentes períodos do dia, simulando assim condições reais de operação. Visando obter o maior rendimento possível, foi desenvolvido um posicionador solar, sendo que este possibilitou o acompanhamento do sol tanto na variação horária quanto na mudança da inclinação dos raios solares e também em outras variáveis controladas. Foram estudadas as diversas concentrações de nanopartículas nos nanofluidos, buscando verificar a influência de tal variável no processo de absorção de energia e também nas modificações das propriedades termofísicas do fluido. A condução dos testes respeitou as normas regulamentadoras e possibilitou expandir os conhecimentos a cerca da conversão fototérmica utilizando nanofluidos. Os resultados mostraram que o nanofluido apresentou menor capacidade de conversão fototérmica que a água destilada em circuito direto, utilizando a convecção natural como meio de circulação do fluido. O reservatório com água apresentou incremento de até 4,5°C na temperatura média, já o reservatório com nanofluido ( $\phi_v=0,008\%$  de Ag) apresentou elevações de temperatura menores, não passando de 2,2°C. Isto ocorreu em função do aumento da viscosidade dinâmica do nanofluido o que induz ao aumento da perda de carga no escoamento e conseqüentemente a redução da vazão mássica.

---

Palavras chave: *Nanofluidos, Posicionador Solar, Conversão Fototérmica*

MENEZES, A. **Photothermal conversion in nanofluids Using Collector Plan Mounted in the Solar Positioner**. 2015. 94 p. M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia

### **Abstract**

This study investigated experimentally photothermal conversion silver nanofluids / water with different concentrations of nanoparticles dispersed in the base fluid. Stable nanofluids were obtained with high-pressure homogenizer and the experiments were performed under direct sunlight during different times of the day, simulating actual operating conditions. To obtain the best possible performance, a solar positioner was developed, and this enabled the monitoring of the sun as much as the time variation in changing the inclination of the sun's rays and also in other controlled variables. We studied the different concentrations of nanoparticles in nanofluids, seeking to verify the influence of this variable in the energy absorption process and also in modifications of thermo-physical properties of the fluid. The conduct of the tests complied with the regulatory standards and possible expands the knowledge about the photothermal conversion using nanofluids. The results showed that the lowest nanofluid presented photothermal conversion capability that distilled water circuit directly, using natural convection as a means of fluid circulation. The water tank grew by up to 4.5°C in average temperature since the reservoir with nanofluid ( $\phi_v=0,008\%$  de Ag) showed lower temperature rises, or up to 2.2°C. This was due to the increased dynamic viscosity nanofluid which leads to increased pressure drop in the flow and consequently the reduction of mass flow.

---

Keywords: Nanofluids, Solar Positioner, Photothermal Conversion



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Coletor solar convencional. Fonte: site da empresa THERMO/SOLAR Žiar s.r.o .....	6
Figura 2.2 – Efeito termossifão – convecção natural.....	7
Figura 2.3 – Célula fotovoltaica da Bell Labs. Fonte: Bell Labs.....	10
Figura 2.4 – Coletor solar híbrido – PVT. Fonte: Naked Energy's-Inglaterra .....	11
Figura 2.5 – Coordenadas horizontais celestiais. Fonte: (CAMACHO <i>et al.</i> , 2012) .....	12
Figura 2.6 - Coordenadas numa superfície inclinada. Fonte: (CAMACHO <i>et al.</i> , 2012) .....	12
Figura 2.7 – Equação do tempo solar em função dos dias do ano. Fonte: (DUFFIE; BECKMAN).....	13
Figura 3.1 – Diagrama esquemático da bancada experimental.....	24
Figura 3.2 – Concepção da estrutura de testes.....	25
Figura 3.3 – Posicionador solar. ....	27
Figura 3.4 – Controle da movimentação solar, (A) ângulo horário, (B) inclinação solar.....	27
Figura 3.5 – Reservatório térmico.(A) caixa d'água e isolante (B) reservatório pronto com entrada e saída de fluido. ....	28
Figura 3.6 – Coletor solar construído para os testes.Sendo a seqüência (a), (b) (c) a de construção e (d) o coletor pronto. ....	29
Figura 3.7 – Célula fotovoltaica calibrada .....	30
Figura 3.8 – Soldagem de termopares.....	31

Figura 3.9 – Sistema de aquisição de dados da National Instruments.(A) Chassi, (B) Módulo .....	32
Figura. 3.10 – Programa no LabWiew utilizado nos testes.....	33
Figura. 4.1 – Homogeneizador: a) foto do equipamento e b) visão esquemática. ....	35
Figura 4.2 – Estrutura experimental em funcionamento .....	37
Figura. 5.1 – Resultados obtidos na verificação do isolamento do reservatório térmico no qual circula água destilada .....	40
Figura. 5.2 – Resultados obtidos na verificação do isolamento do reservatório térmico no qual circula nanofluido .....	40
Figura. 5.3 – Temperatura na saída dos coletores solares .....	41
Figura. 5.4 – Temperaturas no reservatório no qual circula nanofluido, $\phi v = 0,0005\%$ de Ag .....	41
Figura. 5.5 - Temperaturas no reservatório no qual circula água destilada .....	42
Figura 5.6 - Temperatura na saída dos coletores solares .....	43
Figura 5.7 – Temperaturas no reservatório que circula nanofluido, $\phi v = 0,0005\%$ de Ag ....	43
Figura 5.8 - Temperaturas no reservatório que circula água destilada.....	44
Figura 5.9 – Temperatura na saída dos coletores solares .....	45
Figura 5.10 – Temperaturas no reservatório que circula nanofluido, $\phi v = 0,0005\%$ de Ag ..	45
Figura 5.11 – Temperaturas no reservatório que circula água destilada .....	46
Figura 5.12 – Temperatura na saída dos coletores solares .....	47
Figura 5.13 – Temperaturas no reservatório no qual circula nanofluido, $\phi v = 0,0005\%$ de Ag .....	47
Figura 5.14 - Temperaturas no reservatório no qual circula água destilada .....	48
Figura 5.15 – Temperatura na saída dos coletores solares .....	49

Figura 5.16 – Temperaturas no reservatório no qual circula nanofluido, $\phi v = 0,065\%$ de Ag .....	49
Figura 5.17 - Temperaturas no reservatório no qual circula água destilada .....	50
Figura 5.18 – Volume de controle estudado no experimento .....	50
Figura 5.19 – Reservatórios térmicos, (A) durante fabricação, (B) em teste .....	53
Figura 5.20 – Diagrama esquemático do sistema com circuito aberto .....	53
Figura 5.21 – Temperaturas nas saídas dos coletores.....	54
Figura 5.22 - Temperaturas no reservatório com nanofluido, $\phi v = 0,008\%$ de Ag .....	54
Figura 5.23 – Temperaturas no reservatório com água destilada.....	55
Figura 5.24 – Temperaturas na saída dos coletores .....	56
Figura 5.25 – Temperaturas no reservatório com nanofluido, $\phi v = 0,008\%$ de Ag.....	56
Figura 5.26 – Temperaturas no reservatório com água destilada.....	57
Figura 5.27 – Temperaturas nas saídas dos coletores.....	58
Figura 5.28 – Temperaturas no reservatório com nanofluido, $\phi v = 0,008\%$ de Ag.....	58
Figura 5.29 – Temperaturas no reservatório com água destilada.....	59
Figura 6.1 – Reservatório térmico para sistemas anti-congelantes. Fonte: Tencnosol® .....	63
Figura A.1 – Mancal para alojamento de rolamento cônico .....	68
Figura A.2 – Flange do pedestal .....	69
Figura A.3 – Flange com eixo .....	70
Figura A.4 – Conjunto girante do posicionador solar .....	71
Figura A.5 – Termômetro padrão .....	72

Figura A.6 – Aparato experimental usado na calibração .....	73
Figura A.7 – Calibração inicial .....	74
Figura A.8 – Curva de calibração .....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Condutividade térmica em diferentes metais.....	18
Tabela 2.2 – Condutividade térmica em fluidos base.....	19
Tabela 4.1 – Propriedades termofísicas dos nanofluidos de prata testados.....	36
Tabela 5.1 – Resultados obtidos em circuito fechado (indireto) .....	52
Tabela 5.2 - Resultados obtidos em circuito aberto (direto) .....	60
Tabela 5.3 – Resultados obtidos no Teste – 8 .....	60
Tabela A.1 – Radiação solar incidente .....	75

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras latinas

$B$	Dia solar
$cp_{np}$	Calor específico da nanopartícula [ $J.kg/K$ ]
$cp_{fb}$	Calor específico do fluido base [ $J.kg/K$ ]
$cp_{nf}$	Calor específico do nanofluido [ $J.kg/K$ ]
$E$	Tempo solar
$h_s$	Entalpia de saída [ $J/kg$ ]
$h_e$	Entalpia de entrada [ $J/kg$ ]
$k_{nf}$	Condutividade térmica do nanofluido [ $W/mK$ ]
$k_{fb}$	Condutividade térmica do fluido base [ $W/mK$ ]
$k_{np}$	Condutividade térmica da nanopartícula [ $W/mK$ ]
$k$	Condutividade térmica do fluido a ser testado [ $W/mK$ ]
$L_p$	Longitude padrão [ $^\circ$ ]
$L_{lo}$	Longitude local [ $^\circ$ ]
$m$	Massa de fluido [ $kg$ ]
$m_{fb}$	Massa de nanofluido [ $kg$ ]
$m_{np}$	Massa de nanopartículas [ $kg$ ]
$\dot{m}$	Vazão mássica [ $kg/s$ ]
$n$	Número do dia
$N$	Número de horas de sol

$Q$	Quantidade de calor absorvida em uma hora [W]
$\dot{Q}_{v.c}$	Fluxo de calor no volume estudado [W/s]
$R$	Radiação solar incidente [W/m <sup>2</sup> ]
$ts$	Hora solar [min]
$tp$	Hora padrão [min]
$T_s$	Hora solar [horas]

#### Letras gregas

$\alpha$	Difusividade térmica [m <sup>2</sup> /s]
$\alpha_s$	Altitude solar [°]
$\beta$	Inclinação [°]
$\gamma$	Ângulo azimutal [°]
$\gamma_s$	Ângulo azimutal solar [°]
$\Delta T$	Diferença de temperatura [°C]
$\delta$	Declinação [°]
$\theta$	Radiação solar incidente [W/m <sup>2</sup> ]
$\theta_z$	Massa específica da nanopartícula
$\mu_{nf}$	Viscosidade dinâmica do nanofluido [kg/m.s]
$\mu_{fb}$	Viscosidade dinâmica do fluido base [kg/m.s]
$\mu_{np}$	Viscosidade dinâmica da nanopartícula [kg/m.s]
$\rho_{fb}$	Massa específica do fluido base [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{np}$	Massa específica da nanopartícula [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{nf}$	Massa específica do nanofluido [kg/m <sup>3</sup> ]
$\Phi$	Latitude geográfica [°]
$\phi_v$	Concentração volumétrica de nanopartículas
$\phi$	Concentração mássica de nanopartículas

$\psi$	Parâmetro de esfericidade da partícula
$\omega$	Ângulo horário [°]
$\omega_s$	Ângulo horário ao nascer do sol [°]

#### Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	American National Standards Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
FEM	Força eletromotriz
FEMEC	Faculdade de Engenharia Mecânica
GUM	Guide Uncertainty Method
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LEST-Nano	Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PVT	Fotovoltaico e fototérmico
UFU	Universidade Federal de Uberlândia



# SUMÁRIO

CAPITULO I - Introdução.....	1
1.1.    Motivação .....	1
1.2.    Objetivos.....	2
1.3.    Organização do texto .....	3
CAPITULO II - Revisão Bibliográfica.....	5
2.1.    Considerações Iniciais .....	5
2.2.    Conversão Fototérmica.....	5
2.3.    Utilização da Energia Solar Fototérmica .....	7
2.4.    Energia Solar Fotovoltaica .....	9
2.5.    Sistemas híbridos (PVT) .....	10
2.6.    Fundamentos gerais da energia solar .....	11
2.7.    Nanofluidos.....	15
2.8.    Propriedades termofísicas dos nanofluidos.....	16
2.8.1.    Massa específica.....	17
2.8.2.    Condutividade térmica.....	18
2.8.3.    Calor específico.....	20
2.8.4.    Viscosidade.....	21
2.8.5.    Síntese de nanofluidos.....	21
CAPITULO III - Bancada Experimental .....	23
3.1.    Considerações iniciais .....	23
3.2.    Projeto da bancada experimental.....	24

3.3.	Componentes da bancada experimental .....	25
3.3.1.	Posicionador Solar .....	25
3.3.2.	Reservatórios térmicos .....	28
3.3.3.	Coletores solares fototérmicos .....	28
3.3.4.	Célula fotovoltaica calibrada.....	29
3.3.5.	Termopares.....	30
3.3.6.	Aquisição de dados .....	31
CAPÍTULO IV – Metodologia experimental .....		34
4.1.	Metodologia dos testes .....	34
4.2.	Caracterização de nanofluidos .....	35
4.3.	Planejamento dos testes .....	37
CAPITULO V - Resultados e discussões .....		39
CAPITULO VI - Conclusões.....		62
6.1.	Sugestões para trabalhos futuros.....	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		64
ANEXOS .....		68
Bancada Experimental .....		68
Calibração dos termopares .....		72
Radiação solar direta incidente .....		76

# CAPITULO I

## INTRODUÇÃO

### 1.1. Motivação

Atualmente os esforços da comunidade científica estão voltados para a sustentabilidade, onde conceitos de “energia limpa” e “energia renovável” são amplamente debatidos, pesquisados e utilizados. Dentre estas fontes alternativas, a energia solar é o recurso mais explorável, ela pode ser usada de forma gratuita, em qualquer lugar do planeta e não precisa ser transportada, pois a intensidade luminosa provida pelo sol ocupa todos os espaços. As aplicações da energia solar incluem utilização de energia solar térmica, geração de energia elétrica a partir de células fotovoltaicas e conversão fotoquímica. Utilização de energia solar térmica é a aplicação mais popular, coletores solares são amplamente utilizados para a conversão fototérmica, principalmente para o aquecimento de água em residências.

O contínuo desenvolvimento da nanotecnologia é um poderoso aliado para a pesquisa de fluidos de trabalho para trocadores de calor com fonte solar. Nanopartículas apresentam propriedades diferentes se comparadas as do mesmo material em escala normal, pois apareceram efeitos provocados pelo seu tamanho reduzido, efeitos de fronteira, efeitos quânticos e assim por diante, tal fato é explicado se for levado em consideração às imperfeições do material que nas nanopartículas praticamente inexistem. As nanopartículas apresentam propriedades ópticas diferentes, do metal que as deu origem, o que leva a ter uma excelente propriedade de fotoabsorção. Considerando-se este fato, as nanopartículas trazem um aumento considerável na transferência de calor do nanofluido, sendo que este nada mais é do que – uma dispersão coloidal de nanopartículas de um metal ou de óxido de metal em solução líquida, por exemplo, a água. Experimentos com nanopartículas absorvendo energia solar no volume de líquido são recentes (BANDARRA FILHO *et al.*,

2014) e (MOGHADAM *et al.*, 2014). Comparando-se com as partículas de tamanho não nanométrico, as nanopartículas oferecem o benefício adicional de aumento exponencial da superfície de contato (“razão de aspecto”) para o mesmo volume de partículas.

Nos últimos anos, as propriedades de radiação de uma série de nanomateriais foram investigadas experimentalmente (SANI, 2010), (OTANICAR *et al.*, 2010), (TAYLOR *et al.*, 2010), (LENERT; WANG, 2012), (HE; WANG.; ZENG, 2013) e algumas teorias foram propostas para maximizar a eficiência de conversão fototérmica sob concentrações otimizadas de partículas (TYAGI; PHELAN; PRASHER, 2007), (OTANICAR *et al.*, 2010). A maioria dos estudos baseou-se em condições de laboratório – radiação solar simulada – e utilizando-se pequeno volume de nanofluidos - poucos mililitros. Este trabalho irá investigar o uso de nanofluidos de prata na conversão fototérmica por efeito termossifão, com volumes consideráveis de até treze litros de fluido, sendo analisada a influência da concentração de partículas na eficiência da conversão de energia em coletores similares aos que são amplamente usados em residências em circuitos abertos e fechados.

## 1.2. Objetivos

O objetivo geral é avaliar o desempenho do nanofluido quando submetido à conversão fototérmica em coletor solar por efeito de termossifão paralelamente à água destilada. Para tanto outras metas deverão ser alcançadas para fundamentar os resultados objetivados e objetivos específicos foram estabelecidos para descrever as etapas a serem atingidas para correta execução e finalização do trabalho.

- Realizar um estudo geral e contínuo sobre energia solar, desde seu histórico até aplicações atuais.
- Estudar de forma contínua os nanofluidos, desde sua caracterização até aplicações correlatas.
- Projetar e construir o posicionador solar, para melhor recepção dos raios solares incidentes.
- Fabricar coletores solares em tamanho reduzido, adequados ao estudo proposto.
- Produzir reservatórios devidamente isolados, para armazenamento dos fluidos, seja em ciclos fechados ou abertos.
- Estruturar uma interface gráfica no software LabVIEW®, para aquisição e armazenamento de dados, com o intuito de registrar e visualizar as variáveis de controle (temperatura, tempo e radiação solar).

- Homogeneizar nanofluidos a partir de nanopartículas ou através de nanofluidos mais concentrados, visando obter dispersões homogêneas e estáveis.
- Caracterizar e determinar as propriedades termofísicas tais como (condutividade térmica, viscosidade e calor específico) dos nanofluidos.
- Avaliar experimentalmente o desempenho fototérmico dos nanofluidos de prata à base de água (Ag/água).
- Analisar os resultados experimentais, determinando se o nanofluido possui melhor desempenho do que a água na transferência de calor.

### 1.3. Organização do texto

O texto está organizado descrevendo todas as etapas realizadas para alcançar o objetivo geral. Para isto o trabalho é composto por seis capítulos devidamente divididos e mais um capítulo de anexos, detalhando a execução do trabalho.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, primeiramente são apresentados os estudos sobre energia solar e posteriormente os estudos sobre nanofluidos. Dentre os estudos sobre energia solar estão abordados os conceitos de conversão fototérmica, efeito termossifão, o histórico de utilização da energia solar e suas aplicações atuais e principalmente como o sol incide sobre nosso planeta. Quanto aos nanofluidos, são estudadas suas características termofísicas (massa específica, calor específico, condutividade térmica e viscosidade) e o que isto interfere na transferência de calor.

O capítulo 3 apresenta o desenvolvimento da bancada experimental. A concepção, projeto e construção do posicionador solar, dos reservatórios térmicos, dos coletores solares e também dos itens de controle do sistema tais como os sensores de temperatura do tipo termopar, da célula fotovoltaica calibrada e do sistema de aquisição de dados.

O capítulo 4 mostra a metodologia experimental utilizada para o desenvolvimento dos testes. Desde a caracterização de nanofluidos até a análise termodinâmica do processo.

No capítulo 5 são apresentados os resultados e discussões a cerca do problema físico proposto, explicando o porquê destes valores.

O capítulo 6 conclui o trabalho e norteia novos trabalhos correlatos, pois conclusões diferentes podem ser obtidas em outras aplicações.

Finalmente o capítulo de anexos descreve particularidades do projeto como um todo. Neste capítulo estão apresentados detalhes do funcionamento estrutura experimental, como foi realizada a calibração dos termopares e mostra croquis do projeto estrutural

## **CAPITULO II**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **2.1. Considerações Iniciais**

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica realizada ao longo de todas as etapas do presente trabalho. Inicialmente são abordados os conceitos de energia solar, são descritas as principais características desta fonte energética abundante que é o sol. Como começou a utilização do sol como fonte de energia e sua imensa importância para existência de vida no planeta. As primeiras células fotovoltaicas e o equacionamento que explica analiticamente o deslocamento da Terra em torno do Sol e suas conseqüências na direção e intensidade dos raios solares.

A partir da sétima seção desta revisão bibliográfica são abordados os estudos sobre nanofluidos, o histórico de utilização, o que a inserção de nanopartículas altera nas propriedades termofísicas do fluido tais como massa específica, calor específico, condutividade térmica e viscosidade, promovendo ou não a intensificação e melhoramento da eficiência dos processos de transferência de calor.

#### **2.2. Conversão Fototérmica**

A conversão fototérmica é a utilização da radiação solar com fins de aquecimento de um determinado material, geralmente fluido. Neste sentido o calor solar é aproveitado diretamente sem transformações intermediárias, que acontecem na conversão fotovoltaica e na conversão fotoquímica.

Este tipo de transformação energética está relacionado ao aquecimento de líquidos ou gases devido à absorção dos raios solares ocasionando seu aquecimento. Com ampla

utilização no aquecimento de água para uso residencial. Podendo ter outras aplicações, como no aquecimento de gases para secagem de grãos, condicionamento de temperaturas internas (climatização de ambiente).

A técnica de transformação da energia provida pelo sol em aquecimento utiliza um coletor solar que vai captar a energia proveniente dos raios solares, transferindo para o fluido e este será levado para um reservatório isolado termicamente, comumente chamado de boiler, onde o líquido ou gás será acondicionado. Existe uma gama de diferentes tipos de coletores, estes podem ser coletores concentradores do tipo parabólico que usa dispositivos para concentrar a radiação solar direta; ou coletores planos: que são as conhecidas placas solares, tais placas geralmente possuem trocadores internos de calor na forma de serpentinas e conseguem aproveitar tanto a radiação direta quanto a radiação difusa.

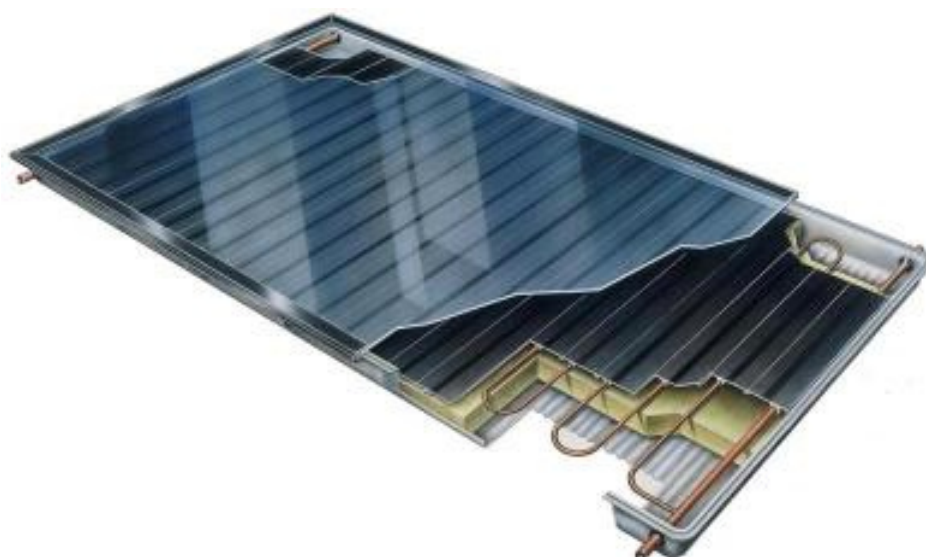


Figura 2.1 – Coletor solar convencional. Fonte: site da empresa THERMO/SOLAR Žiar s.r.o

A conversão fototérmica é amplamente usada para aquecimento de água de consumo em residências e isto é realizado em sistema direto, ou seja, a água de consumo é aquecida diretamente no coletor solar. O aquecimento do fluido ocasiona a diminuição de sua densidade e ocorre o movimento do fluido em sentido ascendente por efeito de termossifão. Esta situação se origina quando forças de volume atuam sobre um fluido no qual existem gradiente de densidade e o efeito líquido é o da existência do empuxo que induz correntes de convecção natural (INCROPERA; WITT, 1992). Na prática o fluido com maior temperatura sobe e o fluido com menor temperatura desce; isto é mais bem visualizado na Fig. 2.2.



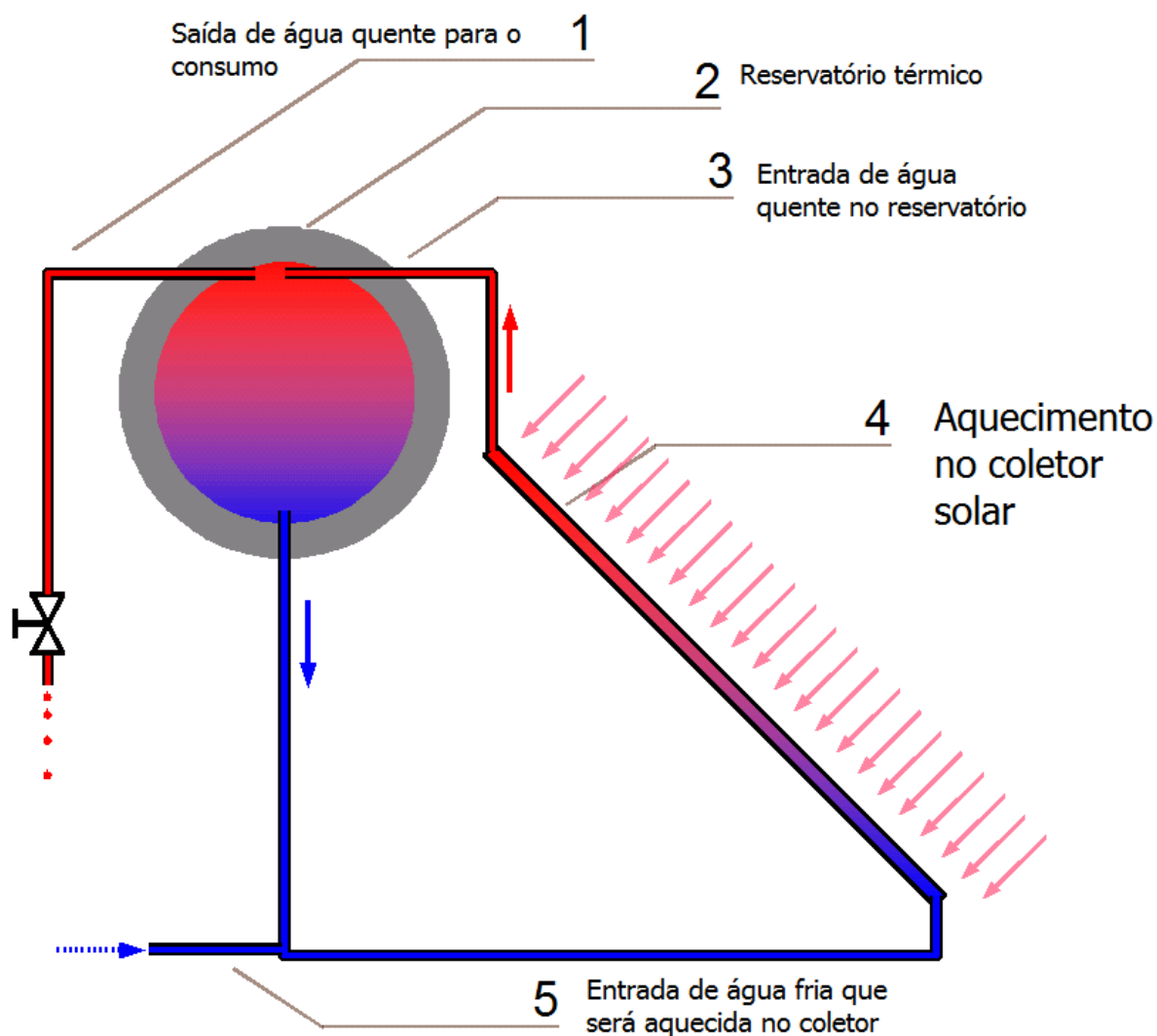


Figura 2.2 – Efeito termossifão – circulação natural

### 2.3. Utilização da Energia Solar Fototérmica

O sol é a fonte sustentável mais abundante de energia, oferecendo ao planeta mais de 150 mil TW (DUFFIE; BECKMAN), onde metade desta energia atravessa a atmosfera e atinge a superfície terrestre e o restante é refletido pela atmosfera. A utilização desta fonte de energia cresceu muito neste século, mas o histórico da utilização desta energia solar para aquecimento mostra que o sol em outras épocas também teve grande utilização.

A história da utilização de energia solar pelo homem é apresentada em várias obras, (SCARLATO, 1998), (KREITH, 1997), (HINRICHS, 2010), (TRIGUEIRO, 2005). Desde os primórdios da civilização as pessoas contam com a energia do sol, tanto para aquecimento do próprio corpo, das casas quanto dos animais. Sem a radiação solar não teríamos água

no estado líquido em nosso planeta, o que impediria a vida de muitas espécies conhecidas. O uso da energia solar para aquecimento começou antes de Jesus Cristo. Arquimedes utilizou espelhos para direcionar raios solares e atacar uma frota hostil em Siracusa, em 212 a.C., incendiando suas velas a uma distância aproximada de quinhentos metros, com o auxílio de pequenos vidros que se movimentavam por dobradiças, tal fato é relatado na obra “De Temperamentis”.

Antoine Lavoisier atingiu temperaturas próximas a 1700 °C usando o sol em sua fornalha solar, temperatura essa a mais alta obtida por qualquer um naquela época, por pouco não fundiu a platina que era seu objetivo. Outros como Horace de Saussure, em 1767, fizeram experiência com a energia solar, Saussure captou os raios do sol em uma caixa feita de vidro, parecida com um aquário de peixes, contendo outras duas caixas no seu interior. Uma dessas caixas foi aquecida a 110 °C em questão de horas.

No do século XIX, muitas pessoas usavam grandes tanques de metal para aquecer a água naturalmente, usando a energia do sol. Em 1891, o empresário Clarence Kemp tornou-se o primeiro homem a patentear um sistema solar térmico. Kemp comercializava com sucesso a sua invenção para aquecimento em residências. Em 1897, um terço das casas em Pasadena, Califórnia tinham água aquecida pelo sol.

O ano de 1909 foi um divisor de águas na conversão fototérmica, William Bailey patenteou o seu sistema de aquecimento solar de água que separava o tanque de armazenamento a partir de outro dispositivo que recolhia o calor do sol. Isto permitiu que a água fosse armazenada em grandes quantidades no interior da casa. Por volta de 1918, Bailey tinha vendido mais de quatro mil unidades de seu produto.

No Japão, a energia solar térmica tem sido uma forma eficaz de aquecimento de água em uma nação carente de fontes baratas de energia. Já em 1969, havia 4.000.000 unidades de boilers de aquecimento solar de água nos telhados de casas japonesas. Hoje, existem 10 milhões de sistemas solares térmicos trabalhando no Japão. Na década de 1960, a falta de óleo resultou em uma explosão no uso de sistemas solares térmicos em Israel. Hoje uma grande maioria dos lares israelenses, cerca de 90%, usa aquecimento solar para aquecer a água de consumo.

O experimento de Lavosier foi replicado e hoje uma fornalha solar instalada em Sandia, Novo México nos Estados Unidos atinge temperatura de aproximadamente 2200 °C.

Atualmente a China possui 15,6 GW instalados de sistemas solares, sendo o país com maior potência instalada superando a Alemanha que era a líder anterior segundo análise da Bloomberg Energy Finance.

No Brasil possui grande capacidade de aproveitamento da energia solar, em qualquer latitude o índice de radiação viabiliza a instalação de painéis fotovoltaicos e fototérmicos. O Brasil encontra-se na quinta posição do ranking mundial na utilização de energia solar térmica, de acordo com o relatório da IEA – International Energy Agency – 2013.

## **2.4. Energia Solar Fotovoltaica**

O efeito fotovoltaico foi observado em 1839, pelo físico francês que verificou pela primeira vez o paramagnetismo do oxigênio líquido, Alexandre Edmond Becquerel, ele conduzia experiências eletroquímicas quando, por acaso, verificou que a exposição à luz de elétrodos de platina ou de prata dava origem ao efeito fotovoltaico. A primeira bateria solar da empresa “Bell Labs” foi construída em Americus, Geórgia, sendo anunciada em 25 de abril de 1954, sendo desenvolvida ao acaso, quando cientistas da empresa tentavam resolver problemas com sistemas telefônicos da Labs Bell.

As descobertas do efeito fotoelétrico foram na sua maioria são devidas ao acaso. Nas palavras de Willoughby Smith numa carta a Latimer Clark datada de 4 de Fevereiro de 1873, a sua descoberta do efeito fotovoltaico no selênio foi um acidente inesperado.

Na sequência desta descoberta, Adams e o seu aluno Richard Day desenvolveram em 1877 o primeiro dispositivo sólido de fotoprodução de eletricidade, onde um filme de selênio depositado num substrato de ferro em que um filme de ouro muito fino servia de contato frontal. Este dispositivo apresentava uma eficiência de conversão de aproximadamente 0,5%. Charles Fritts duplicou essa eficiência para cerca de 1% alguns anos depois construindo as primeiras células solares, também constituídas com selênio, primeiro com um filme muito fino de ouro e depois um sanduíche de selênio entre duas camadas muito finas de ouro e outro metal na primeira célula com área maior.

Embora tenha sido Russell Ohl quem inventou a primeira solar de silício, considera-se que a energia solar fotovoltaica teve início em 1954 quando Calvin Fuller, um químico dos Bell Laboratories em Murray Hill, New Jersey, nos Estados Unidos da América, desenvolveu o processo de dopagem do silício. Fuller partilhou a sua descoberta com o físico Gerald Pearson, seu colega nos Bell Labs e este, seguindo as instruções de Fuller, produziu uma junção p-n ou díodo mergulhando num banho de lítio uma barra de silício dopado com um elemento doador eletrônico. Ao caracterizar eletricamente a amostra, Pearson descobriu que esta exibia um comportamento fotovoltaico e partilhou a descoberta com ainda outro

colega, Daryl Chapin, que tentava sem sucesso, alternativas para as baterias elétricas que alimentavam redes telefônicas remotas.

As primeiras células fotovoltaicas assim produzidas tinham alguns problemas técnicos que foram superados pela química quando Fuller dopou silício primeiro com arsênio e depois com boro obtendo células que exibiam eficiências recorde de cerca de 6%.

A primeira célula solar foi formalmente apresentada na reunião anual da National Academy of Sciences, em Washington, e anunciada numa conferência de imprensa no dia 25 de Abril de 1954. No ano seguinte a célula de silício viu a sua primeira aplicação como fonte de alimentação de uma rede telefônica em Americus, na Geórgia.



Figura 2.3 – Célula fotovoltaica da Bell Labs. Fonte: Bell Labs

## 2.5. Sistemas híbridos (PVT)

Inúmeras residências estão utilizando sistemas híbridos, de fotovoltaicos e fototérmicos, visando melhor aproveitamento da energia solar, o balanço exergético é melhorado. Tais sistemas trabalham com coletores similares aos fotovoltaicos convencionais, porém como diferencial eles possuem trocadores de calor na parte inferior do painel conforme Fig. 2.3, com isso enquanto ocorre a conversão da energia solar em

energia elétrica, conforme visto anteriormente, e também o aquecimento de fluido que circula nestes coletores.



Figura 2.4 – Coletor solar híbrido – PVT. Fonte: Naked Energy's-Inglaterra

## 2.6. Fundamentos gerais da energia solar

Ao trabalhar com conversão fototérmica é de suma importância conhecer os movimentos e posições do sol durante o dia, o mês e o ano em função da posição geográfica, pois tais movimentos implicam diretamente no rendimento do sistema fototérmico. Inicialmente serão apresentadas algumas das grandezas estudadas por (DUFFIE; BECKMAN) e (CAMACHO *et al.*, 2012) relacionadas ao movimento do sol, são elas:

- $\Phi \rightarrow$  Latitude: inclinação da posição geográfica atual até a linha do equador, a latitude varia de  $-90^\circ$  sul e  $90^\circ$  norte;
- $\theta_z \rightarrow$  Ângulo zenital: é o ângulo formado entre uma linha perpendicular a superfície terrestre e a linha formada pelo raio solar incidente;
- $\delta \rightarrow$  Declinação: é o ângulo formado pela posição do sol ao meio-dia e a linha do equador, tal declinação varia de  $-23,45^\circ$  até  $23,45^\circ$ ;
- $\omega \rightarrow$  ângulo horário: é a variação de posição do sol em função do movimento de rotação da terra, varia em  $15^\circ$  a cada hora.

Estas variáveis estão apresentadas na Fig. 2.5.

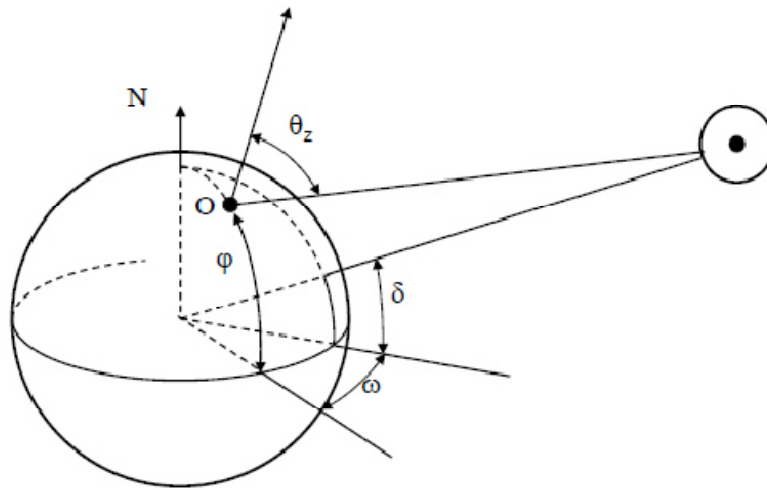


Figura 2.5 – Coordenadas horizontais celestiais. Fonte: (CAMACHO *et al.*, 2012)

Quando se considera uma superfície com ângulo de inclinação, conforme Fig. 2.6, aparecem quatro novas variáveis:

- $\beta$  : Inclinação: é o ângulo entre o plano da superfície estudada e a horizontal.
- $\gamma$  : Ângulo azimutal: é o ângulo formado entre a projeção da linha da incidência solar numa superfície horizontal e o meridiano local (normalmente considera-se zero) e trabalha-se apenas com o ângulo horário.
- $\gamma_s$  : Ângulo azimutal solar: é a posição angular entre a linha do sul e a projeção da radiação solar.
- $\alpha_s$  : Ângulo de altitude solar: é o ângulo entre a horizontal e a linha do sol (complemento do ângulo zenital).

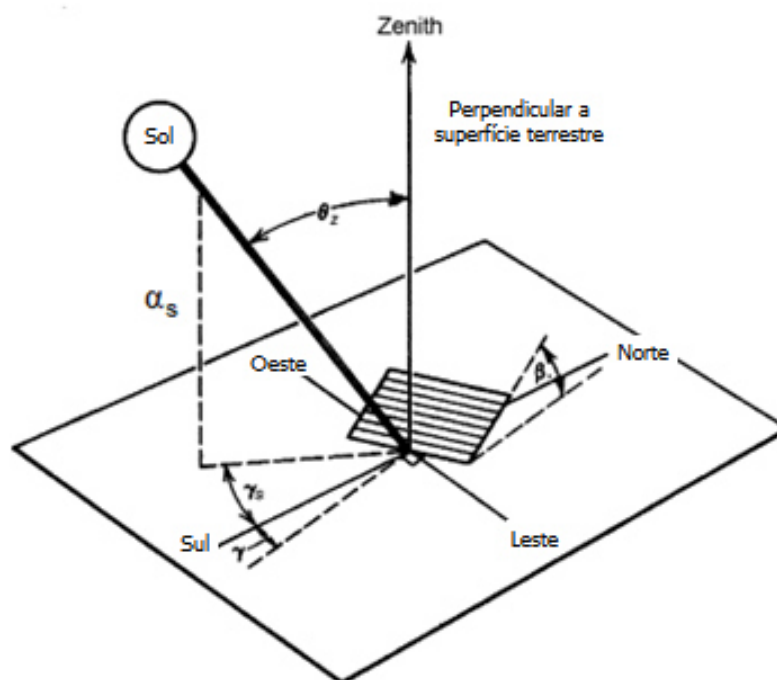


Figura 2.6 - Coordenadas numa superfície inclinada. Fonte: (CAMACHO *et al.*, 2012)

Como pode ser observada a radiação solar incidente numa superfície depende da posição da mesma sobre a terra e do tempo, portanto é necessário conhecer mais sobre o tempo solar. Para calcular a hora solar utiliza-se a Eq. (2.1),

$$ts = tp + E + 4(L_p - L_{lo}) \quad (2.1)$$

$$E = 9,87 \sen(2B) - 7,53 \cos(B) - 1,5 \sen(B) \quad (2.2)$$

$$B = \frac{360 \cdot (n - 81)}{364} \quad (2.3)$$

Onde  $(ts)$  é hora solar em minutos,  $(tp)$  é à hora padrão em minutos,  $(L_p)$  é a longitude padrão,  $(L_{lo})$  é a longitude local,  $(B)$  é o dia solar,  $(n)$  é o número do dia, sendo  $(n)$  igual a 1 no dia primeiro de janeiro e  $(n)$  igual a 365 no dia trinta e um de dezembro.  $(E)$  é o valor do tempo solar e a Fig. 2.6 mostra seu comportamento em função dos dias do ano.

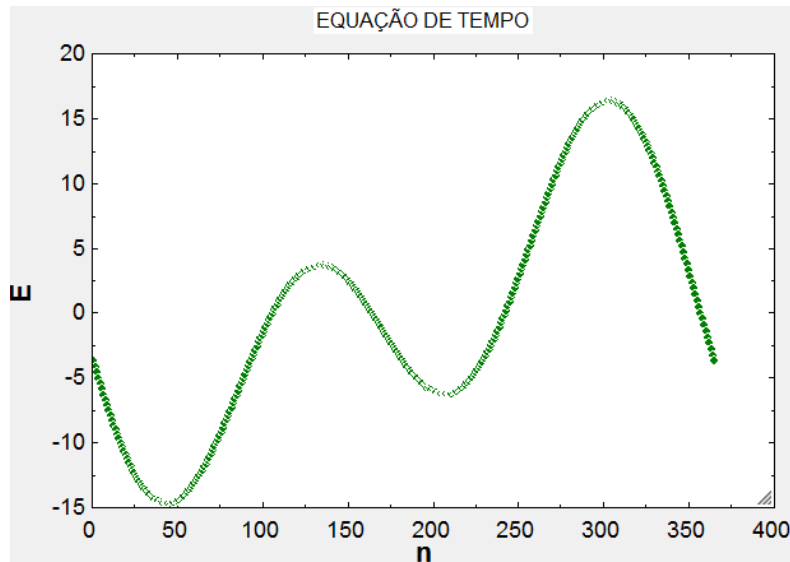


Figura 2.7 – Equação do tempo solar em função dos dias do ano. Fonte: (DUFFIE; BECKMAN)

A declinação solar  $(\delta)$  é calculada pela Eq.(2.4) e o ângulo horário  $(\omega)$  é obtido pela Eq. (2.5).

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (284 + n)}{365}\right) \quad (2.4)$$

$$\omega = 15 \cdot (Ts - 12) \quad (2.5)$$

Onde  $(Ts)$  é a hora solar expressa em horas. Adicionalmente o ângulo horário no nascer do sol  $(\omega_s)$  é calculado pela Eq. (2.6) e o número de horas de luz solar  $(N)$  é obtido pela Eq. (2.7).

$$\omega_s = \cos^{-1}[-\tan(\Phi) \cdot \tan(\delta)] \quad (2.6)$$

$$N = \frac{2}{15} \cdot \omega_s \quad (2.7)$$

A Eq. (2.8) descreve a radiação solar direta incidente  $(\theta)$  em uma superfície, onde  $(\delta)$  é a declinação solar,  $(\Phi)$  é a latitude local,  $(\beta)$  é a inclinação solar,  $(\gamma)$  é o ângulo azimutal,  $(\omega)$  é o ângulo horário e  $(\omega_s)$  é o ângulo horário ao nascer do sol.

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \sin(\delta) \cdot \sin(\Phi) \cdot \cos(\beta) - \sin(\delta) \cdot \cos(\Phi) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) + \\ & \cos(\delta) \cdot \cos(\Phi) \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\omega) + \cos(\delta) \cdot \sin(\Phi) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(\omega_s) + \\ & \cos(\delta) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\gamma) \cdot \sin(\omega_s) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Para superfície horizontal, com inclinação solar  $(\beta)$  igual a zero, o ângulo de incidência direta  $(\theta)$ , vai ser igual ao ângulo zenital  $(\theta_z)$ , conforme Eq. (2.9), onde  $(\delta)$  é a declinação solar,  $(\Phi)$  é a latitude local e  $(\omega)$  é o ângulo horário.

$$\cos(\theta) = \cos(\Phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\Phi) \cdot \sin(\delta) = \cos(\theta_z) \quad (2.9)$$

Para superfícies com inclinação para o norte ou para o sul o ângulo de radiação direta  $(\theta)$  é dado pela Eq. (2.10). Onde  $(\delta)$  é a declinação solar,  $(\Phi)$  é a latitude local,  $(\beta)$  é a inclinação solar e  $(\omega)$  é o ângulo horário.



$$\cos(\theta) = \cos(\Phi + \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\Phi + \beta) \cdot \sin(\delta) \quad (2.10)$$

E ao meio dia solar o ângulo de radiação solar direta ( $\theta$ ) é dado pela Eq. (2.11), onde ( $\delta$ ) é a declinação solar, ( $\Phi$ ) é a latitude local, ( $\beta$ ) é a inclinação solar.

$$\theta = |\delta - \Phi - \beta| \quad (2.11)$$

Todo este equacionamento foi revisado visando implantá-lo no programa de controle e aquisição de dados, para o devido posicionamento do aparato experimental, obtendo com isto o melhor rendimento possível em função da perpendicularidade dos raios solares em relação ao coletor proposto.

## 2.7. Nanofluidos

Dispersões coloidais formadas pela união de nanopartículas com fluido base são denominadas nanofluidos. Estas partículas apresentam-se na escala nanométrica, considera- ( $1\text{nm} = 10^{-9}\text{ m}$ ) e por isso o nome nanofluido. Os nanofluidos estão sendo amplamente estudados nos últimos vinte anos, pois apresentam condutividade térmica muito superior ao do fluido base, (MASUDA *et al.*, 1993) propôs a adição e dissolução de partículas sólidas ultrafinas em fluidos base comumente utilizados em processos de troca de calor, isto aumentou a condutividade térmica do fluido, pois as partículas sólidas possuem condutividade térmica superior a dos fluidos convencionais.

A experiência de (MASUDA *et al.*, 1993) criou uma demanda visando o desenvolvimento de técnicas para produzir partículas de tamanho reduzido que apresentassem estabilidade na mistura e evitassem a erosão e danificação dos equipamentos utilizados. A indústria da nanotecnologia ofereceu uma solução para a demanda imposta, as nanopartículas, que segundo (ROCO, 1999) possuem propriedades físicas e químicas diferenciadas e que, devido o tamanho reduzido, leva a um aumento da sua área interfacial, que traz como consequência um aumento no grau de complexidade e velocidade dos processos nos quais são aplicadas.

Ao serem misturadas as nanopartículas com fluidos de transferência de calor convencionais como água destilada, óleo ou etilenoglicol é obtida uma mistura homogênea, denominada por (CHOI, 1995) de “Nanofluido”. O termo nanofluido, embora recente, foi

estudado em pesquisas de (FARADAY, 1857) com dispersões coloidais de ouro e de (MAXWELL, 1873) com suspensões de fibra de nylon e a intensificação da condutividade térmica de soluções que contém partículas sólidas, tais artigos são os pilares para o entendimento e estudo do comportamento dos nanofluidos.

A utilização de nanofluidos é uma boa alternativa para melhorar os processos de transferência de calor, porém com o incremento de partículas sólidas surgem propriedades abrasivas, corrosivas e erosivas maiores que outros tipos de fluidos convencionais, conforme relata (CELATA; D'ANNIBALE; MARIANI, 2011). Outros autores dizem que o desenvolvimento de nanofluidos está dificultado por fatores como a falta de concordância entre os resultados, problemas na caracterização das suspensões e a falta de entendimento dos mecanismos envolvidos.

No que tange a utilização de nanofluidos para transferência de calor com fonte solar, vários artigos foram escritos nos últimos anos, principalmente com a utilização de coletores solares de absorção direta, onde o fluido circula em reservatórios transparentes, ou seja, o volume como um todo é aquecido, porém isso é característica não só do nanofluido fluido como dispersão coloidal, mas também do espectro fotossensível da luz como mostra (QUINBO *et al.*, 2013), utilizando o espectrofotômetro digital para verificação da transmitância de vários nanofluidos em função da concentração volumétrica de nanopartículas no nanofluido. Outros autores como (BANDARRA FILHO *et al.*, 2014) tiveram sucesso no armazenamento de energia em nanofluidos utilizando coletores transparentes. Já os autores (MOGHADAM *et al.*, 2014) estudaram a transferência fototérmica em nanofluido em sistema com circulação forçada, obtendo bom resultados.

## **2.8. Propriedades termofísicas dos nanofluidos**

A utilização de partículas sólidas em suspensão nos fluidos tem o objetivo principal aumentar a condutividade térmica, porém esta propriedade termofísica não é a única que influencia na transferência de calor, pois ao inserir nanopartículas nos fluidos formando assim os nanofluidos alteram-se outras propriedades do fluido base como o calor específico, a massa específica e a viscosidade.

O aumento da condutividade térmica nos nanofluidos é visualizado nos experimentos realizados por (LEE *et al.*, 1999) que mostraram um incremento de aproximadamente 20% na condutividade térmica do etilenoglicol ao serem dispersas nanopartículas de óxido de cobre (CuO<sub>2</sub>) numa concentração volumétrica de 4% de nanopartículas. Em experimento

semelhante (EASTMAN *et al.*, 2001) mostraram que a condutividade efetiva do etilenoglicol apresentou um incremento acima de 40% ao adicionar nanopartículas de cobre (Cu) de diâmetro médio de 10 nm numa concentração volumétrica de 0,3%. Aplicando a técnica de “fio quente” para a medição da condutividade térmica, (ASSAEL *et al.*, 2005) obtiveram, nos resultados experimentais, uma intensificação da condutividade térmica de 34% para uma solução composta de nanotubos de carbono de parede múltipla e água numa concentração volumétrica de 0,6% e com adição de surfactante para melhorar a estabilidade do nanofluido.

O incremento na condutividade térmica é evidente quando reportada a literatura e com isso a transferência de calor por condução é melhorada em comparação com o fluido base. Mas ao ser colocado em escoamento o nanofluido apresenta uma série de desvantagens, pois os efeitos causados pelo aumento da viscosidade, da massa específica e do calor específico são observados, além disso, o tempo de vida dos aparelhos e a estabilidade da suspensão também são percebidos. Estas desvantagens foram descritas por (HOFFMANN, 2014), tais como a sedimentação, que transcorrido algum tempo, as partículas tendem a sedimentar-se, ocasionando a formação de uma camada junto à superfície dificultando a capacidade de troca térmica; a obstrução que como resultado da sedimentação das partículas, tubulações ou canais de fluxo poderiam ser obstruídos, principalmente quando estes apresentam dimensões reduzidas; o desgaste que conseqüentemente com a sedimentação e obstrução, é necessário o aumento da vazão mássica (velocidade do fluido) para reduzir os dois primeiros efeitos o que propicia um desgaste dos componentes do sistema devido à ação abrasiva das partículas; a perda de carga que nos resultados experimentais demonstraram que o aumento da concentração das partículas no fluido ocasiona um aumento exponencial na perda de carga do sistema devido ao aumento da viscosidade.

#### 2.8.1. *Massa específica*

A massa específica dos nanofluidos é calculada, na maioria dos trabalhos científicos, pela regra da mistura. (PAK; CHO, 1998) efetuaram a medição da massa específica de amostras de nanofluido. A primeira amostra era de nanopartículas de dióxido de titânio dispersas em água e a segunda era de nanopartículas de alumina com base de água, as concentrações de nanopartículas variaram de zero até 31,6% e eles encontraram um desvio máximo de 0,6% em relação aos resultados calculados pela teoria da regra da mistura, sendo assim tal regra será aplicada neste trabalho para determinação da massa específica do nanofluido.

A regra da mistura é dada pela Eq. (2.12), onde  $(\rho_{nf})$  é a massa específica do nanofluido,  $(\phi_v)$  é a concentração em volume de nanopartículas no nanofluido,  $(\rho_{fb})$  é a massa específica do fluido base e  $(\rho_{np})$  é a massa específica das nanopartículas.

$$\rho_{nf} = (1 - \phi_v) \cdot \rho_{fb} + \phi_v \cdot \rho_{np} \quad (2.12)$$

### 2.8.2. Condutividade térmica

A propriedade mais pesquisada na literatura dos nanofluidos é a condutividade térmica  $(k_{nf})$ . Após (MASUDA *et al.*, 1993); (CHOI, 2001); (EASTMAN *et al.*, 2001) terem relatado incrementos na condutividade térmica efetiva em dispersões de diversos tipos nanopartículas em diferentes fluidos base, muitos outros pesquisadores têm provido tempo nessa questão.

Os principais efeitos que influenciam a condutividade térmica dos nanofluidos foram relatados por (PHILIP; SHIMA, 2012), sendo que a concentração de nanopartículas  $(\phi)$  apresenta relação direta no incremento da condutividade térmica do nanofluido, pois os materiais das nanopartículas possuem condutividade térmica bem maior que a do fluido base, conforme é visto na Tab. 2.1, se comparados às dos fluidos base usuais apresentadas na Tab. 2.2.

Tabela 2.1 – Condutividade térmica em diferentes metais.

Materiais metálicos	Símbolos	Condutividade Térmica [W/m.K]
Cobre	Cu	401
Prata	Ag	426-428
Ouro	Au	317-318
Alumínio	Al	237
Ferro	Fe	83,5

Fonte (LI, 2009).

Tabela 2.2 – Condutividade térmica em fluidos base

Fluidos Base	Símbolos	Condutividade Térmica [W/m.K]
Água	H <sub>2</sub> O	0,613
Etileno Glicol	EG	0,253
Óleo de motor	EO	0,145

Fonte (LI, 2009).

Além da concentração de nanopartículas outros efeitos são atribuídos ao aumento da condutividade térmica do nanofluido, dentre deles pode ser citado o efeito da natureza da nanopartícula, o efeito do tamanho e forma das nanopartículas, o efeito da temperatura do nanofluido, o efeito de aditivos como dispersantes e o efeito da acidez.

Muitas correlações foram propostas para o cálculo do valor da condutividade térmica do nanofluido, destes o mais utilizado é o proposto por (HAMILTON; CROSSER, 1962), tal modelo é utilizado para validar resultados experimentais e está apresentado na Eq. (2.13) e pode ser considerada uma modificação ao modelo de (MAXWELL, 1873). Onde ( $k_{nf}$ ) é a condutividade térmica do nanofluido, ( $k_{fb}$ ) é a condutividade térmica do fluido base, ( $k_{np}$ ) é a condutividade térmica das nanopartículas, ( $\psi$ ) é o parâmetro de esfericidade da partícula definida como a razão entre a área superficial de uma esfera e a área superficial de uma partícula e ( $\phi$ ) é a concentração mássica de nanopartículas.

$$\frac{k_{nf}}{k_{fb}} = 1 + 3 \cdot \psi^{-1} \cdot \phi \cdot \frac{k_{np} - k_{fb}}{(3 \cdot \psi^{-1} - 1)k_{fb} + k_{np} - \phi \cdot (k_{np} - k_{fb})} \quad (2.13)$$

Experimentalmente o método do fio quente tem sido muito usado para medir a condutividade térmica dos nanofluidos. Ele realiza o cálculo desta propriedade por intermédio de um transiente de temperatura gerado por uma fonte de calor ideal, sendo geralmente empregada para esta função uma sonda metálica linear longa e fina submersa no fluido. Esta sonda possui em seu interior uma resistência de aquecimento que é conectada a uma fonte de energia externa a qual fornece uma tensão contínua, mantendo o fluxo de calor constante ao longo da sonda. Além da resistência, o aparato dispõe de um termopar que mede a temperatura no intervalo de tempo da realização do experimento. O modelo matemático apresentado na Eq.(2.14) necessita dos dados de temperatura registrados para medir a condutividade térmica do fluido, tal modelo é uma derivação da

equação de Fourier, onde  $(k)$  é a condutividade térmica do fluido testado,  $(\alpha)$  é a difusividade térmica do fluido testado,  $(C = e^y)$  e  $(y = 0,5772157)$ .

$$\Delta T(r, t) = \frac{q}{4\pi k} \ln \left( \frac{4\alpha t}{r^2 C} \right) \quad (2.14)$$

### 2.8.3. Calor específico

O calor específico assim como outras propriedades termofísicas dos nanofluidos precisam ser conhecidas para a correta análise da viabilidade na utilização destes fluidos em aplicações de transferência de calor. (O'HANLEY, 2012) focou seu trabalho na medição e validação de dois modelos para calcular o calor específico de nanofluidos ( $cp_{nf}$ ) que dependem da concentração e tipo de material das nanopartículas. Os autores apresentaram dois modelos para calcular o calor específico dos nanofluidos. O primeiro modelo, apresentado na Eq.(2.15), considera a concentração volumétrica das nanopartículas ( $\phi_v$ ), o calor específico do fluido base ( $cp_{fb}$ ) e o calor específico da nanopartícula ( $cp_{np}$ ), tal modelo é similar à teoria da mistura que é aplicado para misturas de gases ideais. O segundo modelo, apresentado na Eq.(2.16) é baseado no suposto equilíbrio térmico entre as partículas e o fluido base, tal modelo é derivado da primeira lei da termodinâmica.

$$c_{p,nf} = (1 - \phi_v) \cdot c_{p,np} + \phi_v \cdot c_{p,fb} \quad (2.15)$$

$$(\rho \cdot c_p)_{nf} = (1 - \phi_v) \cdot (\rho \cdot c_p)_{fb} + \phi_v \cdot (\rho \cdot c_p)_{np} \quad (2.16)$$

No trabalho de (WANG, 2010) foi avaliado o calor específico em nanofluidos de, e tanto (WANG, 2010) quanto (O'HANLEY, 2012) concluíram que os resultados obtidos experimentalmente para o calor específico em nanofluidos de CuO/EG, CuO/água, SiO2/água e Al2O3/água respectivamente, concordaram satisfatoriamente com o segundo modelo de predição para calor específico, baseado no equilíbrio térmico dado pela Eq. (2.16).

#### 2.8.4. Viscosidade

A propriedade que um fluido tem de apresentar resistência às tensões cisalhantes é chamada de viscosidade ( $\mu$ ). A viscosidade é uma importante propriedade no escoamento dos nanofluidos, pois parâmetros como a queda de pressão, potência de bombeamento, tipo de escoamento e transferência de calor por convecção dependem diretamente desta propriedade.

A viscosidade dos nanofluidos é uma das propriedades que têm sido cuidadosamente estudada e diversos modelos foram propostos para o cálculo da viscosidade nos nanofluidos. A maioria destes modelos é baseada na teoria de (EINSTEIN, 1906), que propôs um modelo hidrodinâmico baseado nas equações de Navier-Stokes, este modelo é apresentado na Eq. (2.17). Mas o modelo mais usado para a determinação da viscosidade é o de (BATCHELOR, 1977), apresentado na Eq. (2.18).

$$\mu_{nf} = (1 + 2,5\phi_v) \cdot \mu_{fb} \quad (2.17)$$

$$\mu_{nf} = (1 + 2,5\phi_v + 6,2\phi_v^2) \cdot \mu_{fb} \quad (2.18)$$

Onde  $\mu_{nf}$  é a viscosidade do nanofluido,  $\mu_{fb}$  é a viscosidade do fluido base e  $\phi_v$  é a concentração volumétrica de nanopartículas. Ambos os modelos consideram basicamente a variação da concentração de nanopartículas como motivadora do incremento de viscosidade. Quando é analisado o escoamento no interior dos tubos, os efeitos viscosos são intensificados devido ao contato do fluido com as paredes, a rugosidade das superfícies e a interação entre as moléculas, ocasionando o aumento da perda de carga nas tubulações.

#### 2.8.5. Síntese de nanofluidos

As propriedades termofísicas devem ser iguais em todo o fluido para isto é imprescindível que este esteja homogêneo e estável, é de suma importância a correta fabricação do nanofluido. A síntese ou produção de nanofluidos ocorre basicamente por duas técnicas, o método de um passo e o método de dois passos. O método de um passo consiste em produzir e dispersar simultaneamente as partículas em um fluido por deposição física de vapor. A principal vantagem que apresenta o método de um passo é que são evitados os processos secagem, armazenamento, transporte, e dispersão de nanopartículas

de modo que a aglomeração das nanopartículas é minimizada, e a estabilidade do fluido é aumentada. Já o método de dois passos é consiste em misturar nanopartículas em pó com o fluido base desejado, é muito utilizado na síntese e produção de nanofluidos devido à disponibilidade comercial de diferentes tipos de nanopartículas. Neste método, as nanopartículas são inicialmente sintetizadas em forma de pó seco ultrafino, aplicando o processo de condensação de gás inerte e em seguida são dispersas nos fluidos base, empregando energia externa extra, que pode ser fornecida com ajuda da agitação intensiva por força magnética, agitação ultrassônica que utiliza o sonicador, mistura de alto cisalhamento, ou homogeneização por alta pressão, sendo este último o processo mais utilizado no Laboratório de Energia Sistemas Térmicos e Nanotecnologia da Universidade Federal de Uberlândia.



## CAPITULO III

### BANCADA EXPERIMENTAL

#### 3.1. Considerações iniciais

A idealização do diagrama esquemático apresentado na Fig. 3.1 tem o intuito de atender o objetivo geral do trabalho, que é avaliar o rendimento do nanofluido em conversão fototérmica. A partir dessa definição foram determinados os componentes e instrumentos necessários para a realização dos testes, assim como os sensores e aparatos necessários para a aquisição e controle de dados. O diagrama proposto é semelhante ao apresentado por (MOGHADAM *et al.*, 2014), com a diferença de não utilizar nenhum tipo de equipamento para bombeamento do fluido, o escoamento ocorrerá simplesmente pela circulação natural ocorrida pela diferença de densidade promovida pelo aquecimento do fluido, o popular termossifão.

Testes preliminares utilizando uma estrutura fixa com coletores solares de absorção direta foram feitos e publicados (BANDARRA FILHO *et al.*, 2014), os resultados apresentados mostraram que nanofluidos de prata tiveram incremento, cerca de 50% maior de temperatura, que o fluido base, porém os dados obtidos mostraram a necessidade do posicionamento adequado do coletor solar com relação ao movimento do sol, para tanto foi idealizado, projetado e construído um posicionador solar; que permitiu a movimentação do coletor em função do deslocamento do sol durante o dia, procurando manter sempre o coletor perpendicular aos raios incidentes do sol. Tal estrutura possibilitará o desenvolvimento de pesquisas na área de conversão fototérmica com a utilização de nanofluidos.

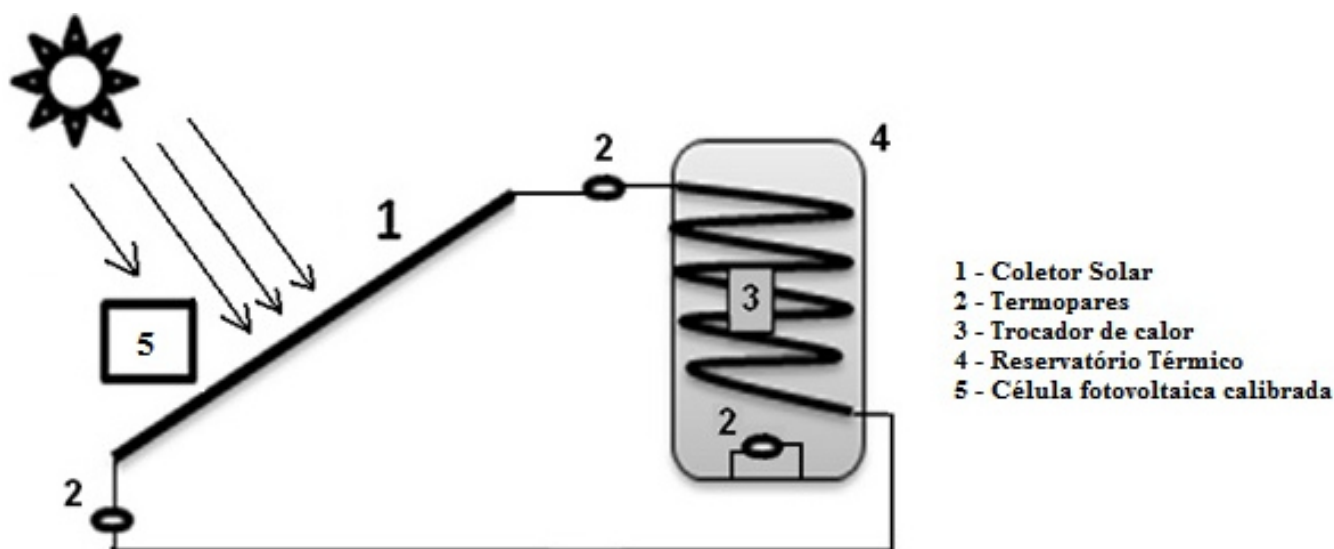


Figura 3.1 – Diagrama esquemático da bancada experimental

### 3.2. Projeto da bancada experimental

A bancada foi projetada e construída para possibilitar o posicionamento correto do coletor solar, mantendo sempre um ângulo perpendicular aos raios incidentes do sol. A partir desta demanda, foram equacionados todos os movimentos do sol durante o dia, levando em consideração as coordenadas geográficas de Uberlândia/MG e o movimento de translação do sol durante o ano. Existem na literatura inúmeros seguidores solares para sistemas fotovoltaicos, mas para fototérmicos são poucos, pois é difícil conciliar a movimentação da estrutura com o reservatório fixo, para isso são utilizadas mangueiras para circulação do fluido. Outra possibilidade é a movimentação de todo o sistema, tanto coletores quanto reservatório. Com as necessidades e restrições devidamente elencadas, foi feita a concepção do projeto estrutural. Para a construção do desenho foi utilizado o software SolidWorks. A concepção previu a movimentação dos coletores tanto na inclinação solar quanto no ângulo horário, como o software possui ferramentas de prototipagem virtual, foi possível prever ainda nesta etapa do projeto, quais seriam os graus de liberdade da estrutura e se tais graus seriam o suficiente para realizar os testes. A visão global do conjunto está apresentada na Fig. 3.2, outros desenhos de peças projetadas estão no capítulo de anexos, a concepção mostra também os reservatórios térmicos posicionados acima do nível dos coletores para possibilitar o efeito termossifão.

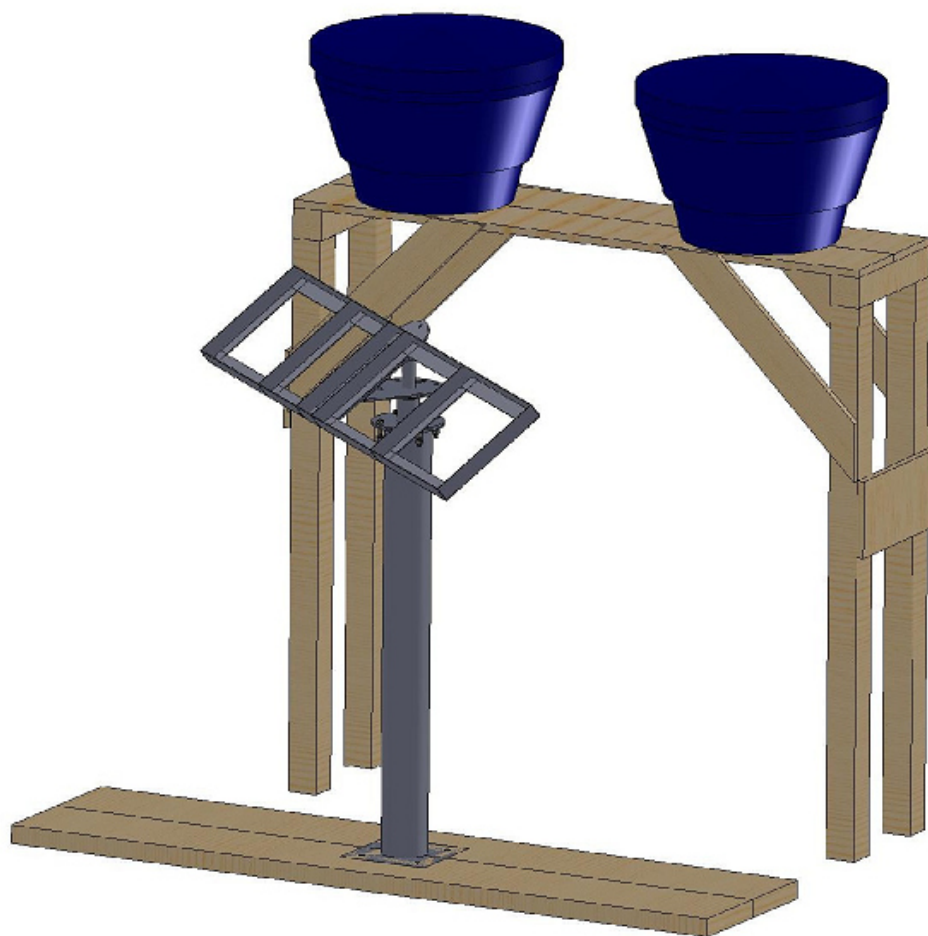


Figura 3.2 – Concepção da estrutura de testes.

### **3.3. Componentes da bancada experimental**

#### **3.3.1. Posicionador Solar**

Visando aperfeiçoar o recebimento da radiação solar, foi desenvolvido um posicionador solar, tal equipamento foi idealizado para permitir o acompanhamento do sol durante o dia. As variáveis controláveis do equipamento foram a inclinação solar e o ângulo horário.

A fase inicial do projeto analisou diferentes concepções que possibilitariam atender as necessidades de movimentação da estrutura durante a realização dos testes práticos. A concepção de estrutura escolhida precisava atender aos requisitos de projeto e também possuir custo efetivo baixo.

Com este intuito foi decidido que a fabricação do equipamento seria realizada principalmente nos laboratório da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU – FEMEC e que a mão de obra necessária partisse quase que na sua totalidade do próprio acadêmico. A matéria prima utilizada para a fabricação foi comprada com recursos pleiteados no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e o restante do material retirado do almoxarifado do Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia – LEST.

A primeira intenção era construir um seguidor solar totalmente automatizado, porém o custo seria bastante elevado, pois necessitaria de mais matéria prima tais como motores atuadores e controle lógico para coordenar as movimentações, a mão de obra precisaria ser terceirizada, pois fugiria ao leque de conhecimentos do autor.

A estrutura proposta para atender aos requisitos foi um posicionador solar, conforme Fig. 3.3, tal posicionador comporta o uso simultâneo de até quatro coletores solares de 400x400 mm. Possui grau de liberdade de 360° de deslocamento radial em torno do eixo da estrutura, o que permite o acompanhamento do sol desde o crepúsculo até o entardecer, foram propostas posições fixas de horários do sol, com a finalidade de tornar a utilização do posicionador mais simples. A cada hora a terra gira 15° em torno de seu eixo, sendo assim foram feitas dozes posições distanciadas de 15° em 15° para o acompanhamento do sol. A inclinação solar possui variações a cada hora do dia e diferentes a cada dia do ano, pois o movimento de translação da terra em torno do sol faz com que existam modificações da intensidade e do ângulo dos raios solares constantemente. Para este cálculo é necessário conhecer a latitude da região onde serão realizados os testes.

O posicionador foi fabricado em aço ABNT 1020. O pedestal que sustenta toda a estrutura foi construído com tubo circular de diâmetro de 150 mm, parede de 4,75mm de espessura e 1,5m de altura, chapas de aço de 6,35mm de espessura para a base e flange. O conjunto girante foi construído com chapa de 6,35mm de espessura, dobradiças de 16 mm de diâmetro, além de mancais e rolamentos comerciais. O suporte para os coletores foi construído em cantoneiras de dimensões 3,0x50,8 mm, sendo cortadas e soldadas no processo de eletrodo revestido. Maiores detalhes da fabricação e dimensões das peças do posicionador estão no capítulo de anexos.

A Fig.3.4A mostra como foi controlada a variação do ângulo horário a cada 15° (ou a cada hora relógio), já a Fig. 3.4B mostra como foi controlada a inclinação solar do posicionador a cada instante de tempo.



Figura 3.3 – Posicionador solar.



(A)



(B)

Figura 3.4 – Controle da movimentação solar, (A) ângulo horário, (B) inclinação solar.



### 3.3.2. Reservatórios térmicos

Conhecendo a necessidade de retirar calor do fluido aquecido pelo coletor solar, foram construídos reservatórios térmicos, cada reservatório possui a capacidade volumétrica de 100 litros. Para a construção de tais reservatórios foram utilizadas caixas d'água fabricadas em polietileno da marca Fortlev, revestidas de isolamento térmico de 19 mm de espessura. Para construção do trocador de calor foi utilizado tubo de cobre de diâmetro de 9,52 mm em forma espiral com 3 metros de comprimento, tendo a entrada de fluido na parte superior e a saída na parte inferior conforme pode ser visto na Fig.3.5B.



Figura 3.5 – Reservatório térmico.(A) caixa d'água e isolante (B) reservatório pronto com entrada e saída de fluido.

### 3.3.3. Coletores solares fototérmicos

O coletor solar tem por objetivo o aquecimento do fluido que circula nele, isto pode ser feito, dentre outras maneiras, por efeito “termossifão”, a movimentação do fluido ocorrerá em direção ascendente até o trocador de calor dentro do reservatório térmico. Desenvolveu-se um coletor solar do tipo convencional, onde em placa em aço absorvedora foi fixada uma tubulação em forma de serpentina de cobre de diâmetro 6,35mm e comprimento de 2m, colocada pasta condutora visando aumentar a condução entre chapa e serpentina, posteriormente tal estrutura recebeu pintura na cor preta fosca. A estrutura finalizada foi encaminhada a uma fábrica de aquários, onde foi enclausurada por uma cápsula de vidro de

espessura de cinco milímetros com entrada e saídas para o tubo de fluido conforme Fig. 3.4 (a), (b), (c) e (d).

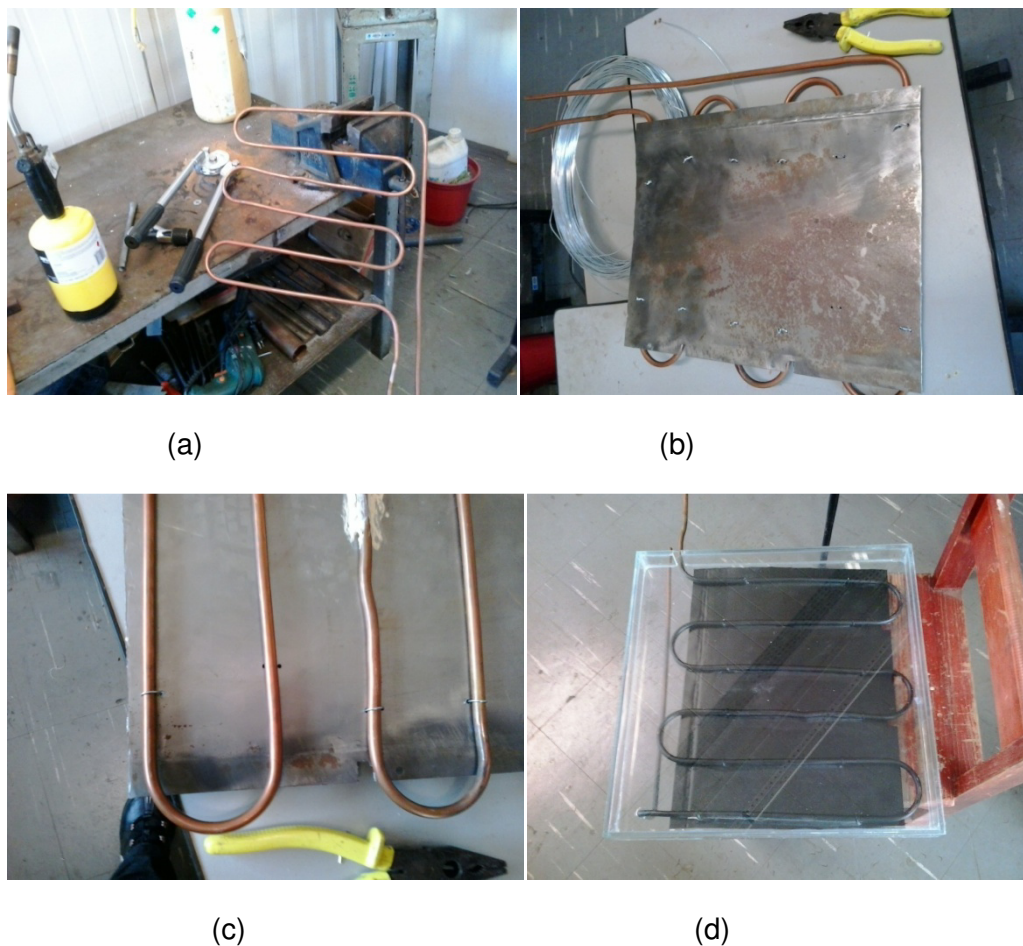


Figura 3.6 – Coletor solar construído para os testes. Sendo a seqüência (a), (b) (c) a de construção e (d) o coletor pronto.

#### 3.3.4. Célula fotovoltaica calibrada

A intensidade da radiação solar é de suma importância no cálculo do rendimento da conversão fototérmica, pois quanto maior for esta grandeza maior será o incremento de temperatura. Para assegurar a medição da intensidade da radiação solar exatamente no local do experimento foi utilizada uma célula fotovoltaica calibrada, montada paralelamente aos coletores solares, submetida aos mesmos movimentos impostos pelo posicionador, conforme Fig. 3.7. A aquisição de dados da célula fotovoltaica foi em milivolts e a cada milivolts tem-se um incremento de  $0,001 \text{ W/m}^2$ .



Figura 3.7 – Célula fotovoltaica calibrada

Embora a célula fotovoltaica tenha sido calibrada, não foi encontrado o certificado de calibração da mesma, nem é sabido quando foi realizada a calibração. Os dados de radiação solar foram confrontados com os dados obtidos no site do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET e são apresentados no capítulo de Anexos.

### 3.3.5. Termopares

Termopares são sensores de temperatura constituídos por dois metais distintos que quando unidos por suas extremidades formam um circuito elétrico fechado. Desta maneira é gerada uma Força Eletro-Motriz (FEM), que quando conectada a instrumento de aquisição de dados é transformada em indicação de temperatura.

Termopares do tipo T foram obtidos utilizando dispositivo de soldagem com descarga capacitiva, ver Fig.3.8, depois de montados com o devido comprimento, os termopares foram submetidos a processo de calibração seguindo o GUM (Guide Uncertainty Method), onde todos os termopares que foram utilizados no experimento foram calibrados. Os resultados e a metodologia de calibração estão apresentados no ANEXO I desta dissertação.

Foram confeccionados onze termopares, dois termopares mais do que o necessário para a instrumentação, pois embora o processo de fabricação dos termopares tenha sido minucioso, com a utilização do gás nitrogênio na soldagem, visando criar uma atmosfera mais inerte, diminuindo a possibilidade de porosidade no ponto de solda. Pode acontecer de algum termopar não ficar enquadrado dentro da norma ANSI MC96.1-1982 e ASTM E230



que impõe um que o erro de leituras fique dentro do limite de mais ou menos  $1^{\circ}\text{C}$  ( $|\text{Erro}| \leq 1,0^{\circ}\text{C}$ ), então poderiam ser utilizados os sobressalentes.

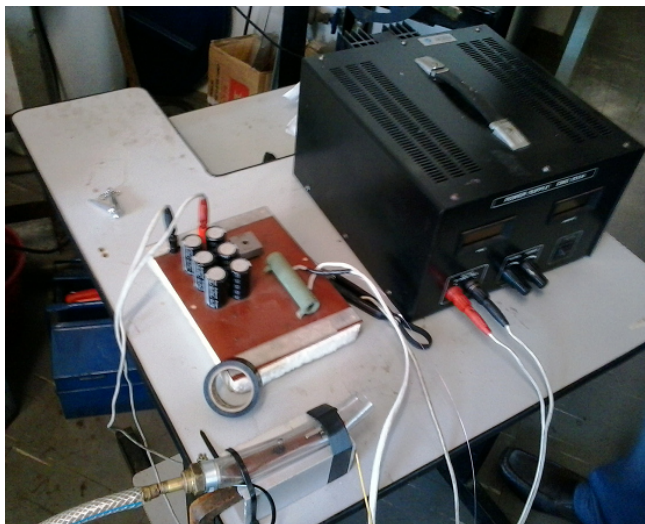


Figura 3.8 – Soldagem de termopares.

Foram instalados dois termopares nos reservatórios térmicos, um na parte superior e outro na parte inferior para verificar a estratificação da temperatura, também foi instalado um termopar na entrada e um na saída de cada coletor solar e mais um externo para verificação da temperatura ambiente, totalizando nove sensores de temperatura.

### 3.3.6. Aquisição de dados

As grandezas armazenadas pelo sistema de aquisição de dados foram a temperatura e a radiação solar. As temperaturas monitoradas foram as de entrada e saída do fluido no coletor solar, as temperaturas de entrada e saída no reservatório térmico, isto duplicado pois foram utilizados dois sistemas simultaneamente, sempre com água destilada e outro com nanofluido, a temperatura ambiente também foi monitorada com o auxílio de termopar. Para realizar a aquisição dos dados de temperatura foram instalados os termopares em módulo de aquisição de dados, modelo NI9211 da fabricante National Instruments, tal módulo foi instalado em um chassi do mesmo fabricante e este foi conectado ao computador, conforme a Fig. 3.7. A aquisição de dados de radiação solar incidente foi feita utilizando módulo NI9213, parecido com o da Fig. 3.9, com a diferença de fazer a aquisição em milivolts, já os dados de temperatura chegavam ao módulo em microvolts, o chassi utilizado comportava a instalação de até oito módulos simultaneamente.

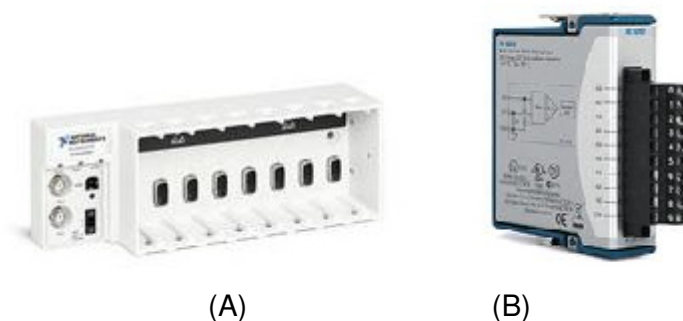


Figura 3.9 – Sistema de aquisição de dados da National Instruments.(A) Chassi, (B) Módulo

A interface do módulo de aquisição com o computador foi feita através do software LabView. Onde foi criado um programa, ver Fig. 3.10, para melhor monitoramento do processo, com colunas que mostram a variação das temperaturas em tempo real e são plotadas as linhas da variação da temperatura em função do tempo de cada termopar. O programa também contou com indicador que mostrava a radiação solar instantânea.

Dentro da mesma janela de controle estão apresentados em caixa de diálogo, a hora solar, a inclinação solar e o ângulo horário que variam a cada lapso de tempo. Para inserir tal posicionamento foram implementadas no programa todas as fórmula de movimentação solar contidas na revisão bibliográfica deste trabalho, foram utilizadas da Eq. (2.1) até a Eq. (2.11). Este posicionamento foi feito constantemente visando deixar os painéis fototérmicos que estavam montados no posicionador perpendiculares aos raios solares. A posição geográfica utilizada foi a do município de Uberlândia/MG, sendo sua latitude igual a  $18^{\circ} 55' 07''$  Sul e sua longitude igual  $48^{\circ} 16' 38''$  Oeste.

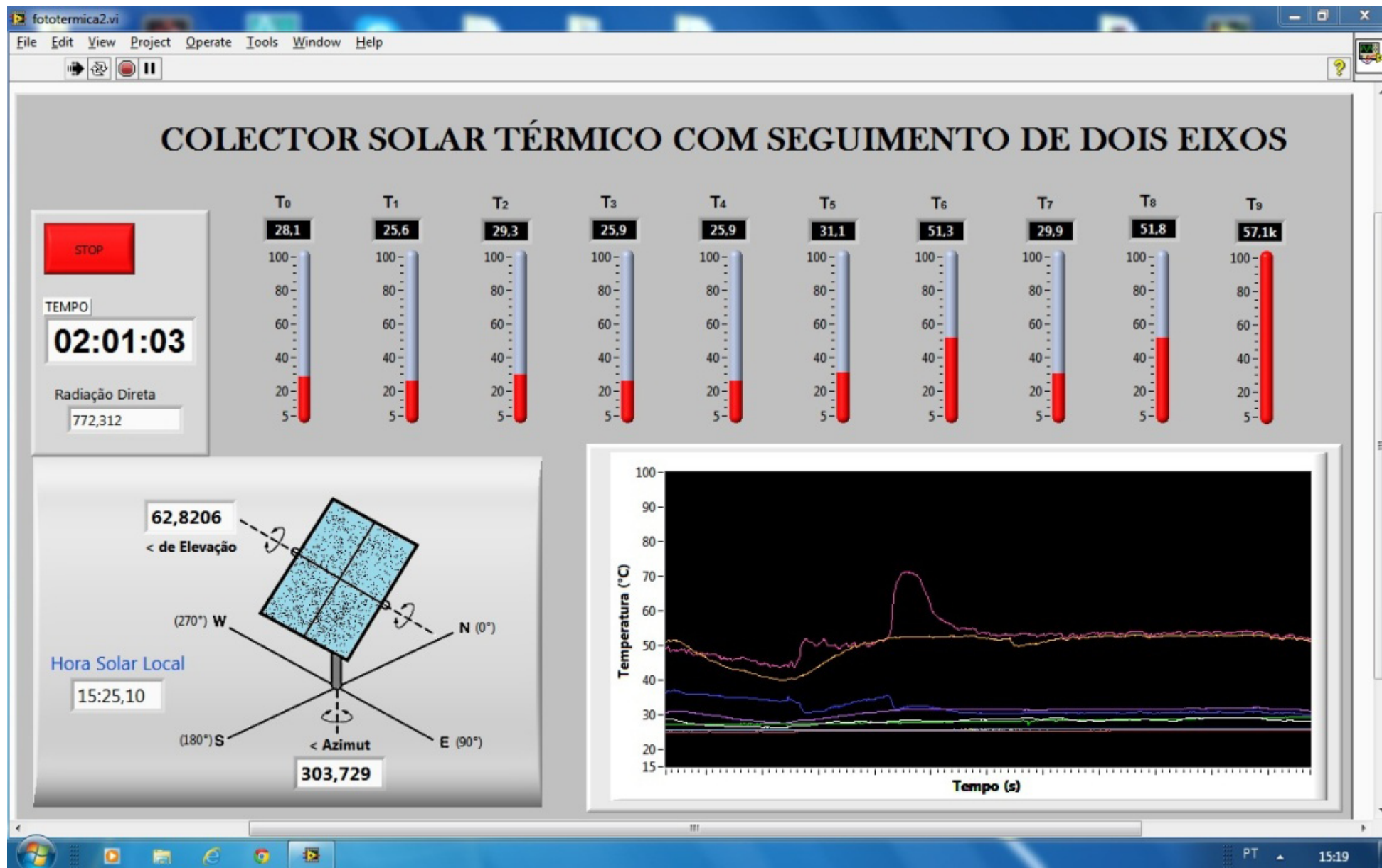


Figura. 3.10 – Programa no LabView utilizado nos testes.

# **CAPÍTULO IV**

## **METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

A metodologia proposta condicionou da melhor maneira possível a realização de testes da eficiência na conversão fototérmica em coletores solares com nanofluidos de prata. Coletores idênticos foram montados no mesmo plano de trabalho, submetidos às mesmas condições climáticas, porém um com nanofluido e outro com prata. Sendo assim ao final de cada teste foi possível determinar a eficiência da conversão fototérmica em cada coletor.

### **4.1. Metodologia dos testes**

Os testes seguiram as orientações das normas:

- ABNT/NBR 12269:2006 – Sistema de aquecimento solar de água em circuito fechado - Projeto e instalação;
- ABNT/NBR 15569:2008 – Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto - Projeto e instalação;
- ABNT/NBR 10185:2013 - Reservatórios térmicos para líquidos destinados a sistemas de energia solar — Determinação de desempenho térmico — Método de ensaio;

A estrutura foi instalada no terraço do Bloco 5S da Universidade Federal de Uberlândia – Campus Santa Mônica, tal local foi escolhido, pois apresentava as condições necessárias para realização dos testes dentro da norma vigente. Depois de instalada a estrutura partiu-se para a caracterização do nanofluidos e determinação de suas propriedades termofísicas, posteriormente os nanofluidos foram colocados dentro do sistema a ser estudado e foram efetuados os testes. Os testes foram conduzidos em condições reais de conversão fototérmica, sendo que não foram priorizados dias de céu

limpo e obviamente não foram realizados testes em dias nublados ou chuvosos, tal fato é importante ser destacado para não viciar resultados com condições ideais.

#### 4.2. Caracterização de nanofluidos

Os nanofluidos foram produzidos pelo método de dois passos. Nanopartículas de prata com tamanho aproximado 10 nm foram misturadas em água destilada, com o auxílio do homogeneizador de alta pressão (até 600bar), conforme Fig. 4.1. O homogeneizador é composto por dois microcanais de diâmetro interno de 75  $\mu\text{m}$  que dividem o fluxo de alimentação em duas partes, as quais são depois recombinadas na câmara de mistura. No homogeneizador ocorre um processo contínuo de quebra das aglomerações, o que propicia a obtenção de nanofluidos estáveis e homogêneos, não foram utilizados dispersantes ou surfactantes.

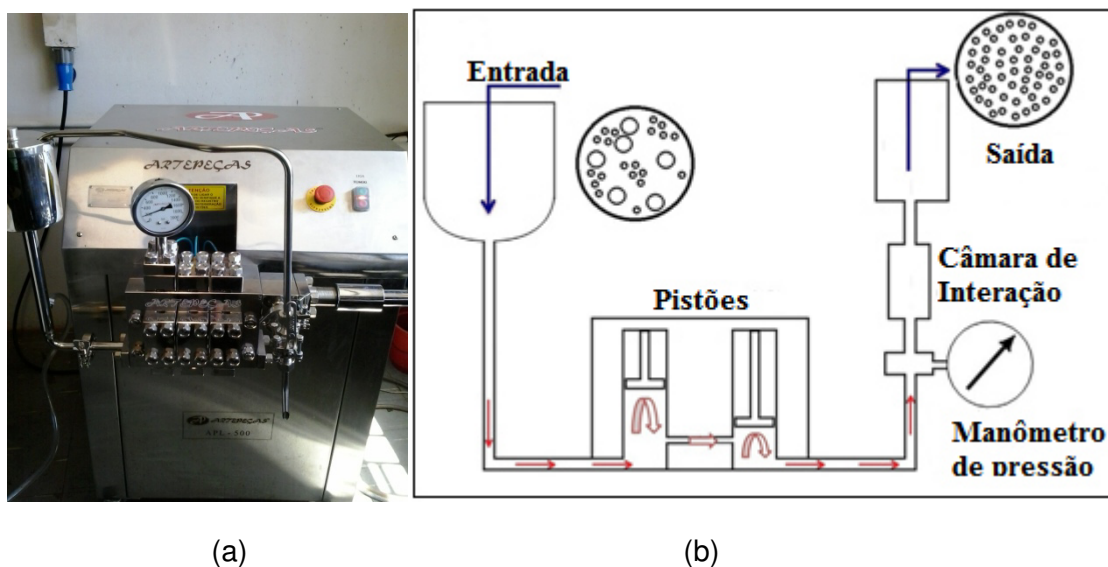


Figura. 4.1 – Homogeneizador: a) foto do equipamento e b) visão esquemática.

Para determinação da concentração exata da porcentagem de nanopartículas no nanofluido foi utilizado o método de evaporação. Com o auxílio de balança de precisão, foi pesado o recipiente onde o nanofluido seria evaporado, depois uma quantidade significativa de nanofluido foi despejada no recipiente e sua massa devidamente medida e posteriormente o nanofluido foi evaporado. Tendo a massa do recipiente vazio, a massa do recipiente cheio e a massa do recipiente com as nanopartículas depositadas no fundo

(depois da evaporação), com o auxílio do software EES (Equation Engineer Solver), foi calculada a porcentagem de nanopartículas em volume de nanofluido, conforme Eq. 4.1.

$$\phi_v = \frac{(m_{np}/\rho_{np})}{(m_{np}/\rho_{np}) + (m_{fb}/\rho_{fb})} \quad (4.1)$$

Sendo,  $(\phi_v)$  a porcentagem em volume de nanopartículas no nanofluido, " $m_{np}$ " a massa de nanopartículas, " $\rho_{fb}$ " a massa específica do fluido base, " $m_{fb}$ " a massa do fluido base e " $\rho_{np}$ " a massa específica de nanopartículas. Após a evaporação as amostras foram obtidas duas concentrações volumétricas diferentes de nanofluidos de prata com fluido base água destilada,  $\phi_v = 0,0005\% \text{ de Ag}$ ,  $\phi_v = 0,065\% \text{ de Ag}$  e posteriormente foi realizada nova homogeneização e a concentração obtida foi de  $\phi_v = 0,008\% \text{ de Ag}$ .

As condutividade térmica foi medida utilizando o método do fio quente, para as concentrações volumétricas de  $\phi_v = 0,0005\% \text{ de Ag}$  e de  $\phi_v = 0,065\% \text{ de Ag}$  para a concentração volumétrica de  $\phi_v = 0,008\% \text{ de Ag}$  a condutividade térmica foi calculada pela correlação de (HAMILTON; CROSSER, 1962) dada pela Eq. (2.13), já a massa específica para todas as amostras foi calculada pela regra da mistura indicada na Eq. (2.12), o calor específico foi calculado pela Eq.(2.16) e a viscosidade foi obtida pela correlação de (BATCHELOR, 1977) dada pela Eq. (2.18). Os valores das propriedades termofísicas destes três fluidos estão apresentados na Tab. 4.1.

Tabela 4.1 – Propriedades termofísicas dos nanofluidos de prata testados

Concentração volumétrica ( $\phi_v$ )	Massa Específica [g/cm <sup>3</sup> ]	Condutividade Térmica [W/m.K]	Calor Específico [J/kg.K]	Viscosidade [kg/m.s]
0,0005%	1,00005	0,62	4183	1,001
0,065%	1,0060	0,67	4254	1.162
0,008%	1,0008	0,62	4184	1,020
0,0% (Água)	1,0000	0,61	4182	1,000



### 4.3. Planejamento dos testes

Com a estrutura montada e com os nanofluidos devidamente caracterizados, a etapa posterior foi realização dos testes. Os testes tiveram planejamento experimental que pautou na replicação, ou seja, o mesmo teste para o mesmo nanofluido foi realizado mais de uma vez. Ocorreu aleatorização de variáveis, foram alteradas as posições de nanofluidos e água destilada e também os pesquisadores na realização do experimento. A vista geral da estrutura experimental em funcionamento é apresentada na Fig. 4.2.



Figura 4.2 – Estrutura experimental em funcionamento

Os testes serão iniciados em condições climáticas boas, não necessariamente com o céu totalmente limpo, ou com temperatura ambiente alta, mas devido ao sistema de aquisição de dados e do computador ficarem expostos as intempéries climáticas, ao menor

sinal de chuva os testes serão interrompidos, devido a isto pode existir grande diferença no tempo de duração de alguns testes.



## CAPITULO V

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos na conversão fototérmica utilizando nanofluidos em coletores solares montados no dispositivo posicionador.

Os resultados do teste utilizando o diagrama esquemático mostrado na Fig. 3.1, utilizando como fluido de trabalho água destilada e nanofluido com  $\phi_v = 0,0005\%$  de *Ag* dispersas no volume. As figuras Fig. 5.1 e Fig. 5.2 mostram os resultados do teste de verificação da capacidade de isolamento dos reservatórios térmicos, segundo a norma ABNT/NBR 10185:2013 e ao testar os reservatórios avaliou-se o comportamento do sistema de aquisição de dados durante a realização de testes. Este teste foi realizado no dia 03/12/14 das 09h30min às 15h30min com duração de seis horas, o sistema de trocadores estava vazio. Após a análise dos testes foi constatado que os dois reservatórios atendem a norma ABNT/NBR 10185:2013 e apresentam boa capacidade de isolamento térmico.

Com o sistema qualificado partiu-se para a realização dos testes com fluidos dentro dos trocadores de calor. O Teste -1 foi realizado no dia 04/12/14 das 08h10min as 11h30min com duração de 3,3 horas, utilizando nanofluido de  $\phi_v = 0,0005\%$  de *Ag* e no sistema testado em paralelo foi usado água destilada. Os resultados obtidos na conversão fototérmica utilizando tais fluidos estão apresentados nas Fig. 5.3 onde foram verificadas as temperaturas nas saídas dos coletores solares com água e com nanofluido, na Fig. 5.4 estão os valores de temperatura no reservatório térmico no qual circula nanofluido no trocador e na Fig. 5.5 são mostrados os valores de temperatura no reservatório térmico onde circula água no trocador de calor, são apresentados os valores de temperatura na parte superior e na parte inferior do reservatório para verificar a estratificação de temperatura. A média da radiação incidente (R) durante o período do teste foi  $R=554 \text{ W/m}^2$

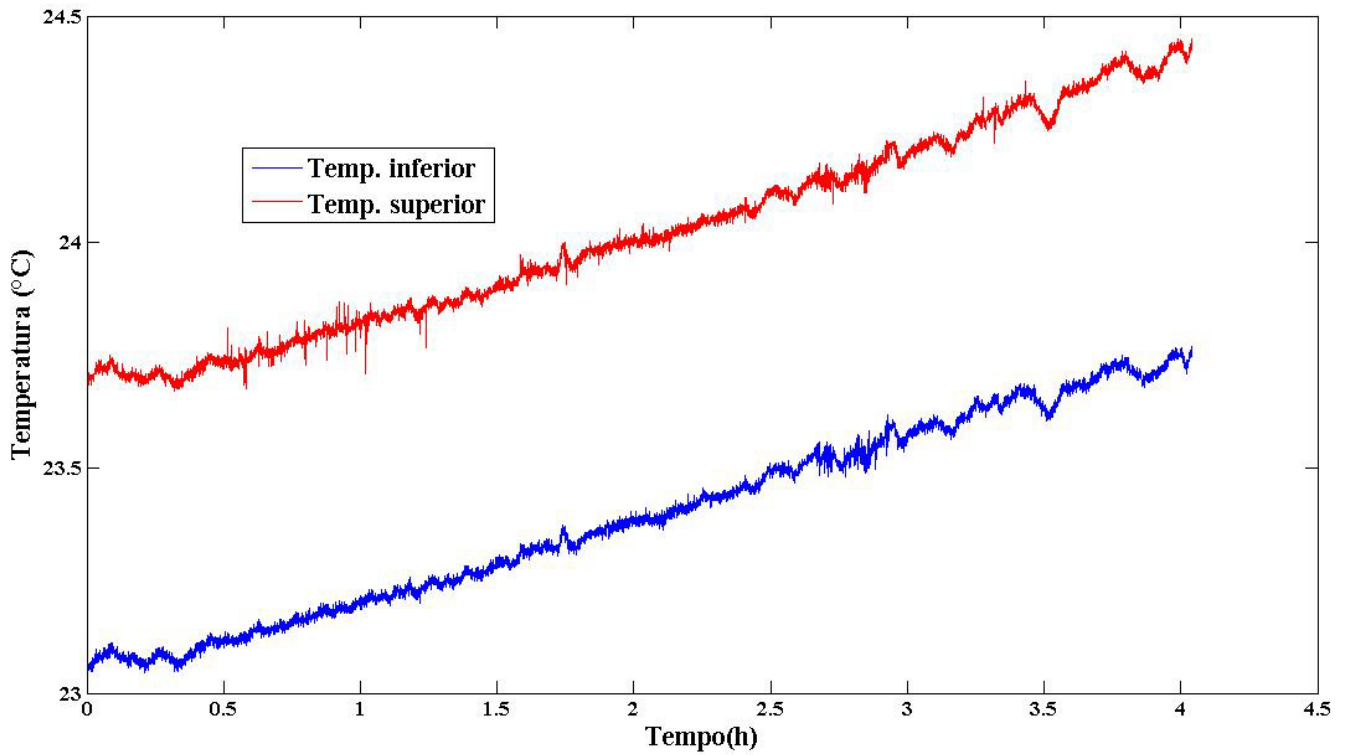


Figura. 5.1 – Resultados obtidos na verificação do isolamento do reservatório térmico no qual circula água destilada

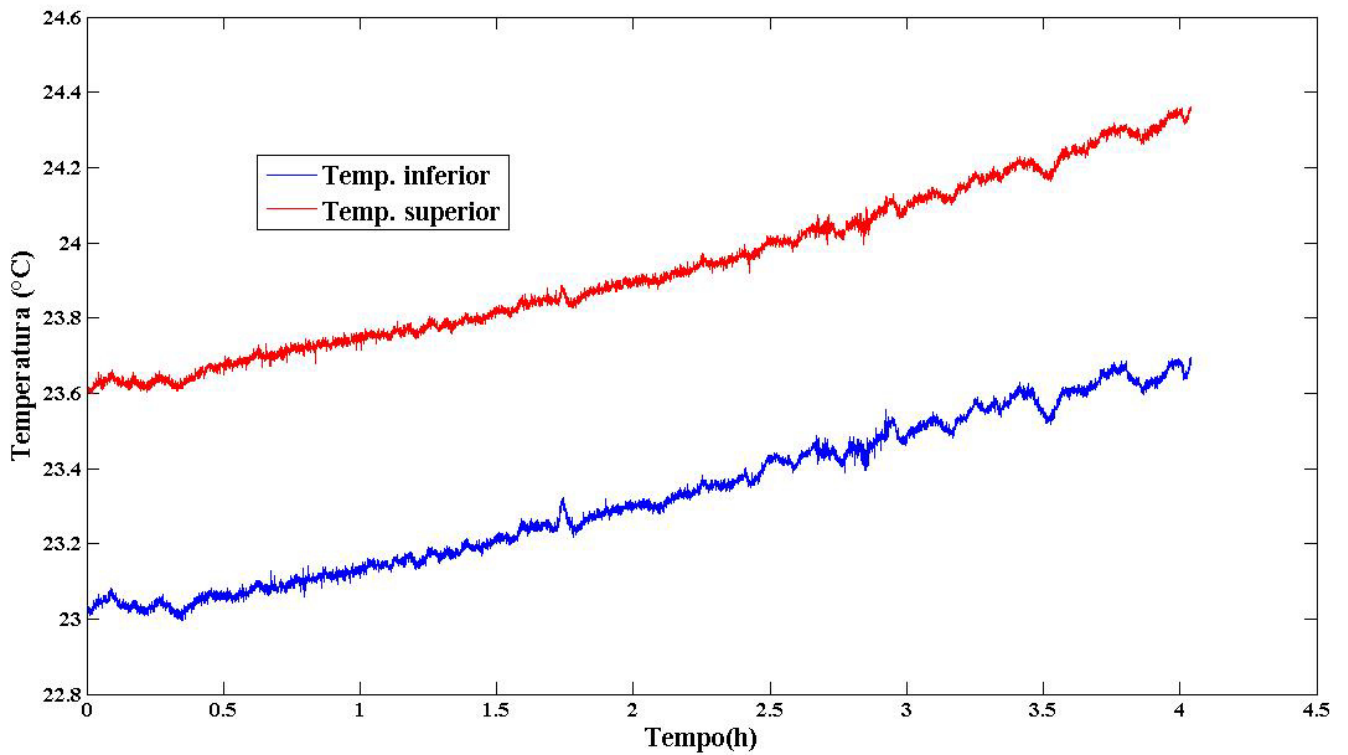


Figura. 5.2 – Resultados obtidos na verificação do isolamento do reservatório térmico no qual circula nanofluido

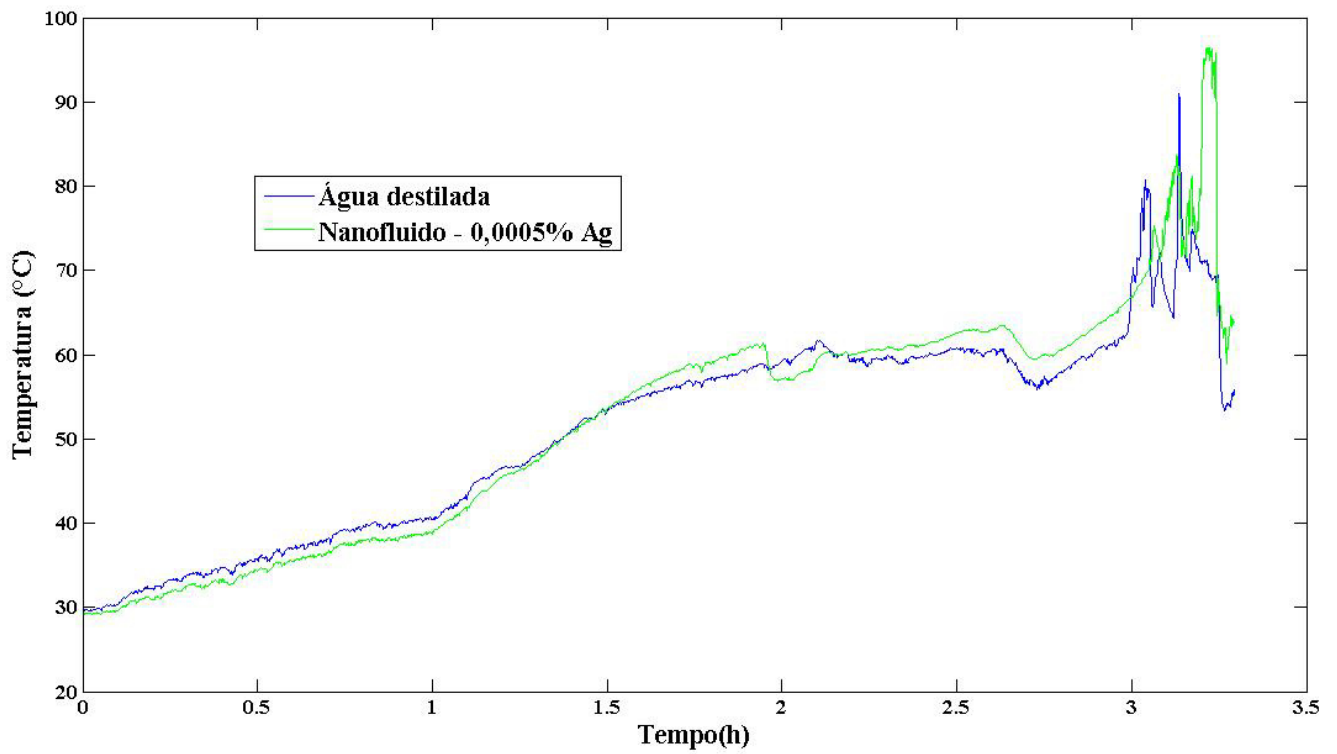


Figura. 5.3 – Temperatura na saída dos coletores solares

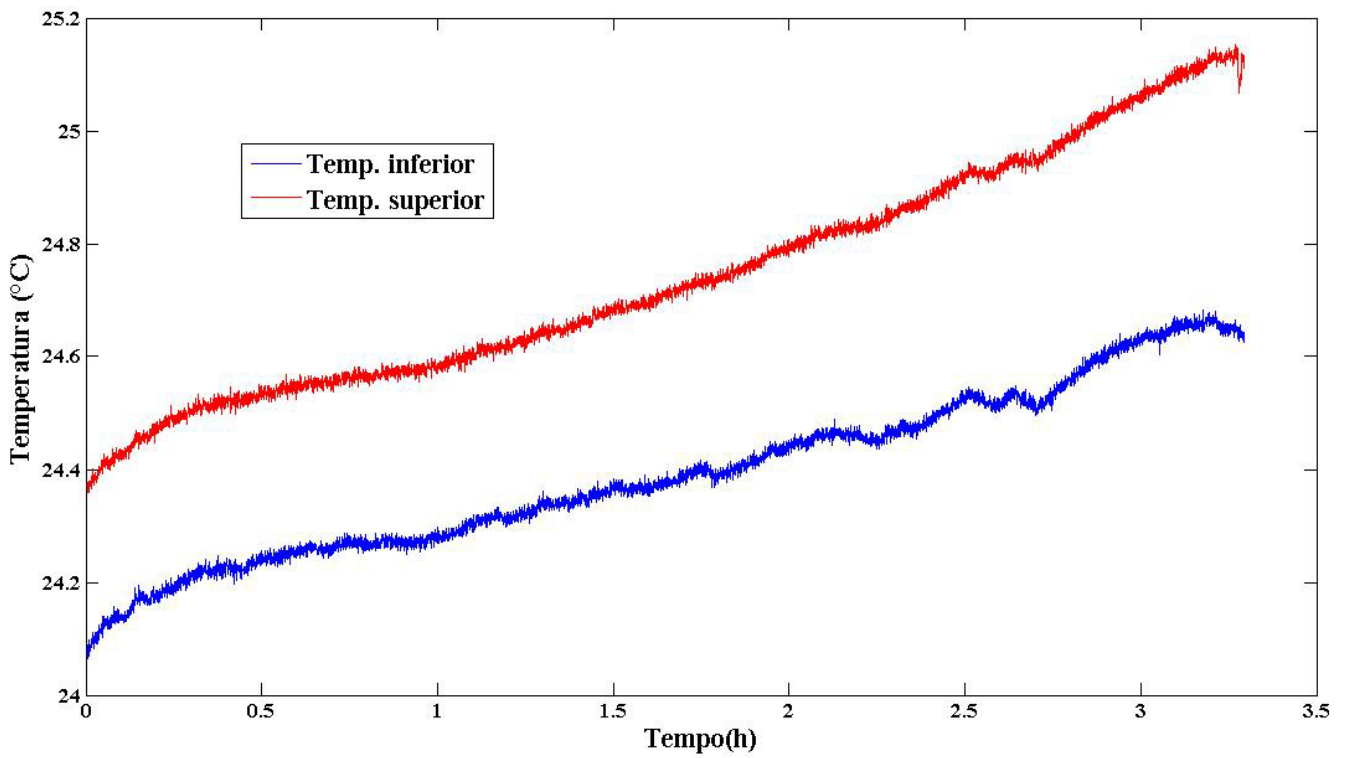


Figura. 5.4 – Temperaturas no reservatório no qual circula nanofluido,  $\phi_v = 0,0005\%$  de Ag

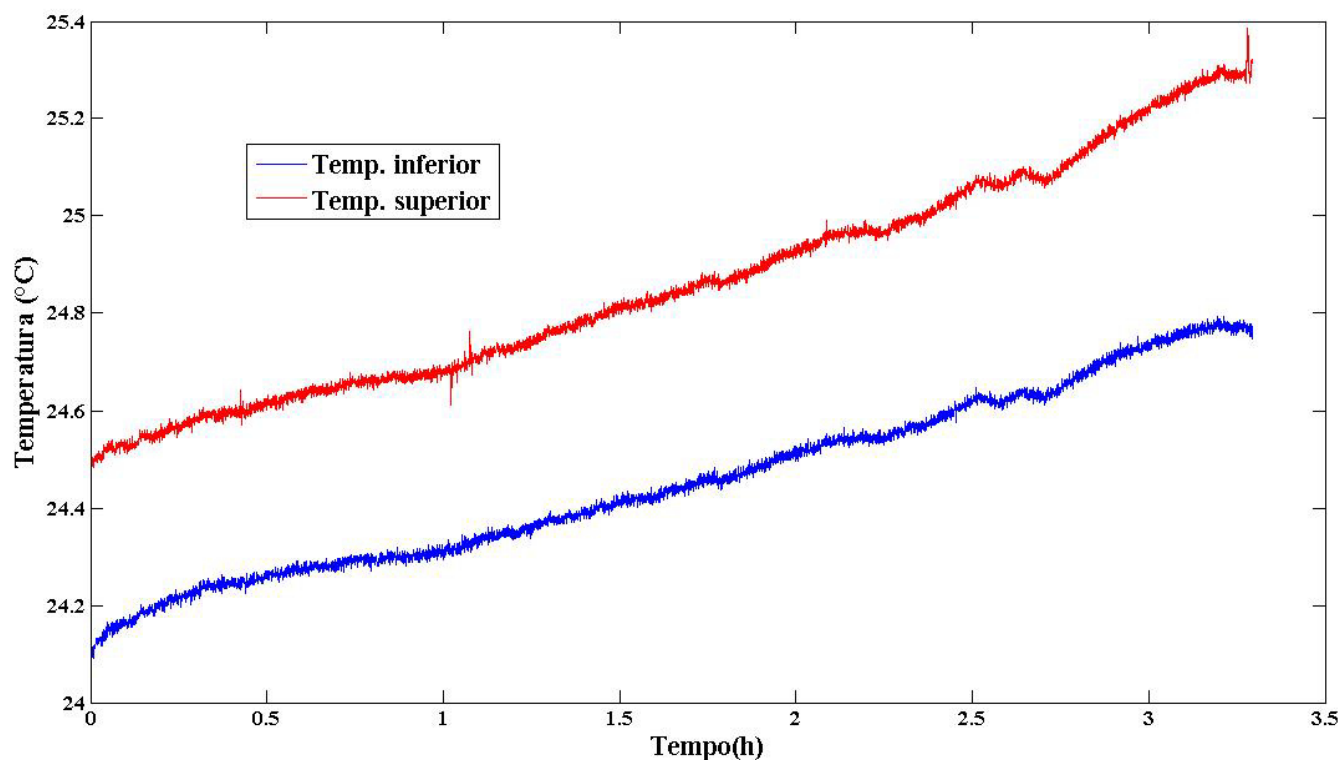


Figura. 5.5 - Temperaturas no reservatório no qual circula água destilada

Neste teste ocorreu o rompimento das mangueiras de transporte de água e de nanofluido dos coletores para os reservatórios, devido ao aumento significativo da temperatura no interior das mesmas, com isto ocorreu o vazamento de fluido e o teste foi interrompido. Foram trocadas todas as mangueiras por outras que suportavam temperaturas próximas a 100 °C e partiu-se para novos testes.

O Teste – 2 foi realizado no dia 12/12/14 das 07h00min as 15h00min com duração de oito horas, com nanofluido de prata  $\phi_v = 0,0005\%$  de Ag e no sistema testado em paralelo foi utilizado água destilada. Os resultados obtidos na conversão fototérmica utilizando tais fluidos estão apresentados nas Fig. 5.6 onde foram verificadas as temperaturas nas saídas dos coletores solares com água e com nanofluido. Na Fig. 5.7 estão os valores de temperatura no reservatório térmico no qual circula nanofluido dentro do coletor e na Fig. 5.8 são apresentados os valores de temperatura no reservatório térmico onde circula água no trocador de calor, são mostrados os valores de temperatura na parte superior e na parte inferior do reservatório para verificar a estratificação de temperatura. A média da radiação incidente (R) durante o período do teste foi  $R=597 \text{ W/m}^2$ .

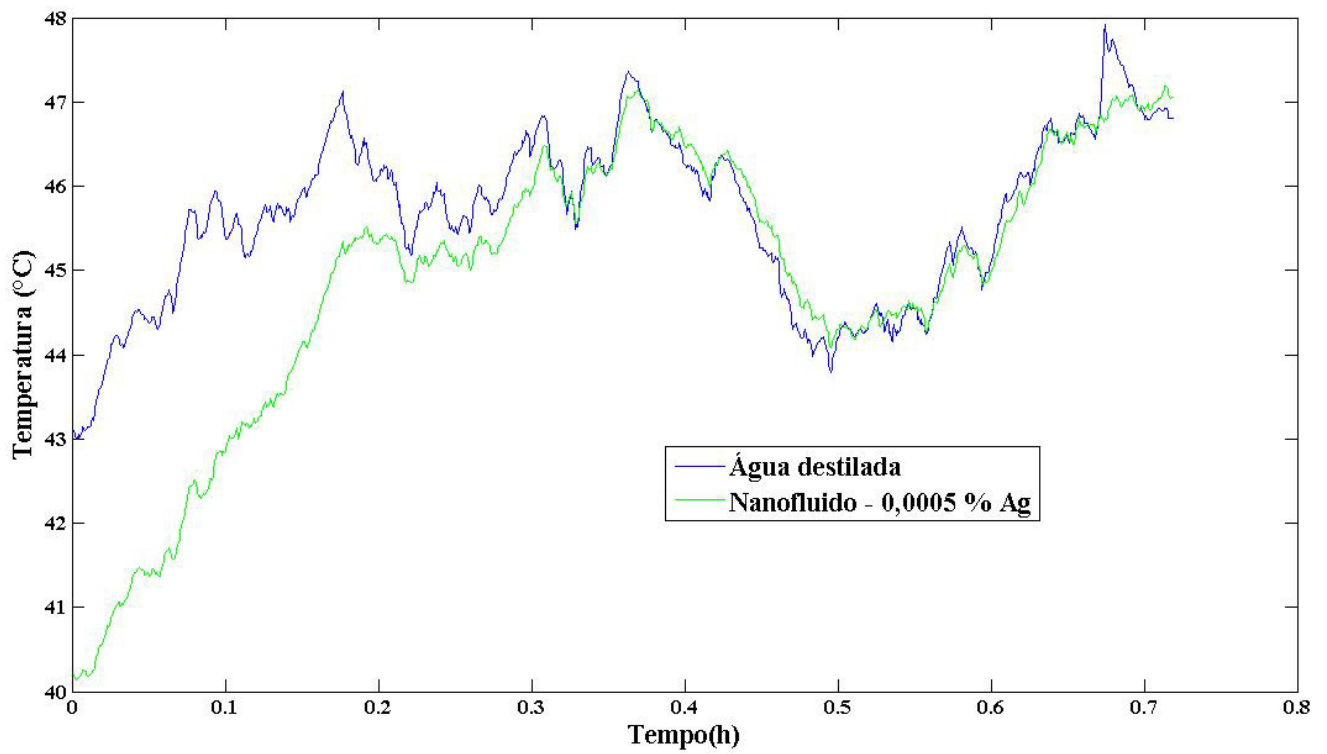


Figura 5.6 - Temperatura na saída dos coletores solares

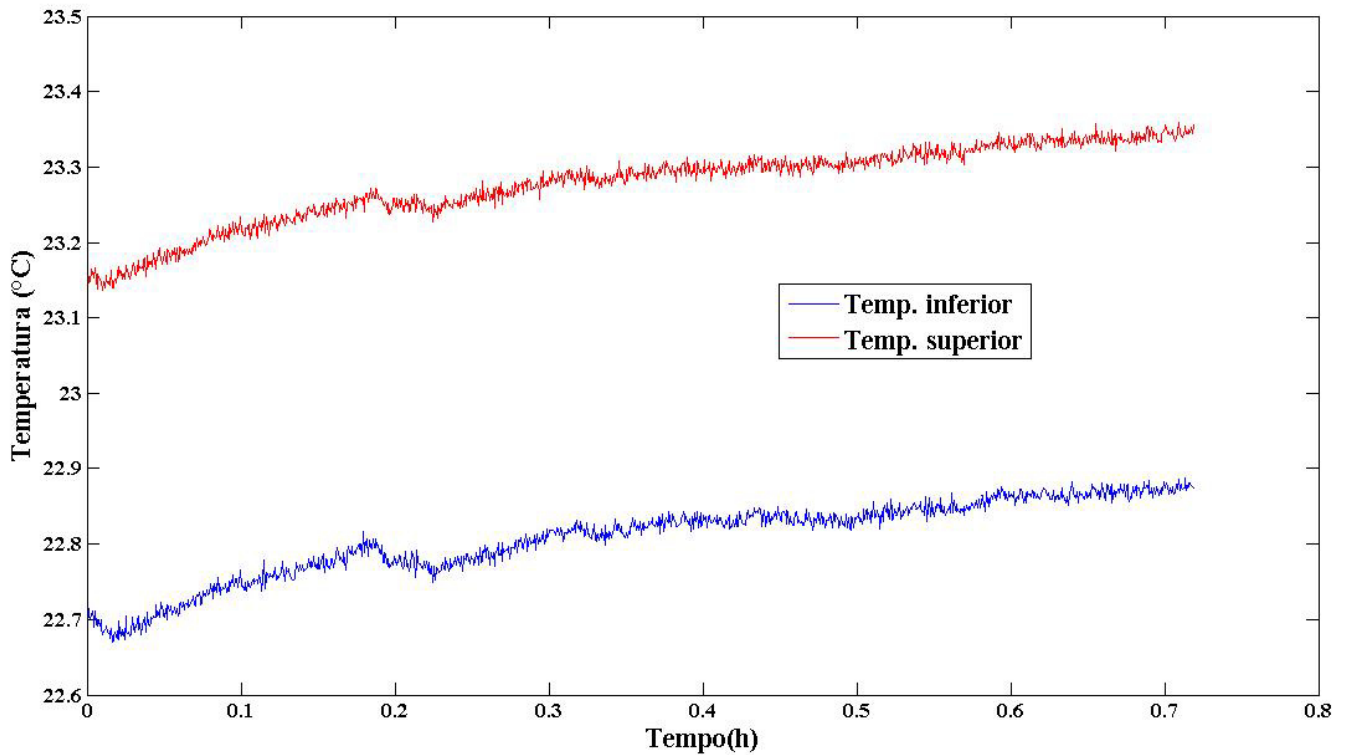


Figura 5.7 – Temperaturas no reservatório que circula nanofluido,  $\phi_v = 0,0005\%$  de Ag

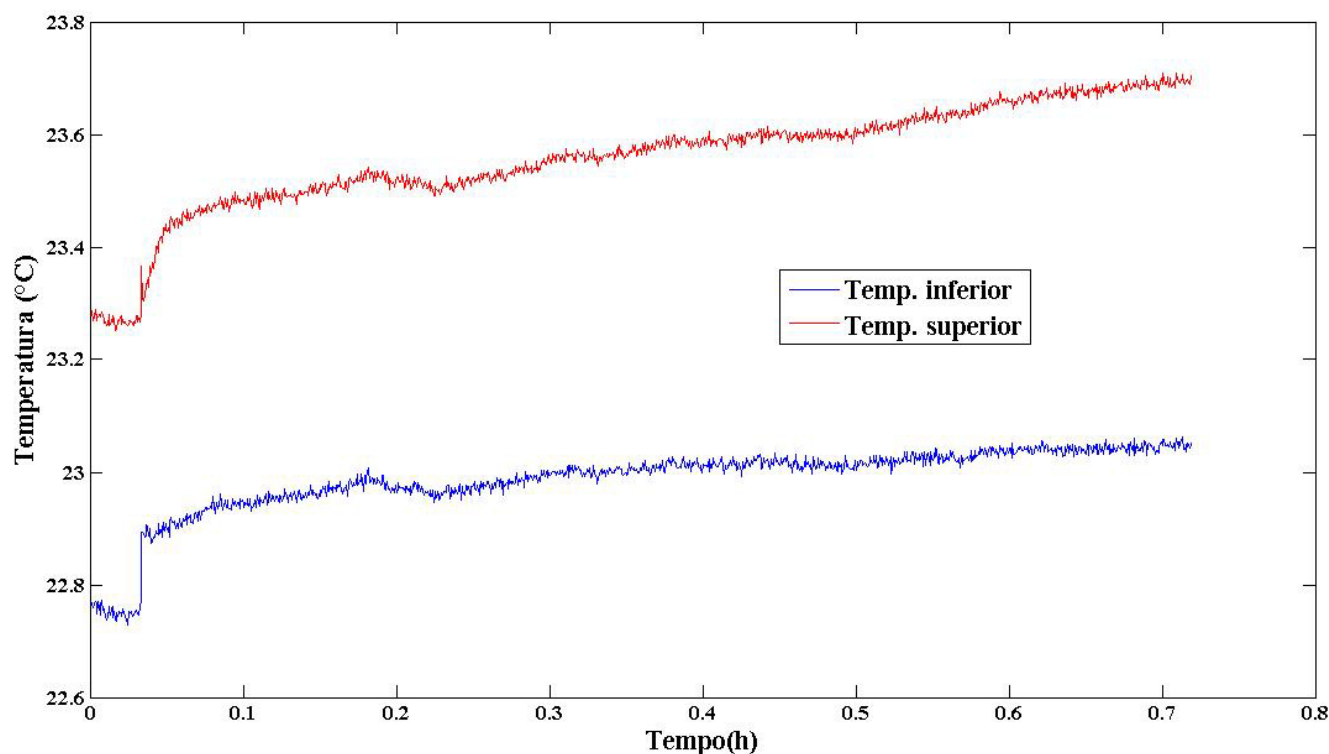


Figura 5.8 - Temperaturas no reservatório que circula água destilada

O Teste – 3 foi realizado no dia 10/01/15 das 10h00min as 16h30min com duração de 6,5 horas, com nanofluido de prata com concentração volumétrica,  $\phi_v = 0,0005\%$  de *Ag* e no sistema testado em paralelo foi utilizado água destilada. Os resultados obtidos na conversão fototérmica utilizando tais fluidos estão apresentados nas Fig. 5.9 onde foram verificadas as temperaturas nas saídas dos coletores solares com água e com nanofluido, na Fig. 5.10 estão os valores de temperatura no reservatório térmico onde circula nanofluido no trocador de calor e na Fig. 5.11 são apresentados os valores de temperatura no reservatório térmico onde circula água no trocador de calor, são mostrados os valores de temperatura na parte superior e na parte inferior do reservatório para verificar a estratificação de temperatura. Neste teste visando maior confiabilidade nos resultados, foi aleatorizado o operador do sistema, ou seja, o experimento foi conduzido por outra pessoa sem a intervenção de autor. A média da radiação incidente ( $R$ ) durante o período do teste foi  $R=498,27 \text{ W/m}^2$ .

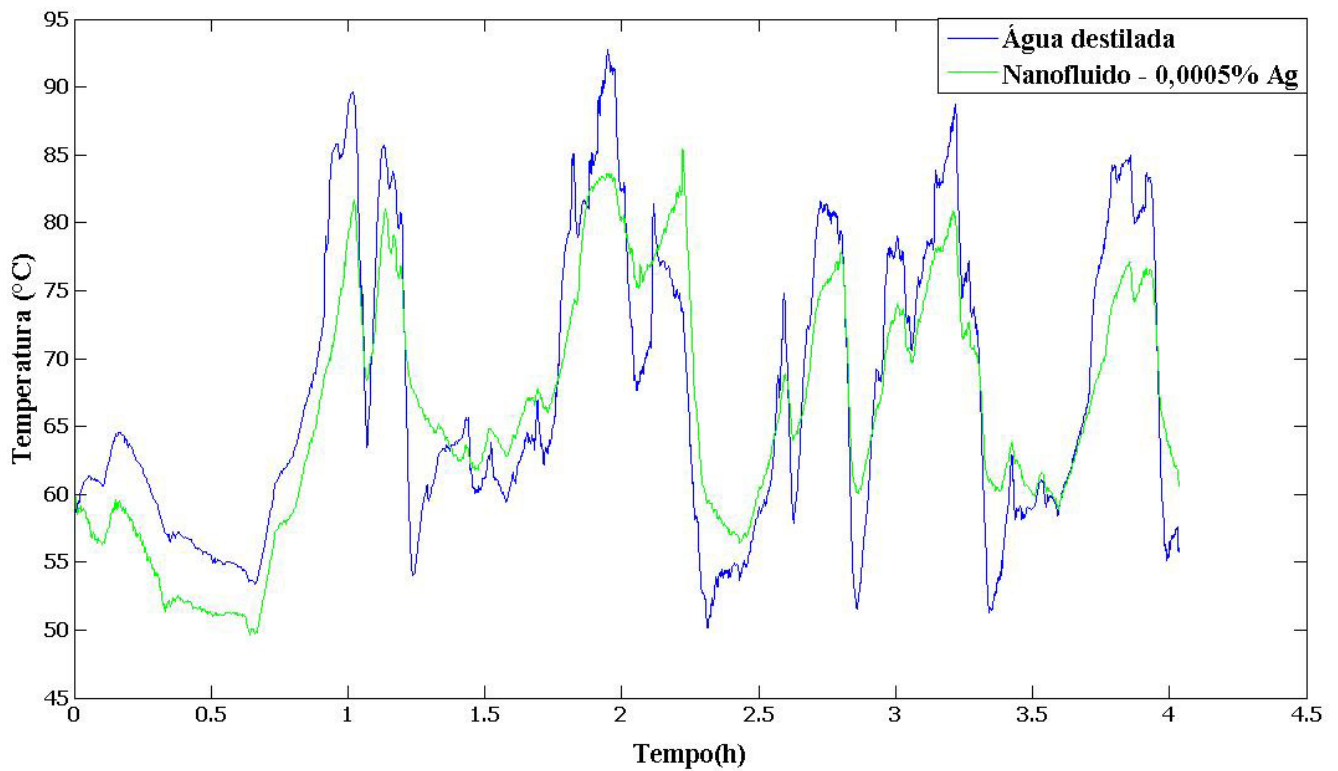


Figura 5.9 – Temperatura na saída dos coletores solares

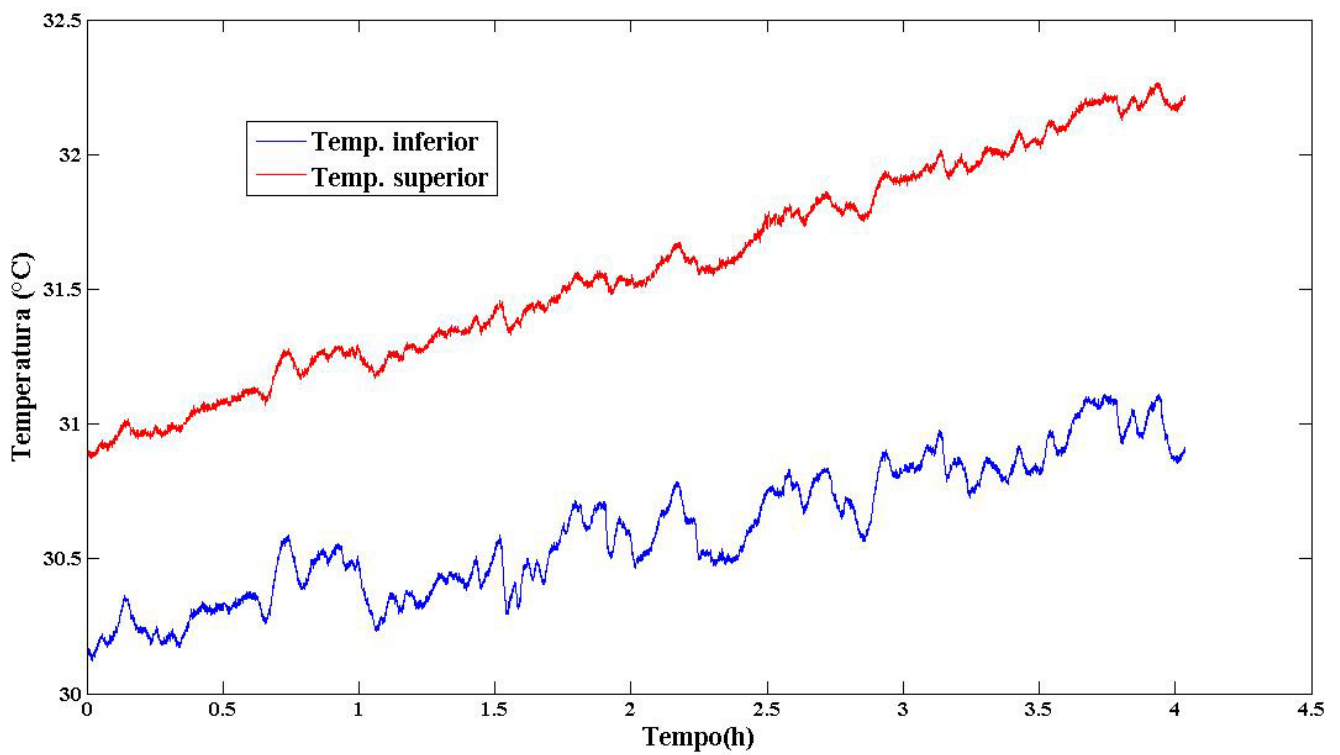


Figura 5.10 – Temperaturas no reservatório que circula nanofluido,  $\phi_v = 0,0005\%$  de Ag

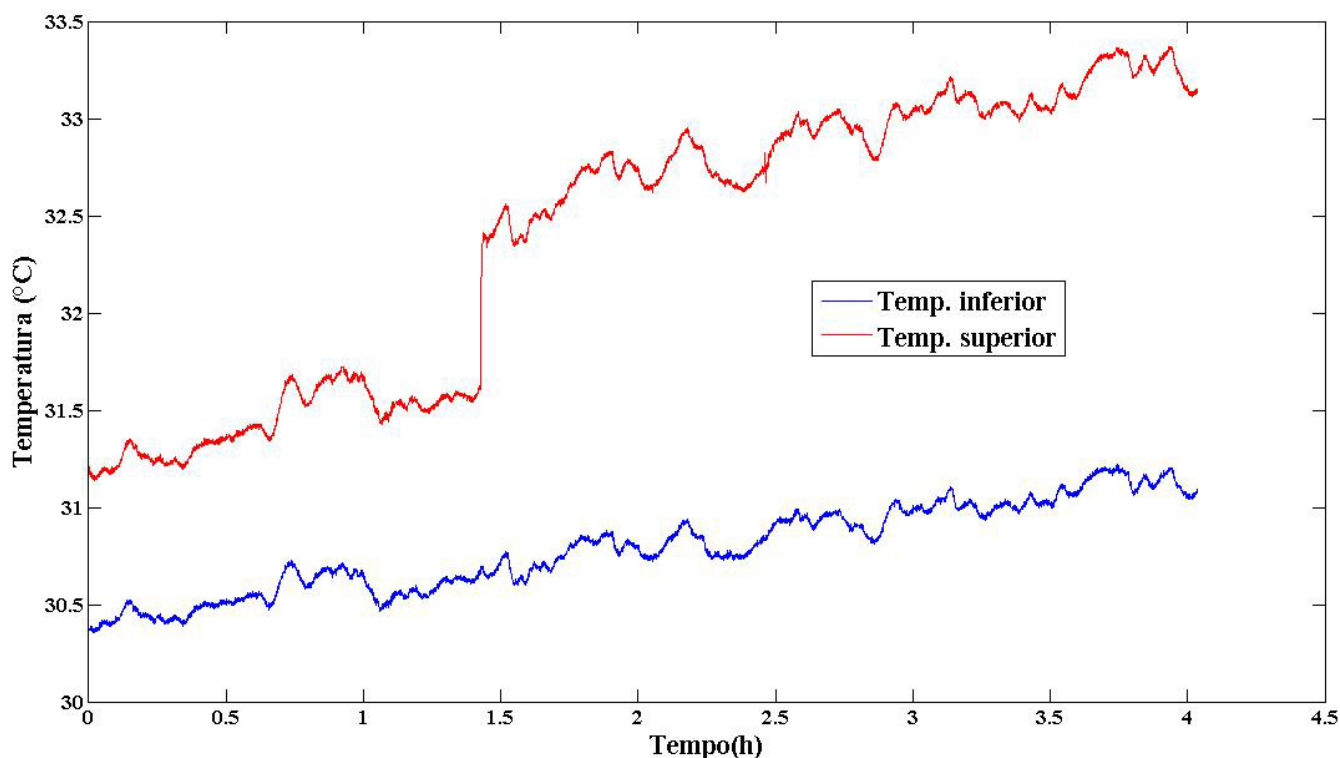


Figura 5.11 – Temperaturas no reservatório que circula água destilada

O Teste – 4 foi realizado no dia 12/05/15 das 07h00min às 15h00min com duração de oito horas com nanofluido de prata com concentração volumétrica,  $\phi_v = 0,0005\%$  de *Ag* e no sistema testado em paralelo foi utilizado água destilada. Os resultados obtidos na conversão fototérmica utilizando tais fluidos estão apresentados nas Fig. 5.12 onde foram verificadas as temperaturas nas saídas dos coletores solares com água e com nanofluido, na Fig. 5.13 estão os valores de temperatura no reservatório térmico que circula nanofluido no trocador de calor e na Fig. 5.14 são apresentados os valores de temperatura no reservatório térmico onde circula água no trocador de calor, são mostrados os valores de temperatura na parte superior e na parte inferior do reservatório para verificar a estratificação de temperatura. Antes da realização do teste foi realizada a limpeza de todo o sistema e posteriormente foram colocados novamente o nanofluido e a água destilada nas tubulações. A média da radiação incidente ( $R$ ) durante o período do teste foi  $R=519 \text{ W/m}^2$ .



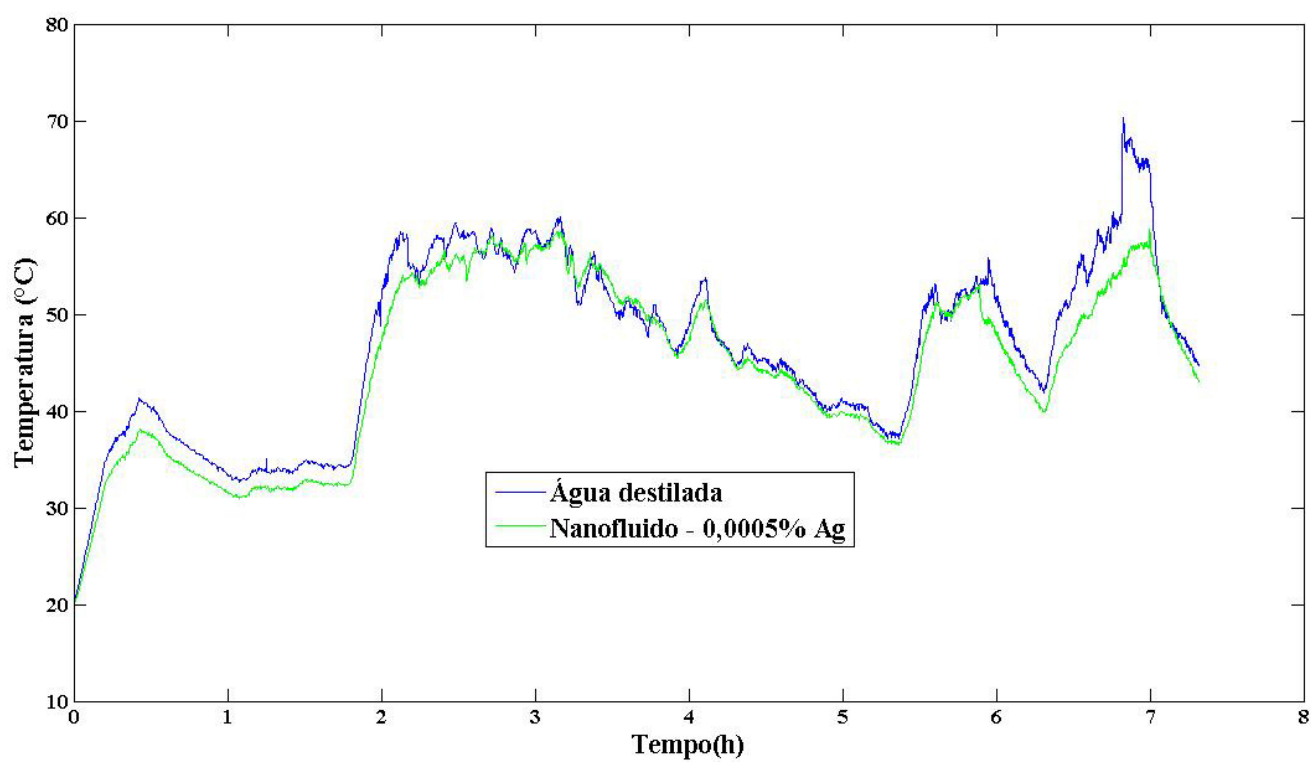


Figura 5.12 – Temperatura na saída dos coletores solares

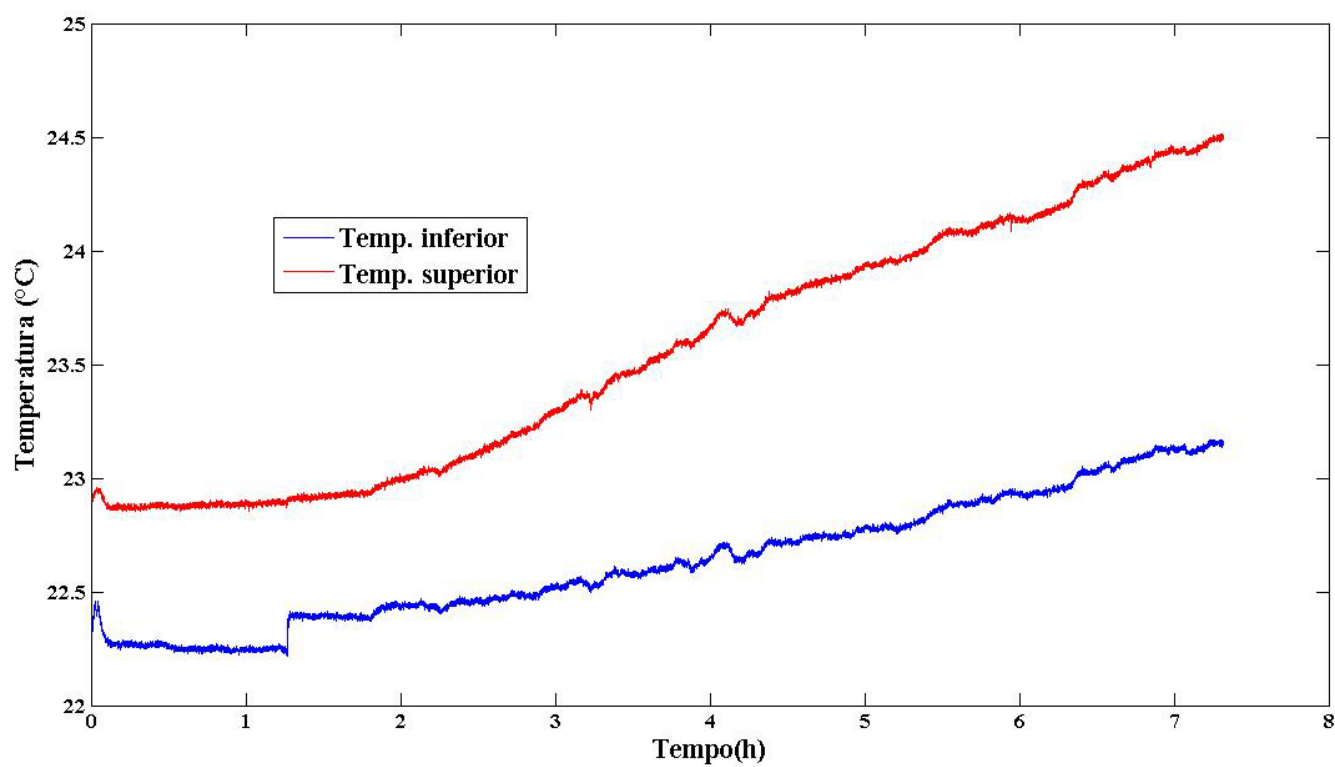


Figura 5.13 – Temperaturas no reservatório no qual circula nanofluido,  $\phi_v = 0,0005\%$  de Ag

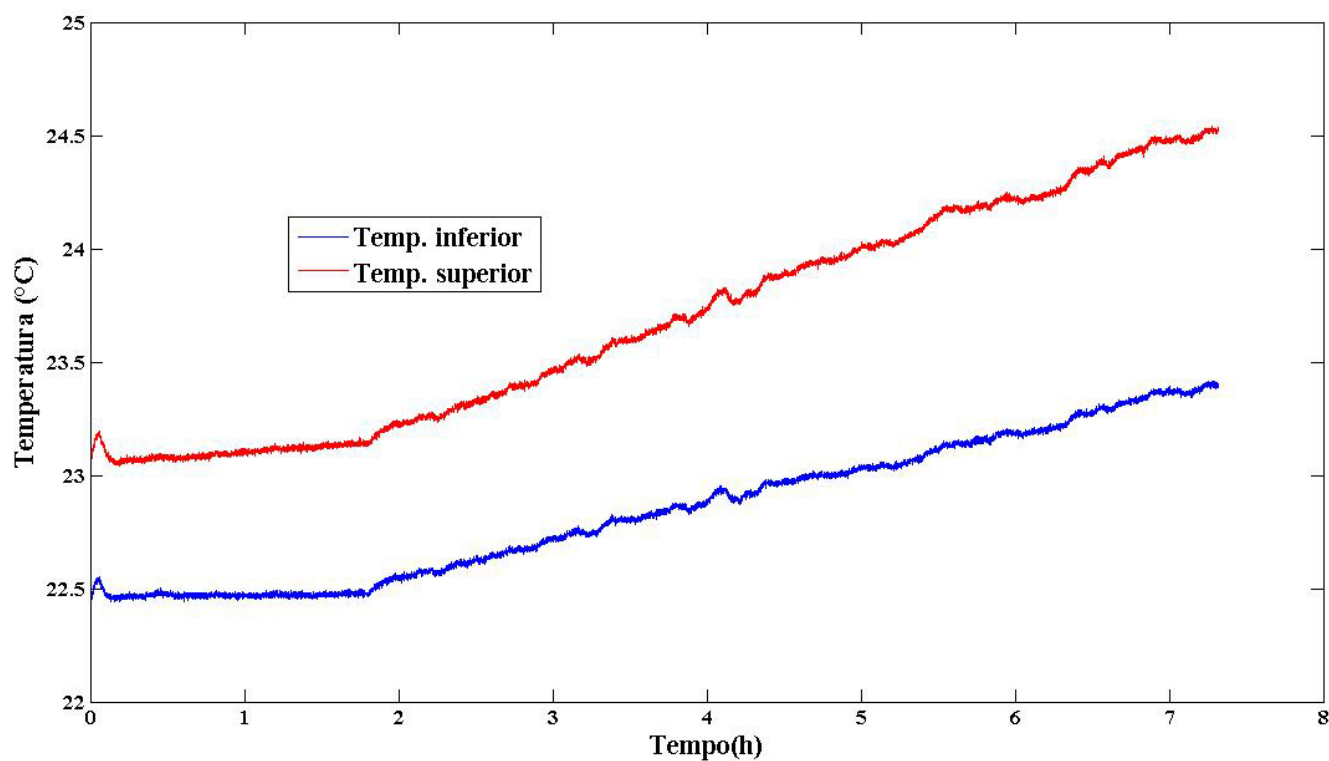


Figura 5.14 - Temperaturas no reservatório no qual circula água destilada

O Teste - 5 foi realizado no dia 13/05/15 das 07h00min as 15h00min com duração de oito horas, usando nanofluido de prata com concentração volumétrica,  $\phi_v = 0,065\%$  de *Ag*. Tal concentração é superior a dos outros testes. No sistema testado em paralelo foi utilizado água destilada. Os resultados obtidos na conversão fototérmica utilizando tais fluidos estão apresentados nas Fig. 5.15 onde foram verificadas as temperaturas nas saídas dos coletores solares com água e com nanofluido, na Fig. 5.16 estão os valores de temperatura no reservatório térmico que circula nanofluido no trocador de calor e na Fig. 5.17 são apresentados os valores de temperatura no reservatório térmico onde circula água no trocador de calor. Foram mostrados os valores de temperatura na parte superior e na parte inferior do reservatório para verificar a estratificação de temperatura. Visando aumentar a confiabilidade dos dados medidos, foi efetuada a aleatorização da posição dos coletores solares, ou seja, no coletor que estava circulando, nos testes anteriores nanofluido, neste teste foi circulado água destilada e vice-versa. . A média da radiação incidente ( $R$ ) durante o período do teste foi  $R=380 \text{ W/m}^2$ .

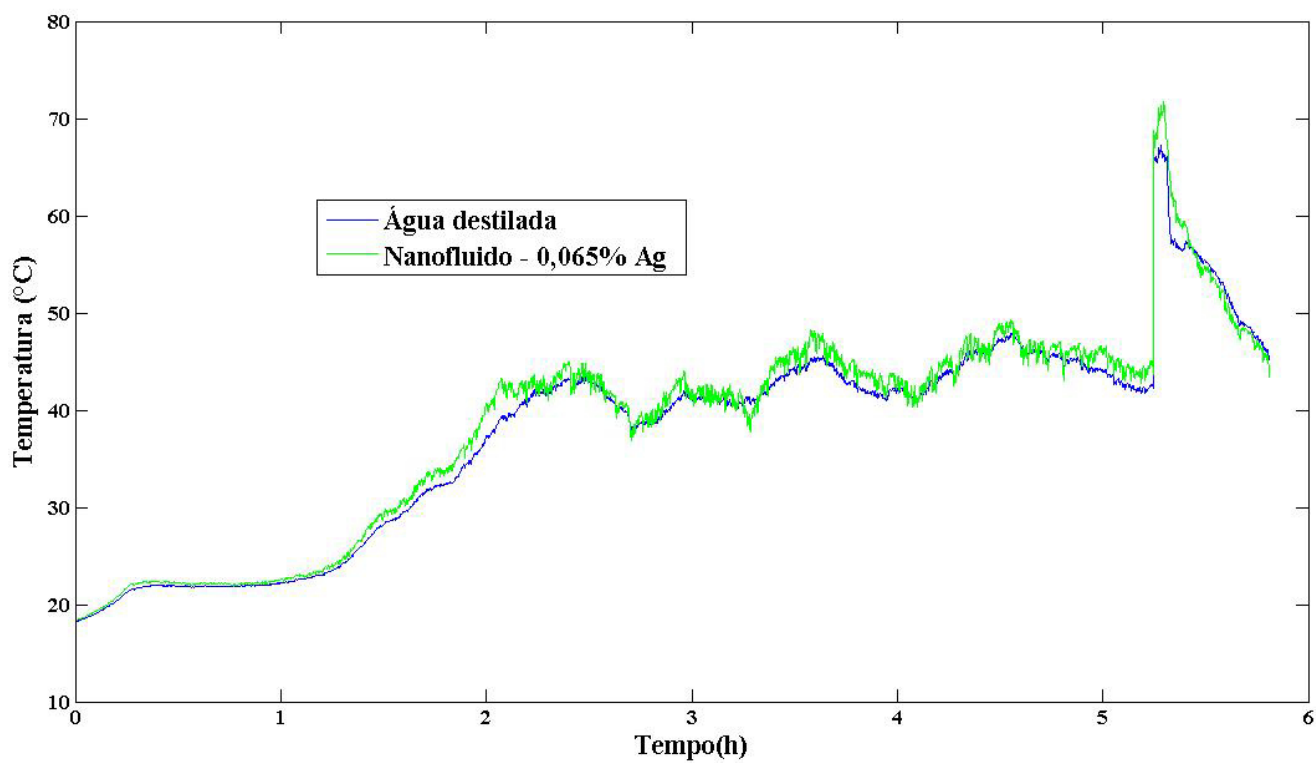


Figura 5.15 – Temperatura na saída dos coletores solares

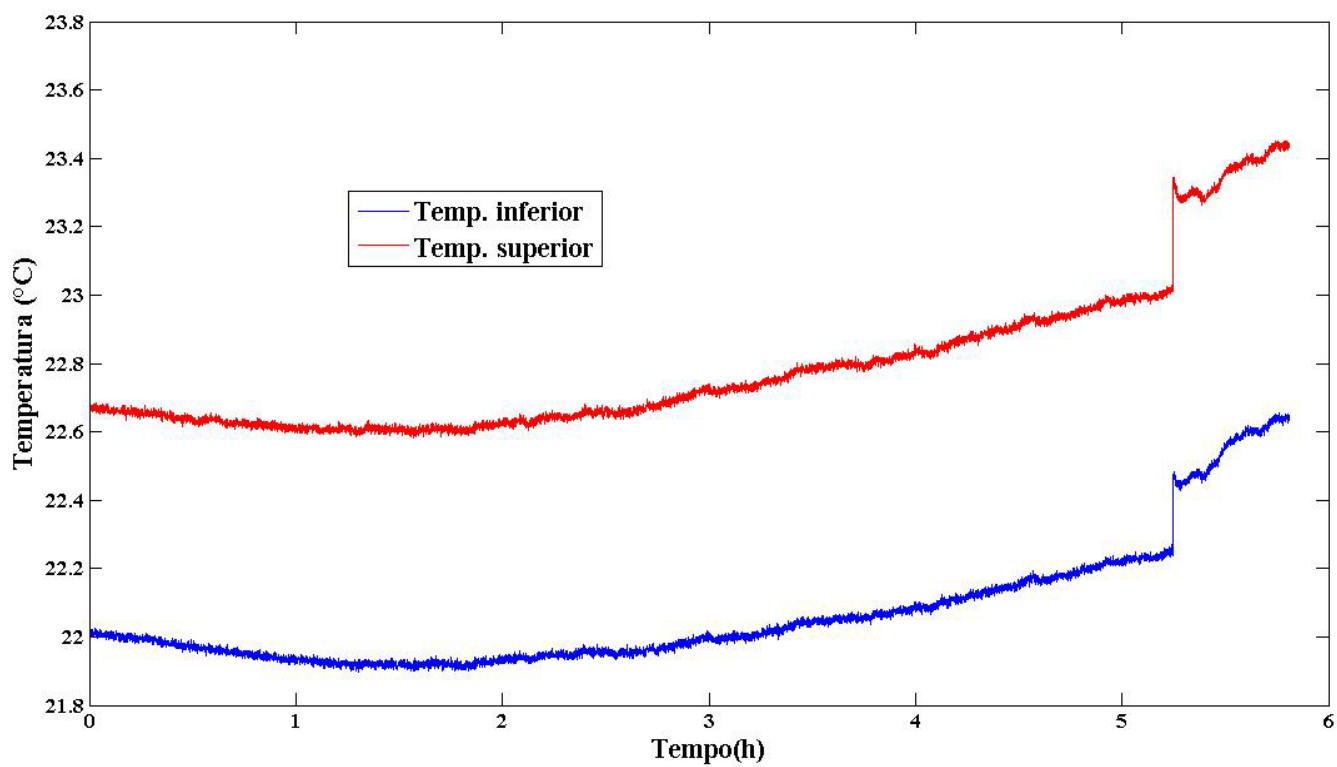


Figura 5.16 – Temperaturas no reservatório no qual circula nanofluido,  $\phi_v = 0,065\%$  de Ag

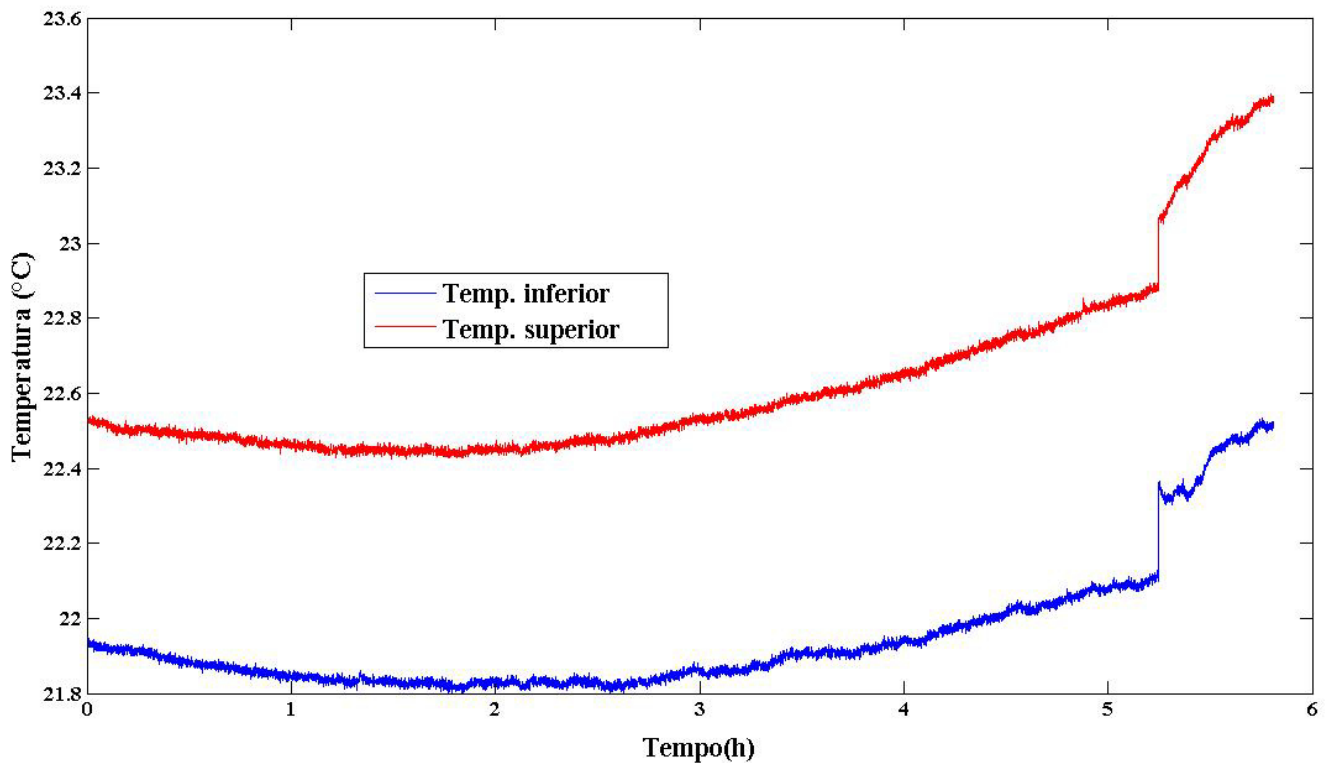


Figura 5.17 - Temperaturas no reservatório no qual circula água destilada

A partir dos dados do Teste – 5 foi realizada a análise de todos os resultados obtidos nos circuitos fechados. A fundamentação física do processo foi feita aplicando-se a primeira lei da termodinâmica em um volume de controle (VC1) em regime transiente, apresentado dentro da área de linha pontilhada na Fig. 5.18, na primeira lei Eq.5.1, realizando a aquisição das temperaturas na entrada e na saída do reservatório, é possível determinar a transferência de calor no sistema.

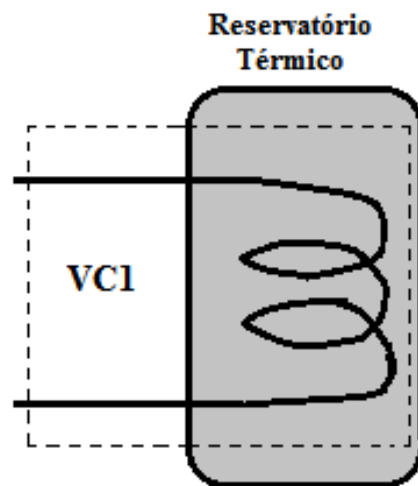


Figura 5.18 – Volume de controle estudado no experimento

A circulação foi induzida por convecção natural, o que popularmente é chamado de circulação natural por efeito termossifão. Foram desconsideradas as variações da energia cinética e da energia potencial nos cálculos.

$$\dot{Q}_{V.C} = \int_0^{\tau} (h_e - h_s) \cdot \dot{m} - E_s = \frac{dE}{dt} \quad (5.1)$$

Onde  $\dot{Q}_{V.C}$  é o fluxo de calor no volume estudado,  $\dot{m}$  é a vazão mássica de fluido circulando nas tubulações,  $h_s$  a entalpia de saída,  $h_e$  a entalpia de saída.

Uma boa aproximação para o valor da entalpia é considerá-la como sendo igual ao produto do calor específico pela temperatura, como é apresentado na Eq. 5.2.

$$h - h_0 = c_p \cdot (T - T_0) \quad (5.2)$$

Para o cálculo da vazão mássica do sistema foi utilizada a Eq. (5.3). Para tanto se considerou o fluxo de calor necessário para elevar a temperatura do fluido do reservatório térmico durante o tempo total de experimentação, obviamente foram feitas aproximações, pois em função da radiação incidente ocorre a variação da vazão mássica, porém em uma análise integral este dado diferencial não trará alterações significativas no resultado final da análise. A Eq. (5.3) considerou constante a vazão mássica e o calor específico do fluido. Substituindo a Eq. 5.2 na Eq. 5.1 e adicionando-se os valores especificados verifica-se um incremento de 83 W de energia, o que é um resultado coerente pois a área do coletor solar é de aproximadamente 0,16 m<sup>2</sup>, se a radiação solar incidente for de 1000 W/m<sup>2</sup>, então o coletor está com um rendimento de aproximadamente 50%. Sabendo que a massa de água em cada reservatório é igual a 100 kg, ao ser aplicada a Eq. (5.3), o incremento de temperatura em uma hora de teste é de apenas 0,72 °C. Onde ( $Q$ ) é a quantidade de calor absorvida em uma hora, ( $m$ ) é a massa de fluido e ( $\Delta T$ ) é a diferença entre a temperatura de saída do coletor e a de saída do reservatório térmico.

$$Q = m \cdot c_p \cdot \int_e^s \Delta T dt \quad (5.3)$$

As temperaturas máximas nos reservatórios apresentaram valores muito próximos, com variações de 0,1°C até 0,5°C de diferença entre as temperaturas máximas no reservatório no qual circulava nanofluido e no reservatório que circulava água destilada.

Considerando a incerteza associada à medição com estes termopares igual a  $\pm 0,4^\circ\text{C}$  não foi possível atribuir tal variação ao comportamento mais ou menos eficiente de um fluido na transferência de calor. O cálculo da incerteza associada à medição com termopares está no capítulo de anexos.

Os valores médios de temperatura ambiente, nas saídas dos coletores com nanofluido e com água e as temperatura na parte superior dos reservatórios térmicos que circulavam água e nanofluido do Teste -1 até o Teste – 5, são mostrados na Tab. 5.1

Tabela 5.1 – Resultados obtidos em circuito fechado (indireto)

Teste	Temperatura ambiente ( $^\circ\text{C}$ )	Saída do Coletor com Nanofluido ( $^\circ\text{C}$ )	Saída do Coletor com Água ( $^\circ\text{C}$ )	Temp.superior reservatório Nanofluido ( $^\circ\text{C}$ )	Temp.superior reservatório Água ( $^\circ\text{C}$ )
1	29,43	50,86	51,59	24,74	24,86
2	26,55	44,90	45,66	23,27	23,55
3	36,56	66,21	67,34	31,57	32,39
4	24,01	44,76	46,66	23,53	23,67
5	21,84	38,39	37,55	22,79	22,63

Os valores de temperatura do nanofluido na saída do coletor apresentaram picos maiores dos que a temperatura da água destilada na saída da placa, mas ao se analisar a Tab.5.1, constata-se que a temperatura média de saída da água no coletor solar é maior em quatro dos cinco testes realizados.

Diante da análise do primeiro resultados, foi decidido construir novos reservatórios bem menores dos que anteriormente utilizados, ver Fig. 5.19 e com isto conseguir trabalhar em circuito direto, ou seja, o fluido circulante aquece no coletor e é levado até o reservatório por termossifão e o fluido com menor temperatura, contido na parte inferior do reservatório, volta para o coletor e o ciclo continua. Para essa nova composição foram utilizados treze litros de nanofluido de prata com ( $\phi_v = 0,008\%$ ), cujas propriedade termofísicas estão apresentadas na Tab. 4.1 e treze litros de água destilada no sistema em paralelo, um novo diagrama esquemático está apresentado na Fig. 5.20.

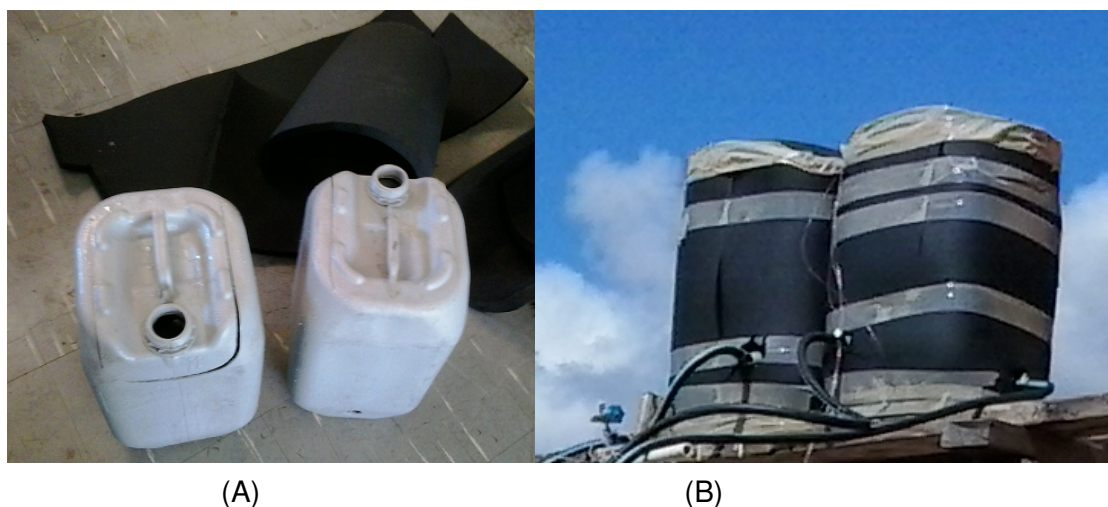


Figura 5.19 – Reservatórios térmicos, (A) durante fabricação, (B) em teste

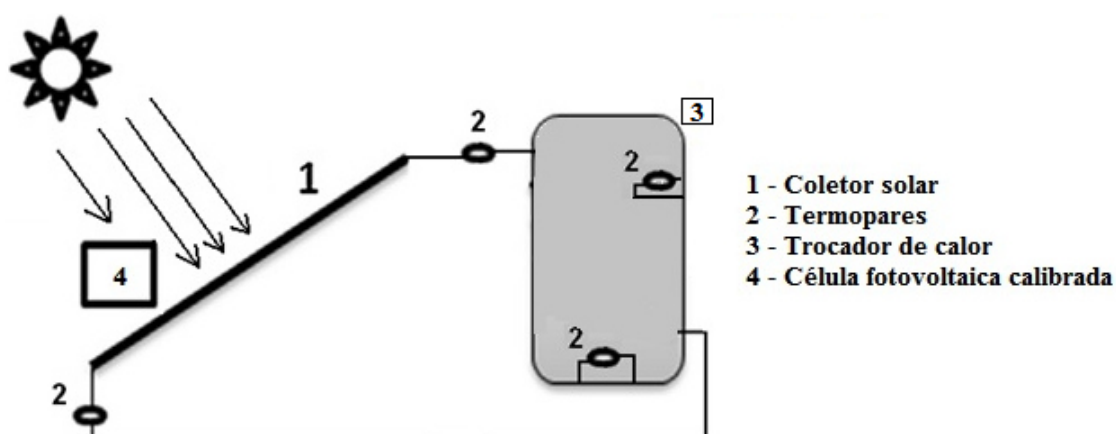


Figura 5.20 – Diagrama esquemático do sistema com circuito aberto

O Teste – 6 foi realizado no dia 14/05/15 das 13h00min as 16h00min com duração de três horas, usando nanofluido de prata de concentração volumétrica,  $\phi_v = 0,008\%$  de Ag e no sistema testado em paralelo foi utilizada água destilada. Os resultados obtidos na conversão fototérmica utilizando tais fluidos estão apresentados nas Fig. 5.21 onde foram verificadas as temperaturas nas saídas dos coletores solares com água e com nanofluido, na Fig. 5.22 estão os valores de temperaturas no reservatório térmico com nanofluido. Na Fig. 5.23 são mostrados os valores de temperatura no reservatório térmico com água, também foram medidas as temperatura na parte superior e inferior de cada reservatório para verificar a estratificação da temperatura. Visando aumentar a confiabilidade dos dados medidos, foi efetuada a aleatorização da posição dos coletores solares, ou seja, no coletor que estava circulando nos testes anteriores nanofluido, neste teste foi circulada água destilada. A média da radiação incidente (R) durante o período do teste foi  $R=556 \text{ W/m}^2$ .

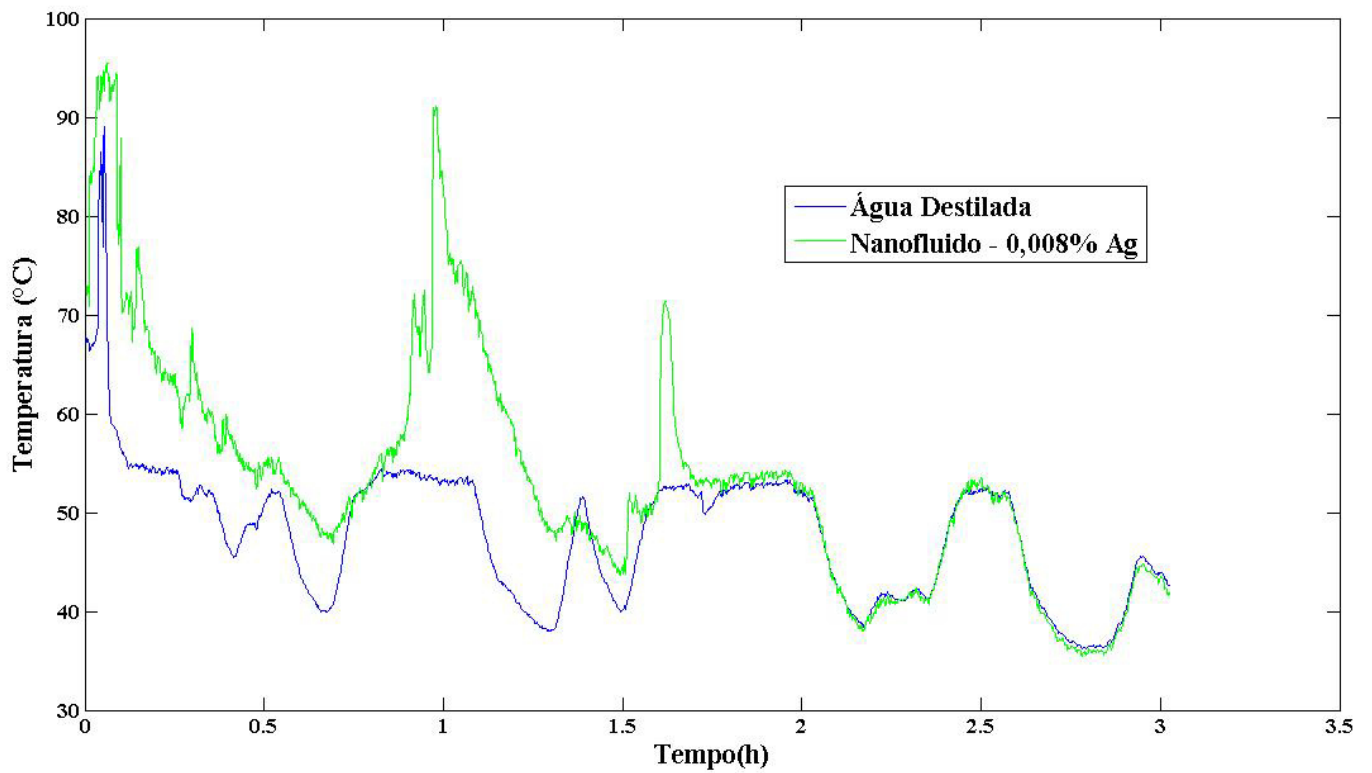


Figura 5.21 – Temperaturas na saída dos coletores

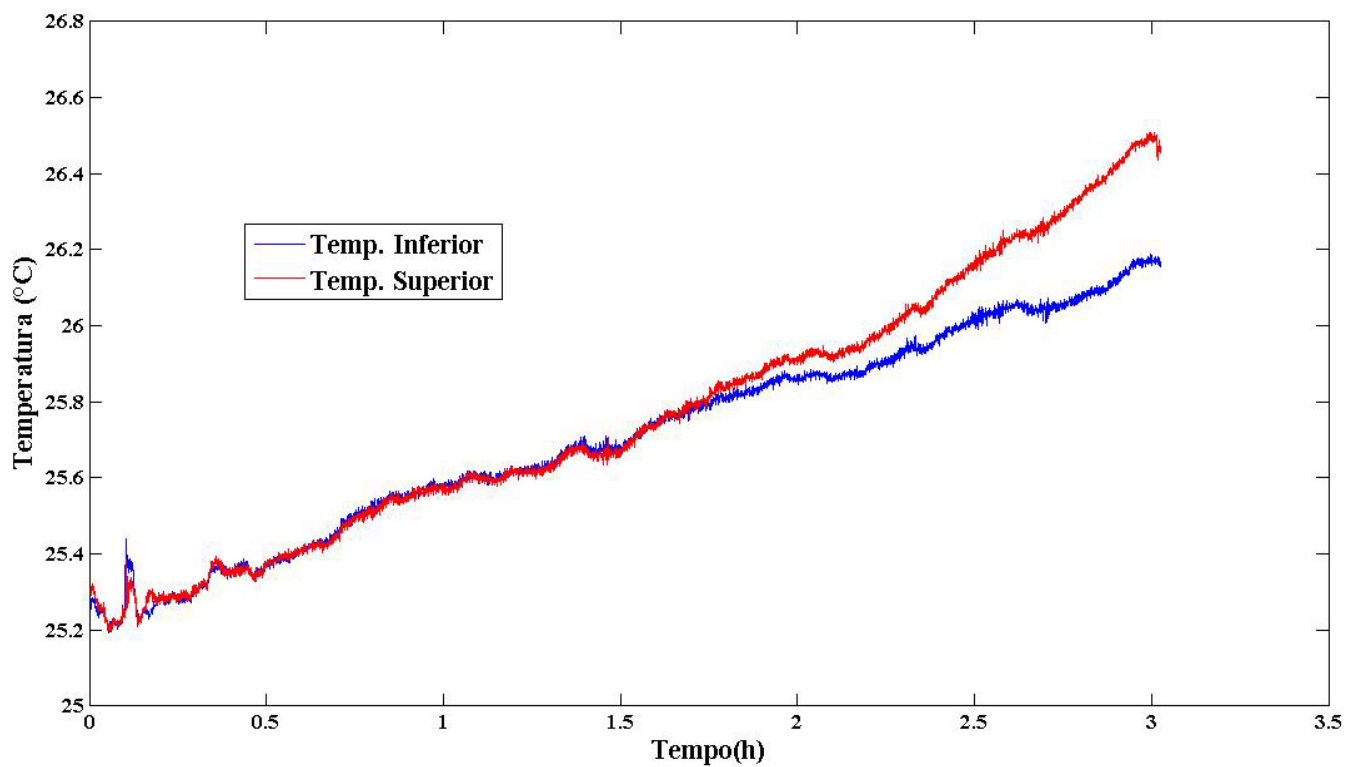


Figura 5.22 - Temperaturas no reservatório com nanofluido,  $\phi_v = 0,008\%$  de Ag



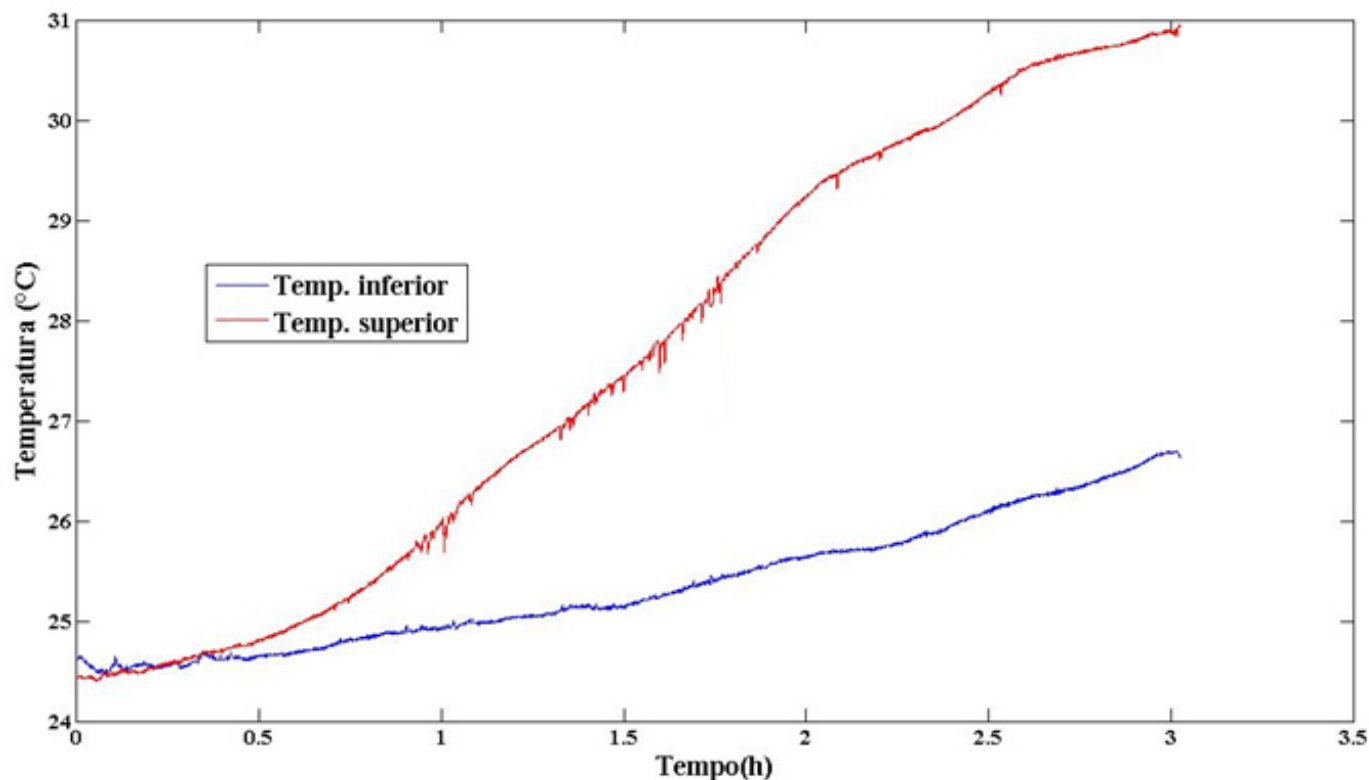


Figura 5.23 – Temperaturas no reservatório com água destilada

O Teste – 7 foi realizado no dia 15/05/15 das 11h45min as 14h45min com duração de três horas, usando nanofluido de prata de concentração volumétrica  $\phi_v = 0,008\%$  de *Ag*. No sistema testado em paralelo foi utilizado água destilada, sendo uma réplica do Teste – 6. Os resultados obtidos na conversão fototérmica utilizando tais fluidos estão apresentados nas Fig. 5.24 onde foram verificadas as temperaturas nas saídas dos coletores solares com água e com nanofluido, na Fig. 5.25 estão os valores de temperatura no reservatório térmico com nanofluido e na Fig. 5.26 são mostrados os valores de temperatura no reservatório térmico com água, foram monitoradas as temperaturas na parte superior e inferior de cada reservatório para verificar a estratificação de temperatura. A média da radiação incidente ( $R$ ) durante o período do teste foi  $R=415 \text{ W/m}^2$ .

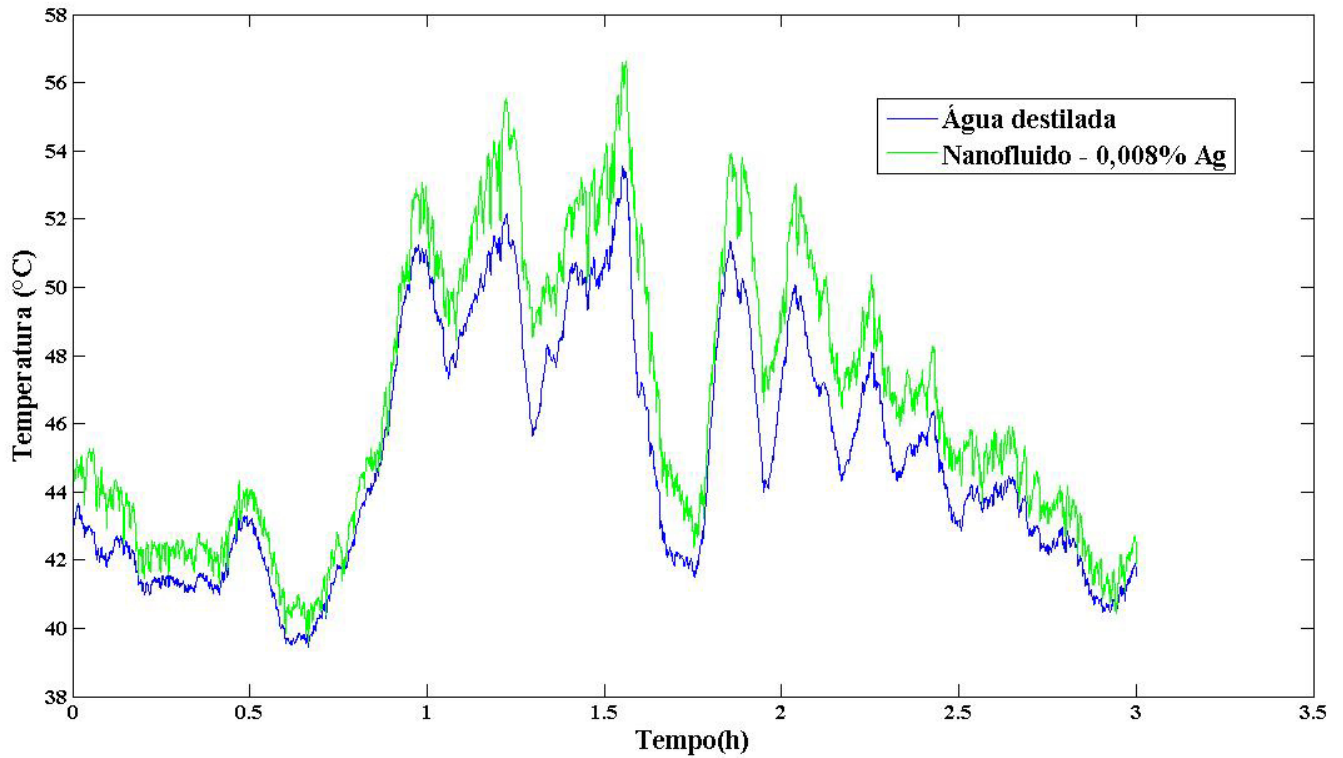


Figura 5.24 – Temperaturas na saída dos coletores

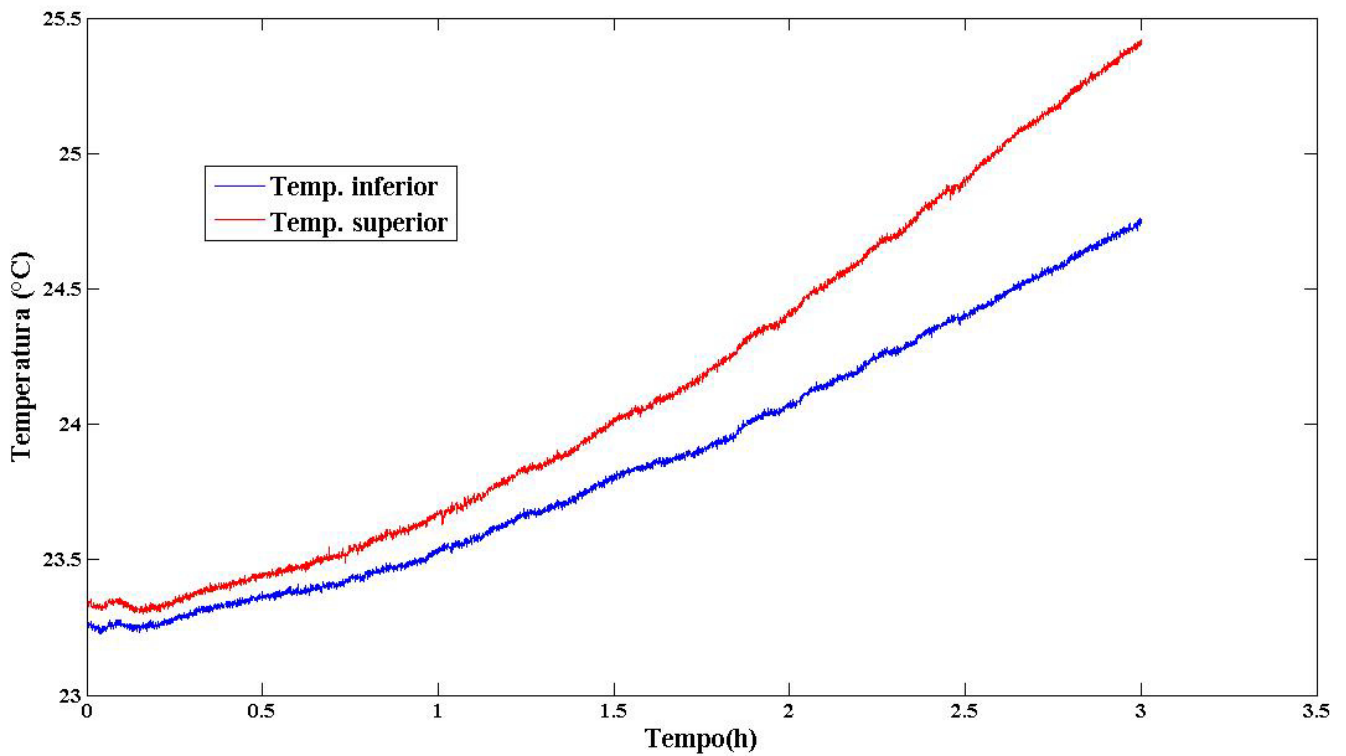


Figura 5.25 – Temperaturas no reservatório com nanofluido,  $\phi_v = 0,008\%$  de Ag

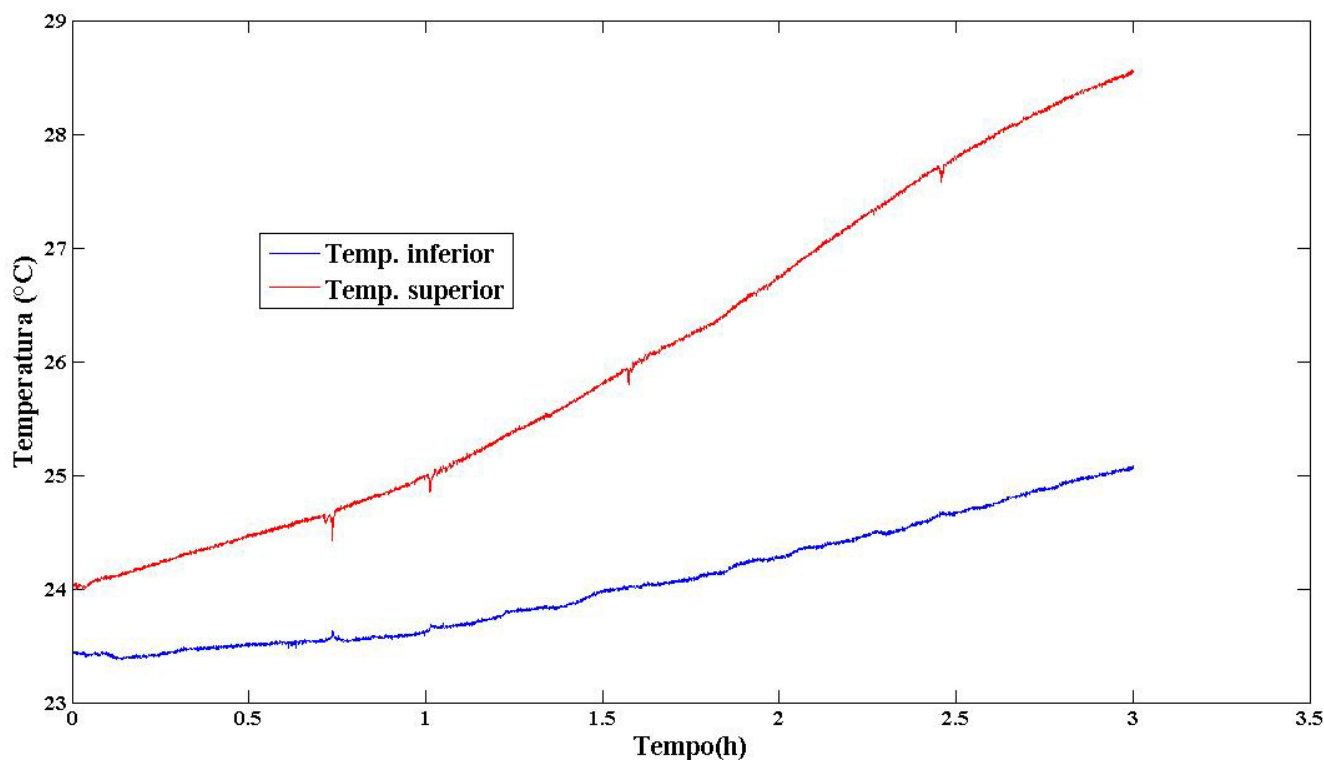


Figura 5.26 – Temperaturas no reservatório com água destilada

O Teste – 8 foi realizado no dia 16/05/15 das 10h00min as 15h00min com duração de cinco horas, foi usado nanofluido de prata de concentração volumétrica,  $\phi_v = 0,008\%$  de Ag. No sistema testado em paralelo foi utilizado água destilada, sendo também uma réplica do Teste – 6. Os resultados obtidos na conversão fototérmica utilizando tais fluidos estão apresentados nas Fig. 5.27 onde foram verificadas as temperaturas nas saídas dos coletores solares com água e com nanofluido, na Fig. 5.28 estão os valores de temperatura no reservatório térmico com nanofluido e na Fig. 5.29 são mostrados os valores de temperatura no reservatório térmico com água. A média da radiação incidente (R) durante o período do teste foi  $R=780 \text{ W/m}^2$ .

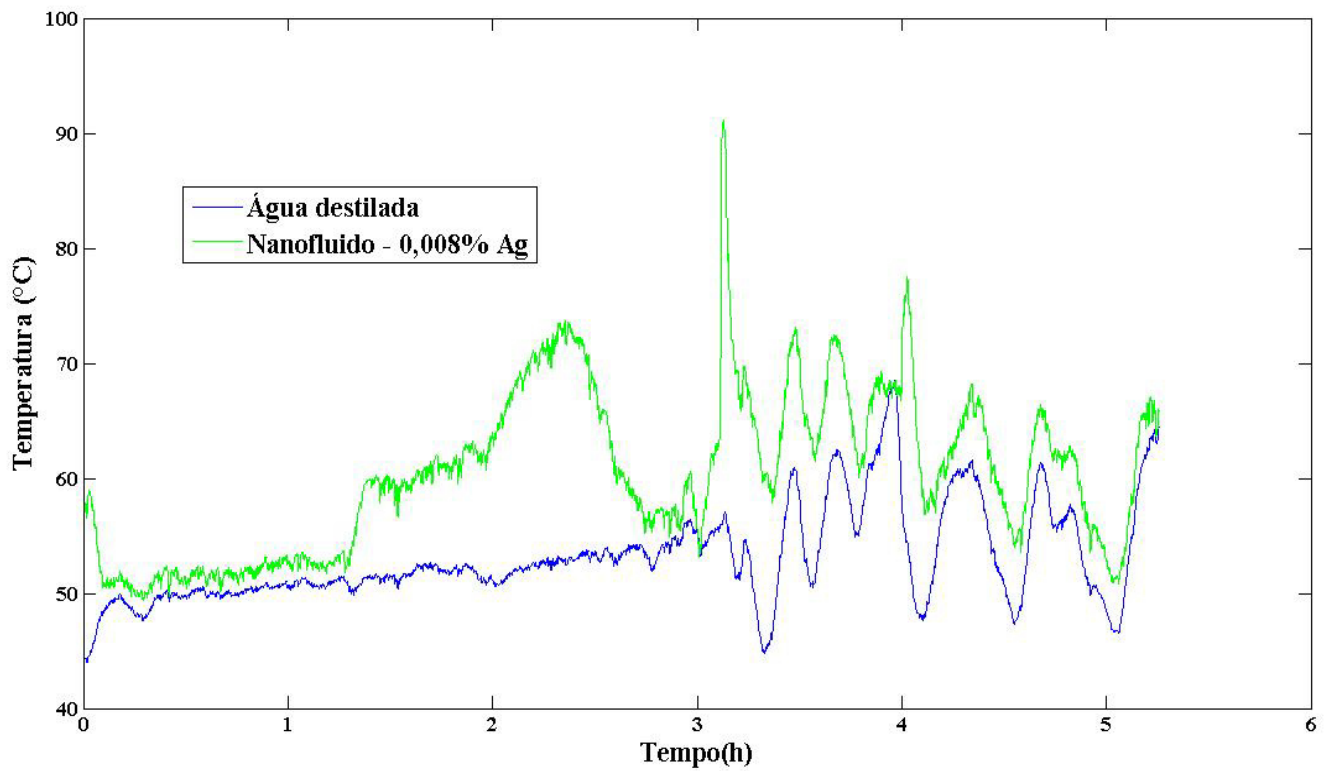


Figura 5.27 – Temperaturas nas saídas dos coletores

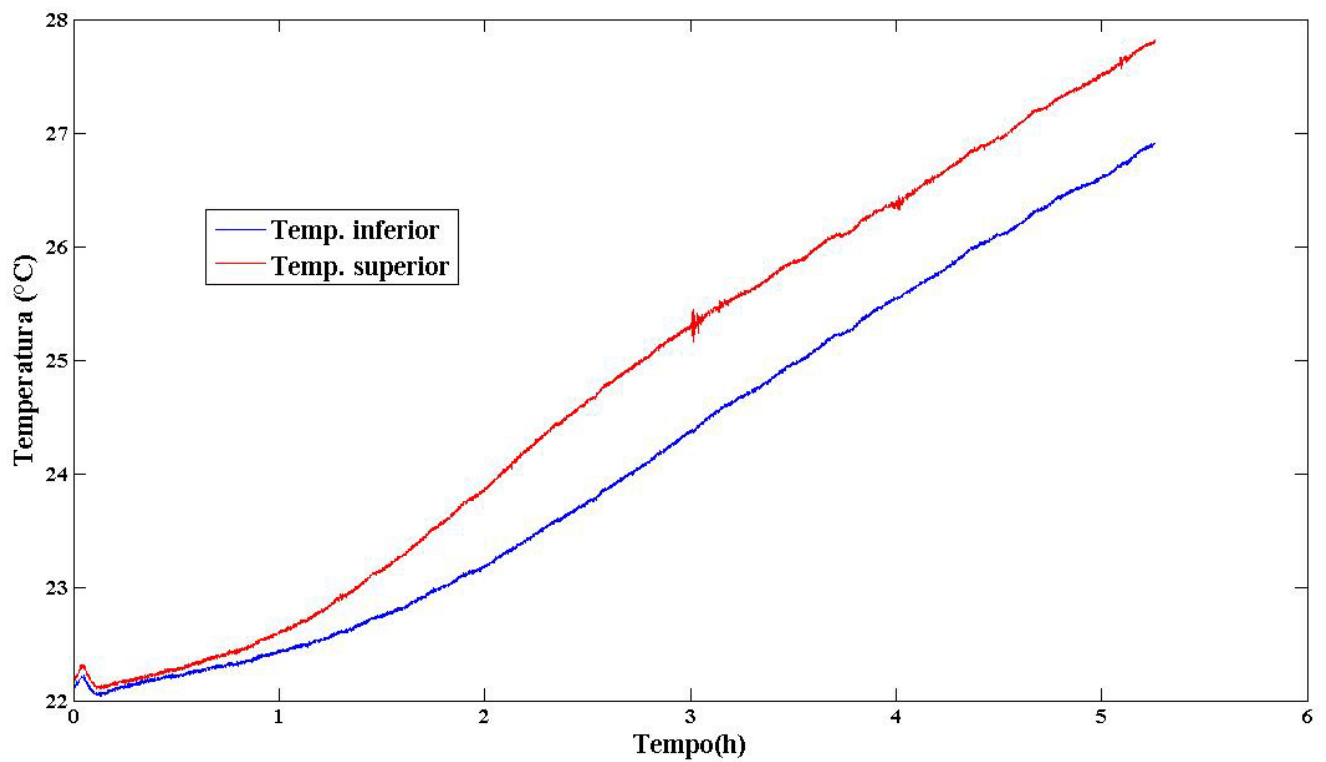


Figura 5.28 – Temperaturas no reservatório com nanofluido,  $\phi_v = 0,008\%$  de Ag

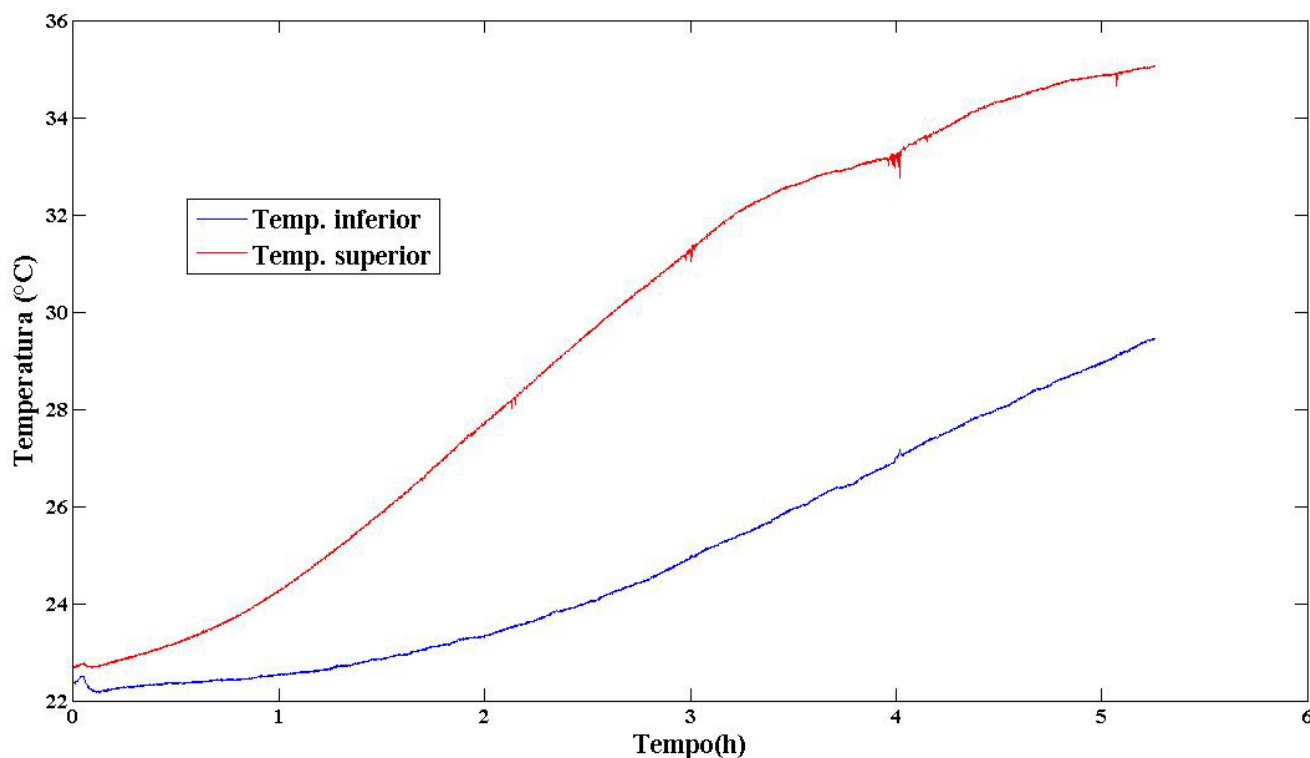


Figura 5.29 – Temperaturas no reservatório com água destilada

A partir dos dados do Teste – 8 foi realizada a análise de todos os resultados obtidos nos circuitos abertos ou diretos. A fundamentação física do processo foi feita da mesma maneira que nos circuitos fechados ou indiretos, aplicando a primeira lei da termodinâmica em volume de controle na situação transiente, na primeira lei Eq.5.1, realizando a aquisição das temperaturas na entrada e na saída do reservatório, é possível determinar a transferência de calor no sistema. Que neste caso foi intensificada, frente aos resultados dos circuitos indiretos.

Ao analisar os gráficos, duas situações são facilmente percebidas. A temperatura no coletor com nanofluido nos três últimos testes é maior do que a temperatura no coletor que circula água e a temperatura do reservatório com água é maior que no recipiente com nanofluido. Duas hipóteses podem ser abstraídas para explicar esta situação:

- ✓A condutividade térmica do nanofluido é maior do que a da água, ou seja, ele absorve com mais eficiência a radiação solar;
- ✓A água circula com maior facilidade, pois sua viscosidade dinâmica é menor, com isso ocorre menor perda de carga e a vazão mássica é aumentada.

Os valores médios de temperatura: ambiente, nas saídas dos coletores com nanofluido e com água; e as temperatura na parte superior dos reservatórios térmicos que circulavam água e nanofluido, do Teste – 6 ao Teste – 8, são mostrados na Tab. 5.2.

Tabela 5.2 - Resultados obtidos em circuito aberto (direto)

Teste	Temperatura ambiente (°C)	Saída do Coletor com Nanofluido (°C)	Saída do Coletor com Água (°C)	Temp. superior no reservatório Nanofluido (°C)	Temp.superior no reservatório Água (°C)
6	28,05	53,45	47,93	25,62	27,57
7	26,12	46,64	45,04	24,12	26,01
8	27,49	60,29	53,02	24,68	29,25

No equacionamento será utilizado o Teste – 8, considerando a média da radiação incidente ( $R=780 \text{ W/m}^2$ ), a duração do teste de ( $t = 5,3 \text{ h}$ ), as temperaturas médias apresentadas na Tab. 5.2 e as propriedades termofísicas da Tab. 4.1. Tais parâmetros quando aplicados nas Eq. 5.1, Eq. 5.2 e Eq. 5.3, trazem os resultados apresentados na Tab. 5.3., onde ( $\dot{Q}$ ) é o fluxo de calor, ( $\Delta T$ ) é a diferença entre a temperatura média do reservatório e a temperatura inicial, ( $\dot{m}$ ) é o fluxo mássico e ( $\eta$ ) é o rendimento do coletor solar.

Tabela 5.3 – Resultados obtidos no Teste – 8

Fluido	$\dot{Q}$ (W)	$\Delta T$ (°C)	$\dot{m}$ (kg/s)	$\eta$
Água	12,8	4,5	0,00012	10,2%
Nanofluido	6,3	2,2	0,00006	5,0%

Os resultados apresentados na Tab. 5.3 mostram o porquê do nanofluido, mesmo possuindo maior condutividade térmica o que é comprovado na Tab. 4.1, não conseguir melhor rendimento do que a água que foi testada paralelamente. Quando em escoamento a propriedade termofísica que teve maior significância foi a viscosidade dinâmica, o que é refletido na vazão mássica tão inferior do nanofluido.

O que é importante abordar nesta análise é a existência dos picos de temperatura que o nanofluido atinge. Isto decorre em função da maior condutividade térmica do nanofluido, que sob baixa radiação, por exemplo, quando aumenta a nebulosidade e impede a radiação de atingir na plenitude o coletor; a vazão mássica diminui drasticamente e ao voltar à radiação diretamente na face do equipamento ocorre o aquecimento muito rápido do nanofluido e como ele é mais viscoso precisa de mais tempo para sair da situação estática e entrar em regime de escoamento.

## CAPITULO VI

### CONCLUSÕES

Este trabalho investigou experimentalmente a conversão fototérmica em nanofluidos de prata/água, com diferentes concentrações de nanopartículas dispersas no fluido base. Nanofluidos estáveis foram obtidos com um homogeneizador de alta pressão e os experimentos foram realizados sob radiação solar direta com testes realizados durante diferentes períodos do dia, simulando assim condições reais de operação.

O objetivo geral proposto no trabalho de avaliar o desempenho do nanofluido quando submetido à conversão fototérmica em coletor solar por efeito de termossifão paralelamente à água destilada foi alcançado, assim como todos os objetivos específicos, que estão elencados no Capítulo I deste texto, dos quais é destacado o projeto e construção do posicionador solar.

O reservatório com água apresentou incremento de até 7°C na temperatura média, já o reservatório com nanofluido ( $\phi_v = 0,008\%$  de Ag) apresentou elevações de temperatura menores, não passando de 2,5°C. Isto ocorreu em função do aumento da viscosidade dinâmica do nanofluido o que induz ao aumento da perda de carga no escoamento e conseqüentemente a redução da vazão mássica.

Os resultados mostraram que o nanofluido apresentou menor capacidade de conversão fototérmica do que a água destilada em circuito direto, utilizando a convecção natural como meio de circulação do fluido.

#### 6.1. Sugestões para trabalhos futuros

Visando ampliar o incremento de temperatura nos reservatórios térmicos testados, podem ser alterados os coletores solares, por outros que utilizem o sistema manifold, com



isso provavelmente a perda de carga iria diminuir e conseqüentemente aumentar-se-ia o rendimento do coletor com nanofluidos. Outra possibilidade a ser testada a utilização de circulação forçada por intermédio de bomba elétrica, com isso controlando a vazão mássica de circulação do fluido com um medidor de vazão do tipo coriolis por exemplo.

Algumas regiões geográficas apresentam em determinadas épocas do ano temperaturas baixas, até inferiores ao ponto de fusão da água e devido a isto sistemas fototérmicos diretos não podem ser aplicados, pois em dias frios a água congelaria no coletor solar. Como isto é freqüente em muitas regiões utilizam-se circuitos fechados para transferência de calor com o sol. Nestes sistemas são utilizados fluidos com ponto de fusão inferior ao da água e com auxílio de trocadores de calor, é possível aquecer água para aplicações residenciais. Fabricantes têm demonstrado grande criatividade ao lidarem com esta questão e propuseram o sistema de “banho Maria”, onde um reservatório contém o fluido de trabalho e outro no interior contendo água, ver Fig. 6.1, o famoso trocador casca e tubo. A sugestão do autor para trabalhos futuros é a utilização de uma dispersão coloidal de nanopartículas em etilenoglicol como fluido de trabalho, em circuitos indiretos de conversão fototérmica utilizando o efeito termossifão para circular o fluido.



Figura 6.1 – Reservatório térmico para sistemas anti-congelantes. Fonte: Tencnosol®

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAI, N.; ITAYA, Y.; HASATAN, M. Development of a "Volume Heat-Trap" Type Solar Collector Usint a Fine-Particle Semitransparent Liquid Suspension (FPSS) as a Heat Vehicleand Heat Storage Medium. **Solar Energy**, v. 32, p. 49-56, 1984.

ASSAEL, M. J. et al. Thermal Conductivity Enhancement in Aqueous Suspensions of Carbon Multi-Walled and Double-Walled Nanotubes in the Presence of Two Different Dispersants. **International Journal of Thermophysics**, v. 26, p. 647-664, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12269**., p. 6, 1992.

BANDARRA FILHO, E. P. ;Mendonza, O. S.H.; Menezes, A.; Beicker, Carolina Lau; Wen, Dongsheng.. Experimental investigation of a silver nanoparticle-based direct. **Energy Conversion and Management**, v. 84, p. 261-267, 2014.

BATCHELOR, G. K. The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 83, n. 1, p. 97-117, November 1977. ISSN ISSN 0022-1120.

CAMACHO, E. F. et al. **Control of Solar Energy systems**. First. ed. Londres: Springer, 2012.

CELATA, G. P.; D'ANNIBALE, F.; MARIANI, A. Nanofluid flow effects on metal surfaces. **Studi & Ricerche, Energia, Ambiente e Innovazione**, p. 94-98, 2011.

CHOI, S. U. S. Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions. **Applied Physics Letters**, v. 79, p. 2252-2254, October 2001. ISSN ISSN 0003-6951.

CHOI, U. S. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. **Developments and applications of Non-Newtonian flow**, v. 66, p. 99-105, 1995.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Eengineering of Thermal Processes**. Wisconsin: Jhon Wiley & sons, INC., 1980.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 3ª Edição. ed. [S.l.]: [s.n.].

EASTMAN, J. A. et al. Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. **Applied physics letters**, v. 78, p. 718-720, 2001.

EINSTEIN, A. Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen. **Annalen der Physik**, v. 324, n. 2, p. 289-306, 1906.

FARADAY, M. Experimental relations of gold (and other metals) to light. **Philosophical Transactions Royal Society London**, v. 147, p. 145-181, 1857.

HAMILTON, R. L.; CROSSER, O. K. Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**, v. 1, p. 187-191, August 1962. ISSN ISSN 0196-4313.

HE, Q.; WANG.; ZENG, S. Experimental investigation on photothermal properties of nanofluids for direct absorption solar thermal energy systems. **Energy Conversion and Management**, v. 73, p. 150-157, 2013.

HINRICHS, R. A. **Energia e Meio Ambiente**. São Paulo : Cengage Learnig , 2010.

HOFFMANN, A. R. K. **Análise experimental do desempenho termo-hidráulico de nanofluidos de nanotubos de carbono em escoamento monofásico**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 260. 2014.

INCROPERA, F. P.; WITT, D. P. **FUNDAMENTOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E DE MASSA**. 3ª. ed. RIO DE JANEIRO: GUANABARA KOOGAN S.A, 1992.

IQBAL, M. An Introduction to Solar Radiation. **Academic Press**, 1983. 390.

KREITH, F. **Princípios de transmissão de Calor**. tradução da 3ª edição americana. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1997.

LEE, S. et al. Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles. **Journal of Heat Transfer**, v. 121, 1999.

LENERT, A.; WANG, E. Optimization of nanofluid volumetric receivers for solar thermal energy conversion. **Solar Energy**, v. 86, p. 253-265, 2012.

LI, Y. E. A. A review on development of nanofluid preparation and characterization. **Powder Technology**, v. 196, n. 2, p. 89-101, December 2009. ISSN ISSN 0032-5910.

MASUDA, H. et al. Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-Fine Particles (Dispersion of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> Ultra-Fine Particles).. **Netsu Bussei**, v. 4, p. 227, 1993.

MAXWELL, J. C. A treatise on electricity and magnetism. **Clarendon Press**, v. 1, 1873.

MOGHADAM, A. J. et al. Effects of CuO/water nanofluid on the efficiency of a flat-plate solar. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 58, p. 9-14, Junho 2014.

O'HANLEY, H. E. A. Measurement and Model Validation of Nanofluid Specific Heat Capacity with Differential Scanning Calorimetry. **Advances in Mechanical Engineering**, p. 1-6, 2012. ISSN ISSN 1687-8132.

OTANICAR, T. et al. Nanofluid-based direct absorption solar collector. **Re-newable Sustainable Energy**, 2010.

PAK, B. C.; CHO, Y. I. HYDRODYNAMIC AND HEAT TRANSFER STUDY OF DISPERSED FLUIDS WITH SUBMICRON METALLIC OXIDE PARTICLES. **Experimental Heat Transfer**, v. 11, n. 2, p. 151-170, 1998. ISSN ISSN 0891-6152.

PARKER, I. D. Carrier tunneling and device characteristics in polymer light-emitting diodes. **Journal of Applied Physics**, v. 75, n. 3, p. 1656-1666, February 1994. ISSN 0021-8979.

PHILIP, J.; SHIMA, P. D. Thermal properties of nanofluids. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 183-184, n. 30-45, 2012. ISSN ISSN 0001-8686.

QUINBO, H. et al. Experimental investigation on photothermal properties of nanofluids for direct absorption solar thermal energy systems. **Energy Conversion and Management**, v. 73, p. 150-157, 2013.

ROCO, M. C. Nanoparticles and nanotechnology research. **Journal of Nanoparticle**, v. 1, p. 1-6, 1999.

SAID, Z. et al. Radiative properties of nanofluids. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 46, p. 74-84, 2013.

SANI, E. Carbon nanohorns-based nanofluids as direct sunlight absorbers. **Optics Express**, v. 18, p. 5179-5187, 2010.

SANI, E. Potential of carbon nanohorn-based suspensions for solar thermal collectors. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 95, p. 2994–3000, 2011.

SCARLATO, F. C. . P. J. A. . **Energia para o Século XXI**. São Paulo : Ática, 1998.

TAYLOR, R. A. et al. **Applicability Of Nanofluids In Concentrated Solar Energy Harvesting**. Proceedings of the ASME 2010 4th International Conference on Energy Sustainability. Phoenix , Arizona: [s.n.]. 2010.

TRIGUEIRO, A. **Mundo Sustentável**. 2<sup>a</sup>. ed. São Paulo : Globo, 2005.

TYAGI, H.; PHELAN, P. E.; PRASHER, R. S. **Predicted Efficiency of a Nano-Fluid Based Direct Absorption Solar Receiver**. 1st International Conference on Energy Sustainability. Long Beach: [s.n.]. 2007.

WANG, B. X. E. A. On the specific heat capacity of CuO nanofluid. **Advances in Mechanical Engineering**, p. 1-4, 2010. ISSN ISSN 1687-8132.

## ANEXOS

### Bancada Experimental

O projeto da estrutura da bancada experimental foi realizado no software SolidWorks. Alguns componentes foram comprados, tais como parafusos, rolamentos, barras roscadas e a grande maioria destes foram desenvolvidos especificamente para esta estrutura, tais como o mancal para alojamento de um rolamento cônico, que está mostrado na Fig. A.1.

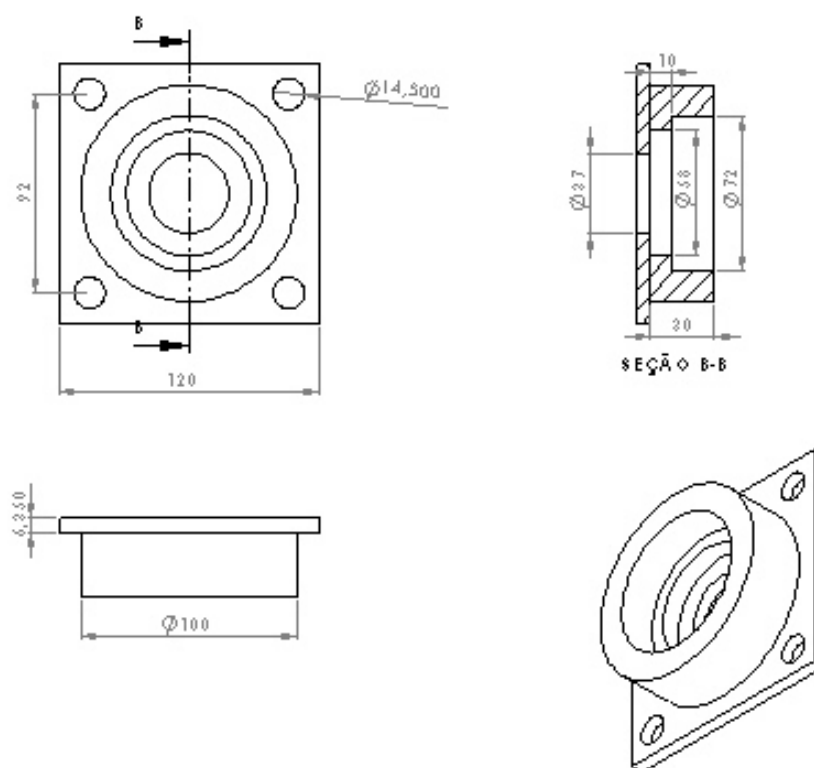


Figura A.1– Mancal para alojamento de rolamento cônico.

A união entre o pedestal construído com tubo de aço de seis polegadas de diâmetro com o dispositivo girante foi feito por meio de flange parafusada, conforme Fig. A.2. Esta flange foi soldada no pedestal e na outra flange foi soldado um eixo no qual foi acoplado todo o conjunto girante, conforme figura A.3.

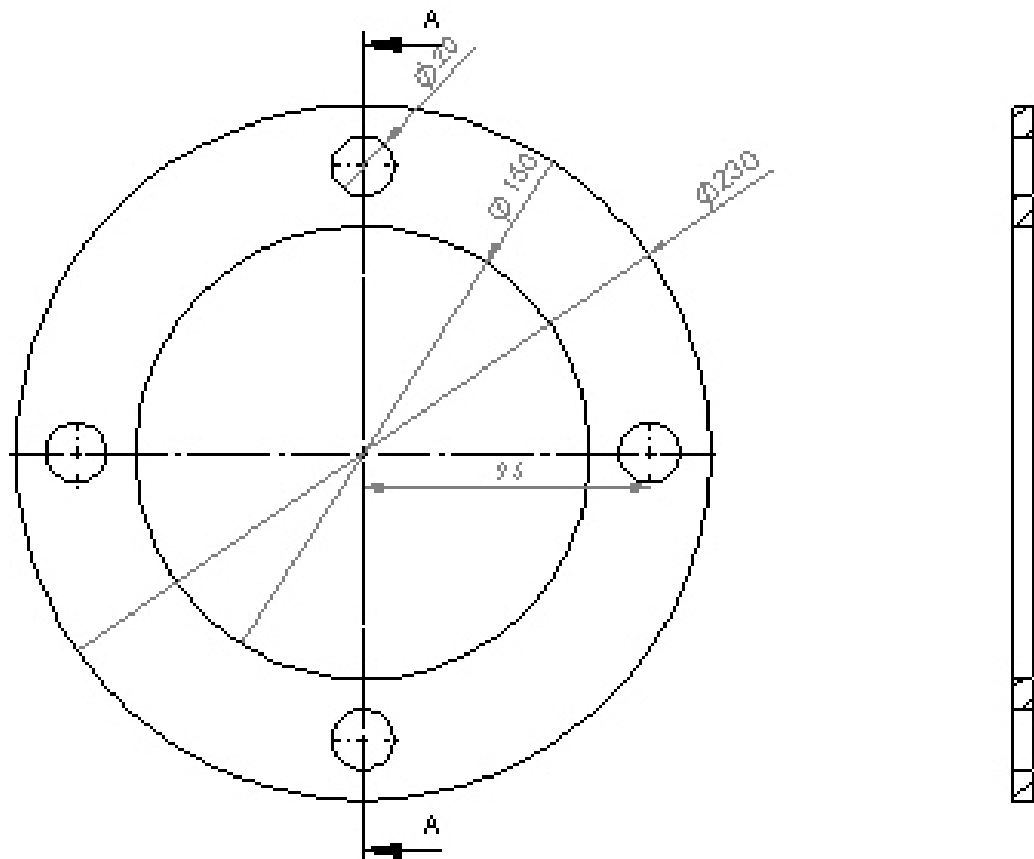


Figura A.2 – Flange do pedestal.

SEÇÃO A-A

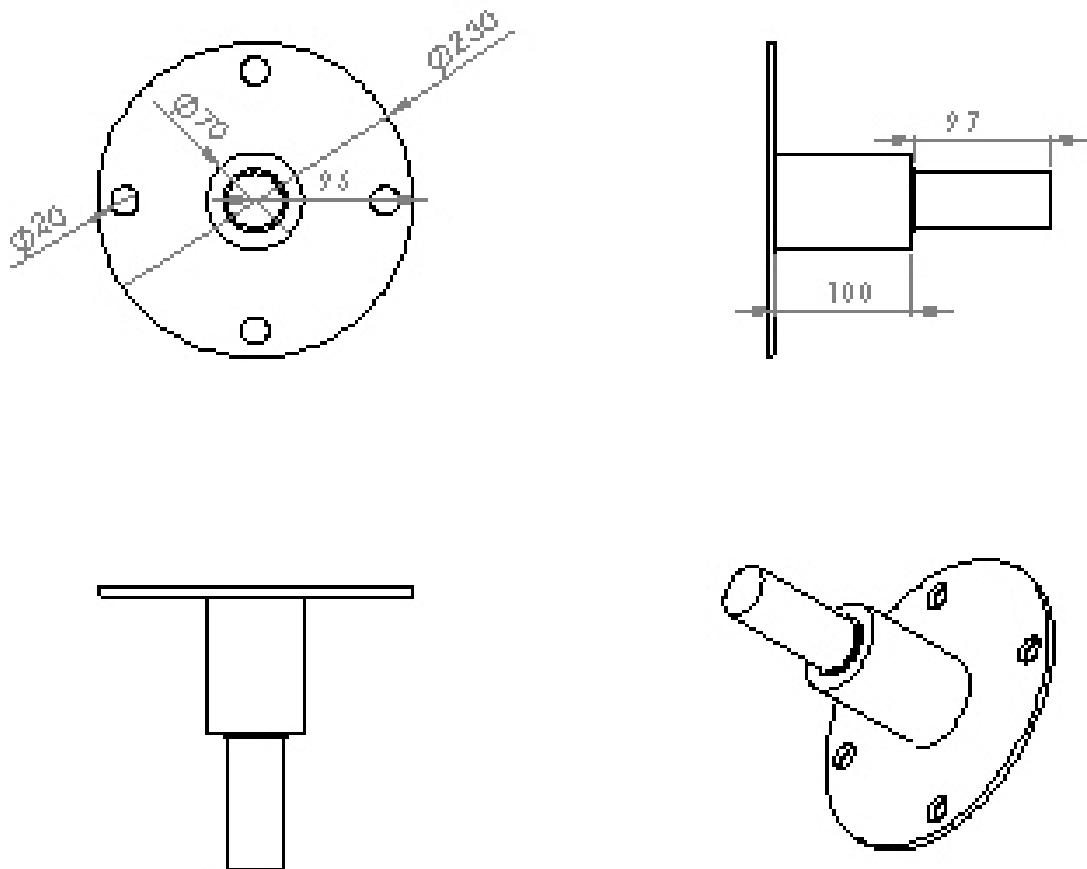


Figura A.3 – Flange com eixo

As estruturas forma construídas em aço ASTM 1020. O conjunto girante pintado e montado está apresentado na Fig. A.4. A movimentação do ângulo horário foi realizada posicionando o pino em cada furo, tais furos foram previamente feitos na fresadora universal sendo que a distância entre um furo e outro é de  $15^\circ$ , correspondendo ao ângulo horário azimutal. A movimentação de elevação do painel solar foi realizada com barra roscada e dobradiças, apresentando  $90^\circ$  na liberdade de movimentação.



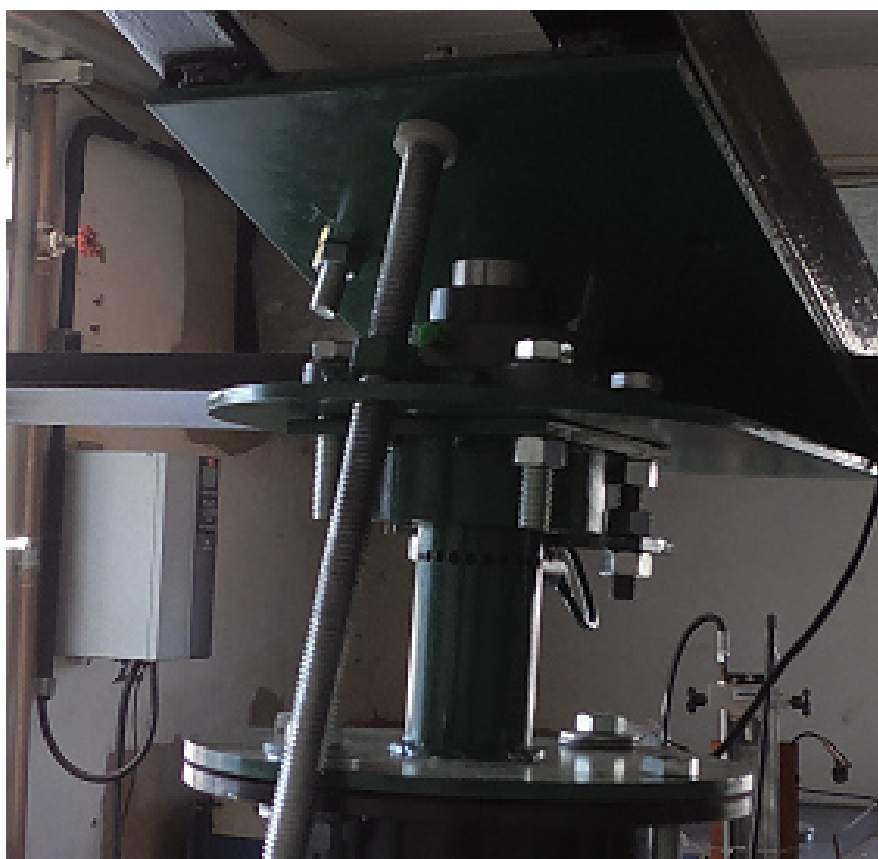


Figura A.4 – Conjunto girante do posicionador solar.

## Calibração dos termopares

Os termopares foram calibrados seguindo o GUM (Guide Uncertainty Method), primeiramente foram definidos os termopares a serem utilizados nos teste, e foi decidido utilizar os termopares do tipo T, pois atenderiam plenamente a faixa de temperatura solicitada, que foi de 0°C a 100 °C. Após definido o sensor foi realizada a soldagem dos mesmos conforme Fig.3.8. e iniciou-se o trabalho de calibração. Foram utilizados termômetros de bulbo (Mercúrio), Marca Incoterm, R=0,1 °C, FN = -10 °C a 55 °C, conforme Fig. A.5.

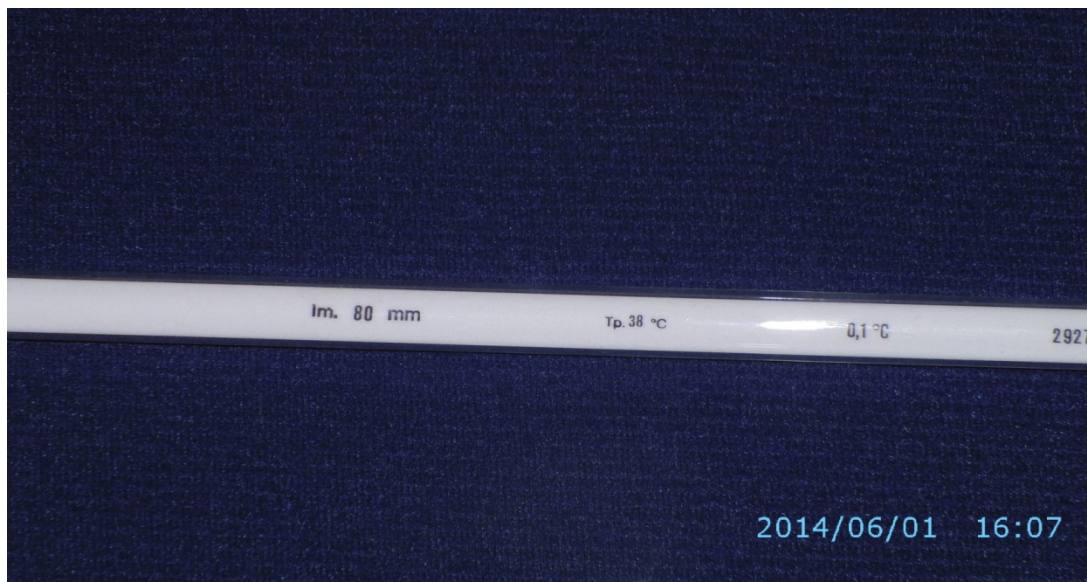


Figura A.5 – Termômetro padrão

O procedimento de calibração seguiu o seguinte roteiro:

- ✓Regulagem da temperatura do banho térmico em: 5 °C,
- ✓10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C, 35 °C, 40 °C, 45 °C, 50 °C;
- ✓Estabilização da temperatura do banho térmico;
- ✓Verificação da temperatura indicada no termômetro padrão simultânea a aquisição de dados no software;
- ✓Repetição do procedimento 5 vezes;
- ✓OBS: Temperatura indicada (aquisição de dados no módulo).

O aparato experimental utilizado para calibração está na Fig. A6. Onde se visualiza:

- ✓ Termopares;
- ✓ Módulo de aquisição de dados;
- ✓ Banho térmico;
- ✓ Termômetro de bulbo;
- ✓ Computador com ambiente LabView.



Figura A.6 – Aparato experimental usado na calibração

Em posse dos dados foi realizada a primeira verificação com a norma ANSI MC96.1-1982 e ASTM E230.  $-1,0^{\circ}\text{C} < \text{Erro} < 1,0^{\circ}\text{C}$ , o que é apresentado na Fig. A.7.

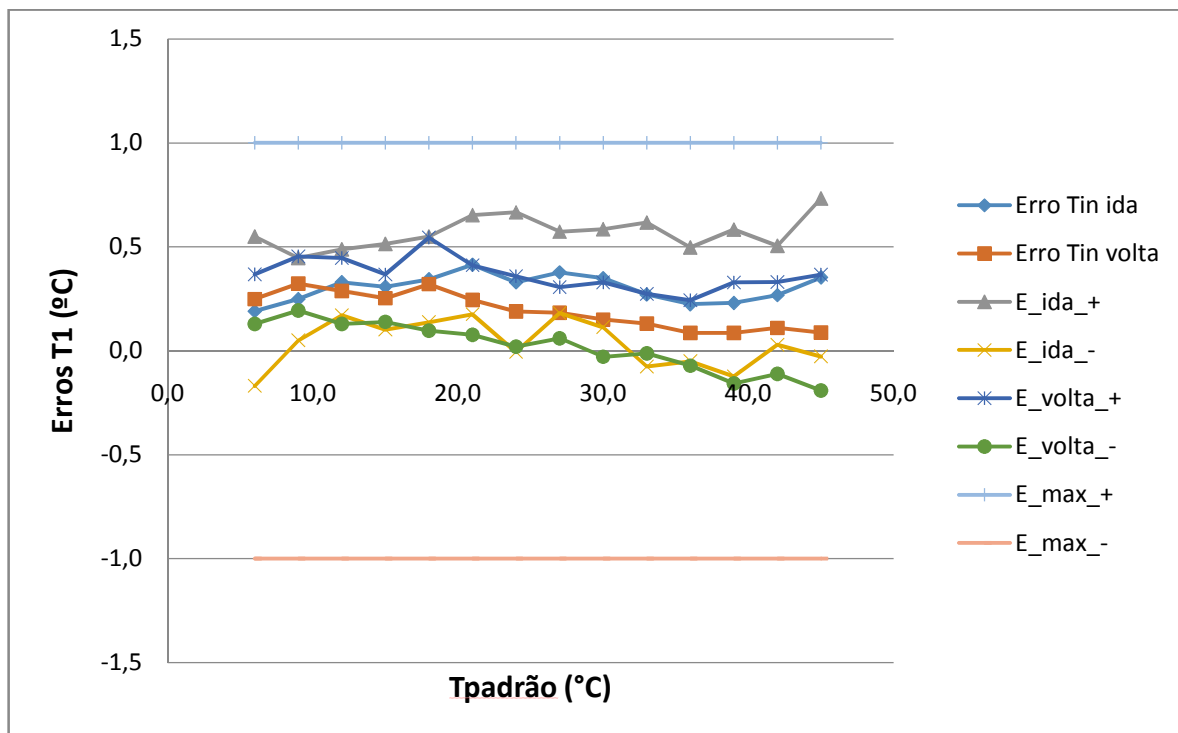


Figura A.7 – Calibração inicial

Para os cálculo foi considerada como variável de saída:

- ✓ Variável de saída: Temperatura medida no termopar (T)

E como variáveis de entrada:

- ✓ Desvio padrão das medições (S);
- ✓ Resolução do termopar ( $R_t$ );
- ✓ Resolução do termômetro padrão ( $R_p$ );
- ✓ Incerteza associada à calibração do termômetro padrão ( $I_c$ );
- ✓ Incerteza associada ao erro máximo na aquisição de dados ( $E_p$ );
- ✓ Estabilidade do banho térmico;
- ✓ Comprimento do termopar;
- ✓ Temperatura ambiente;

A partir destas definições foram calculadas as incertezas padrão associadas a cada variável de entrada, depois a incerteza padrão combinada, os graus de liberdade efetivos e foi atribuída uma probabilidade de abrangência de 95%, com a finalização dos cálculos chegou-se a incerteza associada à calibração dos termopares de ( $I = 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). O curva de calibração está apresentada na Fig. A.8.

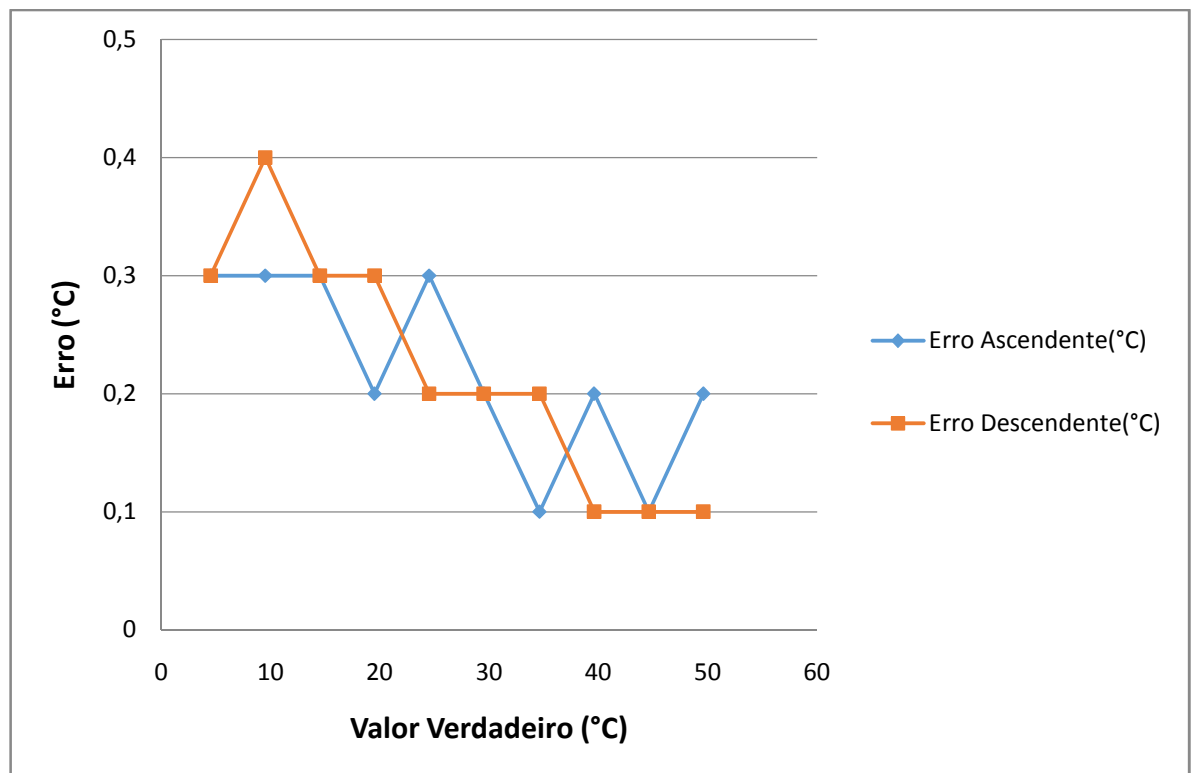


Figura A.8 – Curva de calibração

### Radiação solar direta incidente

A conversão fototérmica consiste em transformar a radiação proveniente do sol em aquecimento de um fluido ou gás, quanto maior a radiação mais temperatura o fluido adquire. Portanto é necessário medir tal o valor de tal radiação para poder determinar a eficiência de um determinado protótipo convertedor. Nos testes realizados ocorreu a medição dos valores de radiação solar com o auxílio de placa fotovoltaica calibrada sendo que para cada milivolt adquirido correspondia a  $0,001 \text{ w/m}^2$ . Mesmo com este controle, os valores adquiridos foram confrontados com os do INMET e um exemplo destes é apresentado na TAB. A1, foi utilizado o Teste – 4 para realizar tal levantamento

Tabela A1 – Radiação solar incidente

Hora	Radiação solar INMET ( $\text{KJ/m}^2$ )	Radiação solar INMET ( $\text{W/m}^2$ )	Rad. solar Cél. Calibr. ( $\text{W/m}^2$ )	Diferença ( $\text{W/m}^2$ )
1	386,7	107,41	358,7	251,29
2	887,8	246,61	307,3	60,69
3	1528,0	424,44	732,7	308,26
4	2242,0	622,77	559,1	63,67
5	1725,0	479,16	417,5	61,66
6	1220,0	338,88	590,6	251,72
7	1928,0	535,55	685,9	150,35

Ocorreram variações nos valores medidos dos apresentados pelo INMET, porém estes não são grandes. As variações que ocorreram devem-se ao fato da diferença de posição geográfica, pois mesmo sendo em Uberlândia a estação meteorológica ela está bem distante do Campus Santa Mônica da UFU. O uso do posicionador solar também auxiliou no aumento da radiação solar absorvida, pois com o correto movimento do equipamento consegue-se a perpendicularidade dos raios incidentes solares em relação à superfície medida.