



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
Curso de Engenharia Mecânica

EDUARDO VINICIUS SOUZA SCHALCHER

**COLETOR SOLAR COM TUBO DE VIDRO
EVACUADO UTILIZANDO
GARRAFA DE VIDRO TEMPERADO**

SÃO LUÍS/MA

2018

EDUARDO VINICIUS SOUZA SCHALCHER

**COLETOR SOLAR COM TUBO DE VIDRO
EVACUADO UTILIZANDO
GARRAFA DE VIDRO TEMPERADO**

Monografia de graduação apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Mc. Núbia Célia Bergê Cutrim

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A VERSÃO FINAL DA MONOGRAFIA DEFENDIDA PELO ALUNO EDUARDO VINICIUS SOUZA SCHALCHER E ORIENTADA PELO PROF. MC. NÚBIA CÉLIA BERGÊ CUTRIM

SÃO LUÍS/MA

2018

Schalcher, Eduardo Vinicius Souza.

Coletor solar com tubo de vidro evacuado utilizando garrafa de vidro temperado / Eduardo Vinicius Souza Schalcher. – São Luís, 2018.
50 f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica,
Universidade Estadual do Maranhão, 2018.

Orientador: Profa. Mc. Núbia Célia Bergê Cutrim.

1. Coletor solar. 2. Tubo evacuado. 3. Eficiência.
4. Energia renovável. I. Título.

CDU 620.91

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

COLETOR SOLAR COM TUBO DE VIDRO
EVACUADO UTILIZANDO
GARRAFA DE VIDRO TEMPERADO

Autor: Eduardo Vinicius Souza Schalcher
Orientador: Núbia Célia Bergê Cutrim

A Banca Examinadora aprovou esta Monografia compostas pelos membros abaixo:

Prof. Mc. Núbia Célia Bergê Cutrim, Presidente.

Instituição: Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Mc. Jorge de Jesus Passinho e Silva

Instituição: Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Mc. Paulino Cutrim Martins

Instituição: Universidade Estadual do Maranhão

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

São Luís/Ma, 26 de junho de 2018.

Dedico este trabalho a minha família e verdadeiros amigos por sempre estarem ao meu lado nos momentos mais difíceis da vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre me abençoar e me guiar nos caminhos da vida.

A Prof. Msc. Núbia Bergê por aceitar ser minha orientadora, agregando com sabedoria na execução do presente trabalho.

Ao professor Valdirson Pereira pelo apoio com equipamento, ferramentas e laboratórios.

Ao meu amigo Josué Cutrim por auxiliar na montagem deste trabalho.

A todos os professores da graduação que contribuíram bastante para que eu pudesse adquirir todo conhecimento acadêmico.

Aos meus pais e irmã que de forma direta sempre foram um espelho e um incentivo para meu crescimento pessoal e profissional.

Deus investiu tanto em você, por que só Ele sabe realmente o valor que você tem. Ele planejou você para um propósito especial, que só você poderá realizar.

(Pe. Fábio de Melo)

RESUMO

A utilização de coletores solares para aquecimento de água apresenta uma forte tendência de expansão. Está grande crescente se dá pelo fato que fontes de energias renováveis trazem vantagens econômicas ao país, ao meio ambiente e a quem os usa. Coletores planos são bastante utilizados, porém, os coletores com tubo evacuado tornaram-se uma opção economicamente viável devido a utilização e fabricação de países como a China. Este trabalho descreve a construção de uma bancada de testes com coletor de tubo evacuado, tubos que serão construídos a partir de garrafas temperadas de 600 ml e instrumentação devidamente calibrada, desenvolvida no Laboratório de Refrigeração, na Universidade Estadual do Maranhão, com o intuito de medir a eficiência deste tipo de coletor e comparar com outros existentes. A necessidade por benefícios econômicos e sustentáveis no setor energético foi a inspiração deste trabalho. O método adotado, primeiramente foi a construção de um protótipo e coleta dos dados de temperatura e vazão. Em seguida, com os dados adquiridos, foi calculado a carga útil e o valor da energia total incidente, através da área do coletor e o valor da radiação solar incidente, através de dados fornecidos pelo site do INPE. Após isso foi calculado o rendimento térmico do sistema, apresentando boa eficiência, comprovando que o sistema utilizando garrafa temperada de 600 ml pode ser utilizado como meio para aquecimento de água, pensando em seu uso doméstico.

Palavras-chave: Coletor solar, tubo evacuado, eficiência, energia renovável.

ABSTRACT

The use of solar collectors for water heating has a strong tendency to expand. The great source of renewable energies brings the advantages to the country, to the environment and to those who use. Flat collectors are widely used, however, with evacuated pipe collectors have become an economically viable option due to the use and manufacture of countries such as China. his work describes the construction of a test bench with evacuated tube collector, tubes that will be constructed from 600 ml tempered bottles and properly calibrated instrumentation, developed in the Refrigeration Laboratory, at the State University of Maranhão, in order to measure the efficiency of this type of collector and compare with other existing ones. The need for economic and sustainable benefits in the energy sector was the inspiration of this work. The method adopted was the construction of a prototype and the collection of temperature and flow data. With the data acquired, the payload and the value of the total incident energy, through the collector area and the incident solar radiation value, were calculated using data provided by the INPE website. After that, the thermal efficiency of the system was calculated, showing good efficiency, proving that the system using 600 ml tempered bottle can be used as a medium for heating water, considering its domestic use.

Key words: Solar collector, evacuated tube, efficiency, renewable energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Coletor Solar Plano.....	6
Figura 2: Principais componentes de um coletor solar.....	7
Figura 3: Diagrama esquemático de um termosifão aquecedor solar de água.....	8
Figura 4: Esquema de circulação forçada.....	9
Figura 5: Materiais e dispositivos para montagem.....	13
Figura 6: Esquema de bancada experimental.....	14
Figura 7: Tubo de vidro evacuado.....	14
Figura 8: Coletor solar.....	15
Figura 9: Bancada Experimental.....	16
Figura 10: Termômetro portátil Penta III Full Gauge.....	17
Figura 11: Média da radiação diária.....	19
Figura 12: Gráfico Temperatura x Tempo.....	22
Figura 13: Média de temperaturas no coletor.....	22

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica

INPE Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

NBR Norma Brasileira

SAS Sistema de Aquecimento Solar

LISTA DE SÍMBOLOS

Δt	Variação do tempo	[s]
ΔT_m	Variação de temperatura média	[°C]
A_c	Área do coletor	[m ²]
C_p	Calor específico da água	[J/Kg.°C]
I	Energia solar incidente (radiação)	[W/m ²]
I_{on}	Irradiância	[Wh/m ²]
ISC	Constante Solar	[W/m ²]
\dot{m}	Taxa mássica	[Kg/s]
Q	Vazão	[m ³ /s]
\dot{Q}	Taxa de calor útil	[W]
t_f	Temperatura final	[°C]
t_i	Temperatura inicial	[°C]
V	Volume	[m ³]
η	Eficiência	-
ρ	Massa específica da água	[Kg/m ³]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	2
2.1	OBJETIVO GERAL	2
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	2
3	REVISÃO DA LITERATURA	3
3.1	AS ENERGIAS RENOVÁVEIS	3
3.2	A ENERGIA SOLAR	4
3.3	RADIAÇÃO SOLAR	5
3.4	COLETOR SOLAR	6
3.4.1	Coletor Solar Plano	6
3.4.2	Coletor Solar com Tubo de Vidro Evacuado	7
3.5	SISTEMA PASSIVO.....	9
3.6	SISTEMA ATIVO	10
3.7	RESERVATÓRIO TÉRMICO	11
3.8	RENDIMENTO TÉRMICO	11
4	MODELAGEM TEÓRICA.....	14
4.1	MATERIAIS E DISPOSITIVOS PARA MONTAGEM	14
4.2	CONSTRUÇÃO DO TUBO EVACUADO.....	15
4.3	CONSTRUÇÃO DO COLETOR SOLAR	16
4.4	CONSTRUÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL	17
4.5	AQUISIÇÃO DE DADOS.....	18
4.6	CÁLCULOS OBTIDOS A PARTIR DOS DADOS	19
4.6.1	Calculo da carga útil.....	19
4.6.2	Eficiência do Coletor.....	20
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
6	CONCLUSÃO	25
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da sociedade humana está atrelado à transformação do meio ambiente e obtenção de energia. Durante o desenvolvimento da nossa sociedade ficou evidente a carência de energia em todos possíveis locais da convivência humana, e nas últimas décadas temos visto o apelo de várias vozes que nos mostram o iminente do fim dos combustíveis fósseis, o imenso impacto ambiental causado por essas fontes de energia e a insustentabilidade do modo como obtemos a energia que nos move.

Todas as formas de energia que conhecemos derivam da energia solar. É a energia do sol que altera o estado físico da água, fazendo com que essa migre e possa ser represada e aproveitada nas usinas hidrelétricas. A energia solar que chega à Terra em um ano é muito maior que o consumo humano de energia no mesmo período. Infelizmente todo esse potencial não é aproveitado.

Pensando na viabilidade econômica e vantagens ambientais os coletores solares são uma boa aposta. O coletor solar é um dispositivo onde pode-se verificar a transmissão de calor através dos três processos: condução, convecção e radiação. O mais tradicionalmente encontrados no mercado nacional são os coletores solares planos, com custo relativamente baixo. Hoje, o coletor com tubo evacuado vem sendo muito utilizado e o seu valor está cada vez menor, se aproximando dos coletores planos de fabricação nacional. Já está comprovada que esta tecnologia é muito superior aos coletores planos devido sua menor perda térmica, permitindo atingir altas temperaturas.

Este trabalho apresentará um estudo com coletor solar de tubo evacuado, utilizando garrafas de 600 ml como o material do tubo. Baseando-se nas atuais tecnologias de aquecimento de água utilizando energia solar, é importante realizar experimentos para saber a viabilidade do projeto, pensando na sua utilização no ambiente doméstico e o seu custo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O principal objetivo do trabalho é determinar se há vantagens econômicas e técnicas de coletores com tubo de vidro evacuados para uso doméstico, aquecendo a água e aproveitando a energia solar.

2.2 Objetivo Específico

- I. Salienta-se a redução de consumo de energia elétrica;
- II. Redução dos impactos ambientais;
- III. Garantir o conforto térmico.

3 REVISÃO DA LITERATURA

A NBR 15569 (2008), é aplicável aos sistemas onde a circulação de água nos coletores se faz por termossifão ou circulação forçada. Ela estabelece os requisitos para o sistema de aquecimento solar (SAS), onde devemos considerar aspectos de concepção, dimensionamento, arranjo hidráulico, instalação e manutenção, onde o fluido de transporte é a água

Os choques do petróleo ocorridos a partir dos anos 70 resultaram na mudança do patamar de preços do combustível e evidenciaram a dependência existente dos países industrializados. Buscando minimizar esses efeitos, iniciativas para promover a eficiência energética e usar fontes alternativas ou renováveis de energia foram realizadas, visando reduzir a utilização das chamadas fontes fósseis de energia para alavancar o desenvolvimento dos países. No Brasil, o primeiro movimento foi o lançamento, em 1981, do Programa Conserve, que visava à melhoria da eficiência energética em indústrias por meio da busca de processos energeticamente mais eficientes. (ANEEL, 2008)

No Brasil, a matriz elétrica é essencialmente renovável e várias ações têm sido feitas para o desenvolvimento e melhor aproveitamento de fontes limpas, como a energia solar, em especial para aquecimento de água (ANEEL, 2008)

3.1 As energias renováveis

Utilizar fontes de energias renováveis como opção energética é uma interessante escolha, energeticamente falando. O planeta precisa de alternativas na área energética e as fontes renováveis podem proporcionar essa modificação, através de uma utilização cada vez maior, reduzindo os 81% da atual oferta energética mundial, estimada em 11.435 milhões de toneladas equivalentes de petróleo, que é fundamentado nos combustíveis fósseis. (IEA, 2007)

May; Lustosa; Vinha (2003) afirmam que a particularidade dos recursos renováveis é que eles são liderados por fenômenos biológicos. Apesar disso as fontes renováveis podem virar

escassas e tornar-se não-renováveis por se localizarem em locais que o homem normalmente tem fácil e livre acesso, podendo conseqüentemente fazer-se apropriação privada.

Energia renováveis são a única solução para tais problemas, pois são intrinsecamente duráveis. A conversação de energia, fóssil ou não, é complementar à transição para um novo padrão de desenvolvimento, e prolongará a vida útil das reservas existentes.

De acordo com dados do Balanço Energético Nacional (2013) o Brasil tem 85% de sua energia gerada por usinas hidrelétricas que apesar de ser renovável, é uma dependência bastante significativa e arriscada se tratando das dimensões territoriais, de ser uma fonte renovável que está escassa em várias regiões do país e por causar impacto ambiental não avaliado. (IEA, 2013)

O que é preciso é mudar as atuais prioridades de maneira rápida e significativa. Pequenas mudanças em suas prioridades podem fazer uma grande diferença em termos de sustentabilidade.

3.2 A energia solar

A maior fonte de energia disponível na Terra provém do sol. A energia solar é indispensável para a existência de vida na Terra, sendo o ponto de partida para a realização de processos químicos e biológicos. Por outro lado, a energia proveniente do Sol é das mais “amigas do ambiente”, podendo ser utilizada de diversas maneiras. No centro do Sol ocorre um processo de fusão nuclear, no qual dois núcleos de hidrogênio se fundem com um de hélio, radiando para o espaço uma grande quantidade de energia. A energia proveniente desta fusão é radiada para o espaço em forma de ondas eletromagnéticas. Tendo em conta que o Sol se encontra a 143 milhões de quilômetros da Terra apenas uma pequena fração da energia irradiada está disponível. No entanto a energia fornecida pelo Sol durante um quarto de hora é superior à energia utilizada, a nível mundial, durante um ano. Os astrofísicos consideram que o sol tem aproximadamente 5 bilhões de anos. Com uma expectativa de existência de 10 bilhões de anos o sol pode ser considerado como fonte de energia para os próximos 5 bilhões de anos.

Assim, de uma perspectiva humana o sol apresenta uma disponibilidade ilimitada. (GEENPRO, 2004, p.21)

Segundo Wolfgang Palz, (1995), a energia solar recebida pela Terra a cada ano é dez vezes superior a contida em toda a reserva de combustíveis fósseis. Atualmente a maior parte da energia usada pela população mundial provém de combustíveis fósseis - Petróleo, carvão mineral etc. A vida moderna tem sido movida à custa de recursos renováveis que levaram milhões de anos para se formar. A utilização desses combustíveis em larga escala tem mudado bastante a composição da atmosfera e o balanço térmico do Planeta, provocando o aquecimento global, degelo nos polos, chuvas ácidas e envenenamento da atmosfera e todo meio ambiente. As previsões dos efeitos decorrentes para um futuro próximo, são catastróficas.

Vasconcellos e Limberger (2012) diz que utilizar a energia solar térmica pode ser aproveitada, não somente para o aquecimento da água, como também para processos de dessalinização, secagem de grãos, geração de vapor e até para produção de energia elétrica, ampliando a aplicação na indústria.

De acordo com Wolfgang Palz (1995, p. 107) “Da perspectiva puramente técnica, os sistemas de conversão de energia solar são potencialmente capazes de produzir a maior parte da futura demanda de energia de todo o planeta”.

3.3 Radiação Solar

O sol é a principal fonte de energia do nosso planeta. Para um concreto estudo e uma boa utilização dos recursos naturais, é necessário estudar como a radiação solar chega ao nosso planeta e como se distribui.

O deslocamento aparente do Sol em relação a um observador na Terra é um item importante. Além da rotação diária terrestre, durante o ano, o caminho aparente do Sol muda constantemente. Para melhor captação da radiação solar, é necessário que o coletor seja instalado em um ângulo adequado conforme a latitude do local de instalação e a demanda por aquecimento.

O fluxo da radiação solar que chega na Terra em média anual sobre um plano normal e localizado fora da atmosfera terrestre é denominado de constante solar, e o seu valor (I_{sc}) é 1367 W/m^2 [Dufie e Beckman, 1991]. Como a distância entre o sol e a terra sofre uma variação ao longo do ano, tem-se uma variação de $\pm 3\%$ na irradiância normal extraterrestre, obtido pela equação 1:

$$I_{on} = I_{sc} (1 + 0,033 \cos 360n/365) \quad (1).$$

Onde I_{on} é a irradiância que chega efetivamente a um plano normal à radiação, I_{sc} é a Constante Solar e n representa o dia do ano.

3.4 Coletor Solar

Para captar a energia térmica solar são necessários os coletores solares, responsável pela captação da energia proveniente do sol e sua conversão em calor utilizável. O seu propósito é transformar a radiação solar em energia térmica promovendo o aumento da temperatura do fluido que circula pelo seu interior.

3.4.1 Coletor Solar Plano

Segundo Cusseiala (2013), “Na sua maioria, os coletores usados são do tipo planos, podendo ser de baixa ou alta temperatura variando consoante o fabricante. O coletor solar plano é o mais comum; permite aquecer água até aos 60°C . Utiliza no seu funcionamento dois fenômenos naturais: a absorção de calor pela cor negra e a subida da água quente. O coletor solar plano, é constituído por uma caixa isolada, coberta por uma placa de material transparente. No interior da caixa são colocados tubos por onde circula a água.”

Cusseiala (2013) demonstra como é formado o coletor solar plano, o interior da caixa é pintado (ou revestido) de preto, para receber a energia do Sol e transformá-la em calor que é transmitido aos tubos por onde circula a água. A cobertura transparente permite a passagem dos raios solares, e serve para provocar o efeito de estufa e reduzir as perdas de calor. A radiação incidente sobre o vidro do coletor deve estar convenientemente orientada, de forma a atingir a

superfície absorvedora de cor negra, convertendo-a em emissora de radiações infravermelhas. Sendo o vidro ou plástico opaco à radiação infravermelha, permite conservar o calor no seu interior ficando a uma temperatura superior à temperatura exterior. O fluido que circula nos canais em circuito fechado, aquece e transporta a energia térmica, muitas vezes com a ajuda de um sistema com bombas. Assim, os coletores planos com cobertura são constituídos por absorvedores de metal no interior de uma caixa retangular plana com isolamento térmico, sendo que na parte frontal existe uma cobertura transparente e na lateral, dois tubos ligados para alimentação e retorno do fluido de transferência térmica.

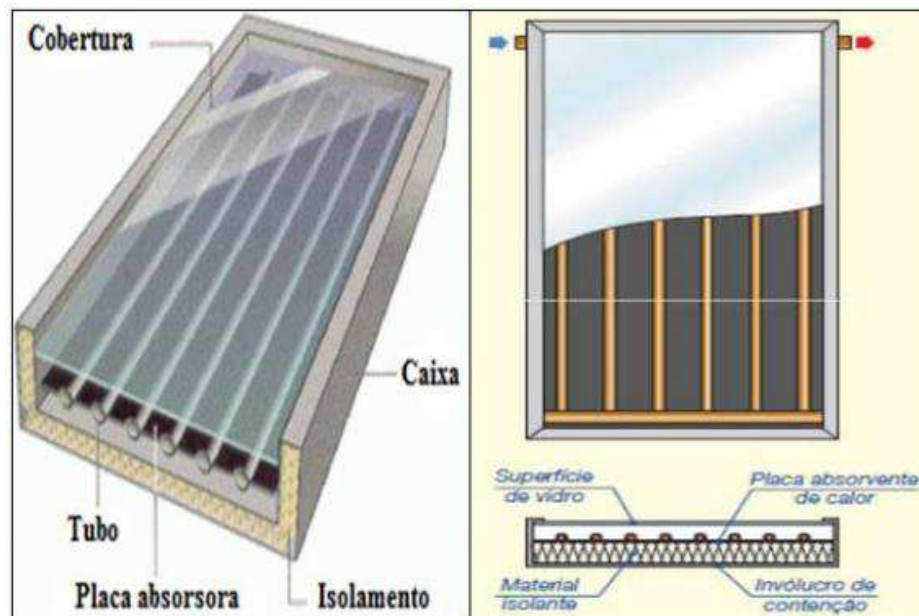


Figura 1: Coletor Solar Plano

Fonte: <http://www.portugalrenovaveis.com>

3.4.2 Coletor Solar com Tubo de Vidro Evacuado

Rosa (2012) define que um coletor solar com tubo de vidro evacuado é composto basicamente de:

- Tubos: os tubos são de vidro, sendo 2 tubos concêntricos, onde no interno está o fluido de trabalho, e o mesmo está coberto na parte externa com uma camada

seletiva. Entre o interno e o externo, está o isolamento a vácuo, principal responsável por atenuar as perdas térmicas por convecção e condução. No grampo metálico existe um capturador de gases que se trata de uma pastilha de material reativo que é colocada dentro do sistema de vácuo com o propósito de mantê-lo praticamente sem matéria. Quando as moléculas de gases contidas no espaço evacuado colidem com o material do capturador, elas combinam-se quimicamente ou por absorção com ele, removendo pequenas quantidades de gás do espaço evacuado que causariam condução de calor indesejada.

- Cabeçote: Os tubos são inseridos no cabeçote, por onde passa o fluido de trabalho. O cabeçote pode ser de aço, alumínio ou cobre, sendo revestido por algum isolamento térmico.
- Estrutura: A estrutura é o que mantém os tubos presos ao cabeçote e na posição adequada a captação da energia solar

De acordo com Manea (2013), coletores solares que utilizam o tubo a vácuo minimizam a troca de calor por convecção e condução colocando a superfície absorvedora em um ambiente quase totalmente evacuado de matéria. A troca de calor por radiação nestes coletores também é minimizada, devido à superfície absorvedora ter baixa emissividade. Estas características põem este tipo de coletor em vantagem aos coletores planos quanto às perdas térmicas. Desta forma, esses tipos de coletores, de tubos evacuados, tendem a ter melhor desempenho em ambientes menos favoráveis como, por exemplo, em climas mais frios ou em procedimentos que exijam temperatura mais alta do fluido de trabalho.

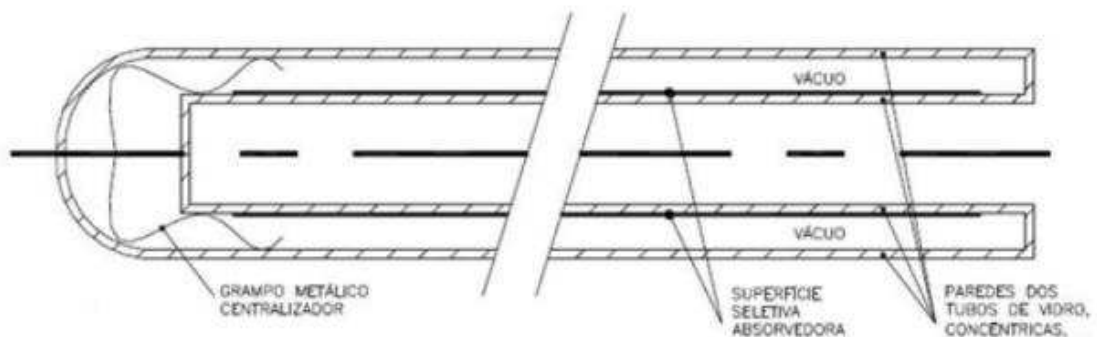


Figura 2: Principais componentes de um coletor solar

Fonte: Rosa (2008)

3.5 Sistema Passivo

Conforme (Guariente, Laércio José, 2005) no sistema passivo, ou sistema em termosifão, a circulação pelos coletores solares ocorre devido à diferença de peso específico do fluido térmico nas regiões do reservatório de acumulação e dos coletores. O fluido aquecido nos coletores fica mais leve e tende a subir pelo princípio da convecção, enquanto o fluido que está na região do reservatório, devido a estar mais frio, e, portanto, mais pesado, tende a descer para os coletores, e assim se estabelece um processo de circulação que permanece acontecendo enquanto houver diferença de temperatura.

O processo de circulação natural da água que ocorre no sistema passivo é conhecido no meio científico pôr termosifão.

Por ser um sistema que não depende da energia elétrica, bombas ou controladores, são mais confiáveis e têm vida mais longa, o sistema torna-se vantajoso e é o mais utilizado no Brasil.

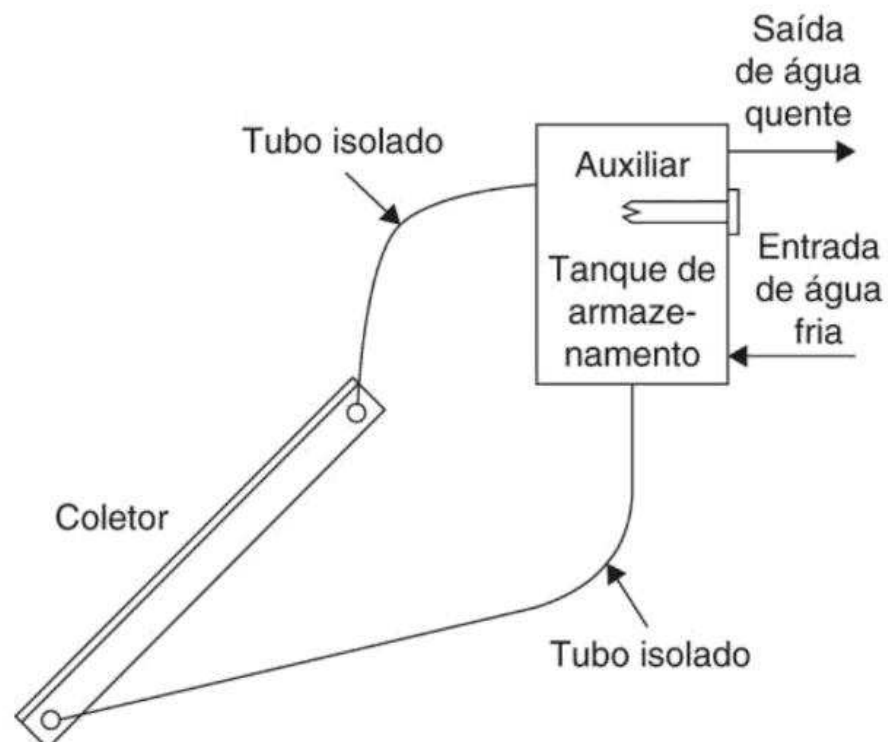


Figura 3: Diagrama esquemático de um termosifão aquecedor solar de água

Fonte: Engenharia de energia solar (Kalogirou, 2004)

3.6 Sistema ativo

No sistema ativo, denominado também como sistema de circulação forçada, o fluido de trabalho é forçado a circular entre o coletor e o reservatório térmico por pressão gerada externamente (por exemplo, motobomba).

Durante o funcionamento, a motobomba é acionado por um controle termostático diferencial, que possui sensores conectados ao reservatório e ao coletor, reportando a temperatura de ambos.

Permite instalar o reservatório em qualquer posição em relação a localização dos coletores.

Ele também é usado para evitar o congelamento dos fluidos em climas com temperaturas mais baixas. Sua desvantagem estar relacionado ao custo, pois requer mais dispositivos para o funcionamento.

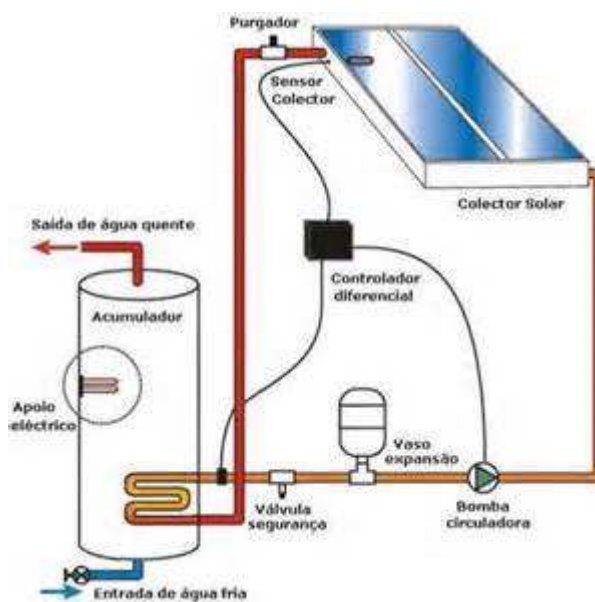


Figura 4: Esquema de circulação forçada

Fonte: <https://www.tisst.net/products/circula%C3%A7%C3%A3o-for%C3%A7ada/>

3.7 Reservatório térmico

Os reservatórios térmicos são tanques utilizados para armazenar água quente proveniente dos coletores solares, de modo a atender a demanda de água aquecida mesmo fora dos períodos de incidência solar. São constituídos de um corpo interno cilíndrico, geralmente de aço inoxidável ou cobre, termicamente isolado para minimizar as perdas de calor para o ambiente. A maior parte dos modelos tem um sistema de aquecimento auxiliar, acionado por um termostato, que aquece a água nos períodos chuvosos ou nublados.

O reservatório tem que ser capaz de suportar grandes pressões e temperaturas de trabalho. Todo projeto de sistema de aquecimento solar deve prever um mecanismo de alívio de pressão, sem a possibilidade de escape para o vapor, o reservatório pode danificar-se em função de uma dilatação térmica. Os reservatórios podem ser fabricados para instalação na posição horizontal ou vertical. Para melhorar a estratificação recomenda-se a instalação de reservatórios verticais, mas no Brasil predomina o modelo horizontal, principalmente no setor residencial unifamiliar

Do ponto de vista térmico o vertical é bem mais eficiente, pois a estratificação ocorre na horizontal em níveis decrescentes de temperatura em função da densidade da água. Um cuidado não relacionado às etapas de aquecimento, mas que deve ser comentado tendo em conta a saúde do usuário, é quanto à temperatura mínima de funcionamento e armazenamento dos reservatórios. Os reservatórios devem garantir temperatura mínima de 50 °C ou fornecerem ciclos de aquecimento até esta temperatura, para evitar o possível surgimento da legionella – bactéria que causa pneumonia, pois ela se prolifera em ambientes úmidos, escuros e com temperatura entre 35 e 40 °C.

3.8 Rendimento Térmico

O rendimento de um coletor solar é descrito por um balanço de energia entre a energia solar incidente convertida em ganho de energia para o fluido e as perdas térmicas decorrentes

deste processo. DUFFIE e BECKMAN (1991). Isso significa que é a razão definida entre o calor útil transferida para o fluido de trabalho (Qu) e a energia total incidente (\dot{Q}). A energia total incidente é representada pela área da superfície coletora (A) e a intensidade da radiação solar incidente (GT).

Sendo assim, a eficiência do coletor pode ser definida como:

$$\eta = \frac{Qu}{A \cdot GT} \quad (2)$$

Onde:

η : eficiência do coletor

Qu : calor útil (W)

A : área da superfície coletora (m^2)

Gt : intensidade da radiação solar incidente (W/m^2)

O método básico de medir o desempenho do coletor é expor o coletor operacional à radiação solar e medir as temperaturas de entrada e saída do fluido e a taxa de fluxo do fluido. DUFFIE e BECKMAN (1991).

O calor útil é então:

$$Qu = \dot{m}C_p(T_0 - T_i) \quad (3)$$

Onde:

Qu = calor útil (W)

\dot{m} = vazão mássica do fluido (Kg/s);

C_p = calor específico do fluido (J/kg.°C);

t_0 = temperatura do fluido na saída do coletor (°C);

t_i = temperatura do fluido na entrada do coletor (°C);

A taxa da vazão mássica é representada pela equação:

$$\dot{m} = Q \cdot \rho \quad (4)$$

Onde:

Q = vazão (m^3/s);

ρ = massa específica da água (Kg/m³).

A vazão é representada pela equação:

$$Q = V/\Delta T \quad (5)$$

Onde:

V = volume (m³);

ΔT = Variação do tempo (s).

Portanto, a eficiência do coletor fica da seguinte forma:

$$\eta = \frac{mC_p(T_0 - T_i)}{A \cdot G_T} \quad (6)$$

4 MODELAGEM TEÓRICA

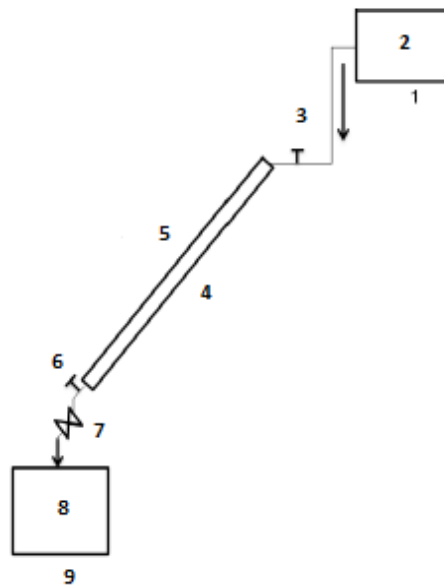
4.1 Materiais e Dispositivos para Montagem

Para montagem do sistema foi utilizado garrafa de cerveja, tubo de cobre $\frac{5}{16}$ in e $\frac{1}{4}$ in, tinta preto fosco para altas temperaturas, válvulas schrader, válvula reguladora de vazão, porcas, união, durepox, tábua retangular, fita aluminizada, espuma de vedação. Para o sistema de instrumentação utilizou-se um termômetro digital penta com 5 sensores (termopar).



Figura 5: Materiais e dispositivos para montagem

Fonte: Elaborada pelo autor, 2018.



1. Reservatória de água fria
2. Sensor de temperatura no reservatório de água fria (termopar 1)
3. Sensor de temperatura de entrada (termopar 2)
4. Coletor Solar com tubo evacuado
5. Sensor de temperatura dentro do tubo evacuado (termopar 3)
6. Sensor de temperatura de saída (termopar 4)
7. Válvula reguladora de vazão
8. Sensor de temperatura no reservatório de água quente (termopar 5)

Figura 6: Esquema da bancada experimental

Fonte: Elaborada pelo autor, 2018.

4.2 Construção do Tubo Evacuado

A construção do tubo se deu com garrafa de vidro de 600 ml, de dimensões 29 cm de comprimento, 67,8 mm de diâmetro, em que o fundo da garrafa foi furado com uma broca serra copo de 12 mm para que o tubo de cobre pudesse passar. Um tubo de cobre $\frac{5}{16}$ in de 3m pintado com tinta preto fosco, especial para altas temperaturas e as extremidades vedadas com uma massa resistente para que o vácuo fosse feito.



Figura 7: Tubo de vidro evacuado

Fonte: Elaborada pelo autor, 2018.

4.3 Construção do Coletor Solar

O coletor solar foi construído com 5 garrafas de 600 ml, em que por dentro de cada uma passou o tubo de cobre e em cada extremidade, mais especificamente na boca das garrafas, foi fixada uma válvula schrader, para que fosse feito o vácuo e assim evitar perdas significativas de calor por condução e convecção. Tanto na entrada, quanto na saída do fluido foi feito uma adaptação com porcas, união e válvula reguladora de vazão, desta forma ficou mais fácil a ligação dos reservatórios com o coletor.



Figura 8: Coletor Solar

Fonte: Elaborada pelo autor, 2018.

4.4 Construção da Bancada Experimental

A bancada constituída por um coletor solar, reservatórios para água a temperatura ambiente e água quente, termômetro digital. Foi fabricada para verificar a eficiência do projeto, verificando seu desempenho e comparando com outros coletores solares já existentes no mercado.

A mesma foi montada na Universidade Estadual Do Maranhão, localizado em São Luís com Latitude $2^{\circ}34'43.4''\text{S}$, Longitude $44^{\circ}12'36.3''\text{W}$ Longitude.

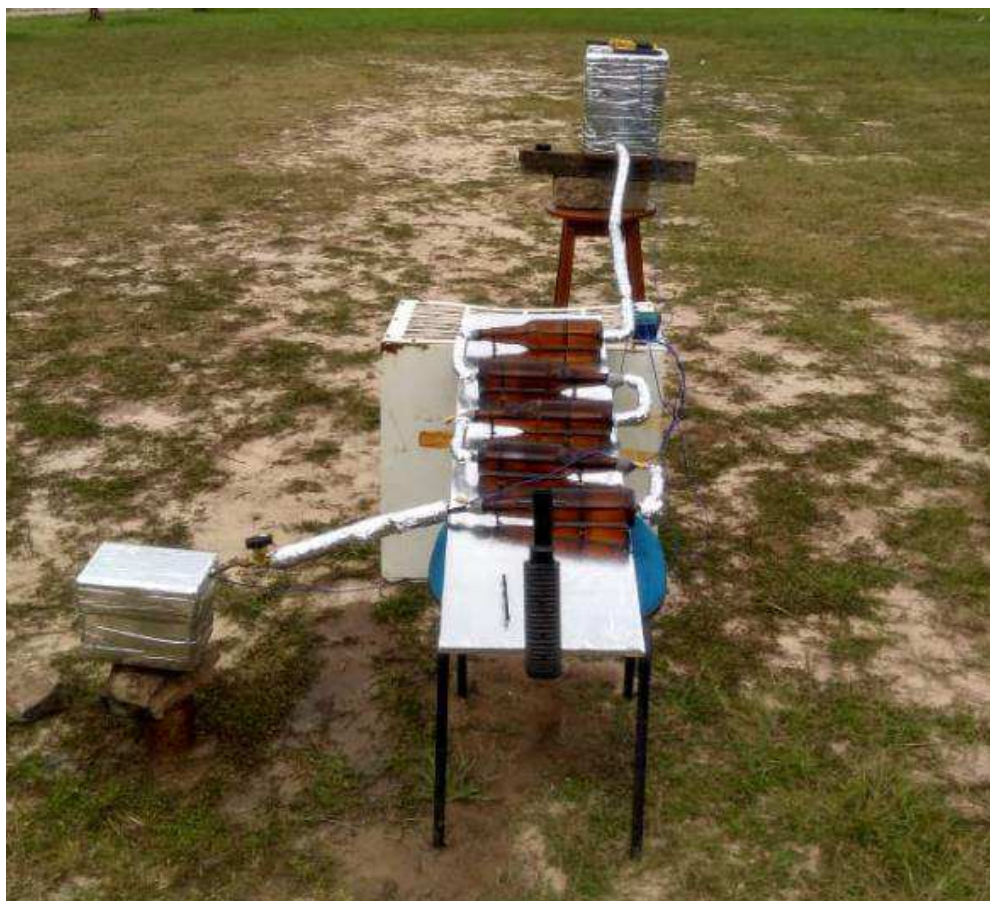


Figura 9: Bancada Experimental

Fonte: Elaborada pelo autor, 2018.

4.5 Aquisição de Dados

O aparelho utilizado para tal foi um termômetro digital portátil com 5 termopares tipo J. Os termopares foram colocados em 5 pontos: Reservatório frio (Termopar 1), entrada de água (Termopar 2), dentro de uma das garrafas (Termopar 3), saída de água (Termopar 4) e reservatório quente (Termopar 5). Os dados de temperatura foram coletados a cada 1 minuto, 1:50 horas por dia, durante 1 semana e armazenados para ser trabalhado futuramente.



Figura 10: Termômetro portátil Penta III Full Gauge

Fonte: Elaborada pelo autor, 2018.

4.6 Cálculos obtidos a partir dos dados

4.6.1 Calculo da carga útil

Para calcular a eficiência do coletor solar é necessário antes de mais nada o cálculo da carga útil. Sendo assim a equação (3) será utilizada:

$$Q_u = \dot{m}C_p(T_o - T_i)$$

Será necessário encontrar o valor da taxa mássica, sendo a equação (4) utilizada:

$$\dot{m} = Q \cdot \rho$$

Para achar a taxa mássica, o valor da vazão foi obtido pela equação (5) Utilizando apenas uma válvula reguladora para controlar a vazão, obtivemos os seguintes resultados. Para encher 3 litros, ou $0,003 \text{ m}^3$, do recipiente utilizado, fora necessário 1 hora e 19 minutos, ou seja, 4740 segundos. Logo temos:

$$Q = V/\Delta t$$

$$Q = 0,003/4740$$

$$Q = 6,3291 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$$

Após achar o valor da vazão, podemos substituir na equação (4). O ρ é o da água, já é um valor conhecido e tabelado. Então:

$$\dot{m} = Q \cdot \rho$$

$$\dot{m} = 6,3291 \times 10^{-7} \cdot 1000$$

$$\dot{m} = 6,3291 \times 10^{-4} \text{ Kg/s}$$

Por fim, empregando os valores obtidos através das equações utilizadas e dados do experimento, temos:

$$\begin{aligned}Qu &= \dot{m}C_p(T_0 - T_i) \\Qu &= 6,3291 \times 10^{-4} \times 4186,7981 (34,19 - 28,96) \\Qu &= 13,858 \text{ J/S} \\ \text{Ou} \\ Qu &= 13,85 \text{ W}\end{aligned}$$

4.6.2 Eficiência do Coletor

A equação (2) será utilizada para calcular a eficiência do sistema:

$$\eta = \frac{Qu}{\dot{Q}}$$

A energia total incidente (\dot{Q}) é dado pela área da superfície coletora e a intensidade da radiação solar incidente (GT). A intensidade da radiação solar incidente foi encontrado por dados fornecidos pelo INPE. Analisando a figura (10), o valor de 200 W/m² foi utilizado.

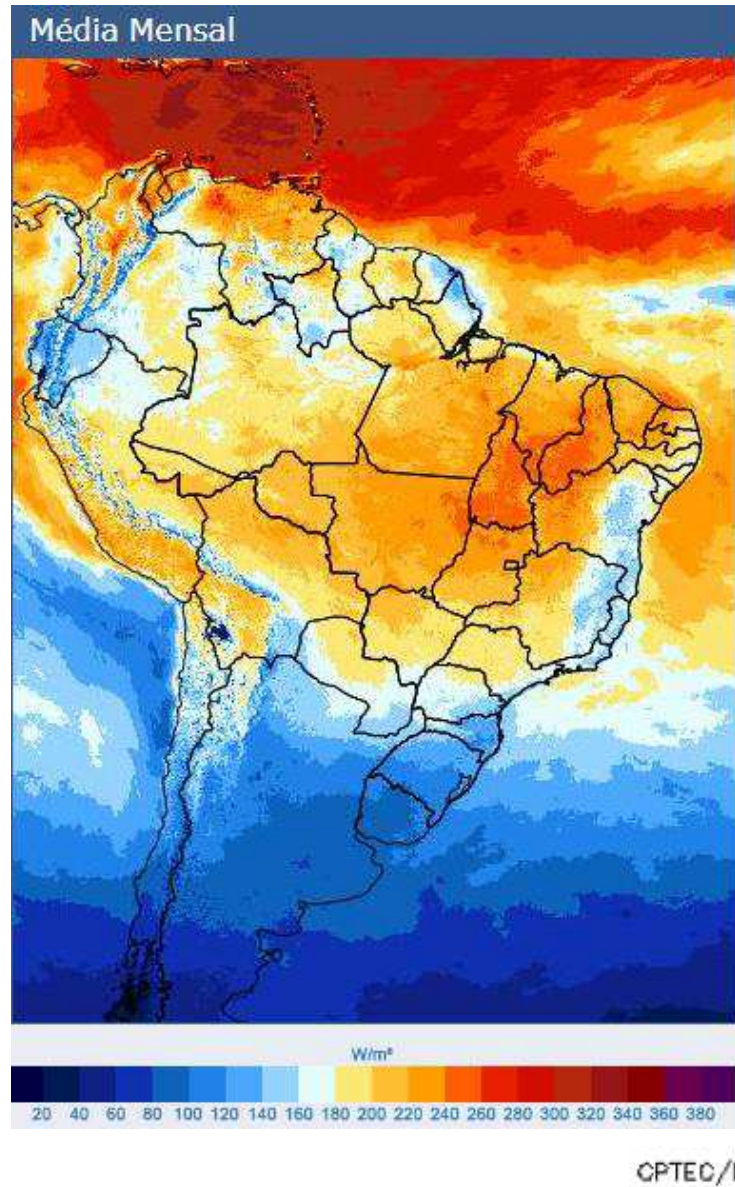


Figura 11: Média da radiação diária. Período Junho 2018.

Fonte: INPE, 2018

A área da superfície coletora é 0,1740 m². Para se chegar a esse valor foi necessário considerar a garrafa como cilindro, calcular a metade da sua área lateral somada a área do tubo de cobre, considerando este como um retângulo, em uma visão superior.

Sendo assim a eficiência do coletor é:

$$\eta = \frac{Qu}{\dot{Q}}$$

$$\eta = \frac{Qu}{A \cdot G_T}$$

$$\eta = \frac{13,85}{0,1740 \times 200}$$

$$\eta = 0,3979$$

Ou

$$\eta = 39,79 \%$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O uso de materiais de baixo custo para montar o sistema foi uma opção viável devido a simplicidade na obtenção, manutenção, funcionamento e também seu custo financeiro. O vácuo nas garrafas foi feito através de uma bomba de vácuo, onde era verificada em todos os dias de teste se havia ar nas mesmas. No manifold era averiguado que o valor da pressão estava abaixo de 0 psi, garantindo o vácuo nas garrafas.

Montar um sistema de aquecimento solar e distribuir água quente a uma residência pode ser considerado um desafio. Este tipo de coletor está crescendo no mercado brasileiro e produzi-lo com materiais recicláveis é algo positivo, pois preserva a natureza e economiza energia elétrica. O presente trabalho teve como intuito analisar o desempenho, principalmente, de tubos de vidro a vácuo.

A maior dificuldade encontrada foi na forma como o coletor seria montado e no aparelho para obtenção das temperaturas, onde ele não se conectava diretamente com um computador para registrar os dados automaticamente. O aparelho disponível foi o Termômetro Portátil Penta, consiste em um aparelho com 5 termopares, adequado para temperaturas de -50°C a 105°C . Os dados foram obtidos de maneira manual, verificando no aparelho a cada 1 minuto, em um tempo total de 1:50h e anotando as temperaturas. Devido as condições climáticas e a maneira como o coletor foi construído, não foi possível deixa-lo exposto por mais tempo.

A bancada experimental foi montada no Campus da UEMA. Após finalizar a montagem, calibrar os equipamentos, fazer o vácuo nas garrafas, ela foi exposta ao sol. Finalizado o teste, com os dados obtidos, dois gráficos foram gerados para demonstrar o desempenho do mesmo.

No gráfico 1 pode-se notar o comportamento das temperaturas em relação ao tempo em que ficou exposta ao sol e no gráfico 2 percebe-se as temperaturas mínimas, médias e máximas registradas.

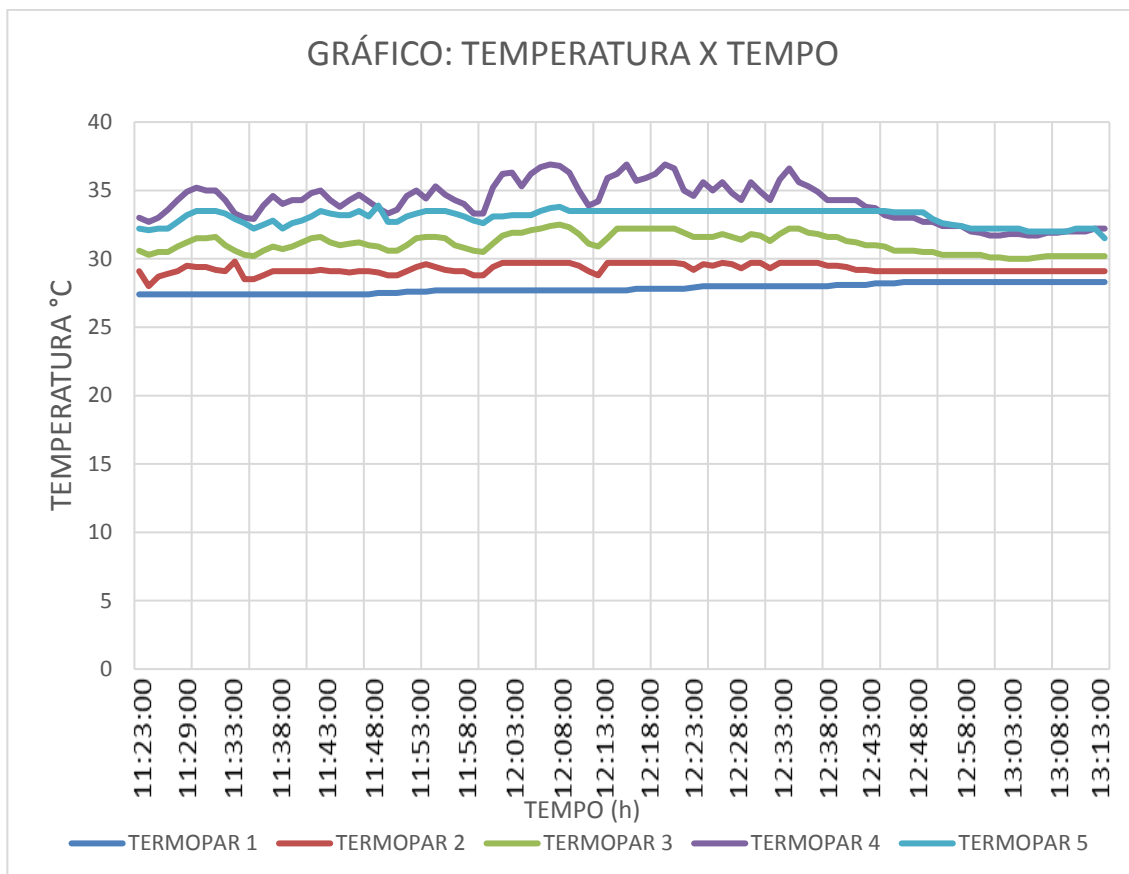


Figura 12: Gráfico Temperatura x Tempo.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2018.

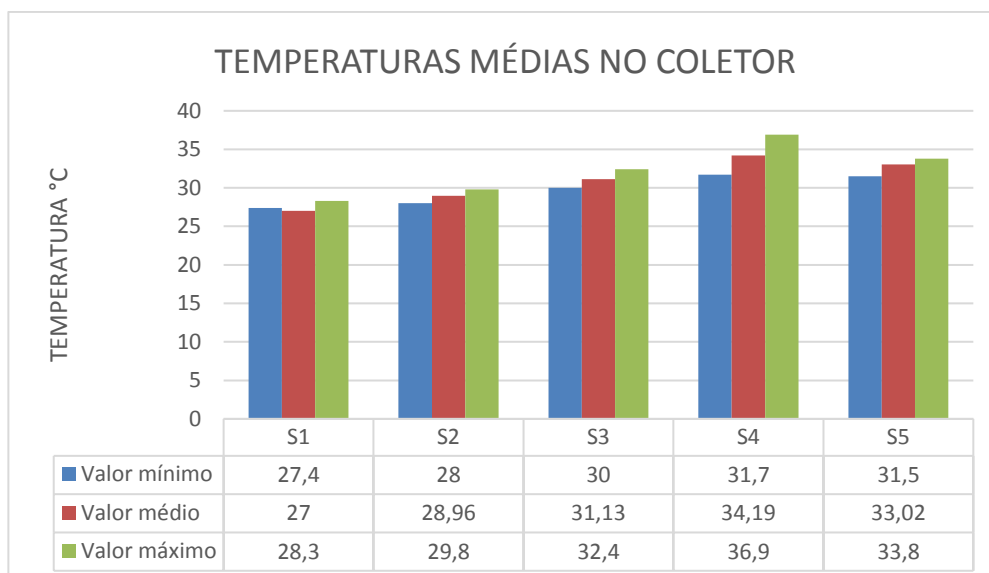


Figura 13: Média de temperaturas no coletor.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2018.

Analisando os resultados e comparando com outros trabalhos já feitos ((Arruda, 2004), (CUTRIM, 2017)), pode-se perceber de maneira satisfatória e consistente que este registrou uma significativa variação de temperatura $\Delta t_m = 5,23^\circ\text{C}$ e eficiência $n = 39,79\%$, utilizando uma área de $0,867\text{ m}^2$, constatando a eficácia do coletor solar utilizando garrafa de cerveja.

6 CONCLUSÃO

O experimento demonstrou que o sistema é eficiente no aquecimento de água. A adversidade se deu na montagem do projeto, onde foram necessárias algumas alterações da ideia inicial. O sistema que deveria ser por termossifão, onde a água faria a circulação utilizando apenas um reservatório não foi possível e acabou sendo utilizado dois reservatórios, um para armazenar água em temperatura ambiente e outro para armazenar água a uma temperatura superior, ou seja, água quente. Não sendo possível, a transferência de água de um reservatório para o outro ficou por conta da gravidade, em que o reservatório frio ficava no alto e o reservatório quente ficava em baixo. Para o uso do sistema solar em períodos de pouca radiação é necessário proporcionar um isolamento térmico eficiente, com o intuito de impedir ao máximo as trocas térmicas da água, e assim, manter o interior deste quente durante todo o tempo.

O protótipo do coletor solar permitiu chegar a um bom valor de eficiência; as análises feitas permitiu identificar quais parâmetros mais influenciam na eficiência deste equipamento, bem como os parâmetros que exercem pouca influência. Vale salientar que o sistema pode ser aprimorado, tanto com uma área maior e maior número de garrafas, quanto com o uso de outros equipamentos, que possam proporcionar temperaturas maiores.

É fundamental a construção de novos conceitos que estimulem a sustentabilidade, preservação do meio ambiente e reutilização de materiais recicláveis. O presente trabalho desenvolveu um coletor solar visando todos estes conceitos e pôde comprovar sua eficiência, apesar de utilizar uma garrafa de material escuro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15747-1** – Sistemas solares térmicos e seus componentes – Coletores solares, Rio de Janeiro, 2009.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, Atlas de Energia Elétrica – 3ª Edição; Brasília, 2008.

ARRUDA, Laerte Bernardes. Operação de sistemas de aquecimento solar de água com controle de vazões em coletores planos. 2004. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CUTRIM, Josué Lucas Sousa. Coletor solar com tubo de vidro evacuado utilizando lâmpadas fluorescentes descartadas pela Universidade Estadual do Maranhão. MA:UEMA. 2017.

DUFFIE, John A., **BECKMAN**, William A. Solar Engineering of Thermal Processes 4th Edition. John Wiley & Sons. 2013.

GREENPRO: Manual sobre tecnologias, projeto e instalação. Energia Solar

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). SGI 2.5 - Introdução ao Sistema de Informações Geográficas – SGI. Imagem Geosistemas São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1995.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY– IEA. **World Energy Statistics**, 2007.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY– IEA. **World Energy Statistics**, 2013.

Kalogirou, Soteris. A. **Engenharia de energia solar: processos e sistemas**/ Soteris A. Kalogirou; [tradução Luciana Arissawa]. -2. Ed. – Rio de Janeiro:Elsevier, 2016. 864p.: il.; 24cm

MANEA, Tiago Francisco. Desenvolvimento de uma bancada para ensaios de coletores solares de tubos de vidro a vácuo. RS: UFRS. 2012.

MAY, P. H.; LUSTOSA, M. C.; VINHA, V. **Economia do Meio Ambiente**: teoria e prática. Rio de Janeiro: Elsevier, 2003.

SIQUEIRA, D. A. Estudo do desempenho de um aquecedor solar de baixo custo. Uberlândia. Dissertação de mestrado Universidade Federal de Uberlândia. 2009.

SIQUEIRA, D. A. Estudo do desempenho de um aquecedor solar de baixo custo. Uberlândia. Dissertação de mestrado Universidade Federal de Uberlândia. 2009. Térmica e Energia Fotovoltaica.