



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FABRICAÇÃO E ESTUDO DE UM COLETOR SOLAR
NÃO CONVENCIONAL: UMA ALTERNATIVA PARA
AQUECIMENTO DA ÁGUA UTILIZADA NO
TRATAMENTO HIDROSSANITÁRIO TÉRMICO DA
MANGA (THT)

MARCOS VINICIUS SOUSA DOS SANTOS
NATAL- RN, 2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FABRICAÇÃO E ESTUDO DE UM COLETOR SOLAR
NÃO CONVENCIONAL: UMA ALTERNATIVA PARA
AQUECIMENTO DA ÁGUA UTILIZADA NO
TRATAMENTO HIDROSSANITÁRIO TÉRMICO DA
MANGA (THT)

MARCOS VINICIUS SOUSA DOS SANTOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**, orientado pelo Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza.

NATAL – RN

2019

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Santos, Marcos Vinícius Sousa dos.

Fabricação e estudo de um coletor solar não convencional: uma alternativa para aquecimento da água utilizada no Tratamento Hidrossanitário Térmico da Manga (THT) / Marcos Vinícius Sousa dos Santos. - 2019.

63f.: il.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de tecnologia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica- PPGEM, Natal, 2019.

Orientador: Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza.

1. Energia solar - Dissertação. 2. Coletor solar - Dissertação. 3. Aquecimento de água - Dissertação. 4. Tratamento hidrossanitário térmico - Dissertação. 5. Manga - Dissertação. I. Souza, Luiz Guilherme Meira de. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.472

FABRICAÇÃO, ENSAIO E ANÁLISE DE UM COLETOR
SOLAR TÉRMICO: UMA ALTERNATIVA PARA
AQUECIMENTO DA ÁGUA UTILIZADA NO TRATAMENTO
HIDROSSANITÁRIO TÉRMICO DA MANGA (THT)

MARCOS VINICIUS SOUSA DOS SANTOS

Dissertação **APROVADA** pelo Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Federal do Rio
Grande do Norte

Banca Examinadora da Dissertação

Prof. Dr. Guilherme Meira de Souza

Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Orientador

Prof. Dr. Pedro Henrique de Almeida Varela

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Natanaelyfle R. Gomes dos Santos

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

NATAL, 11 de janeiro de 2019.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo palpável zelo dispensado a mim, claramente evidenciado nas oportunidades, pessoas grandiosas e soluções que me aparecem a todo o tempo.

Agradeço aos meus familiares pelo caráter que em mim foi impresso, especialmente àqueles que se fizeram pilar em todo o processo educacional que me permitiu chegar até aqui: minhas mães Eulenirdes (“Tia Lêda”), Eunildes (“Tia Véa”), também meu pai Erivaldo Plácido.

A todos os meus grandes amigos pelo suporte emocional, especialmente aos do LMHES pelo total acolhimento que fez de tal lugar a extensão do meu lar, com destaque para Amanda Cavalcante (de quem sou o único amigo) pelas incontáveis “resenhas”, que proporcionaram diversão a essa trajetória.

Agradeço à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa durante a realização deste mestrado. Agradeço aos componentes da banca Pedro Varela e Natanaeyfle Randemberg pela aceitação do convite e disposição em contribuir com melhorias ao presente trabalho.

Agradeço ao prof. Dr. Cleiton Rubens por confiar na minha ideia. Obrigado também, ao mestre Aldo Paulino pela amizade e imensa parceria durante fabricação do protótipo.

E por fim, um agradecimento especial ao meu orientador prof. Dr. Luís Guilherme por tornar possível a concretização desse estudo, por me conceder uma amizade genuína e por me mostrar, nas suas atitudes, meios de me tornar uma pessoa melhor.

*“Um passarinho quando aprende a voar,
sabe mais sobre coragem que de voo”.*

(Autor desconhecido)

Sousa dos Santos, M. V. **Fabricação e estudo de um coletor solar não convencional: uma alternativa para aquecimento da água utilizada no tratamento hidrossanitário térmico da manga (THT)**. 2019. yy p. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2019.

RESUMO

No nordeste brasileiro, a manga é cultivada em vários estados. Barreiras fitossanitárias são impostas à fruta destinada ao mercado internacional, sendo a imersão em tanques com água a 46,1°C recomendada na solução de dois problemas típicos: a antracnose e a eliminação da mosca da fruta. Os níveis de temperatura requeridos para o tratamento térmico da manga e as excelentes condições climáticas locais apontam para a viabilidade técnica do uso do aquecimento solar em substituição de grande parte do GLP consumido. Para estudo de viabilidade de aplicação no aquecimento da água utilizada no processo de tratamento hidrossanitário térmico (THT) da manga, esse trabalho tem por objetivo a fabricação de um coletor solar multitubo, trabalhando em regime de fluxo contínuo, com serpentina absorvedora formada por tubos de PVC ligados em série, dispostos em forma labirinto sobre chapa absorvedora de alumínio e conectado a uma fonte alimentadora de água fria. O sistema foi ensaiado para o diagnóstico de seu desempenho térmico e levantamento dos parâmetros necessários para sua caracterização. Para um período de 9:00 às 16:00 horas, foram coletadas periodicamente as temperaturas em pontos internos e externos ao coletor; as temperaturas de entrada e saída do fluxo de água para variadas vazões (60l/h, 80 l/h, 100l/h) em regime permanente e a radiação solar global ao longo do período de realização dos ensaios. Calculou-se o coeficiente global de perdas e o rendimento térmico do coletor. Para estimativa da demanda de energia térmica, simulou-se as condições esperadas no período de safra e então avaliou-se as características técnicas para inserção dos coletores no sistema de aquecimento. Foi demonstrada a viabilidade térmica do sistema de aquecimento para o tratamento hidrossanitário térmico (THT) da manga proposto, com resultados mais expressivos para a vazão de 60 l/hora para a área estudada. Para resultados mais viáveis para os outros

níveis de vazão estudados, 80 e 100 l/hora, poder-se-ia aumentar a área de superfície absorvedora, plenamente viável nos campos térmico e econômico.

Palavras-chave: energia solar, coletor solar, aquecimento de água, tratamento hidrotérmico hidrossanitário, manga.

Sousa dos Santos, M. V. **Production and study of na unconventional solar collector: an alternative for heating the water used in the thermal water treatment of mango (THT)**. 2019. yy p. Master's Dissertation in Mechanical Engineering - Federal University of Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2019.

ABSTRACT

In Brazilian northeast mango is grown in many states. Phytosanitary barriers are imposed on the fruit destined for the international market, being the immersion in tanks with water at 46.1°C recommended in the solution of two typical problems: the anthracnose and the elimination of the fruit fly. The temperature levels required for the heat treatment of the mango and the excellent local climatic conditions point to the technical feasibility of using solar heating in substitution of much of the LPG (Liquified Petroleum Gas) consumed. For the feasibility study of the water heating used in the thermal hydro sanitary treatment (THST) process of the mango, this work has the objective of manufacturing a multitube solar collector, working in a continuous flow regime, with an absorber serpentine formed by PVC tubes connected in series, arranged in labyrinth shape over an aluminum absorber plate and connected to a cold water supply. The system was tested for the diagnosis of its thermal performance and the necessary parameters for its characterization. For a period from 9:00 a.m. to 4:00 p.m., the temperatures were collected periodically at internal and external points of the collector; the inlet and outlet water temperatures for different flows (60l/h, 80 l/h, 100l/h) in steady state and global solar radiation over the period of the tests. The overall loss coefficient and the thermal efficiency of the collector were calculated. In order to estimate the thermal energy demand, the expected conditions were simulated in the harvesting period and then the technical characteristics for the insertion of the collectors in the heating system were evaluated and later the technical and financial feasibility of the proposed solution and final configuration more suitable for this solar heating installation. The parameters presented by the prototype were satisfactory, they serve as basis for the study of solar heating systems in the agribusiness sector and constitute a viable alternative from a technical, constructive and financial point of view.

Keywords: solar energy, solar collector, water heating, hydrothermal treatment, mango.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes de um sistema de aquecimento solar de água	21
Figura 2 - Instalação solar de aquecimento em circulação forçada.....	22
Figura 3 - Esquema básico de um sistema de aquecimento solar convencional por termossifão ou convecção natural.....	23
Figura 4 - Sistema de aquecimento solar comercial do fabricante Mondialle Solar, modeloBP-81.....	23
Figura 5 - Esquema básico de SAS de circuito direto com bomba de circulação e SAS de circuito indireto	24
Figura 6 - Seção de um coletor solar plano básico	25
Figura 7 - Perspectiva isométrica de um coletor solar básico	26
Figura 8 - Serpentina absorvedora do coletor em labirinto.....	27
Figura 9 - Boilers instantâneos: (a) Simples; (b) Caldeira mural	31
Figura 10 - Aquecedor de água tipo de acumulação.....	32
Figura 11 - Coletor solar em CAD	34
Figura 12 - Marcação prévia para dobramento da chapa de aço galvanizado	35
Figura 13 - Caixa do coletor fabricada	36
Figura 14 - Aplicação do isolamento térmico na caixa do coletor.....	36
Figura 15 - Caixa do coletor pronta para receber a grade absorvedora.....	37
Figura 16 - Grade absorvedora do coletor fabricada.....	37
Figura 17 - Cobertura transparente do coletor solar em labirinto	38
Figura 18 - Coletor solar em labirinto completamente montado e pronto para ensaio	38

Figura 19 - Comportamento da temperatura mínima em Petrolina	42
Figura 20 - Comportamento assumido pelos parâmetros de temperaturas para a vazão 60 l/h	47
Figura 21 - Comportamento assumido pela radiação solar global para a vazão 60 l/h	47
Figura 22 - Comportamento assumido pela eficiência térmica para a vazão 60 l/h ..	47
Figura 23 - Comportamento assumido pelos parâmetros de temperaturas para a vazão 80 l/h	49
Figura 24 - Comportamento assumido pela eficiência térmica para a vazão 80 l/h ..	50
Figura 25 - Comportamento assumido pela radiação solar global para a vazão 80 l/h	50
Figura 26 - Comportamento assumido pela radiação solar global para a vazão de 100 l/h	52
Figura 27 - Comportamento assumido pela eficiência térmica para a vazão 100 l/h	53
Figura 28 - Comportamento assumido pela radiação solar global para a vazão 100 l/h	53
Figura 29 - Representação esquemática dos pontos	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais propriedades do PVC para aplicações térmicas	28
Tabela 2 - Principais propriedades do EPS.....	29
Tabela 3 - Massa das mangas tratadas por ciclo	43
Tabela 4 - Resultados médios gerais para 60 l/h	46
Tabela 5 - Resultados médios gerais para 80 l/h	49
Tabela 6 - Resultados médios gerais para 100 l/h	52
Tabela 7 - Parâmetros térmicos calculados para determinação do U_{loss}	55
Tabela 8 - Custo dos materiais utilizados na montagem do coletor solar alternativo	55

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
1.1.	APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	15
1.2.	OBJETIVOS	18
1.2.1	OBJETIVO GERAL.....	18
1.2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1.	A ENERGIA SOLAR E SUA IMPORTÂNCIA	20
2.2.	SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR (SAS)	21
2.2.1.	COLETORES DE PLACA PLANA.....	24
2.2.1.1.	<i>Coletor em labirinto</i>	<i>26</i>
2.2.2.	O CLORETO DE POLIVINILA (PVC).....	27
2.2.2.1.	<i>O PVC e suas principais características para aplicação em coletores</i>	<i>28</i>
2.2.3.	POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS - ISOPOR).....	28
2.3.	PRODUÇÃO DE MANGA NO BRASIL.....	29
2.3.1.	BOILERS.....	30
2.3.1.1.	<i>Gás Liquefeito de Petróleo</i>	<i>32</i>
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1.	PROJETO EM CAD.....	34
3.2.	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO, MONTAGEM E DE ENSAIO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR ALTERNATIVO PROPOSTO.....	34
3.2.1.	PROCESSO DE FABRICAÇÃO E MONTAGEM DO COLETOR SOLAR ALTERNATIVO.....	35
3.3.	PROCESSO DE ENSAIO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR ALTERNATIVO PROPOSTO.....	39
3.3.1.	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS TÉRMICOS DO COLETOR.....	39
3.3.2.	COEFICIENTE GLOBAL DE PERDAS (U_{loss})	39

3.4.	LEVANTAMENTO DA DEMANDA DE ENERGIA TÉRMICA.....	41
3.4.1.	DEMANDA TOTAL DE ENERGIA TÉRMICA POR SAFRA	41
3.4.2.	CONSUMO DE GLP POR SAFRA	44
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1.	ENSAIOS COM VAZÃO DE 60 L/H.....	46
4.2.	ENSAIOS COM VAZÃO DE 80 L/H.....	48
4.3.	ENSAIOS COM VAZÃO DE 100 L/H.....	51
5.	CONCLUSÕES	57
6.	SUGESTÕES	58
7.	REFERÊNCIAS.....	59

1. INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Fontes renováveis de energia vêm se tornando o centro das atenções das nações desenvolvidas nos últimos anos, pela abundância e correção ambiental quando comparadas às demais fontes que compõem a matriz energética mundial. É necessário e importante desenvolver novas tecnologias e utilizar energia limpa e renovável de forma eficiente e extensiva para lidar com os desafios de uma crise energética e sérios problemas ambientais. (BAI, 2018)

Segundo o estudo de Pottmaier et al. (2013) em 2012, cerca de 66% da energia gerada no Brasil vem de usinas hidrelétricas, e estas estão sujeitas a ter seu potencial de geração diretamente afetado pela mudança dos ciclos de chuvas ou variações climáticas, isso porque a geração de energia depende da água da chuva armazenada em reservatórios. Em outras palavras, a matriz energética brasileira é extremamente vulnerável à variação climática e, portanto, a variabilidade climática plurianual, como as secas, pode afetar a capacidade das usinas de fornecer a demanda de eletricidade. (BESSA e PRADO, 2015)

Essa situação obriga a ativação de fontes termelétricas a gás natural, que agora correspondem a 10,6% da energia gerada no Brasil. (POTTMAIER et al., 2013). Além disso, o uso de 1,6% de energia nuclear, 1,5% de carvão e 5,7% de derivados de petróleo, gás e outras energias não renováveis, representa a maior causa de poluição do ar no meio ambiente. (SOUZA et al., 2012)

O aproveitamento da energia solar, através de sistemas de aquecimento de água, tem se tornado uma alternativa viável, e apresentam crescimento significativo especialmente em países desenvolvidos. Contudo, tais sistemas são geralmente conhecidos pelo alto custo inicial e baixo custo operacional.

Esses sistemas precisam ser cuidadosamente avaliados, especialmente devido ao aumento de aplicações de energia solar nos últimos anos. Nesta avaliação, os componentes do conjunto devem ser projetados considerando-se o efeito do clima,

energia e custo na satisfação das condições térmicas e econômicas. (YAMAN e ARSLAN, 2018)

De forma ainda discreta, o Brasil vem apresentando pequenas perspectivas de mudanças voltadas para o aproveitamento da energia solar, tanto no setor residencial como no setor industrial, no qual se destacam aplicações no âmbito das indústrias de processamento de alimentos em regiões que possuem alto potencial, como o nordeste brasileiro, mais especificamente na produção de manga. (PEREIRA, 2007)

Na exploração da manga no Brasil convivem sistemas extensivos, em áreas esparsas, quintais e fundos de vales em pequenas propriedades, formando bosques subespontâneos; e sistemas, normalmente irrigados e em extensas áreas, visando a produção de variedades selecionadas para os mercados interno e externo. (SEBRAE, 2018)

A escolha da variedade de manga a ser plantada está relacionada a vários fatores: às preferências do mercado consumidor; o potencial produtivo da variedade para região; as limitações fitossanitárias e de pós-colheita da variedade e, principalmente, ao comportamento ou tendência de mercado do tipo de fruto a ser produzido.

Dentre as muitas variedades, a *Tommy Atkins* (de origem norte-americana) é a mais produzida e que possui a maior participação no volume comercializado de manga no mundo, devido principalmente à sua coloração intensa, produções elevadas e resistência ao transporte a longas distâncias.

As pragas e doenças constituem fatores limitantes à cultura da mangueira. Dentre as pragas, as moscas-das-frutas são o principal problema. As larvas desses insetos sobrevivem no interior dos frutos e causam queda prematura e a inutilização destes para o comércio e indústria.

A *antracnose* (causada pelo fungo *Colletotrichum gloeosporioides* Penz) é uma doença que causa grandes prejuízos na produção e comercialização da manga. O seu controle é importante para garantir a produtividade e manter a qualidade dos frutos.

No Nordeste brasileiro, a manga é praticamente cultivada em todos os estados,

em particular nos estados da Bahia e Pernambuco que respondem por 61,5% da produção nacional. Os municípios de Juazeiro (BA), Petrolina (PE) e Livramento de Nossa Senhora (BA) se destacam na produção e exportação de manga.

Entretanto, barreiras fitossanitárias são impostas à manga brasileira destinada ao mercado internacional. As exigências de países importadores de frutos “in natura” têm sido crescentes em relação à qualidade do produto, especialmente quanto à presença de resíduos de agrotóxicos. (PEREIRA, 2007)

Os tratamentos oneram os custos e exigem instalações próprias “*packing house*” para serem realizados, aumentando substancialmente o investimento. Como forma de prevenir a proliferação de pragas em países importadores o tratamento mais comum refere-se ao tratamento térmico à qual a manga é submetida. A imersão em água quente recomendada na solução de dois problemas típicos: a antracnose e a eliminação da mosca da fruta.

A *antracnose* é uma doença dependente de condições climáticas como alta umidade e cujo tratamento térmico consiste na imersão em água quente a 55°C por 5 minutos. Para o controle da mosca da fruta, os Estados Unidos, Japão e Chile seguem o Protocolo Mango Board que consiste na imersão das frutas em tanques com água a 46,1°C, conforme Assis (2004).

O tempo de permanência das frutas nesta temperatura depende de seu peso: 75 minutos para manga com peso inferior a 425g e 90 minutos para frutas com peso acima de 425g. Para o mercado japonês, o controle é feito na temperatura da polpa que deve atingir 46,1°C, independentemente do tempo requerido para tal.

Os níveis de temperatura requeridos para o tratamento térmico da manga e as excelentes condições climáticas locais apontam para a viabilidade técnica do uso do aquecimento solar em substituição de grande parte do GLP consumido, agregando valor ao agronegócio pelo aumento da competitividade das empresas exportadoras brasileiras e pela incorporação de tecnologias limpas e renováveis.

Como pode ser visto sistemas de energia solar podem ser usados para uma ampla gama de aplicações e fornecer benefícios significativos, portanto, segundo Kalogirou (2004) eles devem ser usados sempre que possível.

Buscando-se formas para baratear o custo dos sistemas de aquecimento, vem-se estudando há mais de 35 anos no âmbito do LMHES/UFRN sistemas alternativos para tornar viável o uso da energia solar para o fim proposto.

Esse trabalho tem por objetivo a concepção, fabricação e estudo de um coletor solar de fluxo contínuo com tubos absorvedores de PVC associados em série, para estudo de viabilidade de aplicação no aquecimento da água utilizada no processo de tratamento hidrossanitário térmico (THT) da manga.

Serão apresentados resultados de testes que demonstraram a viabilidade do sistema de aquecimento proposto, para três níveis de vazão. Ressalte-se os simples processos de fabricação, montagem e operacionalidade do sistema proposto e seu baixo custo, características que ampliam as possibilidades de utilização do sistema, pelo menos para contribuir para a diminuição da utilização de combustíveis convencionais para o tratamento da manga.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Demonstrar a viabilidade de utilização de um sistema de aquecimento solar destinado ao aquecimento de água para utilização em processo de tratamento hidrossanitário térmico da manga (THT).

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Projetar o coletor solar alternativo de baixo custo;
- Fabricar o coletor solar alternativo;
- Montar o sistema de aquecimento;
- Ensaiar o sistema solar de aquecimento de água fabricado;

- Analisar a viabilidade térmica do coletor solar proposto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A ENERGIA SOLAR E SUA IMPORTÂNCIA

O Sol libera uma enorme quantidade de energia de radiação para seus arredores: (10^{15} W) na atmosfera superior da Terra. Quando a energia chega à superfície da Terra, ela foi atenuada duas vezes: pela atmosfera (6% por reflexão e 16% por absorção) e as nuvens (20% por reflexão e 3% por absorção).

Cerca de 51% da radiação solar total emitida chegam à terra e aos oceanos. É evidente que, apesar da atenuação, a quantidade total de energia solar disponível na Terra ainda é enorme, mas por ser de baixa densidade e intermitência, precisa ser coletada e armazenada de maneira eficiente. (SMIL, 1991)

Por ser uma fonte de energia renovável, a luz solar é uma das alternativas mais promissoras para o futuro para a produção de eletricidade ou transformação em energia térmica. Apesar disso, a energia solar sozinha não é a solução para os problemas energéticos da humanidade. Ela pode ser utilizada de maneira complementar, e, devido ao seu imenso potencial energético, em tempos de economia de combustíveis convencionais, esta fonte representa importante alternativa para a composição da matriz energética mundial. (DUFFIE e BECKMAN, 2013)

O Brasil possui uma disponibilidade equivalente a $1,13 \times 10^{10}$ Gwh, o que o torna um forte candidato ao aproveitamento da energia solar. Em países tropicais, como neste caso, em que a disponibilidade existe durante quase todo o ano, os equipamentos solares têm grandes potenciais de aplicação. É o caso da região nordeste, que é a região mais propícia ao uso destes equipamentos. (LUIZ, 1985)

A radiação solar incidente sobre uma superfície depende de vários fatores. São eles: a localização geográfica, dia do ano, condições do tempo, nebulosidade, umidade e turbidez e orientação. O ângulo de inclinação do coletor também tem relação direta com o aproveitamento da incidência solar. (MEIRA, 2002). Há, naturalmente, os efeitos diurno e noturno a serem considerados quando se projeta um sistema solar; e isto introduz, a necessidade de armazenamento elétrico e/ou térmico

para as condições de tempo nublado e uso noturno da energia.

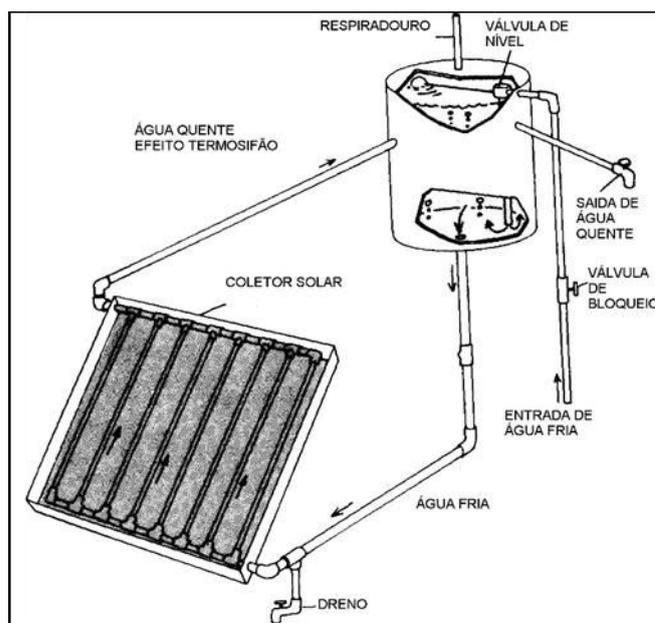
A energia solar pode ser aproveitada de forma direta ou indireta. De forma direta, a energia solar pode ser empregada na produção de calor, potência e energia elétrica, utilizando para isso dispositivos conhecidos como coletores solares. Estes são considerados equipamentos que produzem energia limpa e de baixo impacto ambiental. Além disso, não lançam resíduos na natureza.

A degradação ambiental, a poluição atmosférica e o aumento de temperatura da Terra causado pelas plantas de potência convencionais, como por exemplo em processamentos industriais que fazem uso de caldeiras, têm ressaltado a natureza benigna das tecnologias energéticas renováveis. (LUIZ, 1985)

2.2. SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR (SAS)

Os componentes de um sistema de aquecimento solar podem ser separados em coletores, reservatório, tubulações e caixa da água fria, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Componentes de um sistema de aquecimento solar de água



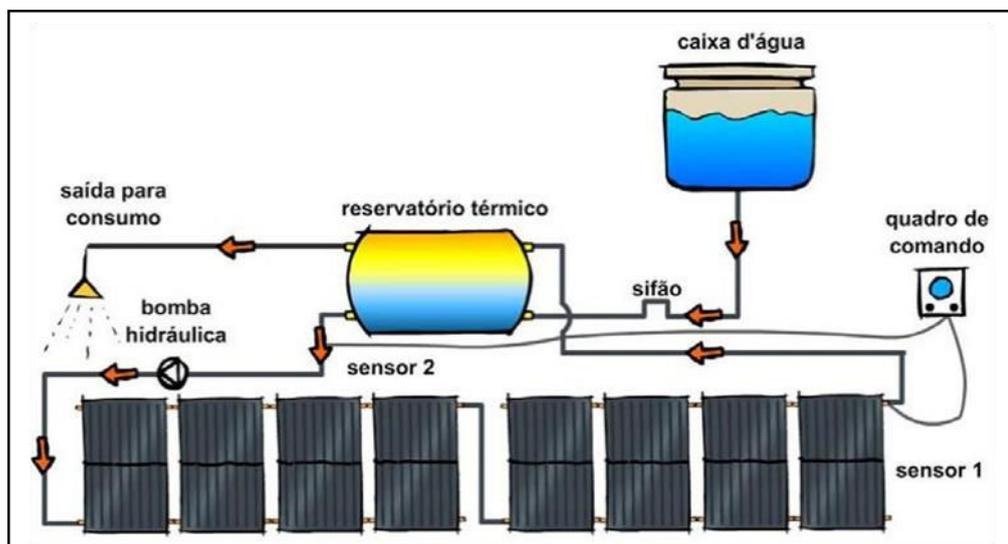
Fonte: Lopo, 2010

O coletor é composto pela caixa, cobertura transparente, tubulação e placas de absorção e é responsável pela absorção da radiação solar. A caixa do coletor é geralmente fabricada em alumínio e suporta e protege todos os componentes do coletor. Costuma-se utilizar vidro na cobertura, pois permite a passagem da radiação e reduz a perda de calor para o meio. A tubulação é geralmente de cobre, na qual tubos são interconectados através dos quais o fluido circula dentro e fora do coletor. A placa de absorção é responsável pela absorção e transferência de energia solar para o fluido de trabalho. (LOPO, 2010)

Em relação à circulação da água, esta pode ser feita de duas maneiras: circulação forçada e circulação natural, conhecida por termossifão. A circulação forçada utiliza uma bomba hidráulica e um circuito eletrônico que controla o fluxo de água no circuito, e é indicada para sistemas de médio e grande porte.

O sistema termossifão não necessita de bomba, o fluido circula naturalmente devido à diferença de temperatura em diferentes pontos do sistema. O reservatório térmico é feito geralmente em aço inoxidável ou cobre. A Figura 2 ilustra os componentes básicos de uma instalação bombeada.

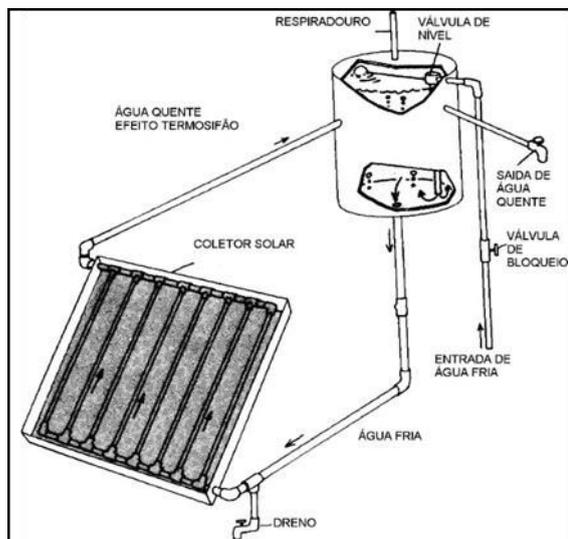
Figura 2 - Instalação solar de aquecimento em circulação forçada



Fonte: Rede Brasil, 2008

Na Figura 3 são apresentados os componentes principais de um sistema de aquecimento solar convencional por convecção natural ou termossifão.

Figura 3 - Esquema básico de um sistema de aquecimento solar convencional por termossifão ou convecção natural



Fonte: Cheremisinoff, 1980

Em sistemas comerciais para uso residencial o princípio de funcionamento é composto basicamente por convecção natural ou termossifão. A Figura 4 apresenta um SAS do fabricante Mondialle Solar, modelo BP-81, com volume de 81 litros e potência elétrica para resistência auxiliar de 4.000W. (MONDIALLE SOLAR, 2016)

Figura 4 - Sistema de aquecimento solar comercial do fabricante Mondialle Solar, modeloBP-81

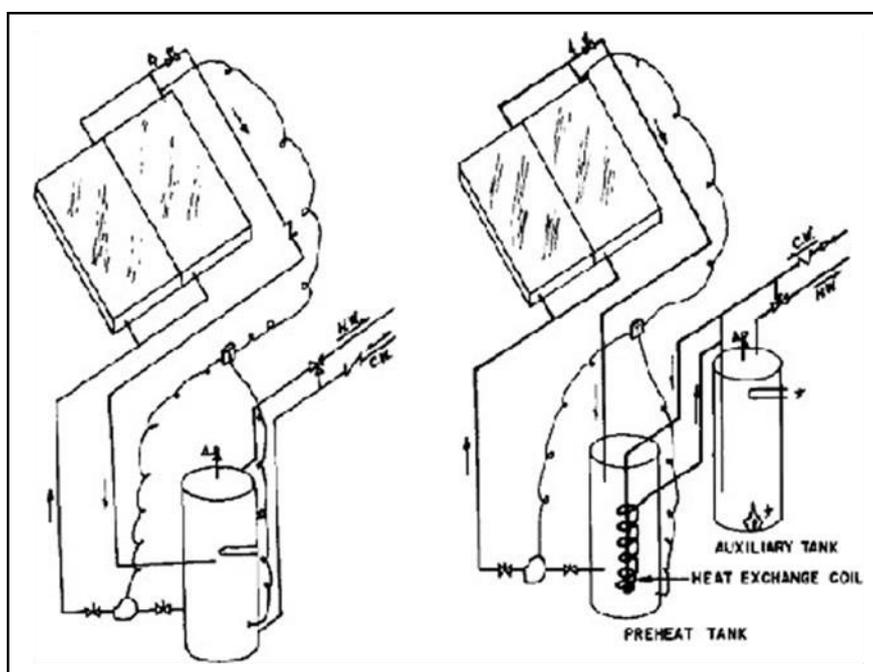


Fonte: Mondialle Solar, 2016

Existem dois tipos de circuitos para a realização da troca de calor, o direto e o indireto. Quando o fluido a ser utilizado é aquecido diretamente pelo coletor tem-se um circuito direto. No circuito indireto um há fluido captador e um trocador de calor para realizar a transferência de calor a um segundo fluido utilizado diretamente para consumo.

Na Figura 5 é possível observar um SAS com circuito direto com fluxo determinado por uma bomba de circulação. Na mesma figura, ao lado direito, está representado um SAS classificado como de circuito indireto.

Figura 5 - Esquema básico de SAS de circuito direto com bomba de circulação e SAS de circuito indireto



Fonte: Lopo, 2010

Os principais elementos dos SAS de circuito indireto são o coletor solar, bomba de circulação, trocador de calor, tanque de dilatação, válvula limitadora de fluxo, válvula controladora, válvula de segurança, tubulação de cobre com conexões, conexões de enchimento e drenagem, isolamento e desaerador. (LOPO, 2010)

2.2.1. COLETORES DE PLACA PLANA

Os coletores de placas planas solares são dispositivos usados para reter energia térmica solar e usá-la para aplicações de aquecimento, como aquecimento de água, aquecimento de ambientes e outras aplicações industriais. (PANDEY e CHAURASIYA, 2017)

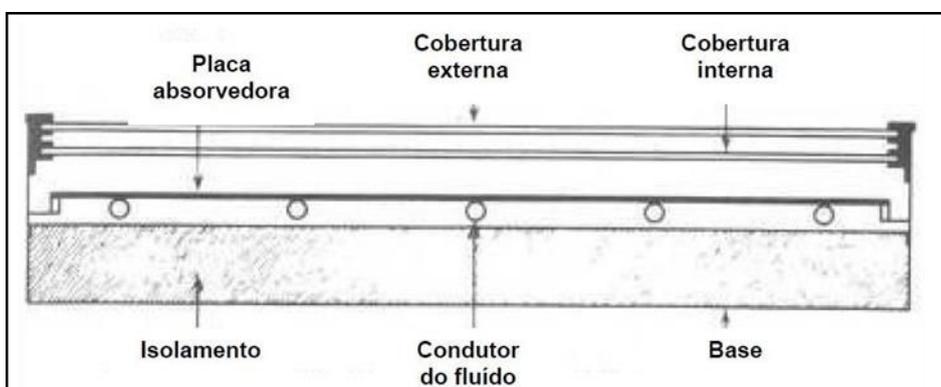
O coletor diferencia-se em diversos aspectos dos trocadores de calor convencionais. Estes usualmente realizam uma troca entre dois fluidos com alta taxa de transferência de calor desprezando-se o fator radiação. O coletor solar converte a energia da fonte radiante, o sol, em calor para o fluido (LOPO, 2010).

O coletor solar de placa-plana, em geral, consiste de cinco componentes principais: (a) uma ou mais cobertura transparente de vidro ou plástico; (b) uma placa absorvedora, normalmente metálica, de superfície preta, embora outros materiais possam ser utilizados; (c) Tubos, passagens ou canais integrados à placa absorvedora ou ligados a ela, os quais carregam água, ar ou outros fluidos; (d) isolamento térmico, o qual é colocado no fundo e nas laterais do coletor para minimizar perdas de calor, (e) uma caixa para suportar e proteger os componentes do ambiente.

O principal equipamento do sistema de aquecimento solar é o coletor, visto que, ele é o responsável pela transformação da energia proveniente da radiação solar em calor para aquecer o fluido de trabalho, neste caso, a água.

A Figura 6 apresenta um coletor solar convencional com seus principais componentes.

Figura 6 - Seção de um coletor solar plano básico



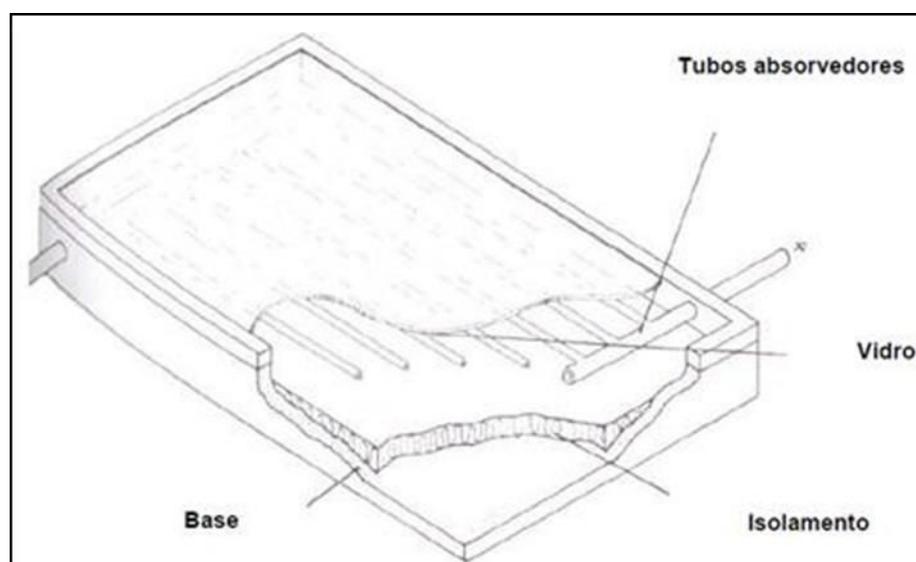
Fonte: Traduzido de Duffie e Beckman, 2013

Existem basicamente três opções de configuração da tubulação absorvedora,

são elas: em série, na qual uma tubulação contínua dentro da caixa, geralmente em formato de serpentina, labirinto ou espiral, permite um maior aumento na temperatura final do fluido de trabalho; em paralelo, na qual os tubos paralelos são interligados por tubos transversais, permitindo uma maior vazão, porém, uma temperatura final um pouco inferior à configuração em série; e, a configuração mista. É comum também a associação de coletores para um aumento destas características. (SODRÉ, 2010)

A Figura 7 apresenta o formato básico de um coletor solar e suas configurações dos tubos ligados em paralelo.

Figura 7 - Perspectiva isométrica de um coletor solar básico



Fonte: Traduzido de Roaf, Fuentes e Thomas, 2007

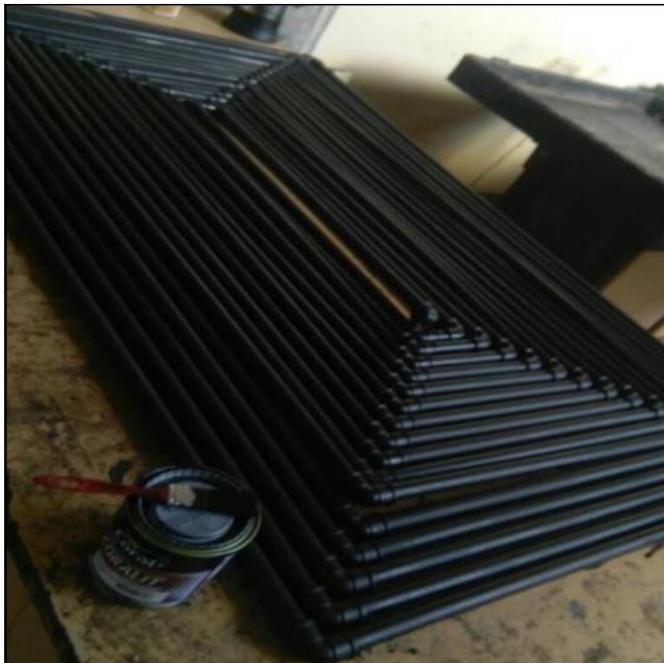
Em se tratando da eficiência de um coletor, esta característica envolve um grande número de variáveis entre elas: materiais utilizados na fabricação, tipo de superfície absorvedora, intensidade da radiação solar, o número de coberturas transparentes, tipo e espessura do isolamento térmico, as temperaturas de trabalho, entre outras. (DUFFIE e BECKMAN, 2013)

2.2.1.1. Coletor em labirinto

Visando um aumento significativo no comprimento da serpentina, o coletor em labirinto foi desenvolvido com base no coletor em espiral (CABIROL et al., 1978). Isso

permite um melhor aproveitamento da área de troca térmica com o fluido circulante. A figura 8 mostra a serpentina absorvedora construída.

Figura 8 - Serpentina absorvedora do coletor em labirinto



O aumento no comprimento da tubulação absorvedora se torna extremamente necessário para a aplicação em coletores que utilizam um material classificado como isolante térmico em sua tubulação, no caso o PVC.

2.2.2. O CLORETO DE POLIVINILA (PVC)

Por ser durável e versátil, o PVC abrange uma vasta gama de aplicações, desde a construção civil até a fabricação de utensílios domésticos. Sua vida útil é superior a 20 anos, e, em alguns casos pode chegar a 50 anos.

Além disso, o PVC aplicado à construção civil traz consigo incorporados produtos tais como antioxidantes, estabilizantes ao ultravioleta, que permitem a manutenção de suas propriedades ao longo de toda a vida útil. Contudo, ao se tratar de transferência de calor, este é considerado um isolante térmico por conta da sua baixa condutividade térmica, 0,15 W/m.K.

2.2.2.1. O PVC e suas principais características para aplicação em coletores

Quando comparado ao cobre o PVC demonstra ter uma capacidade de transferência de calor inúmeras vezes menor, porém, o seu baixo custo e boa resistência às intempéries acabam o tornando um material alternativo viável para aplicação em coletores.

A tabela 1 demonstra algumas das características mais relevantes do PVC para aplicação em coletores solares.

Tabela 1 - Principais propriedades do PVC para aplicações térmicas

Propriedades	Valor
Peso específico (ρ)	1,4 g/cm ³
Coeficiente de dilatação térmica (C ⁻¹)	(60 a 80) x 10 ⁶
Coeficiente de Expansão Térmica	0,9 - 1,8 x 10 ⁻⁴ (°C) ⁻¹
Temperatura de Distorção ao Calor	75 °C
Índice de Refração (I _R)	1,57
Absorção de água em 24h (%)	0,04-0,40
Condutividade térmica (k)	0,20 W/mK

2.2.3. POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS - ISOPOR)

O poliestireno expandido (EPS) é um plástico celular e rígido, que pode apresentar uma variedade de formas e aplicações. Apresenta-se como uma espuma moldada, constituída por um aglomerado de grânulos.

Duas características do isopor têm fortalecido a sua presença no mercado consumidor, aonde vem obtendo crescente participação: a leveza e a capacidade de isolamento térmico, às quais ainda se associa o baixo custo.

É bastante utilizado na confecção de caixas térmicas para acondicionamento de alimentos e bebidas devido a sua estrutura de células fechadas cheias de ar (97% de seu volume) dificultando passagem do calor.

Em coletores o EPS é utilizado no isolamento da serpentina e da placa absorvedora, minimizando as perdas térmicas para o fundo e laterais. A tabela 2 apresenta duas características do EPS.

Tabela 2 - Principais propriedades do EPS

Propriedades	Valor
Condutibilidade térmica (K)	0,030 a 0,040 W/m°C
Peso específico (ρ)	10 - 30 kg/m ³

Fonte: Lima (2016)

2.3. PRODUÇÃO DE MANGA NO BRASIL

O Brasil é um grande produtor e exportador de manga para diversos países da Europa e Estados Unidos. A exportação brasileira da manga *in natura* também para o mercado japonês é recente. Após 32 anos de negociações o mercado foi aberto para o produto brasileiro em 2004.

O país alcançou uma exportação de 5200 toneladas por ano da variedade Tommy Atkins produzida, principalmente, no Vale do Rio São Francisco em Pernambuco e na Bahia. As mangas exportadas para o Japão renderam US\$ 10,4 milhões para o Brasil em 2004. (SEBRAE, 2018). Em 2003, o país exportou 126 mil toneladas da fruta para os Estados Unidos e a União Europeia, gerando US\$ 71 milhões. (AGRONEWS, 2018).

Pelo protocolo fitossanitário bilateral acordado entre o Brasil e Japão, ficou acertado que os estabelecimentos exportadores de manga deveriam incluir no processo de tratamento pós-colheita a imersão dos frutos em água quente (Tratamento Hidrotérmico) para evitar a presença de larvas e de ovos da Mosca da Fruta.

Além disto, os japoneses exigiram também o tratamento dos frutos com hipoclorito de sódio para eliminação de bactérias. O tratamento vem sendo utilizado na agroindústria desde sua aprovação pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos em 1989. (GENÚ e PINTO, 2002)

O tratamento consiste em, para o caso da Antracnose, a imersão da manga em água quente à temperatura de 55°C por 5 minutos. Para a eliminação da mosca da fruta, o Protocolo Mango Board define a imersão das frutas em tanques com água a 46,1°C. O tempo de permanência das frutas nesta temperatura depende de seu peso: 75 minutos para mangas com massa inferior a 425g e 90 minutos para frutas de maior massa. (PEREIRA, 2007)

Segundo Pereira (2007) o tratamento Hidrotérmico apresenta como vantagens: o custo baixo (para os médios e grandes produtores), simplicidade de operação e dispensa do tratamento contra o fungo *Colletotrichum gloeosporioides* causador da *Antracnose*.

2.3.1. BOILERS

Os boilers também chamados de caldeiras são muito utilizados em indústrias para aquecer a água e por vezes para transformar a água em vapor. São equipamentos com alto grau de emissão de poluentes. A energia necessária para tal operação é dada pela queima de um combustível ou por eletricidade.

Existem diversos tipos de aparelhos para aquecimento de água a gás natural ou GLP existentes no mercado com características específicas e que permitem aplicações mais comuns como água para banho e lavatório, aquecimento de piso e ambiente, piscina, saunas e tratamento térmico hidrossanitário de frutas.

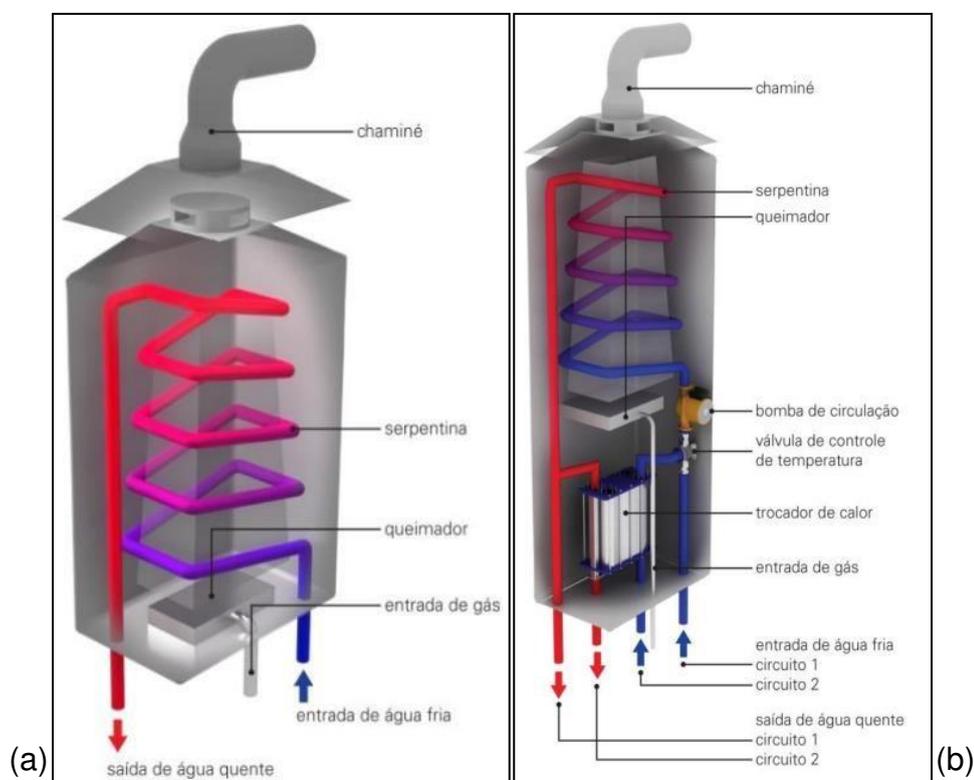
Os aparelhos para aquecimento de água podem ser classificados em função do tipo de transmissão de calor para aquecer a água, direto ou indireto; e também do tipo de funcionamento, instantâneo ou de acumulação.

A Figura 9 (a) mostra um aquecedor instantâneo, também conhecido como

aquecedor de passagem. São aparelhos compactos que aquecem a água no instante em que existe uma solicitação de demanda nos pontos de consumo.

A Figura 9 (b) mostra uma caldeira mural que é um equipamento que possui um complexo sistema de aquecimento, servindo a diversas aplicações simultaneamente associadas. Os usos simultâneos podem estar associados a um ou mais sistemas independentes de aquecimento de água, que podem ser destinados a aplicações distintas, com circuitos de temperaturas e características de funcionamento específicas.

Figura 9 - Boilers instantâneos: (a) Simples; (b) Caldeira mural

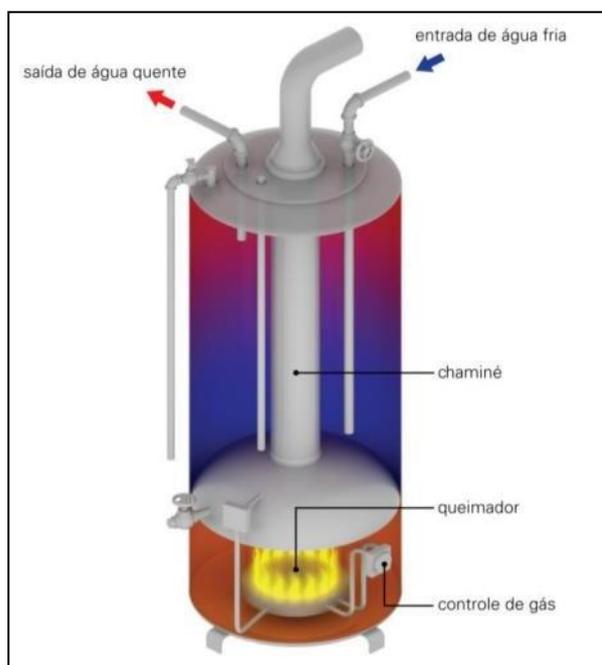


Fonte: Sistemas de aquecimento de água para edifícios através da associação solar e gás (2011)

O aquecedor de água do tipo acumulação (figura 10) é um aparelho constituído basicamente por um reservatório de água e uma unidade de aquecimento, que mantém o volume de água armazenado aquecido e disponível para consumo. Este aquecimento é controlado através de termostato, podendo ser ajustado conforme as necessidades do usuário, ligando ou desligando a unidade de aquecimento. Os reservatórios são protegidos com isolante térmico, reduzindo assim a transmissão do calor da água quente armazenada para o ambiente.

O gás natural vem há não muito tempo se tornando um combustível importante na matriz energética do país, estando em fase de expansão, ainda necessita de diversos estudos para a adaptação do seu uso no mercado consumidor. (DADAM et al., 2006). Contudo, no estudo abordado, a atenção é voltada para caldeiras que usam o Gás Liquefeito do Petróleo (GLP) como combustível para aquecimento da água aplicada ao THT.

Figura 10 - Aquecedor de água tipo de acumulação



Fonte: Sistemas de aquecimento de água para edifícios através da associação solar e gás (2011)

2.3.1.1. Gás Liquefeito de Petróleo

No Brasil o gás liquefeito de petróleo (GLP) é mais conhecido popularmente como gás de cozinha por sua ampla utilização na cocção. Normalmente comercializado em botijões no estado líquido, torna-se gasoso à pressão atmosférica e temperatura ambiente. (PETROBRÁS, 2009)

O GLP é de grande aplicabilidade como combustível devido à facilidade de armazenamento e transporte a partir do seu engarramento em vasilhames (botijões, cilindros e outros). (PETROBRÁS, 2009).

O GLP comercializado é composto pela combinação dos gases propano (50%) e butano (50%), sendo que apresenta poder calorífico inferior de 10.800 kcal/kg, massa específica de 500 kg/m³ e teor de enxofre de 140 mg/kg. (ANP, 2004). Sua queima emite poluentes, e, dentre eles destaca-se o CO₂, que é um gás que favorece o aumento do efeito estufa no planeta.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

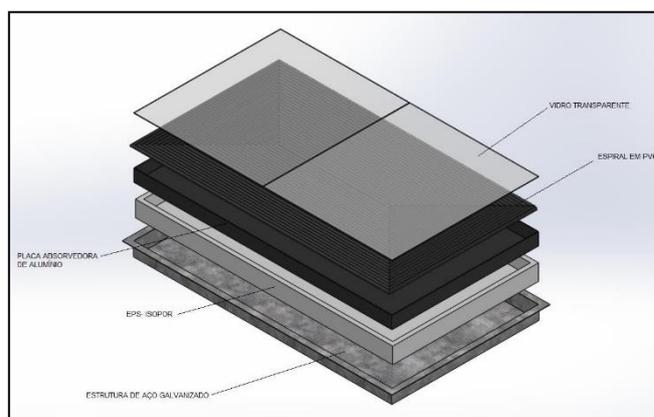
O coletor solar alternativo para sistema de aquecimento de água possui caixa fechada em aço galvanizado; isolante térmico de EPS; grade absorvedora em série e em espiral com tubulação de PVC; chapa absorvedora de alumínio e cobertura de vidro plano transparente. A área total do coletor foi de 1,85 m².

A principal característica para o sistema de aquecimento solar proposto foi o baixo custo de fabricação e a ausência de um reservatório térmico. Este último se justifica pelo fato de que a água aquecida pelo sistema seria canalizada diretamente para a sua aplicação, o tratamento hidrotérmico da manga (THT).

3.1. PROJETO EM CAD

Foi realizado um projeto do coletor solar em CAD (Computer Aided Design), ou seja, em Desenho Assistido por Computador. Isto permitiu um melhor planejamento evitando possíveis erros construtivos e maior fidelidade ao projeto e sua execução. O resultado pode ser visto na Figura 11 e serviu como base para as etapas seguintes. A tubulação em PVC e a placa absorvedora de alumínio estão representadas em preto fosco.

Figura 11 - Coletor solar em CAD



3.2. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO, MONTAGEM E DE ENSAIO DO SISTEMA DE

AQUECIMENTO SOLAR ALTERNATIVO PROPOSTO

3.2.1. PROCESSO DE FABRICAÇÃO E MONTAGEM DO COLETOR SOLAR ALTERNATIVO

Os processos de fabricação e montagem compreenderam as etapas mostradas e detalhadas a seguir:

- a. Marcação e dobramento da chapa de aço galvanizado, Figura 12;

Figura 12 - Marcação prévia para dobramento da chapa de aço galvanizado



- b. Fabricação da caixa do coletor, Figura 13;

Figura 13 - Caixa do coletor fabricada



c. Aplicação do isolamento térmico de placas de EPS de 30mm e da chapa absorvedora de alumínio no coletor solar alternativo, Figura 14;

Figura 14 - Aplicação do isolamento térmico na caixa do coletor



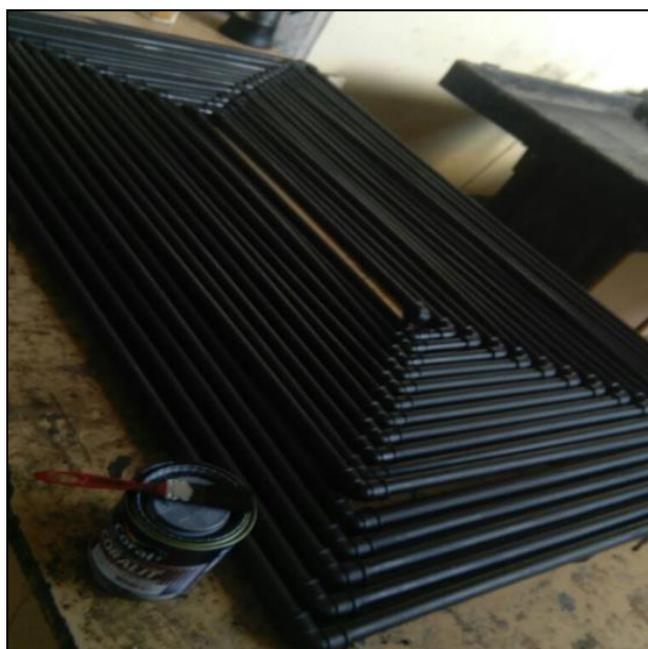
d. Acabamento da caixa do coletor solar alternativo com tinta preta, Figura 15;

Figura 15 - Caixa do coletor pronta para receber a grade absorvedora



e. Fabricação da grade absorvedora em labirinto do coletor com tubos PVC de 20mm de diâmetro externo - foram utilizados 64 joelhos do mesmo material, unidos com cola de PVC especial, tendo na grade absorvedora 65 tubos em série, Figura 16;

Figura 16 - Grade absorvedora do coletor fabricada



f. Grade absorvedora na caixa do coletor, fixada na chapa absorvedora de alumínio por abraçadeiras, com pintura do conjunto chapa-tubos com tinta esmalte preto fosco;

g. Colocação da cobertura transparente de vidro plano de 3mm de espessura utilizando cola de silicone (Figura 17);

Figura 17 - Cobertura transparente do coletor solar em labirinto



h. Montagem do sistema e preparação dos dispositivos de coleta de dados para realização do ensaio (Figura 18);

Figura 18 - Coletor solar em labirinto completamente montado e pronto para ensaio



3.3. PROCESSO DE ENSAIO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR ALTERNATIVO PROPOSTO

3.3.1. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS TÉRMICOS DO COLETOR

Os parâmetros que melhor caracterizam a eficiência térmica de um coletor solar são o rendimento térmico, a potência perdida e o coeficiente global de perdas.

3.3.2. COEFICIENTE GLOBAL DE PERDAS (U_{loss})

A temperatura do sistema de aquecimento, durante o processo de absorção de energia através da radiação solar, eleva-se acima da temperatura ambiente. Este gradiente de temperatura gera um fluxo de calor do coletor para a atmosfera, que se constituem as perdas térmicas do coletor.

O parâmetro que engloba todas essas perdas é o Coeficiente Global de Perdas (U_{loss}), que pode ser determinado por três métodos distintos, quais sejam: Método da Perda Térmica, Método das Trocas Térmicas e Método da Inversão de Fluxo (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

O Método da Inversão Térmica requer um controle rígido de vários parâmetros, necessitando, por conseguinte, de um aparato tecnológico de grande sofisticação, resolveu-se determinar esse parâmetro a partir do método da perda térmica, descrito a seguir.

O coeficiente global de perda térmica é dado pela seguinte equação:

$$U_{loss} = \frac{Q_p}{A.(T_{mp} - T_a)}$$

Em que: U_{loss} = coeficiente global de perda térmica (W/m².K);

Q_p = taxa de energia perdida do coletor (kW);

A = área do coletor (m²);

T_{mp} = temperatura média da placa (K);

T_a = temperatura ambiente (K).

A taxa de energia perdida pelo coletor (Q_p) é calculada por:

$$Q_p = Q_{abs} - Q_u$$

Em que: Q_{abs} = taxa de energia absorvida pelo conjunto absorvedor (kW);

Q_u = taxa de energia útil transferida ao fluido de trabalho (kW).

A taxa de energia útil (Q_u) transferida ao fluido é dada por:

$$Q_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Em que: \dot{m} = vazão mássica (kg/s);

c_p = calor específico do fluido (kJ/kg.K);

ΔT = diferença de temperatura na entrada e saída do coletor (K).

Finalmente, a taxa de energia absorvida pelo conjunto absorvedor é:

$$Q_{abs} = \alpha_p \cdot \tau_v \cdot I \cdot A$$

Onde: α_p = absorptividade da placa (estimada em 85%);

τ_v = transmissividade do vidro (estimada em 85%);

I = radiação solar global (kW/m²);

A = área do coletor (m²).

Ainda, o rendimento térmico (η_t) é calculado pela seguinte expressão:

$$\eta_t = \frac{Q_u}{A.I}$$

3.4. LEVANTAMENTO DA DEMANDA DE ENERGIA TÉRMICA

3.4.1. DEMANDA TOTAL DE ENERGIA TÉRMICA POR SAFRA

De acordo com a equação da Primeira Lei da Termodinâmica, tem-se que a energia necessária por dia para aquecer a água da temperatura inicial (T_i) até a temperatura final (T_f) é dada pela equação:

$$Q = \rho \frac{V}{1000} C_P(T_F - T_I)$$

Onde: V = volume diário de água a ser aquecido (l);

ρ = massa específica da água (994 kg/m³);

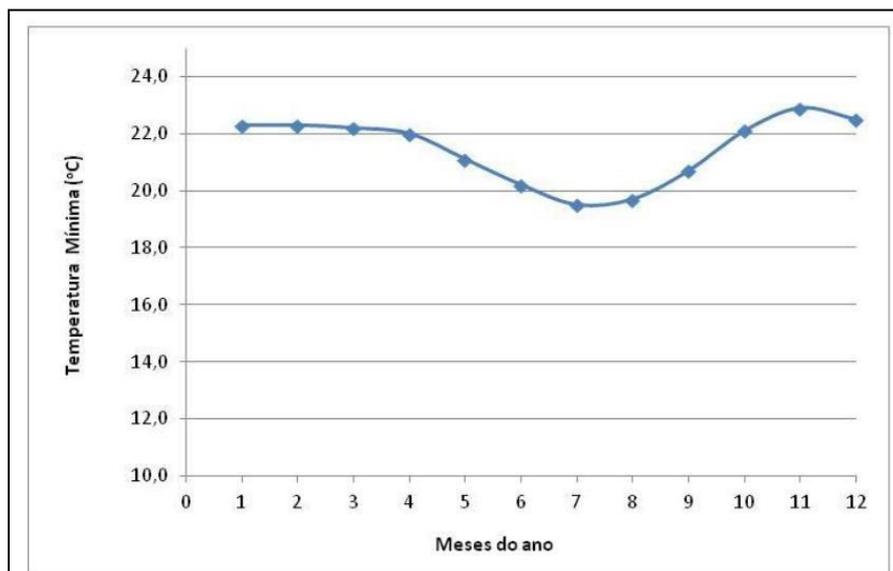
C_P = calor específico a pressão constante (4,19 kJ/kg°C).

A massa específica e o calor específico foram considerados constantes e calculados à temperatura média da água no processo de aquecimento. A constante 1000 representa a conversão da unidade do volume de água para m³.

Para definição da variação da temperatura da água requerida no processo,

considera-se que a água no início da manhã (T_i) está com uma temperatura igual à temperatura ambiente mínima de Petrolina nos meses da alta temporada, que conforme mostra o gráfico da Figura 19 é da ordem de 21,3° C. A temperatura final (T_f) foi estimada em 50° C, para compensar as eventuais perdas térmicas no processo de carga dos tanques.

Figura 19 - Comportamento da temperatura mínima em Petrolina



Substituindo-se os valores na equação 1, tem-se:

$$Q = 994 \frac{57000}{1000} 4,19(50 - 21,3)$$

$$Q = 6813294 \text{ kJ ou } 6,81 \text{ GJ por dia} \quad (1)$$

Para a determinação da demanda total de energia térmica por safra, será necessário calcular o número de dias efetivos de tratamento térmico, conforme a metodologia proposta a seguir:

a. Peso por caixa das mangas:

Durante a pesquisa constatou-se uma variação do peso das caixas de acordo com determinadas empresas. Levou-se em consideração para um produtor de médio porte um valor médio 1.000.000 de caixas de 4,0 kg e 100.000 caixas de 6,0 kg das variedades de manga que seguem o protocolo Mango Board. Portanto, serão tratadas 4600 toneladas de manga.

b. Massa das mangas tratadas por ciclo:

Para a determinação desse valor foi levado em consideração os dados dos componentes descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Massa das mangas tratadas por ciclo

Conjunto	Massa
1 CONTENDOR	25 Kg de manga
1 GAIOLA	60 CONTENTORES
1 GAIOLA	1500 Kg de manga
Cada tanque recebe	3 gaiolas
<hr/>	
Total de mangas tratadas por ciclo	13,5 t manga/ciclo

Para o cálculo do número de dias em que o tratamento térmico é efetivamente realizado, calcula-se o número de ciclos por safra pela razão entre a produção total que se destina ao mercado externo pela massa de manga tratada em cada ciclo. Esse valor dividido pelo número de ciclos promovidos por dia fornecerá o período considerado como alta temporada, a saber pela equação 2:

$$\text{Número de ciclos por safra} = \frac{\text{Massa total a ser tratada}}{\text{Massa tratada por ciclo}} \quad (2)$$

O número de dias que compõem a alta temporada é dado pela equação 3:

$$\text{Número de dias – alta temporada} = \frac{\text{Número de ciclos por safra}}{\text{Número de ciclos por dia}} \quad (3)$$

No caso da empresa hipotética, tem-se:

$$\text{Número de ciclos por safra} = \frac{4600 \text{ toneladas}}{13,5 \text{ ciclo}} = 341 \text{ ciclos por safra}$$

$$\text{Número de dias – alta temporada} = \frac{341 \text{ ciclos por safra}}{5 \text{ ciclos por dia}} = 68 \text{ dias}$$

$$Q_{safra} = 6813294 \text{ kJ} \times 68 \text{ dias} = 464.313.4011 \text{ kJ ou } 464 \text{ GJ por safra}$$

3.4.2. CONSUMO DE GLP POR SAFRA

Considerando-se o poder calorífico inferior (PCI) do GLP igual a 49.115 kJ/kg ter-se-ia um consumo teórico de 9454 kg GLP/safra. Para a determinação do consumo efetivo ($C_{GLP,eff}$), devem ser consideradas a eficiência da caldeira a gás (η_c) e efetividade do trocador de calor (ϵ) utilizados no processo e normalmente informadas pelo fornecedor desses equipamentos, ou seja:

$$C_{GLP,eff} = \frac{Q_{safra}/PCI}{\eta_c \times \epsilon}$$

No caso do estudo de caso, adotou-se a eficiência do gerador de vapor igual a 80% e do trocador de calor da ordem de 60% e, portanto, o consumo esperado de GLP por safra é de:

$$C_{GLP,ef} = \frac{464.313.401/49115}{0,80 \times 0,60}$$

$$C_{GLP,ef} = 19695 \text{ Kg GLP / safra}$$

Isto representa um consumo específico de 4,28 kg de GLP por tonelada de manga termicamente tratada. A partir deste dado tem-se o gasto da empresa por safra

com o tratamento térmico das mangas. No estudo de caso proposto, o valor adotado é de R\$ 2,6869 /kg (PMPF, 2018), totalizando R\$ 52.918,00.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão apresentados os resultados de testes térmicos realizados com o sistema de aquecimento solar proposto para três níveis de vazão.

4.1. ENSAIOS COM VAZÃO DE 60 L/H

A Tabela 4 apresenta os resultados médios obtidos com o coletor solar em labirinto sendo atravessado por uma vazão correspondente a 60 l/h. Tais resultados médios foram obtidos após a realização de três dias de testes, para excelentes condições solarimétricas.

Os gráficos das figuras 20, 21 e 22 mostram o comportamento assumido pelos parâmetros medidos e calculados contidos na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados médios gerais para 60 l/h

TEMPO (Horas)	T_{Entrada} (°C)	T_{Saida} (°C)	ΔT (°C)	I (W/m²)	ηt (%)
8:00 - 9:00	30,5	42,2	11,7	750,6	58,7
9:00 -10:00	30,5	43,8	13,3	863,1	58,1
10:00 -11:00	31,0	45,5	14,5	908,1	60,2
11:00 -12:00	31,1	45,8	14,7	911,5	60,8
12:00 -13:00	31,1	45,3	14,2	907,4	59,0
13:00 -14:00	31,2	43,5	12,3	852,4	54,4
14:00 -15:00	31,1	42,1	11,0	782,5	53,0
MÉDIA	30,9	44,0	13,1	855,9	57,7

Figura 20 - Comportamento assumido pelos parâmetros de temperaturas para a vazão 60 l/h

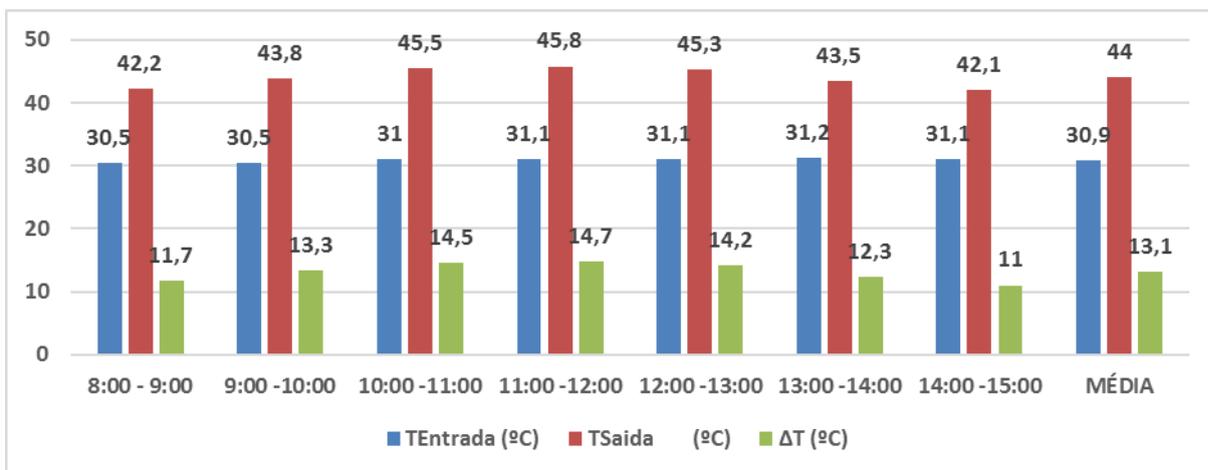


Figura 21 - Comportamento assumido pela radiação solar global para a vazão 60 l/h

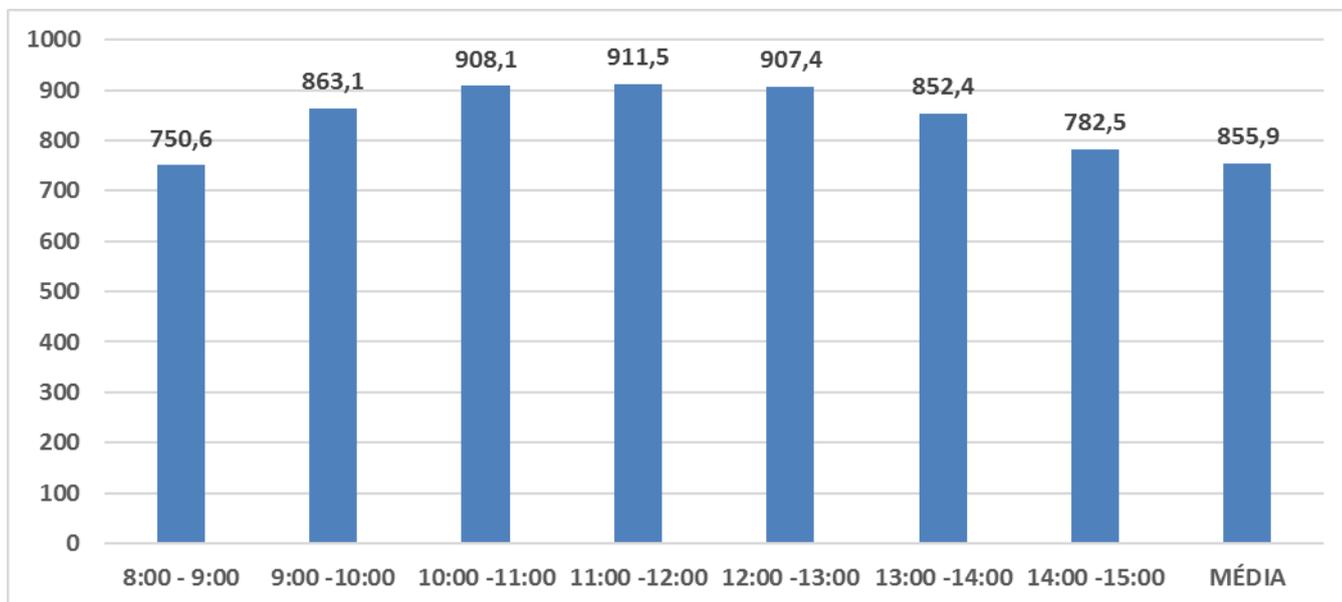
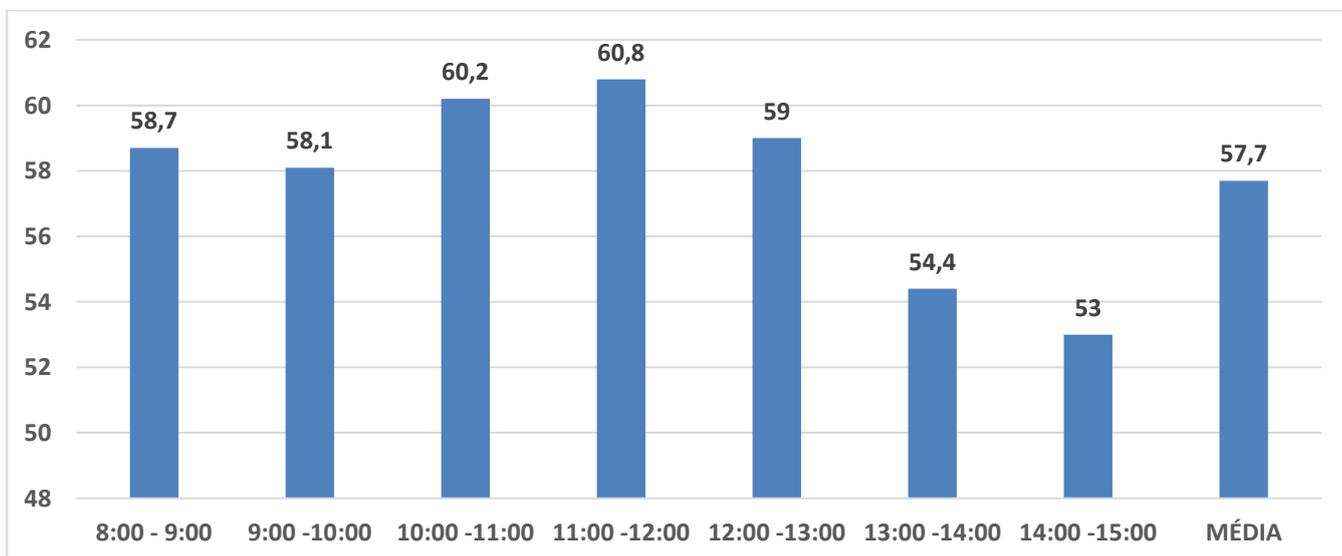


Figura 22 - Comportamento assumido pela eficiência térmica para a vazão 60 l/h



Para esse nível de vazão, que produz um aquecimento de um volume total de água diário de 420 litros, a temperatura média de saída para os três dias de teste ficou um pouco abaixo da ideal para o tratamento proposto, 44°C.

Em horários de pico, entre 10 e 13 horas, essa temperatura correspondeu em média a 45,5°C, muito próxima aos 46°C exigidos para o tratamento. O aumento da temperatura média de saída do coletor poderia ser obtido para a obtenção do nível ideal através do aumento da área do coletor, plenamente factível, com baixo custo acrescido.

Ressalte-se que os bons resultados obtidos foram para dias com excelentes condições solarimétricas, com média de radiação solar global correspondente a 755W/m² e pico de 911,5W/m².

A eficiência térmica média do coletor solar foi bastante significativa, 57,7%, com pico de 60,8%, o que demonstra a pequena perda térmica, em função da boa transferência de calor dos tubos para a água circulante. Tal transferência foi facilitada pelo regime de fluxo forçado adotado para essa aplicação. Esse elevado rendimento térmico é característica de coletores que trabalham em regime de fluxo contínuo, com apenas uma passagem no coletor.

A temperatura média de saída obtida para esse nível de vazão foi inferior em 5% à ideal para o tratamento térmico da manga. Pode-se, portanto, concluir pela grande viabilidade desse nível de vazão para a obtenção de níveis de temperatura ideais para o tratamento térmico pretendido.

4.2. ENSAIOS COM VAZÃO DE 80 L/H

A Tabela 5 apresenta os resultados médios obtidos com o coletor solar em labirinto sendo atravessado por uma vazão correspondente a 80 l/h. tais resultados médios foram obtidos após a realização de três dias de testes, para excelentes condições solarimétricas.

Os gráficos das figuras 23, 24 e 25 mostram o comportamento assumido pelos

parâmetros medidos e calculados contidos na tabela 5.

Tabela 5 - Resultados médios gerais para 80 l/h

TEMPO (Horas)	T_{Entrada} (°C)	T_{Saída} (°C)	ΔT (°C)	I (W/m²)	η_t (%)
8:00 - 9:00	30,7	38,8	8,1	743,3	54,7
9:00 -10:00	30,7	40,5	9,8	835,3	58,9
10:00 -11:00	31,0	41,7	10,7	821,3	65,4
11:00 -12:00	31,0	42,5	11,5	869,4	66,4
12:00 -13:00	31,1	42,1	11,0	899,3	61,4
13:00 -14:00	31,1	41,1	10,0	839,5	59,8
14:00 -15:00	31,0	39,1	8,1	746,1	54,5
MÉDIA	30,9	40,8	9,9	822,0	60,2

Figura 23 - Comportamento assumido pelos parâmetros de temperaturas para a vazão 80 l/h

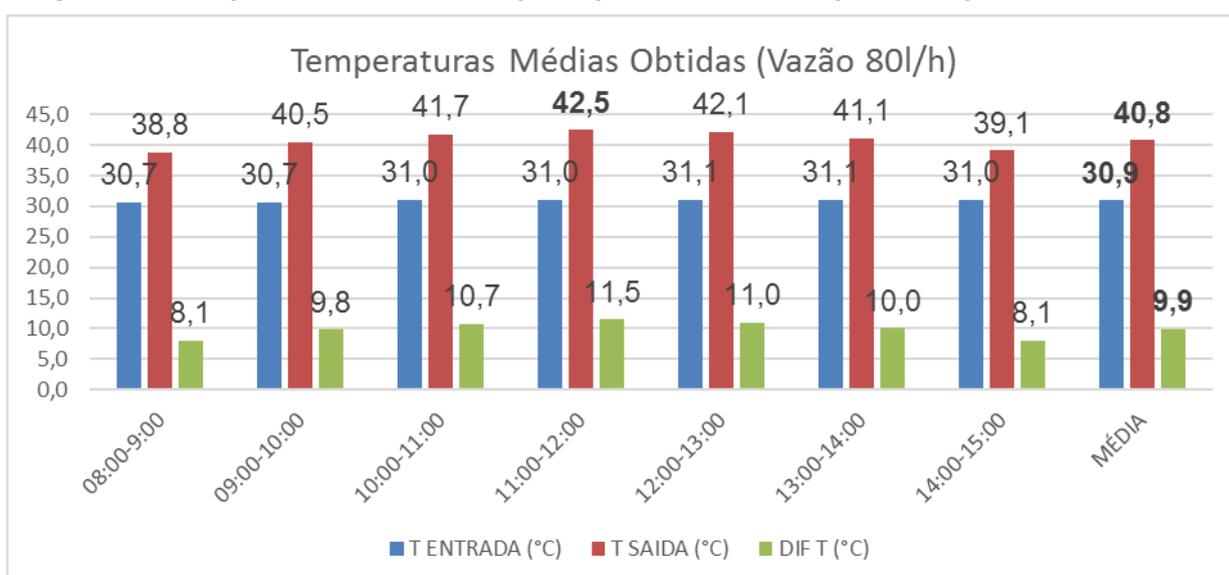


Figura 24 - Comportamento assumido pela eficiência térmica para a vazão 80 l/h

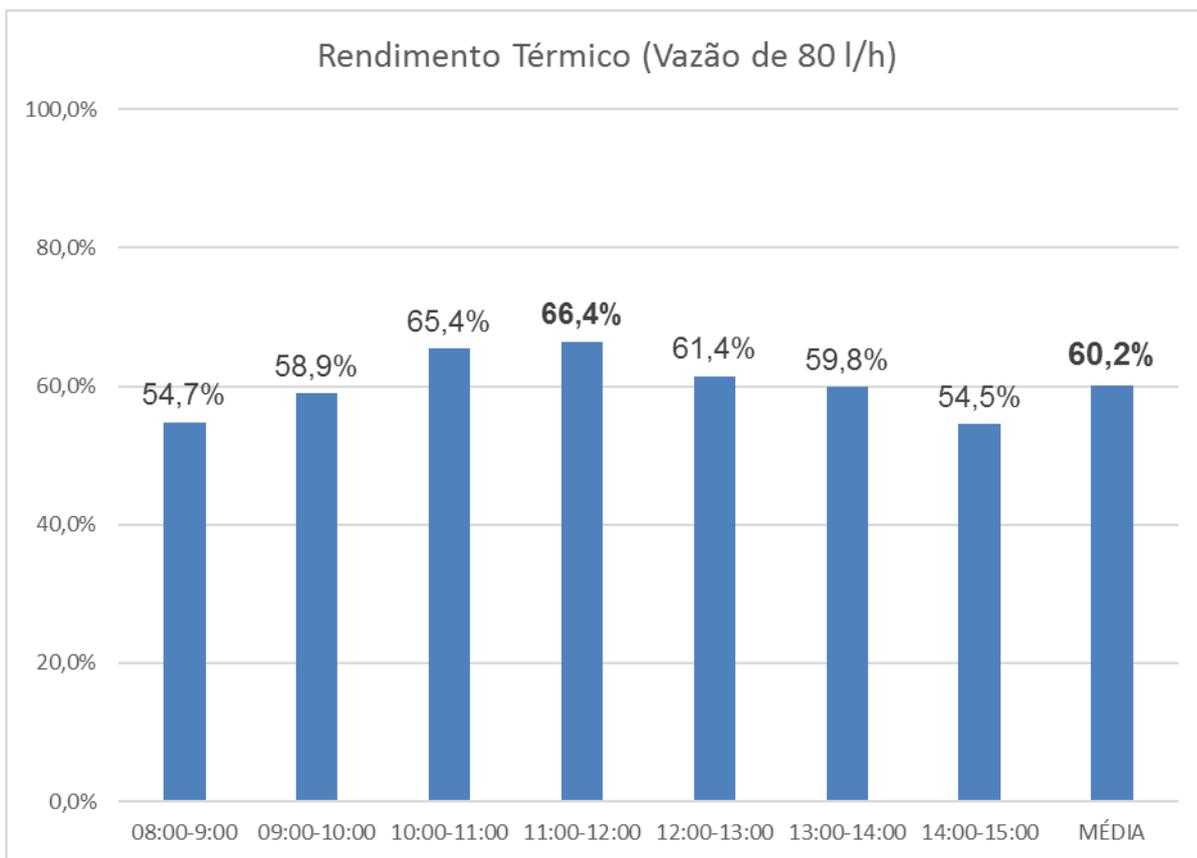
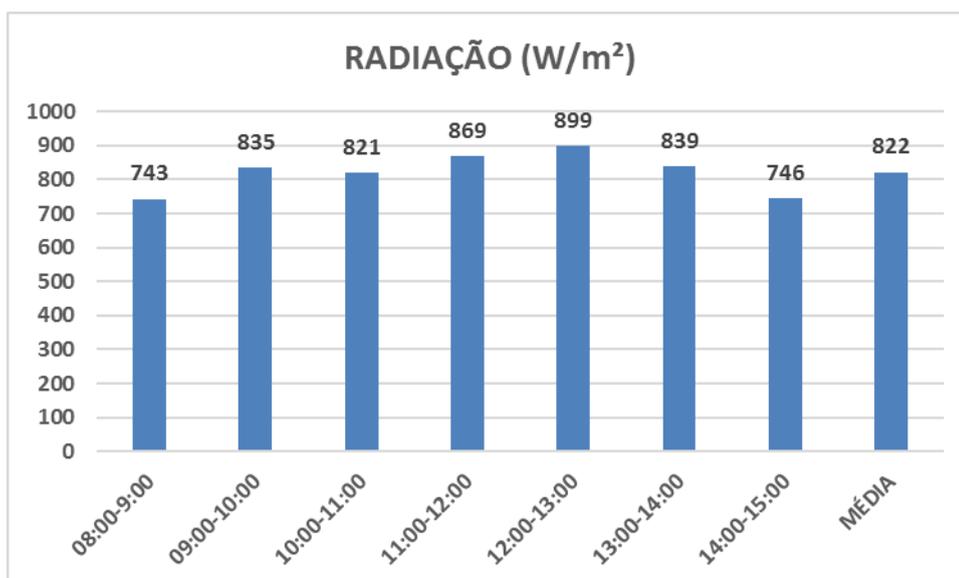


Figura 25 - Comportamento assumido pela radiação solar global para a vazão 80 l/h



Esse nível de vazão produz um aumento de 33,3% em relação à vazão anterior, produz o aquecimento de um volume total de água diário de 560 litros. A

temperatura média de saída para os três dias de teste, 40,8°C, ficou abaixo da ideal para o tratamento proposto, 46°C.

Em horários de pico, entre 10 e 13 horas, essa temperatura correspondeu em média a 42,1°C, mais próxima aos 46°C exigidos para o tratamento. O aumento da temperatura média de saída do coletor poderia ser obtida para atingir-se o nível ideal, através do aumento da área do coletor.

As condições solarimétricas para o ensaio de 80l/h foram muito boas, porém um pouco interiores aos testes para a vazão anteriormente testada, com média de radiação solar global correspondente a 822W/m² e pico de 899W/m².

A eficiência térmica média do coletor solar para esse nível de vazão foi similar e um pouco superior à obtida para a vazão de 60l/hora, alcançando 60,2%, com pico de 60,8%, o que demonstrou uma perda menos significativa uma vez que ocorreu um aumento na vazão em torno de 33,3%.

A temperatura média de saída obtida para esse nível de vazão foi inferior em 12% à ideal para o tratamento térmico da manga.

4.3. ENSAIOS COM VAZÃO DE 100 L/H

A Tabela 6 apresenta os resultados médios obtidos com o coletor solar em labirinto sendo atravessado por uma vazão correspondente a 100 l/h. Tais resultados médios foram obtidos após a realização de três dias de testes, para excelentes condições solarimétricas.

Os gráficos das figuras 26, 27 e 28 mostram o comportamento assumido pelos parâmetros medidos e calculados contidos na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados médios gerais para 100 l/h

TEMPO(HORA)	T ENTRADA (°C)	T SAIDA (°C)	DIF T (°C)	RADIAÇÃO (W/m ²)	RENDIMENTO
08:00-9:00	30,5	37,2	6,7	784	53,7%
09:00-10:00	30,9	38,1	7,4	864	53,8%
10:00-11:00	30,9	39,5	8,6	887	60,9%
11:00-12:00	31,2	40,5	9,3	898	65,0%
12:00-13:00	31,2	41,1	9,9	901	69,0%
13:00-14:00	31,0	40,2	9,2	885	65,3%
14:00-15:00	30,7	38,1	7,4	849	54,7%
MÉDIA	30,9	39,2	8,4	867	60,3%

Figura 26 - Comportamento assumido pela radiação solar global para a vazão de 100 l/h

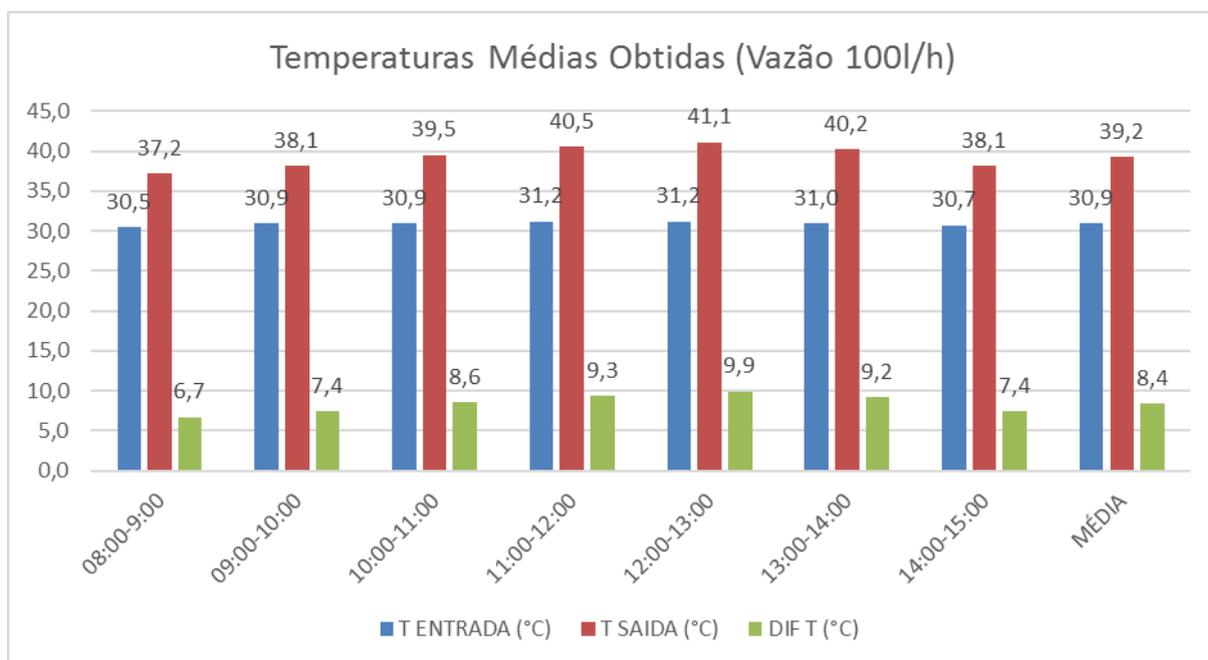


Figura 27 - Comportamento assumido pela eficiência térmica para a vazão 100 l/h

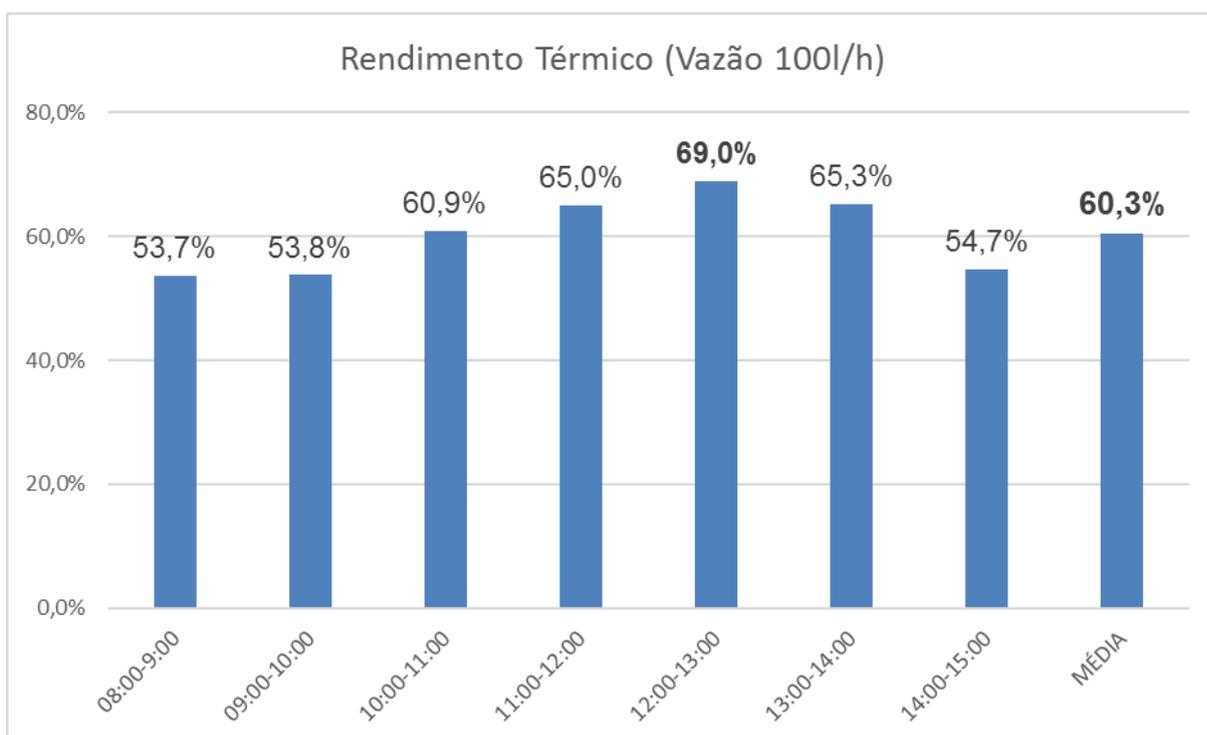
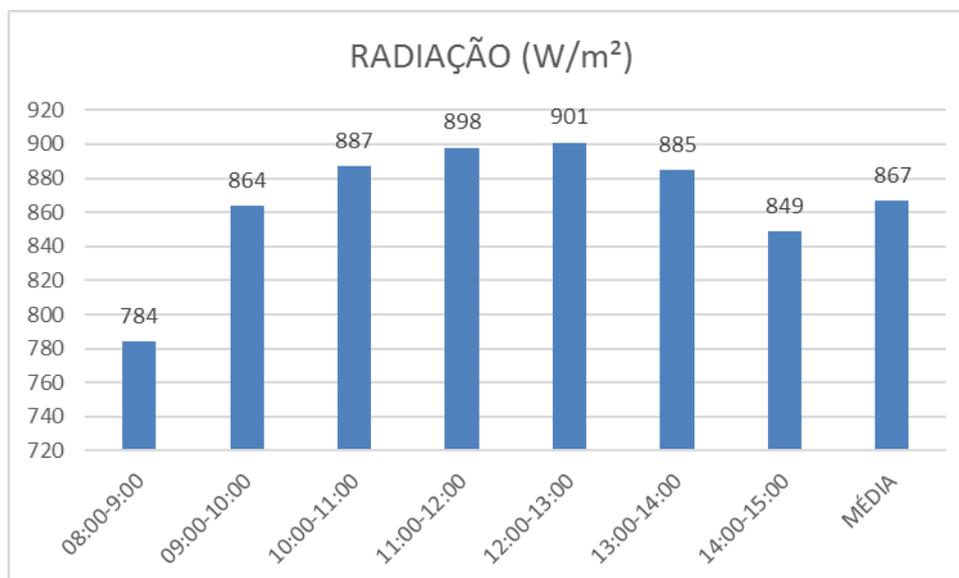


Figura 28 - Comportamento assumido pela radiação solar global para a vazão 100 l/h



Esse nível de vazão produz um aumento de 67,0% em relação à menor vazão propiciando o aquecimento de um volume total de água diário de 700 litros. A temperatura média de saída para os três dias de teste, 39,2°C, ficou abaixo da ideal para o tratamento proposto.

Em horários de pico, entre 10 e 13 horas, essa temperatura correspondeu em

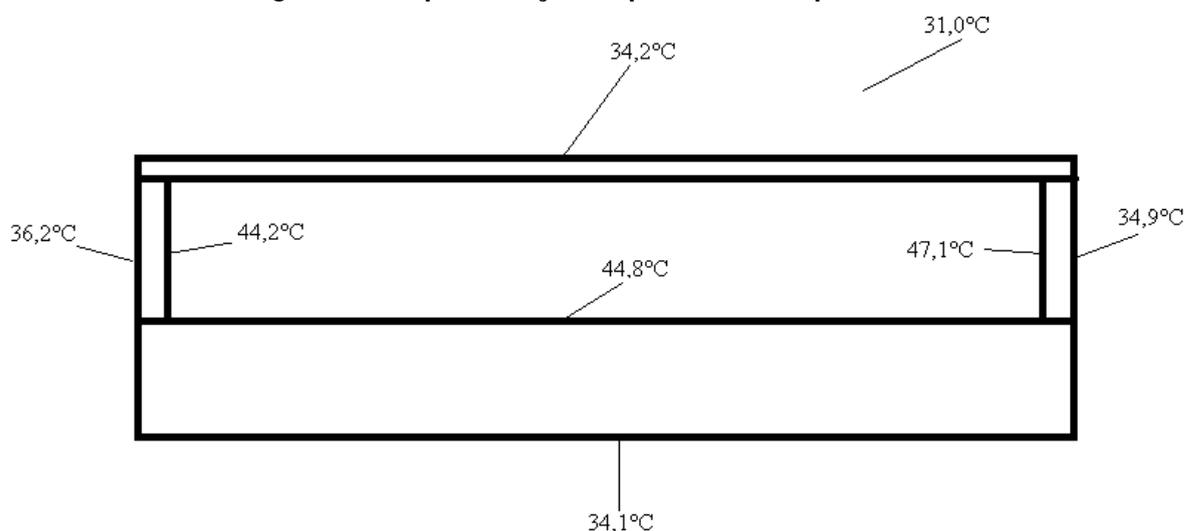
média a 40,5°C, um pouco distante dos 46°C exigidos para o tratamento. O aumento da temperatura média de saída do coletor poderia ser obtido para atingir-se o nível ideal, através do aumento da área do coletor.

As condições solarimétricas para o ensaio de 100l/h foram muito boas, similares às dos outros testes com as outras duas vazões, com média de radiação solar global correspondente a 867W/m² e pico de 901W/m².

A eficiência térmica média do coletor solar para esse nível de vazão foi igual à da relativa a 80l/hora e superior à da 60l/hora. A temperatura média de saída obtida para esse nível de vazão foi inferior em 15% à ideal para o tratamento térmico da manga.

Outro parâmetro térmico, Coeficiente Global de Perda (U_{loss}) foi determinado para a vazão de 100 litros/hora . Para a determinação do coeficiente global de perda térmica (U_{loss}) foram utilizadas as temperaturas internas e externas do coletor quando das realizações dos testes térmicos. A Figura 29 mostra um diagrama esquemático onde estão contidos os níveis médios de temperatura para a vazão de 100 l/hora, no período de 11 às 12 horas.

Figura 29 - Representação esquemática dos pontos



A Tabela 7 apresenta os resultados dos parâmetros térmicos calculados para a determinação do coeficiente global de perdas do coletor solar proposto, para 100 l/hora no horário de pico entre 11 e 12 horas. A radiação solar global média correspondeu a 900 W/m².

Tabela 7 - Parâmetros térmicos calculados para determinação do U_{loss}

PARÂMETRO	Valor (Watts)
Taxa de energia absorvida	1203
Taxa de energia útil	1079
Taxa de energia perdida	124
Uloss (W/m.C)	4,85

Para a fabricação do coletor estudado, os principais materiais utilizados foram: chapa em aço galvanizado, placa de EPS de 30mm, tubos de PVC de ½”, joelhos de ½”, cola PVC, vidro transparente de 4mm e etc. O custo de fabricação do coletor solar de grade mista ficou em torno de R\$ 616,69, correspondente a R\$ 333,35/m². A Tabela 8 mostra a planilha de custo para construção deste coletor.

Tabela 8 - Custo dos materiais utilizados na montagem do coletor solar alternativo

MATERIAL	UNID.	QUANT.	CUSTO UNIT. (R\$)	CUSTO TOTAL (R\$)
Chapa em aço galvanizado	Unid.	01	180,00	180,00
Chapa em alumínio	m	1,6	16,00	25,60
Placa de EPS de 30mm	m ²	2,5	12,00	30,00
Tubos de PVC de Ø ½”	m	65	2,00	130,00
Joelhos de ½” em PVC	Unid.	64	0,37	23,68
Borracha quadrada	m	06	4,50	27,00
Vidro transparente de 4mm	m ²	1,85	85,00	157,25
Adesivo plástico para PVC	Unid.	02	6,58	13,16
Esmalte preto fosco	Litro	01	18,00	18,00
Cola silicone grande	Unid.	01	12,00	12,00
TOTAL				616,69

Uma vez que o sistema de aquecimento estudado composto pelo coletor e um reservatório para coleta do líquido aquecido apresentou viabilidade de utilização para o fim proposto, e que pode ser produzido a baixo custo, conforme demonstrado pelos dados da Tabela 8, a viabilidade do sistema de aquecimento proposto fica demonstrada, uma vez que o custo do aquecimento de água por energias convencionais é significativo.

Pretende-se avançar nesse estudo realizando-se uma detalhada análise de viabilidade econômica, uma vez que foi demonstrado que a utilização da energia solar para produzir o aquecimento de água, no nível de temperatura pretendido. Ressaltando-se a grande vantagem ambiental que traz a utilização de uma fonte limpa, abundante e largamente disponível em todas as regiões de nosso país.

5. CONCLUSÕES

a) O sistema solar de aquecimento demonstrou-se viável para o aquecimento de água destinada ao tratamento hidrossanitário térmico (THT) da manga;

b) Dentre os níveis de vazão estudados, o mais viável foi 60l/hora, obtendo-se temperatura média do ensaio muito próxima ao nível de temperatura ideal para o tratamento pretendido;

c) As perdas térmicas do coletor solar foram de baixa magnitude, explicada pela grande quantidade de água no interior da grade absorvedora em função do fluxo forçado com apenas uma passagem;

d) A eficiência térmica do coletor foi bastante significativa, em torno de 60%, competitiva com os níveis mostrados pela literatura solar para aquecedores trabalhando em regime de fluxo forçado;

e) O coletor solar e o sistema de aquecimento apresentam fáceis processos de fabricação, montagem e operacionalidade, podendo esta tecnologia ser repassada para pessoas de quaisquer níveis sociais e intelectuais;

f) A temperatura da placa absorvedora de PVC. Em torno de 45°C, esteve abaixo do nível crítico para início do processo de degradação térmica, em torno de 70°C. No que diz respeito à degradação por UV tal efeito é amenizado pela tinta preto fosco que recobre os tubos absorvedores, que contém pigmentos pretos absorvedores de radiação ultravioleta.

6. SUGESTÕES

a) Em função da elevada produção de água quente para a vazão de 100 l/hora, 700 l/dia, o coletor solar poderia ter sua área aumentada para propiciar a obtenção da temperatura ideal para o tratamento pretendido, obtendo-se um volume de 280 l/dia superior ao da menor vazão estudada;

b) Promover uma melhor vedação do coletor solar para a diminuição de fugas de calor e proporcionar uma diminuição das perdas térmicas e consequente aumento da temperatura de saída, aumentando a viabilidade do sistema;

c) Fabricar um sistema de aquecimento com coletores em série e/ou paralelo para a utilização de maiores níveis de vazão para diversas aplicações industriais agropecuárias;

d) Fazer um amplo estudo de viabilidade econômica do sistema de aquecimento proposto e estudado.

7. REFERÊNCIAS

ACERVO CIENTÍFICO, Laboratório de Máquinas Hidráulicas e Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (LMHES/UFRN) (2016).

ALTAFINI, C. R. Curso de engenharia mecânica: Caldeiras. Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2002.

ALVARES, G.; ARCE, J.; LIRA, L.; HEARS, M.R. Thermal performance of an air solar collector with an absorber plate made of recyclable aluminium cans. *Sol Energy* 2004; 77; 107-13.

ANP. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. RESOLUÇÃO ANP Nº 16, DE 17.6.2008 - DOU 18.6.2008.

ASSIS, J. S. de Colheita e pós-colheita. In: MOUCO, M. A. do C. (Ed.). Cultivo da mangueira. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2004.

BAI, Y. Experimental investigation of a solar thermal storage heater assembled with finned heat pipe and collective vacuum tubes; *Energy Conversion and Management* 166. 463–473. 2018

BAYAZTTOGLU, Y.; ASPARGOUR, S. Performance Calculations of Tubular Cover Collectors, *Solar Energy*, 24, 105 - 109, 1980.

BESSA, V. M. T.; PRADO, R. T. A. 2015. Reduction of carbon dioxide emissions by solar water heating systems and passive technologies in social housing. *Energy Policy*, 83, 138-150. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.04.010>.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. NR 13-Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulação, Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 1978. Disponível em: < <http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR13.pdf>> acesso em jul. 2018.

BUKER, Mahmut Sami, RIFFAT, Saffa B. Building integrated solar thermal collectors – A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51 (2015) 327–346.

BRUNI, A. L. Avaliação de Investimentos. São Paulo: Atlas, 2008.

CABIROL, T.; PELISSOU, A.; ROUX, D., El calentador solar de agua, Compañia Editorial Continental, S.A., Barcelona, Espanha, 1978.

CALLISTER, W. D. Ciência e engenharia dos materiais: Uma introdução. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CASAROTTO FILHO, N. C. & KOPITTKKE, B. H. Análise de investimentos. 10ª Edição. São Paulo: Atlas, 2008.

CENSOLAR, La Energía Solar: Aplicaciones Prácticas, Tercera edición, Sevilla, 1999.

CHEREMISINOFF PN (Eds). Marcel Dekker, "Flat plate and concentrating collectors. In solar energy technology hand book, part-A" DICKINSON WC, New York, pp. (1980) 218-254.

CRISTOFARI, C. Modeling and performance of a copolymer solar water heating collector, Solar Energy, v. 72: (2), p. 99-112, 2002.

DADAM, A. P.; NICOLAU, V. P.; JAHN, T. G.; HARTKE, R. F. Análise Numérica Comparativa de Combustíveis Utilizados em Fornos Túneis. Cerâmica Industrial, Agosto, 2006.

DICKINSON, W.C., CHEREMISINOFF, P.N., Solar Energy Technology Handbook, Part B, Marcel Dekker, New York, 03-30, 1980.

DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W.A. Solar Engineering of Thermal Processes, New York, John & Sons, 757 p., 2013.

FASULO, A, El uso del policarbonato em dispositivos solares. XIV Congreso Ibérico y IX Congreso Iberoamericano de Energia Solar, Vigo, Galicia, España, 2008.

GENÚ, P. J. C.; PINTO, A. C. Q. A Cultura da Mangueira. Embrapa. Informação Tecnológica. Brasília, 2002. 479 p

GOMES, M. R. Projeto, Construção e Análise de Eficiência Térmica de um Sistema de Aquecimento Solar de Água de Baixo Custo. Dissertação de Engenharia Mecânica, UFRN, 2010.

KALOGIROU, S. A. Solar thermal collectors and applications, Progress in Energy and Combustion Science 30 (2004) 231–29.

KUHNEN, O. L; BAUER, U. R. Matemática Financeira Aplicada e Análise de Investimentos. 6ª edição. São Paulo: Atlas, 1996.

LEITE, N. R.; MILITÃO, R. A. Tipos e aplicações de caldeiras. PROMINP – ENGENHEIRO DE SUPRIMENTOS. Disciplina: Fabricação e Montagem de Caldeiras e Trocadores de Calor. Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Mecânica. 2008

LENZ, A. M. Evaluation of three systems of solar thermal panel using low cost material, tested in Brazil, Journal of Cleaner Production 167 (2017) 201-207.

LIMA, F. A. S., Obtenção e Caracterização de um Compósito de Matriz Cerâmica com Cargas de Resíduos de EPS e Raspa de Pneu para Construção de Casas populares, Dissertação de Engenharia Mecânica, UFRN, 2016.

LOPO, Alexandre Boleira. Análise do desempenho térmico de um sistema de aquecimento solar de baixo custo. 2010. 81 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais; Projetos Mecânicos; Termociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

LOURENÇO, J. M. Estudo de um Coletor Solar Alternativo, usando tubos absorvedores de Alumínio. 1997, 144f. 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.

LUIZ, ADIR M. Como Aproveitar a Energia Solar, Edgard Blücher, 1985.

MEIRA, L.G.S. “Viabilidades Térmica, Econômica e de Materiais da Utilização de Tubos de PVC como Elementos Absorvedores em Coletores de um Sistema de Aquecimento de Água por Energia Solar” – tese de doutorado, 2002.

SEBRAE, O cultivo e o mercado da manga. Disponível em:

<http://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/o-cultivo-e-o-mercado-da-manga,90f5438af1c92410VgnVCM100000b272010aRCRD>>. Acesso em: 09 jul 2018.

PANDEY, K. M.; CHAURASIYA, R. A review on analysis and development of solar flat plate collector, Renewable and Sustainable Energy Reviews 67 (2017) 641–650.

PEREIRA, E. M. D. (ED). “Guia de Implementação do Aquecimento Solar de Água para Fruticultura do Vale do São Francisco” – Projeto SOLBRASIL. FINEP, 2007.

PMPF. Preço médio ponderado a consumidor final (PMPF) de combustíveis. ATO

COTEPE/PMPF Nº 5, DE 08 DE MARÇO DE 2012. Disponível em: <http://legisla.receita.pb.gov.br/LEGISLACAO/ATOCOTEPE/2012/AC-05/PMPF%2005_.html> Publicado no DOU de 09.03.12

POTTMAIER, D.; MELO, C.R.; SARTOR, M.N.; KUESTER, S.; AMADIO, T.M.; FERNANDES, C.A.H.; 2013. The Brazilian energy matrix: from a materials science and engineering perspective. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 19, 678e691. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.063>.

REIS, E. P. Análise do Desempenho Térmico de um Sistema de Aquecimento Solar Utilizando Coletor com Superfície Absorvedora em Chapas de PVC. Dissertação de Engenharia Mecânica, UFRN, 2009.

RIVEIRA, D, A. L. Projeto de construção e Análise de Desempenho de um Coletor Solar Alternativo a Baixo Custo, 1994. 127f. 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.

ROAF, S. FUENTES, M. THOMAS, S. *Ecohouse 2: a design guide*, 2th Ed. Architectural Press, Michigan 2003.
SAGLIETTI, J. R. C. ; ESCOBEDO, J. F. ; SILVA, L. A. . Coletor Solar de Polietileno - Uma Alternativa de Baixo Custo. *Engenharia Agrícola (Impresso)* , Jaboticabal, v. 17, n.1, p. 32-43, 1997.

ROSS, S. A. *Principio de administração financeira*. 2ª Edição.. São Paulo: Atlas, 2000.

SILVA, B. C. F.; SILVA, V. Combustíveis e queimadores em caldeiras. PROMINP – Engenheiro de suprimentos. Disciplina: Fabricação e montagem de caldeiras e trocadores de calor. Escola Politécnica, departamento de Engenharia Mecânica. 2008.

SILVA, Edinesio Jales da. Fabricação e estudo de um sistema de aquecimento de água utilizando coletor solar de grade absorvedora formada com tubos pvc na configuração série-paralelo. 2016. 79f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

SMIL V. *General energetics: energy in the biosphere and civilization*. 1st ed. New York: John Wiley & Sons; 1991.

SODRÉ, D., Construção e Análise de Desempenho de um Sistema de Aquecimento Solar de Água Utilizando Placas de Policarbonato como Superfície Absorvedora. Dissertação de Engenharia Mecânica, UFRN, 2010.

SOUZA, O.; SCHULZ MARCO, A. F.; GUSTAVO, A.; WAGNER, A.; THEODORO, M.; SELLIN, N. 2012. Alternative energy from biomass: bioethanol from banana pulp and peels. Rev. Bras. Eng. Agrícola Ambient. 16 (8), 915-921. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000800015>.

SURESH, N. S.; RAO, B. S. 2017. Solar energy for process heating: a case study of select Indian industries. J. Clean. Prod. 151, 439-451. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.190>.

YAMAN, K.; ARSLAN, G. Modeling, simulation, and optimization of a solar water heating system in different climate regions; Journal of Renewable and Sustainable Energy 10, 023703 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5004069>.

VAN NIEKERK, W.M.K; Du TOIT, C.G.; SCHEFFLER, T.B., Performance modeling of a parallel tube polymer absorber, Solar Energy, 58, 39-44, 1996.