



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
CURSO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

GÍNETON HEBER MOTA MOURA

**ESTUDO DE UM COLETOR SOLAR PLANO DE BAIXO CUSTO PARA
AQUECIMENTO DE ÁGUA NO MUNICÍPIO DE CARAÚBAS-RN**

CARAÚBAS / RN

2019

GÍNETON HEBER MOTA MOURA

**ESTUDO DE UM COLETOR SOLAR PLANO DE BAIXO CUSTO PARA
AQUECIMENTO DE ÁGUA NO MUNICÍPIO DE CARAÚBAS-RN**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Rural do Semiárido, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr.: Rudson de Souza Lima.

CARAÚBAS / RN

2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

M931e Mota Moura, Gíneton Heber.
ESTUDO DE UM COLETOR SOLAR PLANO DE BAIXO
CUSTO PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA NO MUNICÍPIO DE
CARAÚBAS-RN / Gíneton Heber Mota Moura. - 2019.
53 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Rudson de Souza Lima.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2019.

1. Energia Solar. 2. Térmica. 3. Coletores. 4.
Efeito Estufa. 5. Temperatura. I. Lima, Rudson de
Souza, orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

GÍNETON HEBER MOTA MOURA

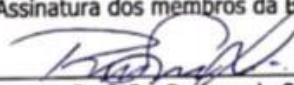
**ESTUDO DE UM COLETOR SOLAR PLANO DE BAIXO CUSTO PARA
AQUECIMENTO DE ÁGUA NO MUNICÍPIO DE CARAÚBAS-RN**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Rural do Semiárido, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

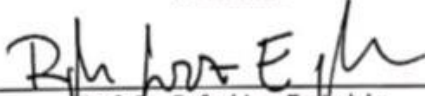
Avaliada em: 22 / 03 / 2019

BANCA EXAMINADORA

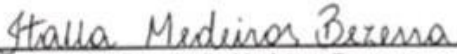
Assinatura dos membros da Banca Examinadora.



Prof. Dr. Rudson de Souza Lima
Presidente



Prof. Dr. Rafael Luz Espindola
Membro



Profa. Dra. Italla Medeiros Bezerra
Membro

A minha eterna Avó, Luzia Filomena de Moura (In Memoriam).

*Ao meu pai e mãe, Manoel Moura e Helena Mota, por
me ensinar sobre a vida.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por sempre me dar forças e guiar o meu caminho. Aos meus pais, Manoel Moura e Helena Lúcia Mota Moura, e a minha irmã Jemima Helen Mota Moura, meus agradecimentos pelo carinho e pela fé que depositaram em mim.

A minha família, pelo apoio moral.

Ao Dr. Rudson de Souza Lima e Ms. Andersson Guimaraes Oliveira, por ter construído este trabalho comigo, além de ter aberto muitas portas para a progressão da minha vida acadêmica. Enfim, por ter sido um professor amigo.

Aos meus amigos, Alipsson Gustavo, Anderson Mateus, Anderson Bezerra, Állison Breno, Jorge Cruz, Halisson Suassuna e outros, pela lucidez e sabedoria adquirida ao longo da nossa convivência.

Aos meus professores: Rudson, Andersson, Daniel, Italla, e outros, pela sabedoria, e, sobretudo, por me inspirarem a viver a graduação. A banca examinadora pela contribuição acadêmica.

*“Ser feliz é deixar de ser vítima dos problemas e
se tornar um autor da própria história.”*

(Augusto Cury)

RESUMO

O presente trabalho visa realizar um estudo experimental de um coletor solar de baixo custo e a sua construção, para transformar a radiação solar em energia térmica utilizável para o consumo no cotidiano. Através da coleta de dados de temperatura foi possível analisar o gradiente de temperatura, a temperatura das tubulações e a temperatura do coletor ao longo do dia. O sistema de montagem do coletor se mostrou satisfatório, visto que foi possível evidenciar temperaturas elevadas dentro da estufa. O sistema de isolamento das mangueiras foi satisfatório, visto que houve pouca perda de calor ao longo das tubulações. As perdas de carga promovidas no sistema fizeram com que ocorresse retorno de fluxo na tubulação de entrada, evidenciados pelas altas temperaturas na entrada do coletor. Este tipo de sistema pode ser uma boa alternativa para fins domésticos e de higiene, contribuindo por exemplo na redução dos custos com energia e no uso sustentável, pois utiliza-se de uma energia renovável (solar) durante todo o processo de aquecimento.

PALAVRAS-CHAVES: Energia solar, térmica, coletores, efeito estufa, temperatura.

ABSTRACT

The present work aims to perform an experimental study of a low cost solar collector and its construction, to transform the solar radiation into thermal energy usable for daily consumption. By collecting temperature data it was possible to analyze the temperature gradient, the temperature of the pipes and the collector temperature throughout the day. The collector assembly system was satisfactory, since it was possible to show elevated temperatures inside the greenhouse. The insulation system of the hoses was satisfactory, since there was little heat loss along the pipes. The load losses promoted in the system caused a return flow in the inlet pipe, evidenced by the high temperatures at the collector inlet. This type of system can be a good alternative for domestic and hygiene purposes, contributing for example to reducing energy costs and sustainable use, because renewable energy (solar) is used throughout the heating process.

KEYWORDS: Energy solar, thermal, collectors, greenhouse effect, temperature.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Processo de reflexão, absorção e transmissão.....	18
FIGURA 2: Concentrador Parabólico.....	20
FIGURA 3: Esquema de um coletor solar plano.....	21
FIGURA 4: Desenho do sistema.....	29
FIGURA 5: Serpentina de ar-condicionado.....	30
FIGURA 6: Caixa de madeira.....	30
FIGURA 7: Coletor pronto.....	31
FIGURA 8: Conversão de energia solar em calor.....	31
FIGURA 9: Conexão de entrada do reservatório.....	32
FIGURA 10: Reservatório isolado com adesivo de poliuretano.....	33
FIGURA 11: Suporte com reservatório.....	33
FIGURA 12: Sistema montado.....	34
FIGURA 13: Inclinação do coletor.....	35
FIGURA 14: Termômetro digital (MT-450) e termopar do tipo K.....	35
FIGURA 15: Localização dos pontos de coleta.....	36
FIGURA 16: Tabela dos Custos aproximados.....	37
FIGURA 17: Gráfico do dia 09/03 do gradiente de temperatura.....	38
FIGURA 18: Gráfico do dia 10/03 do gradiente de temperatura.....	39
FIGURA 19: Gráfico do dia 15/03 do gradiente de temperatura.....	39
FIGURA 20: Gráfico do dia 09/03 das temperaturas das tubulações.....	40
FIGURA 21: Gráfico do dia 10/03 das temperaturas das tubulações.....	41
FIGURA 22: Gráfico do dia 15/03 das temperaturas das tubulações.....	41
FIGURA 23: Gráfico do dia 09/03 das temperaturas do coletor.....	42
FIGURA 24: Gráfico do dia 10/03 das temperaturas do coletor.....	43
FIGURA 25: Gráfico do dia 15/03 das temperaturas do coletor.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BP	British Petroleum
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PVC	Policloreto de vinila
PET	Polietileno tereftalato
EPS	Poliestireno expandido
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
CO	Cateto oposto
CA	Cateto adjacente

LISTA DE SÍMBOLOS

ε	Emissividade
α	Absortividade
τ	Transmissividade
ρ	Refletividade
Nu	Número de Nusselt
Nu_m	Nusselt médio
h	Coefficiente médio de transferência de calor
L	Comprimento característico
k	Condutividade térmica do fluido
Gr_L	Número de Grashof
ϕ	Coefficiente de expansão volumétrica térmica
ν	Viscosidade cinemática
L	Distância entre as placas
T_s	Temperatura da superfície
T_∞	Temperatura do fluido em escoamento
Pr	Número de Prandtl
α	Difusividade térmica
Ra	Número de Rayleigh
$tg\theta$	Tangente do ângulo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1. OBJETIVOS.....	16
1.1.1. OBJETIVO GERAL.....	16
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1. Radiação.....	17
2.2. Convecção.....	18
2.3. Coletores solares.....	19
2.3.1. Coletor solar plano.....	20
2.4. Estado da arte dos coletores solares.....	22
2.5. Estado da arte dos coletores não-convencionais.....	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1. Desenho do sistema.....	28
3.2. Construção da placa coletora.....	29
3.3. Construção do Reservatório de água.....	32
3.4. Montagem do sistema.....	34
3.5. Caracterização do equipamento de medição.....	35
3.6. Procedimento de coleta de dados.....	36
3.7. Custos.....	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
4.1. Gradientes de temperatura do reservatório.....	38
4.2. Temperaturas das tubulações.....	40
4.3. Avaliação de temperatura do coletor.....	42
5. CONCLUSÃO.....	44
RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46
ANEXO.....	51
APÊNDICE A.....	53

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da sociedade humana está vinculado à transformação do meio ambiente e obtenção de energia. Durante o crescimento da sociedade, ficou perceptível a necessidade de energia nos diversos locais habitáveis, e que nos últimos tempos são observados acontecimentos que mostram a possibilidade do fim dos combustíveis fósseis. Segundo O Globo (2017), relatórios recentes do BP (British Petroleum) mostram que as reservas globais de Petróleo estão sendo mais exploradas nos últimos 35 anos, evidenciando o início do seu declínio e a inevitável estagnação das reservas de Petróleo hoje contabilizadas. Com a crescente preocupação da preservação do meio ambiente, impulsionaram-se o aumento na utilização de fontes alternativas/renováveis de energia. Dentre essas, a energia solar é uma das utilizadas, onde as demais fontes, incluindo hidráulica, biomassa, eólica, combustíveis fósseis e a energia dos oceanos, são formas indiretas dessa energia (ANEEL, 2008).

Entre as formas de aproveitamento da energia solar, atualmente as mais tradicionalmente utilizadas são: a geração de energia elétrica com a energia solar fotovoltaica; e o aquecimento de água através da energia solar térmica. Destas duas formas de aproveitamento, a energia solar fotovoltaica é obtida através de uma tecnologia capaz de converter a energia solar em eletricidade através do uso do seu principal componente, o módulo fotovoltaico, que é constituído de material semicondutor e apresenta um elevado preço de obtenção. Por outro lado, a energia solar térmica de baixa temperatura é obtida a partir da utilização do sistema de aquecimento solar, que se trata de uma tecnologia que converte a energia solar em energia térmica, sendo mais aplicada no aquecimento de água. Os principais componentes desse sistema são os coletores solares e o reservatório térmico, que são bem menos onerosos do que os módulos fotovoltaicos, e apresentam maior disseminação e utilização no Brasil. Além disso, o aquecedor solar de água possibilita a construção de componentes alternativos, que ajudam a reduzir os custos de implantação do sistema (MELO, 2008; *apud* LOPO, 2010).

Coletores solares são trocadores de calor que transformam radiação solar em energia térmica. O coletor capta essa radiação, e converte em energia térmica, transferindo-a para um fluido (KALOGIROU, 2009).

Os coletores podem ser basicamente de dois tipos: não-concentradores ou estacionários e concentradores. Os coletores não-concentradores possuem a mesma área de abertura (área para

interceptação e absorção da radiação) e são aplicáveis para sistemas que necessitem de baixa temperatura. Em aplicações que demandem temperaturas mais elevadas, são mais adequados os concentradores solares, que possuem em geral uma superfície refletora (em alguns modelos são utilizadas lentes) que direcionam a radiação direta a um foco, onde há um receptor pelo qual escoam o fluido absorvedor de calor e que tem os principais tipos de sistema: Parabólica, Fresnel, Torre e Disco (KALOGIROU, 2009).

Os coletores solares possuem tipos diversos que os diferenciam por características particulares na sua configuração e funcionamento. Os modelos mais conhecidos são: Parabólico composto, de Tubos evacuados e o de Placa plana possuindo uma grande variedade e são feitos de materiais diversos.

A eficiência energética é geralmente usada como um dos parâmetros mais importantes para introduzir e comparar sistemas térmicos, incluindo os coletores solares planos (JAFARKAZEMI e AHMADIFARD, 2013).

A eficiência de coletores solares depende dos parâmetros do coletor e das perdas térmicas para o ambiente. Quanto maior a quantidade de energia que o fluido de trabalho conseguir absorver, maior a eficiência térmica do coletor. Para aumentar o desempenho destes equipamentos, têm sido utilizadas novas técnicas, baseadas principalmente no aumento do coeficiente de transferência de calor entre a placa absorvedora e o fluido de trabalho e no aumento da condutividade térmica do fluido de trabalho utilizando-se nanopartículas (SUMAN, et al., 2015).

A determinação da eficiência dos coletores solares passa pelo conhecimento de muitas variáveis como: a intensidade de radiação solar, a temperatura ambiente, o material utilizado na fabricação do coletor solar, a superfície absorvedora, a área de exposição do coletor, dentre outros fatores. Com certas modificações na geometria das superfícies de uso, nos tipos de materiais empregados na construção e na absorvidade como propriedade da placa dependendo da cor, resultam em aumento da eficiência e devem ser selecionadas de acordo com as exigências de temperatura de saída do fluido de trabalho (SUMAN et al., 2015).

De acordo com o Atlas brasileiro de energia solar (2017), o aquecimento de água é um dos processos que mais consome energia elétrica no país. Considerando apenas o setor residencial, os gastos com aquecimento de água chegam a 24% do total da energia elétrica consumida (ELETROBRAS, 2007). Com isto, o uso de sistemas de coletores solares se mostra

uma excelente opção para reduzir gastos e consumo de energia, pois sua energia provém de uma fonte limpa e renovável. Desta forma, o presente trabalho consiste em analisar experimentalmente um coletor solar plano e determinar o seu desempenho térmico através dos ensaios.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GERAL

Realizar o estudo experimental de um coletor solar que atenda os pré-requisitos de baixo custo e ser fabricado com materiais disponíveis no comércio local da região do oeste potiguar, para converter a radiação solar em energia térmica, utilizável para consumo no cotidiano.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir o coletor solar;
- Instrumentar o sistema para quantificar a variável temperatura;
- Fazer a coleta de dados nos pontos específicos do sistema de aquecimento;
- Analisar os resultados experimentais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As aplicações práticas do conhecimento científico que propiciam a captação da energia proveniente do sol estão em constante desenvolvimento, permitindo assim, sua utilização, com relativo sucesso em várias situações e empreendimentos. O aumento da eficiência energética e a constante redução dos custos dessas aplicações são necessários para garantir essa tendência de crescimento de sua inserção na matriz energética brasileira de forma consistente e permanente. A busca de novos sistemas e seu dimensionamento adequado são o caminho para o desenvolvimento de sistemas específicos a cada aplicação. A principal utilização da energia solar no Brasil tem sido para aquecimento de água para uso residencial.

Nesta seção será apresentada uma breve descrição introdutória dos fenômenos de radiação e convecção, os princípios de funcionamento e as configurações de alguns coletores solares baseado no artigo e livro de Kalogirou (2004, 2009) e na revisão de artigos e trabalhos.

2.1 Radiação

A radiação térmica é a energia emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura não-nula e não necessita de um meio material para a transferência de energia, ou seja, ocorre mais eficientemente no vácuo (INCROPERA *et al.*, 2012).

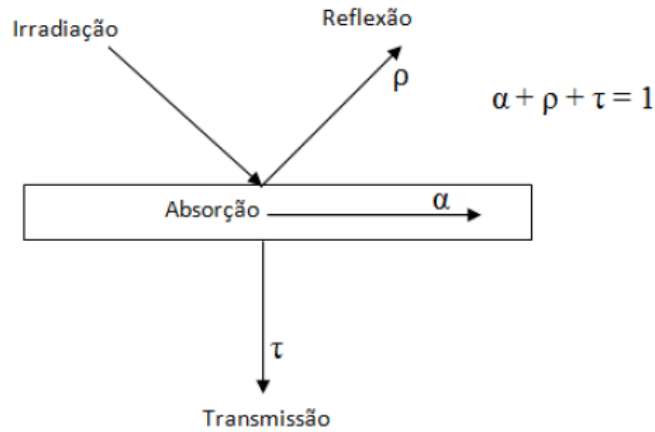
Para a análise de um coletor solar, o Sol é tratado como um corpo negro (emissor e absorvedor ideal). A emissão das superfícies reais é caracterizada pela emissividade (ϵ) do material, que é a propriedade que define a razão entre a radiação emitida pela superfície e a radiação emitida por um corpo negro à mesma temperatura (INCROPERA *et al.*, 2012).

A radiação incidente sobre uma superfície pode ser absorvida, transmitida ou refletida, dependendo da absortividade (α), da transmissividade (τ) e da refletividade (ρ) do material.

Segundo Incropera *et al.* (2012), a absortividade é a propriedade que determina a fração da irradiação que é absorvida por uma superfície, a transmissividade é a fração da radiação incidente transmitida e a refletividade é a fração da radiação incidente refletida.

Na Figura 1 é mostrado um esquema de como ocorre os fenômenos de absorção, reflexão e transmissão para a energia incidente independentes do comprimento de onda, da direção e do ângulo.

Figura 1: Processo de reflexão, absorção e transmissão.



Fonte: CARVALHO; SIONEK, 2015.

2.2 Convecção

A transferência de calor por convecção consiste na troca de calor, que ocorre com o contato entre um fluido em movimento e uma superfície, estando os dois a diferentes temperaturas (INCROPERA et al., 2012).

Para a análise da transferência de calor entre placas do coletor utiliza-se o conceito de convecção natural entre placas planas inclinadas, que é função de quatro parâmetros importantes:

- O número de Nusselt (Nu), sendo igual ao gradiente de temperatura adimensional na superfície e fornece uma medida da transferência de calor na superfície (INCROPERA et al., 2012). Independente da posição espacial ao longo do comprimento, temos o número de Nusselt médio (Nu_m) como mostra a Equação (1):

$$Nu_m = \frac{hL}{k} \quad (1)$$

em que h é o coeficiente médio de transferência de calor, L é o comprimento característico e k é a condutividade térmica do fluido.

- O número de Grashof fornece uma medida da razão entre as forças de empuxo e as forças viscosas na camada limite de velocidade (INCROPERA et al., 2012), como mostra a Equação (2):

$$Gr_L = \frac{g\phi(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (2)$$

onde ϕ é o coeficiente de expansão volumétrica térmica, ν é a viscosidade cinemática dada em m^2/s , L é a distância entre as placas, T_s é a temperatura da superfície e T_∞ é a temperatura do fluido em escoamento.

- O número de Prandtl fornece uma medida da efetividade relativa dos transportes, por difusão, de momento e de energia no interior das camadas-limite de velocidade e térmica, respectivamente (INCROPERA et al., 2012), como mostra a Equação (3):

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3)$$

onde α é a difusividade térmica dada em m^2/s .

- O número de Rayleigh (Ra) que é o produto dos números de Grashof (Gr_L) e de Prandtl (Pr), podendo ser visto como a razão de forças e de flutuabilidade e o produto de difusividades térmicas e dinâmica, definidos da seguinte forma (INCROPERA et al., 2012), como mostra a Equação (4):

$$Ra = Gr_L \times Pr \quad (4)$$

2.3. Coletores solares

Os coletores solares são considerados o componente principal de um sistema de aquecimento solar, sendo responsável pela conversão da radiação solar, transferindo o fluxo energético proveniente da radiação incidente para o fluido que circula no interior do mesmo.

Coletores solares devem ter alta transmissividade e absortividade da radiação, pois as vezes, os mesmos perdem energia pela combinação de mecanismos de convecção e condução de calor, e é desejável que a emitância da superfície seja a mais baixa possível para reduzir as perdas. (DUFFIE; BECKMAN, 1980)

Os principais tipos de coletores solares são os concentradores que podem ser refletores ou refratores, cilíndricos ou parabólicos e contínuos ou segmentados. Os coletores receptores podem

ser convexos, planos, cilíndricos ou côncavos e podem ser cobertos com vidro ou sem cobertura, como mostrado um exemplo na Figura 2.

Figura 2: Concentrador Parabólico.



Fonte: www.cresesb.cepel.br, 2014.

O outro tipo são os não-concentradores que possuem a mesma área que intercepta e absorve a radiação, podendo ser o parabólico composto, o de tubos evacuados e o de placa plana. Os coletores concentradores são projetados para que se atinjam temperaturas mais elevadas e os coletores planos são utilizados quando a temperatura desejada é apenas um pouco superior à temperatura ambiente.

2.3.1. Coletor solar plano

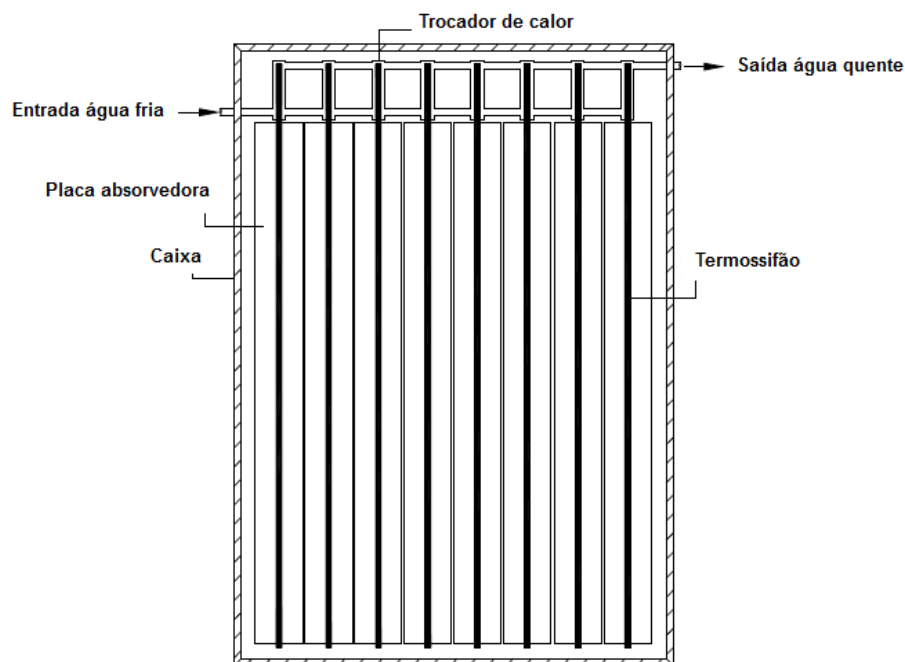
O coletor solar plano tem o mesmo princípio de funcionamento do sistema convencional de aquecimento solar de água, podendo funcionar em regime de termossifão ou bombeado, sendo este último utilizado quando há um grande volume a ser aquecido ou quando o reservatório se encontra abaixo do nível dos coletores. Os mesmos possuem uma grande variedade de modelos e são feitos de materiais diversos. A placa coletora é mais simples, sem cobertura de vidro e caixa retangular e composta por um perfil de forro alveolar de PVC modular com tubos de PVC

acoplados às suas extremidades e isolamento no fundo desta placa. A placa é pintada com tinta preta fosca para aumentar a absorção da energia solar. A ausência de cobertura transparente no coletor, apesar de diminuir a atuação do coletor em dias de muito vento, é necessária para não degradar o material devido às altas temperaturas proporcionadas pelo efeito estufa.

Com relação ao reservatório do sistema alternativo, pode-se utilizar a própria caixa d'água da residência, tambores de plástico rígido ou em fibra de vidro com baixa condutividade térmica, ou caixa de EPS (isopor), sempre isolados termicamente nas laterais e na tampa superior com materiais simples e baratos como isopor, lã de vidro, poliuretano, e até mesmo madeira ou jornal.

Os coletores solares de placa plana são compostos geralmente de tubos para direcionar ou conduzir o fluido de entrada até a saída, de placa absorvedora ao qual os tubos estão conectados, de tubos de alimentação para a admissão e descarga do fluido, de isolamento para minimizar a perda de calor do coletor e a caixa para armazenar os componentes citados, como mostrado na Figura 3.

Figura 3: Esquema de um coletor solar plano.



Fonte: Adaptado de AZAD, 2008.

Através da revisão bibliográfica nota-se a importância de um método para análise de coletores solares, independente do seu tipo de configuração e funcionamento, pois permite o estudo do comportamento das propriedades térmicas sob diversas condições e também a forma como se comportam ao longo do coletor. É possível observar parâmetros que podem ser alterados que venham a ter influência sobre a eficiência, tais como a vazão, temperatura de entrada, ângulo de inclinação, entre outros.

2.4. Estado da arte dos coletores solares

Woodman (1977) mostrou uma maneira de calcular a eficiência do coletor em função dos parâmetros de projeto e de operação do coletor e indicou um método de solução prático que pode ser resolvido através de uma calculadora programável. O método é usado para analisar a sensibilidade do coletor em relação à temperatura do ar ambiente, à temperatura da placa absorvedora e à emissividade.

Rabl (1981) fez uma análise baseando-se em correlações matemáticas para energia solar utilizadas para os principais tipos de coletores solares. Os resultados foram baseados em simulações feitas por 26 estações meteorológicas realizadas a cada hora. Estas correlações são polinômios de primeira e segunda ordem e a energia coletada pode ser encontrada interpretando um simples gráfico dos parâmetros do coletor. O método demonstrado por Rabl pode ser usado para qualquer tipo de coletor operando anualmente. Também é recomendado para caracterizar coletores de diferentes tipos através do seu desempenho.

Um novo método numérico foi criado por Wang e Wu (1990), para calcular a distribuição da vazão e da temperatura em sistemas de coletores solares. A vazão, a condução longitudinal de calor e o efeito de empuxo são todos levados em conta nesta análise. Os resultados encontrados estão de acordo com os resultados experimentais e também foi encontrado que a vazão não uniforme afeta o desempenho do coletor.

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

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

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

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

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

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

Shojaeizadeh et al. (2014) analisaram o efeito da vazão mássica de fluido de trabalho e da adição de propileno glicol na água, como aditivo anticongelamento. Afirmam que o aumento da vazão aumenta a transferência de calor entre a placa absorvedora e o fluido de trabalho,

diminuindo a diferença de temperatura entre a placa absorvedora e o ambiente, reduzindo a transferência de calor para o ambiente. Esses efeitos combinados contribuem para um aumento da energia útil absorvida.

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

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

2.5. Estado da arte dos coletores solares não-convencionais

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

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

Herce-Vigil; Suarez (1991) afirmam que como a pressão de trabalho nos coletores é baixa, os plásticos apresentam ser bons materiais para sua construção. Desta forma, analisou um coletor constituído de placas de copolímero de polietileno e polipropileno formando canais por onde a água escoar. Esta geometria proporciona uma boa área de contato entre o fluido de trabalho

e a placa absorvedora. Os resultados mostraram que esse material pode ser utilizado na fabricação de coletores solares, reduzindo o peso dos equipamentos e os custos de fabricação.

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

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

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

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

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

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

Souza et al. (2008) possui uma lista de trabalhos desenvolvidos compostos por coletores solares e reservatórios térmicos não convencionais com resultados satisfatórios. Os coletores solares, por exemplo, já foram confeccionados à partir de tubos de PVC, garrafas PET e até mesmo latas de alumínio de bebidas. Quanto aos reservatórios, esses já foram confeccionados com tambores de polietileno revestido por um cilindro de fibra de vidro com isolantes térmicos, como também de poliestireno expandido (EPS ou isopor) triturado, entre o reservatório e o revestimento.

Lopo (2010) estudou um sistema de aquecimento solar de água de baixo custo e dimensionado para o banho de uma família com quatro pessoas. O coletor não convencional foi construído a partir de tubos de PVC ligados em paralelo através de conexões, formando a grade absorvedora. Foram estudadas mais de cinco configurações para o reservatório térmico de 150 litros e 200 litros, ambos com a finalidade de armazenar a água aquecida pelo sistema. Além disso, o mesmo avaliou a contribuição das aletas absorvedoras que foram fabricadas com latas de bebidas acopladas aos tubos absorvedores.

Dorfling et al. (2010) analisaram experimentalmente em laboratório um coletor solar fabricado de filme microcapilar, que consiste em um filme extrudado e flexível de plástico, com uma matriz de capilares ocultos disposta paralelamente ao longo de seu comprimento. Os resultados indicaram que a magnitude da energia térmica absorvida por esse coletor equipara aos coletores disponíveis no mercado. Além disso, validaram numericamente um método para dimensionamento de um sistema utilizando esses coletores, mostrando ser viável sua utilização apresentando as vantagens de ser um sistema solar de aquecimento de água de baixo custo, pouco

peso sem abrir mão das vantagens dos sistemas tradicionais.

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

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

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

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

3. MATERIAIS E MÉTODOS

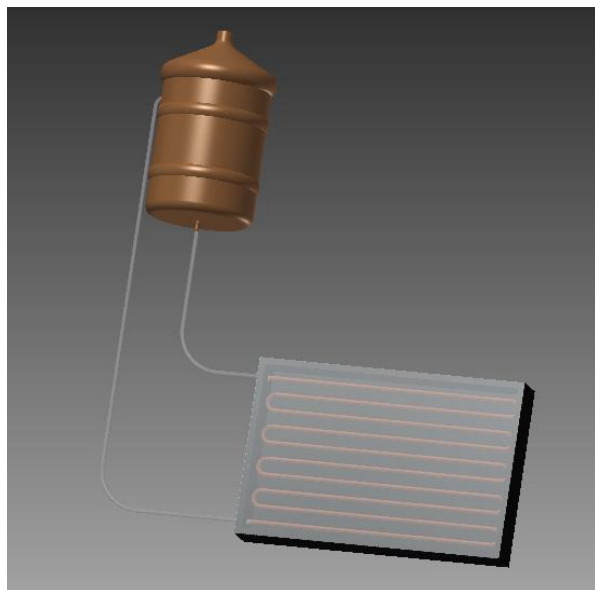
Para desenvolver esse sistema de aquecimento solar de baixo custo, primeiro, foi necessário a compra de alguns materiais. O mesmo é composto por um coletor solar plano e um reservatório térmico para armazenar o fluido de trabalho, que é a água.

O sistema de aquecimento solar foi acomodado na área externa em frente ao bloco de Laboratórios de Engenharias 2 da UFERSA - Campus Caraúbas, localizada na Avenida Universitária “Leto Fernandes”, Sítio Esperança II na cidade de Caraúbas/RN - Brasil. Sua instalação foi realizada de tal modo que garantiu a inclinação de $15,47^\circ$, ou seja, 10° a mais do que a latitude da cidade de Caraúbas que é de aproximadamente $5,47^\circ$, como é indicado por Bezerra (2001) para um maior aproveitamento da radiação solar global. O sistema também foi posicionado de maneira que não ocorra sombreamento na face absorvedora da radiação solar do coletor. Após a instalação, foi verificado que o sistema não possuía vazamentos e que a circulação em regime de convecção natural, conhecido também por termossifão que ocorre pela diferença de densidade da água quente e fria, poderia ser atendido.

3.1. Desenho do sistema

Com o auxílio do Software Autodesk Inventor Professional 2015 (versão de estudante) foi possível desenhar o sistema de aquecimento solar com todos os componentes envolvidos, tendo uma visualização inicial de como seria realizado a construção e montagem, como mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Desenho do sistema.



Fonte: Autoria Própria.

3.2. Construção da placa coletora

Para a construção da placa coletora foram utilizados os seguintes materiais:

- 1 (Uma) Serpentina de condicionador de ar;
- 1 (Uma) Caixa de madeira;
- 1 (Uma) Placa de vidro;
- Silicone;
- Tinta preto fosco.

Primeiro foi construída a caixa de madeira com as dimensões de 0,65 m de comprimento, 0,43 m de largura e 0,10 m de altura para comportar a serpentina. Em seguida foi retocada a pintura da serpentina de Condicionador de ar e da caixa de madeira com uma nova camada de tinta preto fosco para uma melhor absorção solar, como mostrado nas Figuras 5 e 6, respectivamente.

Figura 5 - Serpentina de Condicionador de ar.

Fonte: Autoria própria.

Figura 6 - Caixa de madeira.

Fonte: Autoria própria.

A serpentina utilizada é constituída do material cobre, com configuração em série, possuindo aletas e foi reutilizada para este sistema de aquecimento. O tubo de cobre de aproximadamente 9 mm de diâmetro tem a função de conduzir a água que captará a energia térmica. O mesmo, sendo um ótimo condutor de calor, absorverá todo esse calor do coletor e o transmitirá para a água que está circulando. A serpentina apresenta as seguintes dimensões: largura de 0,38 m, comprimento de 0,59 m e altura de 0,06 m. A mesma possui o número de 14 voltas e o comprimento total aproximado de 8,26 m de tubulação. Logo após, a parte superior do coletor foi coberta com uma folha de vidro de 2 mm de espessura fixado com silicone evitando a fuga de calor para o meio externo e para obter um maior aproveitamento da radiação solar e aumento da temperatura interna da placa coletora. O coletor por fim, possui uma área correspondente a $0,28 \text{ m}^2$, como mostrado na Figura 7.

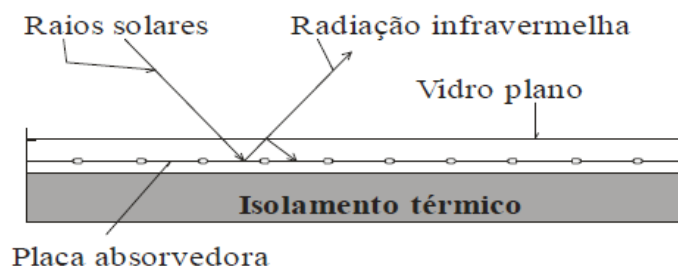
Figura 7 - Coletor pronto.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 8 ilustra o princípio de funcionamento do coletor plano que se baseia na absorção da radiação solar de ondas curtas pela placa absorvedora, energia essa transformada em calor, pelo efeito estufa, que é aprisionada no interior do coletor e transferida ao fluido. Essa cobertura transparente serve tanto para evitar o efeito convectivo do ar ambiente quanto para impedir a saída da radiação infravermelha de ondas curtas, produzindo o efeito e proporcionando um aumento de eficiência da conversão (REIS, 2009).

Figura 8 - Conversão de energia solar em calor.



Fonte: Adaptado de REIS, 2009.

3.3. Construção do Reservatório de água

Para a construção do reservatório foram utilizados os seguintes materiais:

- 1 (Um) garrafão de água mineral de 20 L;
- 2 (Duas) solução de 500 mL com adesivo de poliuretano (isolante);
- 2 (Dois) parafusos com porcas;
- Borracha (cama de ar);
- Silicone.

Primeiro, foram feitas as conexões de entrada e saída do reservatório utilizando os parafusos com porcas usinados no torno do laboratório de Usinagem da UFERSA-Campus Caraúbas. Em seguida, furou-se o garrafão no centro da parte inferior e na parte de cima do corpo cilíndrico, com diâmetro de 10 mm. Colocou-se as conexões nos furos com arruelas de borrachas e silicone para a vedação deixando secar bem, como mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Conexão de entrada do reservatório.



Fonte: Autoria própria.

Posteriormente, aplicou-se a espuma expansiva de Poliuretano sobre toda superfície do garrafão e colocou para secar. O uso desta espuma tem como objetivo isolar termicamente o ambiente interno, diminuindo a transferência de calor do reservatório para o meio externo, como mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Reservatório isolado com adesivo de Poliuretano.



Fonte: Autoria própria.

Após preparado o reservatório, construiu-se um suporte de madeira com 1 metro de altura para colocar o reservatório em cima, como mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Suporte com reservatório.



Fonte: Autoria própria.

3.4. Montagem do sistema

Montou-se o sistema de aquecimento utilizando mangueiras de 10 mm de diâmetro para conectar o coletor solar ao reservatório. A mangueira que conecta a saída do reservatório com a entrada do coletor tem um comprimento de 1,70 m e a outra mangueira que conecta a saída do coletor com a entrada do reservatório tem um comprimento de 1,50 m. Ambas foram isoladas com tubos de espuma de cor branca diminuindo a perda térmica com o meio, como mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Sistema montado.



Fonte: Autoria própria.

Para garantir a inclinação aproximada de 15,47° do coletor, foi necessário a utilização de suportes e cálculo com a relação trigonométrica que envolvem a tangente e os catetos. Com a altura dos suportes de aproximadamente 0,06 m (cateto oposto) e o ângulo de 15,47°, podemos encontrar o cateto adjacente como sendo a distância necessária entre os suportes e a região de contato do coletor com o solo, como mostrado no cálculo e na Figura 13.

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{CO}{CA} \Rightarrow CA = \frac{CO}{\operatorname{tg}\theta} \Rightarrow CA = \frac{0,06}{\operatorname{tg}15,47^{\circ}} \Rightarrow \mathbf{CA = 0,2167\ m}$$

Figura 13 - Inclinação do coletor.



Fonte: Autoria própria.

3.5. Caracterização do Equipamento de medição

Após o sistema montado no local, é necessário ensaiar com a finalidade de determinar as temperaturas. Para isso, utilizou-se para coleta de dados, um termômetro digital 1 canal (fabricante Minipa, modelo MT-450) junto com termopares do tipo K nas medições de temperatura, como mostrado na Figura 14 e as informações técnicas do fabricante no Anexo. Com o auxílio deste equipamento foi possível coletar dados em sete locais específicos que serão mostrados posteriormente.

Figura 14 - Termômetro digital (MT-450) e termopar do tipo K.

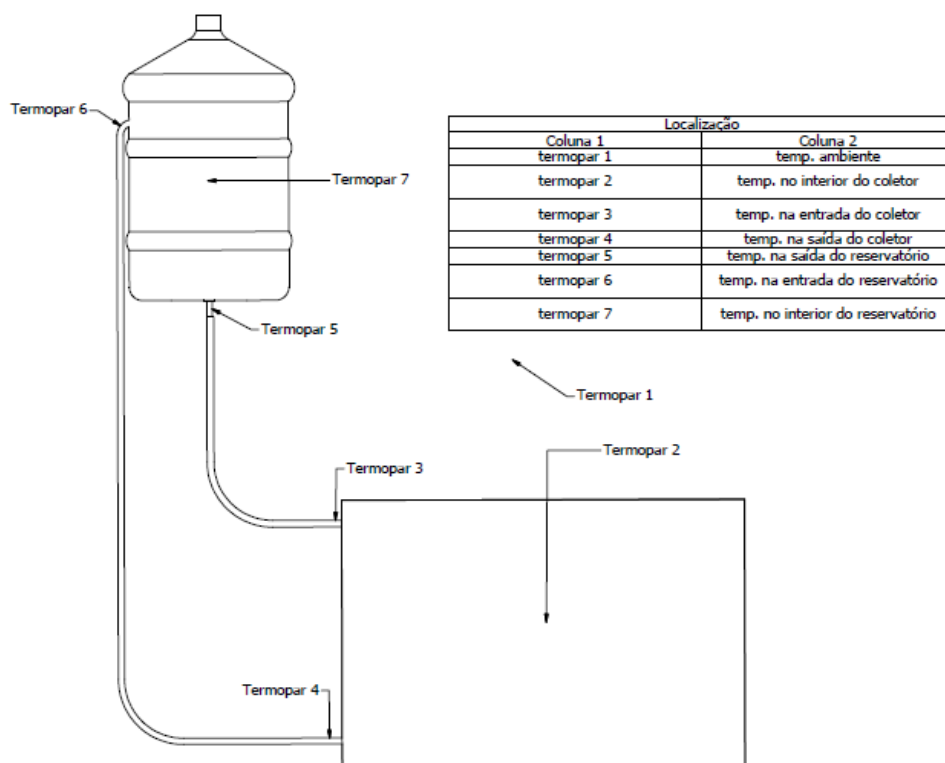


Fonte: Autoria própria.

3.6. Procedimento de coleta de dados

As análises foram realizadas no decorrer de 3 dias, iniciando-se às 08:00h (oito horas da manhã) e terminando às 17:00h (cinco horas da tarde). A verificação ocorreu a cada meia hora entre esses horários citados, em diferentes pontos de coleta do sistema podendo assim acompanhar o aumento da temperatura ao longo do dia, como mostrado na Figura 15 e no Apêndice A. As medições ocorreram na seguinte ordem: Temperatura ambiente; Temperatura na saída do reservatório; Temperatura na entrada do coletor; Temperatura no ambiente do coletor; Temperatura na saída do coletor; Temperatura na entrada do reservatório e Temperatura no meio do reservatório.

Figura 15 – Localização dos pontos de coleta.



Fonte: Autoria própria.

3.7. Custos

Os custos aproximados com materiais desse sistema de aquecimento são mostrados na Figura 16.

Figura 16 – Tabela dos custos aproximados.

Materiais	Valor aproximado (R\$)
Caixa de madeira	10,00
Serpentina de Condicionador de ar	doação
Placa de vidro	20,00
Mangueiras de 10 mm	10,00
2 solução de Poliuretano	30,00
Tinta Preto fosco	15,00
Garrafão de água mineral de 20 L	doação
Silicone	15,00
Suporte de madeira	20,00
2 Parafusos com porcas	4,00
Total	124,00

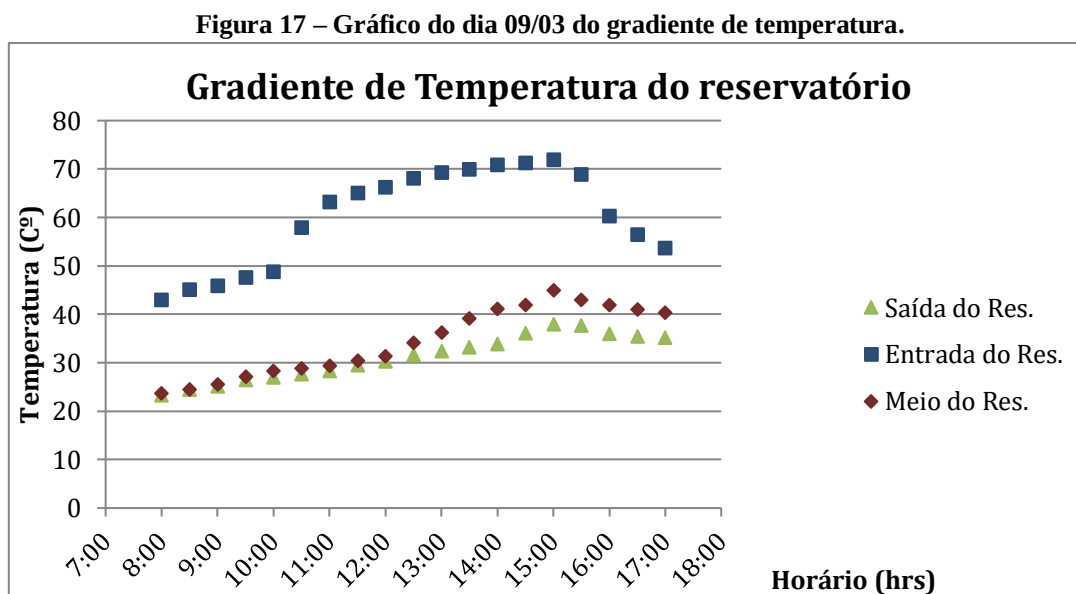
Fonte: Autoria própria.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante os três dias de ensaios foram coletados os dados de temperatura para a análise comparativa dos gradientes de temperatura do reservatório, das temperaturas nas tubulações e da avaliação da temperatura do coletor.

4.1. Gradientes de temperatura do Reservatório

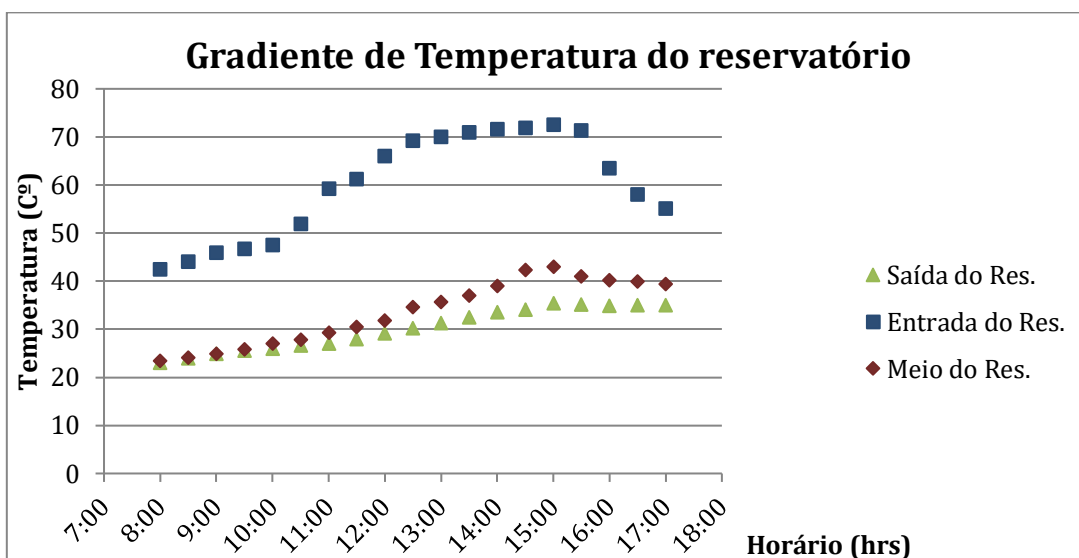
Para a análise do gradiente de temperatura do reservatório, percebeu-se comportamento semelhante entre o primeiro e segundo dia de coleta, como mostrado nas Figuras 17 e 18, respectivamente. No terceiro dia de coleta, percebeu-se um comportamento diferente nas temperaturas, devido as condições de tempo com nebulosidade e a precipitação por volta de 14:00 horas, como mostrado na Figura 19.



Fonte: Autoria própria.

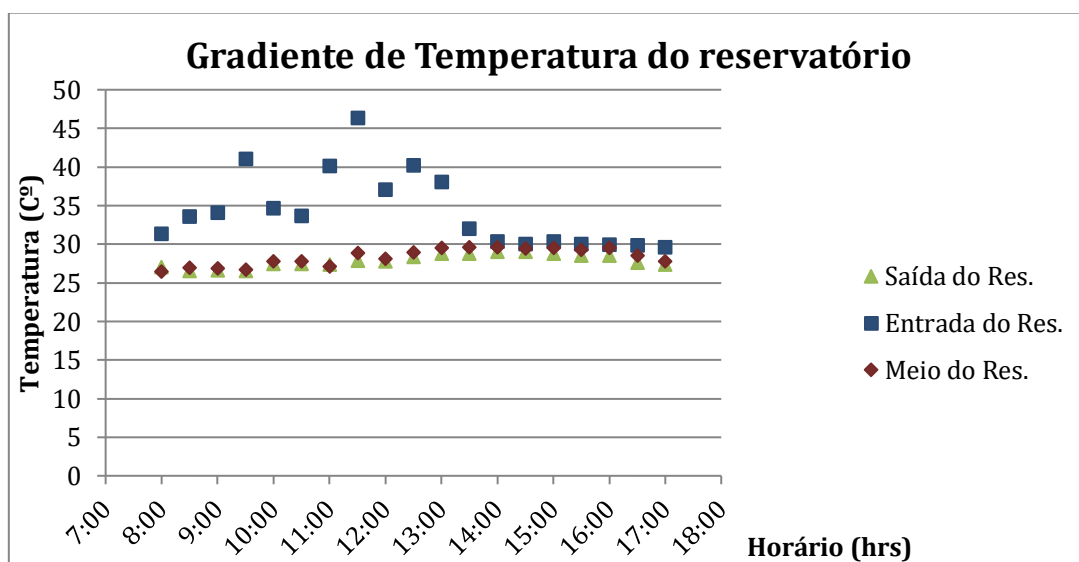
Os gráficos do primeiro e segundo dia, nos revelam uma curva de aquecimento localizado na entrada do reservatório. Espera-se curvas de aquecimento do meio e saída do reservatório mais próximo da curva de entrada, evidenciando assim, uma concentração de calor na parte superior do recipiente.

Figura 18 – Gráfico do dia 10/03 do gradiente de temperatura.



Fonte: Autoria própria.

Figura 19 – Gráfico do dia 15/03 do gradiente de temperatura.



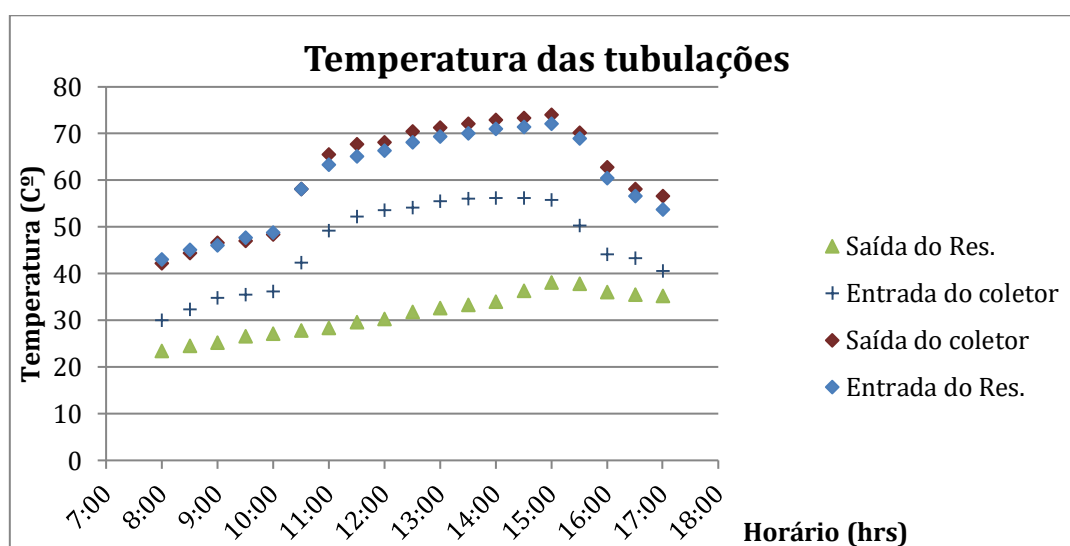
Fonte: Autoria própria.

O gráfico do terceiro dia, os dados coletados na entrada do reservatório, mostra picos de aquecimento devido a nebulosidade atuante e também a precipitação que ocorreu a partir das 14:00 horas. As temperaturas do meio e saída ficaram bem próximas, onde espera-se a aproximação maior da curva de entrada, distribuindo melhor o aquecimento por todo o reservatório.

4.2. Temperaturas das tubulações

Para a análise das temperaturas das tubulações, percebeu-se também comportamento semelhante entre o primeiro e segundo dia de coleta, como mostrado nas Figuras 20 e 21, respectivamente. No terceiro dia de coleta, percebeu-se um comportamento diferente nas temperaturas, devido a fatores externos como nebulosidade e a precipitação por volta de 14:00 horas, como mostrado na Figura 22.

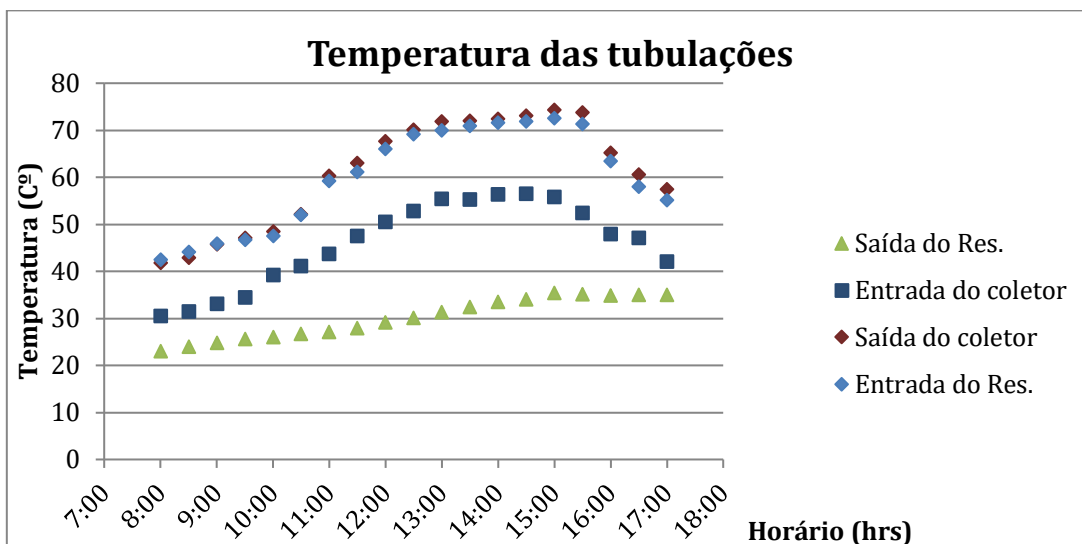
Figura 20 – Gráfico do dia 09/03 das temperaturas das tubulações.



Fonte: Autoria própria.

Os gráficos do primeiro e segundo dia, as curvas de temperatura de entrada do reservatório e saída do coletor estão bem próximas, mostrando um isolamento térmico satisfatório.

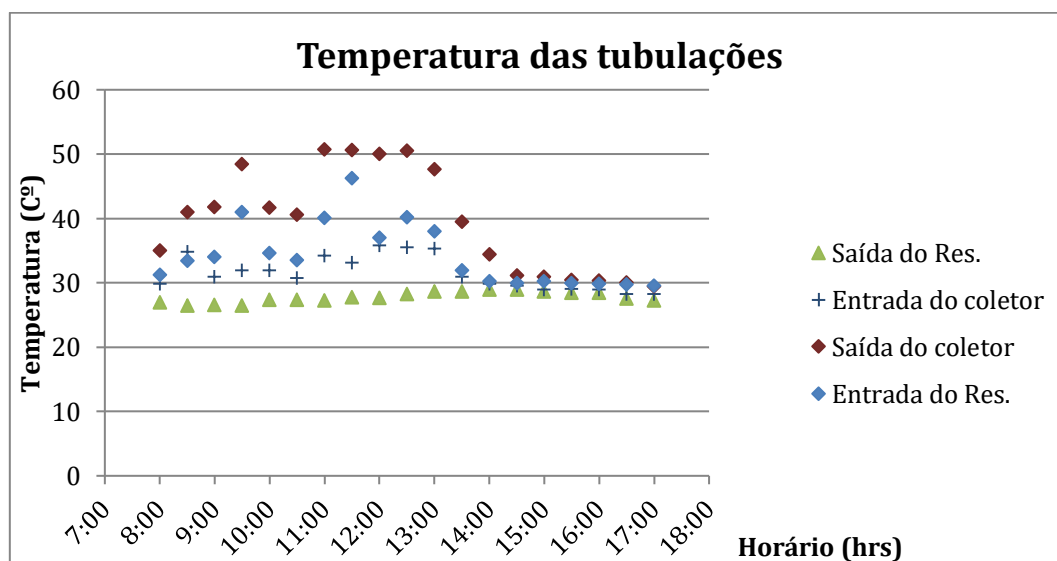
Figura 21 – Gráfico do dia 10/03 das temperaturas das tubulações.



Fonte: Autoria própria.

Com relação, as curvas de temperatura de entrada do coletor e saída do reservatório, esperava-se uma maior aproximação, tendo em vista uma melhor distribuição de temperatura no sistema de tubulações. Esse distanciamento nas temperaturas, nos mostram o retorno de fluxo do fluido devido as perdas de carga ocasionado pela configuração em série da serpentina.

Figura 22 – Gráfico do dia 15/03 das temperaturas das tubulações.



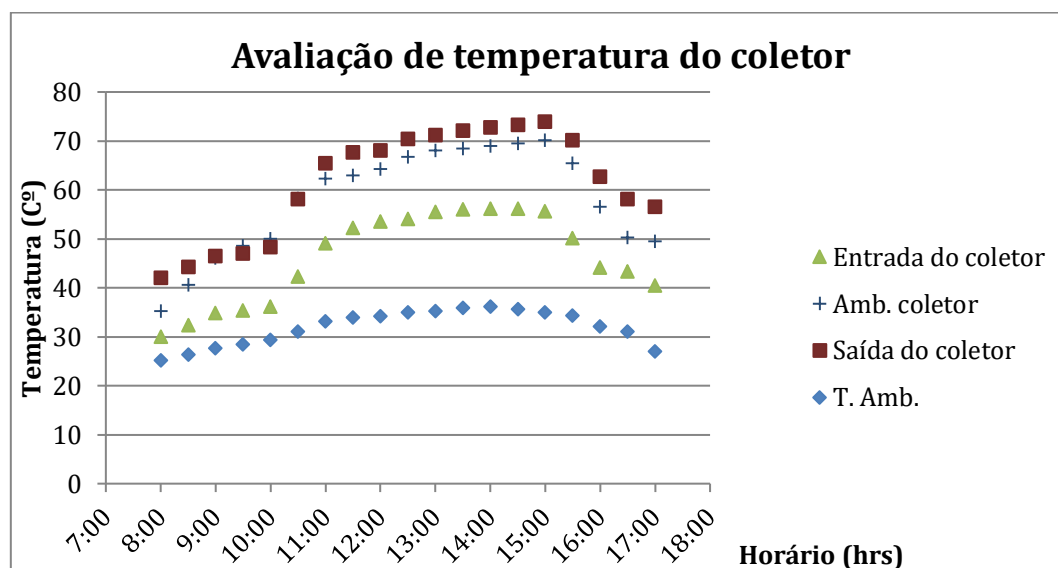
Fonte: Autoria própria.

O gráfico do terceiro dia, devido a nebulosidade e a precipitação, interferiram no comportamento esperado das temperaturas como ocorreu no gráfico do primeiro e segundo dia.

4.3. Avaliação de temperatura do coletor

Para a avaliação das temperaturas do coletor, percebeu-se comportamento semelhante entre o primeiro e segundo dia de coleta, como mostrado nas Figuras 23 e 24, respectivamente. No terceiro dia de coleta, percebeu-se também um comportamento diferente nas temperaturas, devido as condições externas de nebulosidade e a precipitação por volta de 14:00 horas, como mostrado na Figura 25.

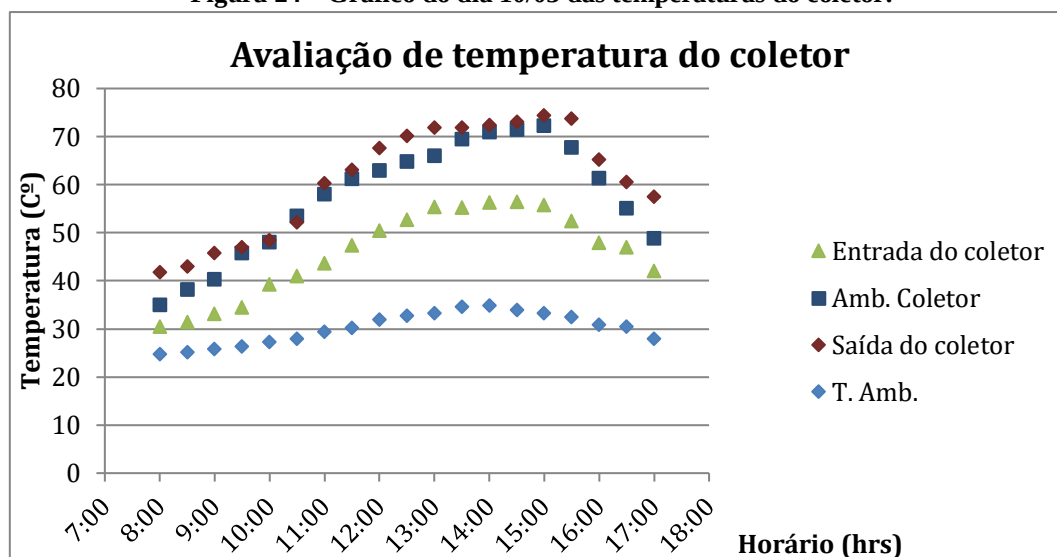
Figura 23 – Gráfico do dia 09/03 das temperaturas do coletor.



Fonte: Autoria própria.

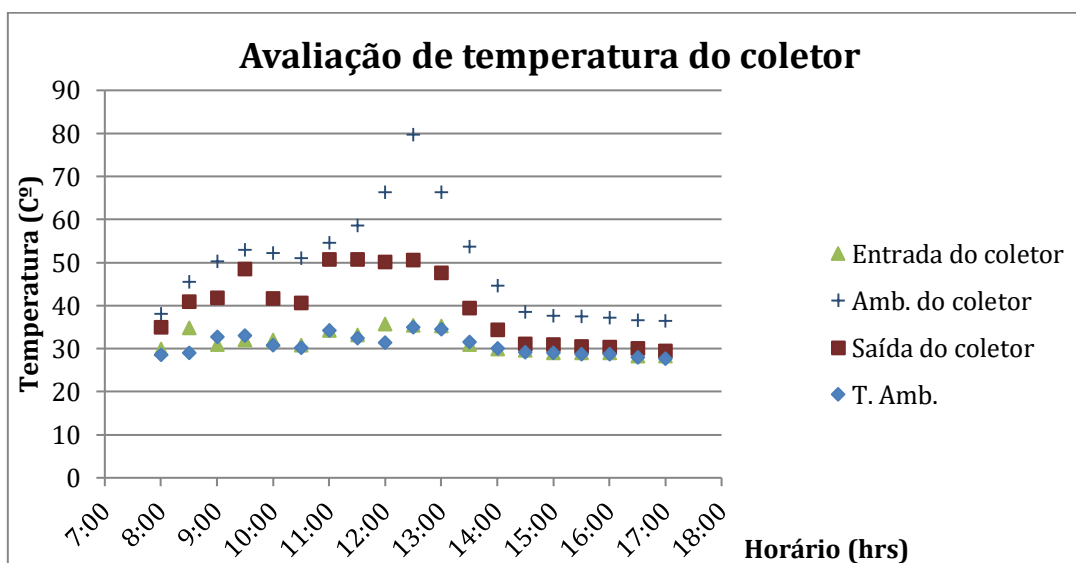
Os gráficos do primeiro e segundo dia, observou-se curvas de aquecimento satisfatório na saída e no ambiente do coletor ao longo do dia, com temperaturas máximas entre 70 e 80 graus.

Figura 24 – Gráfico do dia 10/03 das temperaturas do coletor.



Fonte: Autoria própria.

Figura 25 – Gráfico do dia 15/03 das temperaturas do coletor.



Fonte: Autoria própria.

O gráfico do terceiro dia, observamos que os fatores externos, como a nebulosidade e a precipitação, influenciaram no comportamento das temperaturas ao longo do dia. Mesmo assim, a curva de temperatura mostrada nos dados do ambiente do coletor, evidencia a ocorrência do efeito estufa ao longo do dia, tendo em vista que estão superiores a temperatura ambiente.

5. CONCLUSÃO

O sistema de aquecimento solar construído apresenta o custo relativamente baixo e de simples construção.

O sistema de montagem do coletor se mostrou satisfatório, visto que foi possível evidenciar temperaturas elevadas dentro da estufa.

O sistema de isolamento das mangueiras foi satisfatório, visto que houve pouca perda de calor ao longo das tubulações de saída do coletor e entrada do reservatório.

O sistema de circulação em série, com um longo comprimento a ser percorrido pelo fluido, ocasionou uma grande perda de carga, dificultando a circulação da água ao longo do trajeto.

As perdas de carga promovidas no sistema fez com que ocorresse retorno de fluxo na tubulação de entrada, evidenciados pelas altas temperaturas na entrada do coletor.

Este tipo de sistema pode ser uma boa alternativa para fins domésticos e de higiene, contribuindo por exemplo na redução dos custos com energia e no uso sustentável, pois utiliza-se de uma energia renovável (solar) durante todo o processo de aquecimento.

Este trabalho poderá contribuir para o melhor entendimento dos sistemas de aquecimento como também servirá de base para pesquisas futuras.

6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos a ser desenvolvidos no futuro, as seguintes ações são recomendadas:

- Realizar estudos sobre materiais alternativos na construção de um coletor solar plano, tais como polímeros e compósitos com características de isolante térmicos;
- Desenvolver projetos para fortalecer e ampliar a capacidade de ensaios e medidas, o conhecimento da física desse sistema, bem como o estudo e desenvolvimento de novas tecnologias de coletores solares térmicos;
- Desenvolvimento de processos de fabricação de coletores solares de menor custo e/ou maior eficiência;
- Executar um estudo de um coletor solar plano assistido por termossifão e realizar testes experimentais sob condições similares as testadas utilizando a configuração em paralelo da placa absorvedora (serpentina);
- Buscar melhorar o máximo o isolamento térmico do sistema de aquecimento e principalmente do reservatório, visto que, possibilitará o melhor desempenho na coleta de dados e nos gráficos que serão gerados para as conclusões dos estudos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Atlas da Energia Elétrica do Brasil**. Brasília – DF, 2008. 2ª Edição. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Atlas/download.htm>. Acesso em 14 de Outubro de 2018.
- ARMENTA, C.; VOROBIEFF, P.; MAMMOLI, A. **Summer off-peak performance enhancement for rows of fixed solar thermal collectors using flat reflective surfaces**. Solar Energy, v. 85, n. 9, p. 2041–2052, 2011.
- AZAD, E. **Theoretical and experimental investigation of heat pipe solar collector**. Elsevier: Experimental Thermal and Fluid Science, Teerã, 2008.
- BEZERRA, A.M., **Aplicações térmicas da energia solar**, Editora Universitária - UFPB, João Pessoa, 2001.
- CAMARGO, Jorge M. T.. **A hora do Petróleo**. 2017. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/opiniao/a-hora-do-petroleo-21962943>>. Acessado em: 06 de Novembro de 2018.
- CARVALHO, Filipe Rocha de; SIONEK, Mirella Cristina. **ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE UM COLETOR SOLAR PLANO: Fundamentação teórica**. 2015. 79 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- CHEN, G.; DOROSHENKO, A.; KOLTUN, P.; SHESTOPALOV, K. **Comparative field experimental investigations of different flat plate solar collectors**. Solar Energy, v. 115, p. 577–588, 2015.
- CRISTOFARI, C.; NOTTON, G.; POGGI, P.; LOUCHE, A. **Influence of the flow rate and the tank stratification degree on the performances of a solar flat-plate collector**. International Journal of Thermal Sciences, v. 42, n. 5, p. 455–469, 2003.
- Coletores Solares e Sistemas térmicos solares**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br>>. 2014. Acessado em: 14 de Outubro de 2018.
- DEL COL, D.; PADOVAN, A.; BORTOLATO, M.; DAI PRÈ, M.; ZAMBOLIN, E. **Thermal performance of flat plate solar collectors with sheet-and-tube and roll-bond absorbers**.

Energy, v. 58, p. 258–269, 2013.

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

DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W.A. **Solar Engineering of Thermal Processes**, 1ªEd, New York: John Wiley & Sons, 1980.

ELETROBRAS/PROCEL. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso – Ano base 2005 – Classe Residencial – Relatório Brasil.** 2007.

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

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

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

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

ICERI, D. M. **Análise da relação desempenho/custo de alguns coletores solares comerciais, 2014.** Bauru: Universidade Estadual Paulista. Disponível em: <<http://www2.feb.unesp.br/pos/bibliotecavirtual/documento.php?COD=b3967a0e938dc2a6340e258630febd5a#>>>. Acessado em: 02 de Novembro de 2018.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** tradução e revisão técnica Eduardo Mach Queiroz, Fernando Luiz Pellegrini Pessoa. - [Reimpr.]. - Rio de Janeiro : LTC, 2012.

IHADDADENE, N.; IHADDADENE, R.; MAHDI, A. **Effect of glazing number on the performance of a solar thermal collector.** p.1–6, 2014. IEEE. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6826912>>. Acessado em: 02 de Novembro de 2018.

- JAFARKAZEMI, F.; AHMADIFARD, E., 2013. **Energetic and exergetic evaluation of flat plate solar collectors**. *Renewable Energy*, v. 56, p; 55-63.
- KALOGIROU, S. A. **Solar thermal collectors and applications**. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 30, n. 3, p. 231–295, 2004.
- KALOGIROU, S. **Solar energy engineering : processes and systems**. 1st ed. United States of America: Elsevier Inc, 2009.
- KIM, S. IN; KISSICK, J.; SPENCE, S.; BOYLE, C. **Design, analysis and performance of a polymer–carbon nanotubes based economic solar collector**. *Solar Energy*, v. 134, p. 251–263, 2016.
- LENEL, U. R.; MUDD, P. R. **A review of materials for solar heating systems for domestic hot water**. *Solar Energy*, v. 32, n. 1, p. 109–120, 1984.
- LOPO, A. B. **Análise do desempenho térmico de um sistema de aquecimento solar de baixo custo**. 2010. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2010.
- MARTINOPOULOS, G.; MISSIRLIS, D.; TSILINGIRIDIS, G.; YAKINTHOS, K.; KYRIAKIS, N. **CFD modeling of a polymer solar collector**. *Renewable Energy*, v. 35, n. 7, p. 1499–1508, 2010.
- MELO, Aroldo de Vieira. **Projeto, construção e análise de desempenho de um forno solar alternativo tipo caixa a baixo custo**. 2008. 67f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- NÁBÌLEK, B.; KIRAN, E.; TÜRKSOY, F.; YAZAR, A. **Performance of an unglazed textile-plastic solar absorber**. *Renewable Energy*, v. 16, n. 1, p. 635–638, 1999.
- WANG, X. A., WU, L. G. **Analysis and performance of flat-plate solar collector arrays**. *Solar Energy*, Volume 45, n.2, 71-78, 1990.
- WOODMAN, T. P. **The effect of design and operating parameters on the performance of flat plate solar collectors – calculation method and detailed appraisal**. *Solar Energy*, Volume 19, 263-270, 1977.

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

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

PAIVA, Elisiane Silvia Acácio de et al. **ANÁLISE COMPARATIVA DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DE COLETORES A, B E C COM PENETRAÇÃO DE ÁGUA.** Revista Brasileira de Energia Solar, Belo Horizonte, v. 8, n. 2, p.81-87, 2017.

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

PEREIRA, Enio B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar.** 2. ed, São José dos Campos: INPE, 2017, 80p.

RABL, Ari. **Yearly average performance of the principal solar collector types.** Solar Energy, Volume 27, n.3, 215-233, 1981.

REIS, Edmilson Pedreira dos. **Análise do Desempenho Térmico de um Sistema de Aquecimento Solar utilizando coletor com Superfície Absorvedora em chapas de Forro de PVC, 2009.** 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

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

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

SOUZA, G. M.; SANTOS, N. R. G.; FÉLIX, L. F. **Sistema de aquecimento solar utilizando elementos recicláveis.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2,

CONFERÊNCIA LATINOAMERICANA DE LA ISES, 3., 2008, Florianópolis. Anais... Florianópolis: CBENS ISES-CLA, 2008.

Suman, S.; Khan, M.K.; Pathak, M.. **Performance enhancement of solar collectors—A review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 49, p. 192-210, 2015.

Termômetro digital 1 canal, Modelo MT-450. Ficha técnica do equipamento. Disponível em: <<http://www.minipa.com.br>>. Acessado em: 10 de Março de 2019.

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

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

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

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

ANEXO

TERMÔMETRO DIGITAL 1 CANAL

MODELO: MT-450

CARACTERÍSTICAS

- Display: 3 1/2 dígitos, 2000 Contagens (com iluminação)
- Taxa de Amostragem: 2.5 vezes/s
- Indicação de Polaridade: Automática
- Indicação de Sobrefaixa: OL
- Indicação de Bateria Fraca: 
- Mudança de Faixa: Automática
- Temperatura em °C ou °F
- Tipo de Termopar: K
- Desligamento Automático: Aprox. 30 minutos ou desabilitado
- Data Hold
- Modo Relativo
- Registro MAX / MIN
- Ajuste de Offset
- Ambiente de Operação: 0°C a 30°C (Umidade Relativa RH ≤ 80%), 30°C a 40°C (RH ≤ 75%) e 40°C a 50°C (RH ≤ 45%)
- Ambiente de Armazenamento: -20°C a 60°C, RH ≤ 80%
- Altitude de Operação: Até 2000m
- Uso Interno
- Alimentação: Quatro baterias de 1.5V (AAA)
- Duração da Bateria: Aprox. 200h (baterias de carbono-zinco)
- Dimensões: 160(A) x 83(L) x 38(P)mm
- Peso: Aprox. 240g (incluindo bateria)



APLICAÇÕES

Instrumento preciso para medida de temperatura com um canal. Possui holster protetor para evitar danos ao instrumento quando se trabalha em ambientes industriais.

GERAL

Precisão é dada como $\pm$ (% da leitura + número de graus Celsius ou Fahrenheit) para temperatura 23°C $\pm$ 5°C e umidade relativa < 75%.

Ciclo de calibração recomendado de 1 ano.

TEMPERATURA

- Faixas: -200°C ~ 1372°C, -328°F ~ 1999°F
- Precisão: -60°C ~ 1372°C $\pm$ (0.1%+1.0°C)
 -200°C ~ -60°C $\pm$ (0.1%+2.0°C)
 -76°F ~ 1999°F $\pm$ (0.1%+2.0°F)
 -328°F ~ -76°F $\pm$ (0.1%+4.0°F)
- Resolução: 0.1°C (-200°C~200°C)
 1°C (200°C~1372°C)
 0.1°F (-200°F~200°F)
 1°F (-328°F~200°F ou 200°F~1999°F)

* Nota: A precisão especificada não inclui o erro do termopar.

ACESSÓRIOS

1. Manual de Instruções (1 cópia)
2. Ponta Termopar Tipo K (1 peça)
3. Bateria 1.5V / AAA (4 peças)
4. Holster Protetor (1 peça)

PONTA TERMOPAR

- Tipo de Transdutor: Termopar Tipo K (NiCr-NiAl)
- Faixa: -40°C ~ 204°C (-40°F ~ 399°F)
- Precisão: $\pm$ 0.75% ou $\pm$ 2.2°C ($\pm$ 1.4°F)
- Comprimento do Cabo: Aprox. 1m

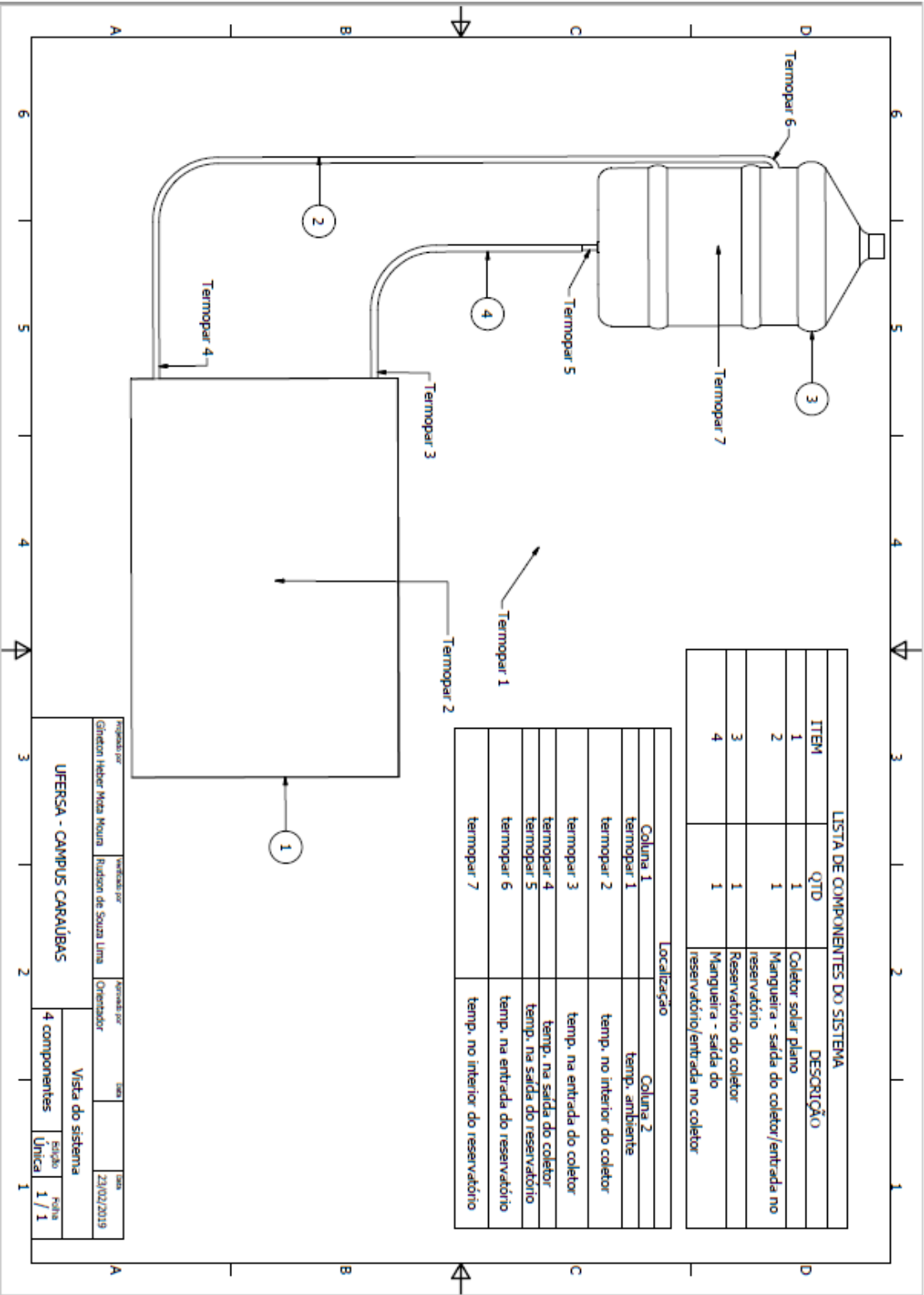
ACESSÓRIOS OPCIONAIS/REPOSIÇÃO

Entre em contato conosco para obter peças de substituição, e acessórios opcionais para seu instrumento de medição.

Utilize sempre acessórios originais Minipa.

1. Ponta Termopar Universal MTK-01
2. Ponta Termopar de Imersão Flexível MTK-13
3. Ponta Termopar de Contato MTK-14
4. Ponta Termopar de Perfuração MTK-15
5. Ponta Termopar de Alta Temperatura MTK-16

APÊNDICE A



Fonte: Autoria própria.