

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

KACIANE APARECIDA BASILIO

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE
UM COLETOR SOLAR DE TUBOS A VÁCUO DE ALTA PRESSÃO**

PONTA GROSSA

2021

KACIANE APARECIDA BASILIO ✉

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM COLETOR SOLAR DE TUBOS A VÁCUO DE ALTA PRESSÃO

Experimental Investigation of the Thermal Performance
of a High Pressure Vacuum Tube Solar Collector

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação apresentado como requisito
para obtenção do título de Bacharela em
Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador:

Prof. Dr. *Thiago Antonini Alves* ✉ 

Coorientador:

Eng. Mec. *Guilherme Antonio Bartmeyer*

PONTA GROSSA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos aos autores, sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

KACIANE APARECIDA BASILIO

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM
COLETOR SOLAR DE TUBOS A VÁCUO DE ALTA PRESSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 15 de dezembro de 2021.

Prof. Dr. Thiago Antonini Alves
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR/Ponta Grossa)

Prof. Dr. Marcos Vinicius Barbosa
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR/Ponta Grossa)

Prof. Dr. Lourival Matos de Sousa Filho
Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)

PONTA GROSSA

2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que de forma singular me conduziu até aqui.

Agradeço aos meus pais, Ricardo e Ironi Basilio, que me deram amor, sustento e oportunidades para seguir o meu sonho. Agradeço também as minhas irmãs, Kelly e Karine, pelo apoio, carinho e por sempre acreditarem em mim.

Agradeço ao Rafael Antonio Piotrowski, meu amigo, confidente e namorado, pela sintonia, reciprocidade e compreensão em minhas ausências.

Agradeço a meu orientador, o professor Thiago Antonini Alves, por me conduzir neste trabalho com paciência, sabedoria e confiança.

Agradeço a todos os amigos e colegas que adquiri durante esse período em que estive na UTFPR e no LabCT, em especial ao Guilherme Antonio Bartmeyer, pelo auxílio no desenvolvimento desse Trabalho de Conclusão de Curso.

Agradeço também a Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPPG) da UTFPR, à Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação (DIRPPG), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) e ao Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da UTFPR/*Campus* Ponta Grossa.

RESUMO

Com o crescimento industrial e da população é inquestionável a necessidade de maior geração de energia. A utilização de sistemas solares térmicos é uma alternativa atrativa para enfrentar a elevada demanda energética e os seus consequentes desafios, pois o sol é uma fonte inesgotável de calor que possui um alto potencial de desenvolvimento. Coletores solares de tubos a vácuo de alta pressão através da irradiância solar, transferem calor como fonte de energia para o fluido de trabalho, aquecendo-o. Em aplicações residenciais, o aquecimento de água pode afetar significativamente o consumo de energia. Nesse contexto, a utilização de coletores solares, além de ser sustentável, pode ser uma opção rentável. Os coletores solares assistidos por termossifões são mais eficientes e operam em temperaturas mais altas se comparados com coletores solares convencionais. Este Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo determinar o desempenho térmico de um coletor solar a vácuo de alta pressão (assistido por termossifões) posicionados em uma inclinação de 25° (latitude da cidade de Ponta Grossa/PR). Foram executados testes experimentais para condições meteorológicas distintas com duração de 7 horas em cada teste. Pela Primeira Lei da Termodinâmica, os valores experimentais de eficiência térmica controlada foram de 41,9% em um dia nublado e 81% em um dia ensolarado, valores que ultrapassam o valor de eficiência de 30% obtidos por coletores solares convencionais. Portanto, conclui-se que o coletor solar de tubos a vácuo é uma alternativa viável e sustentável para o aquecimento de água.

Palavras-chave: Energia Solar, Coletor Solar, Tubos de Calor, Desempenho Térmico, Experimental.

ABSTRACT

Under industrial and population growth, the need for greater energy generation is unquestionable. The use of solar thermal systems is an attractive alternative to face the high energy demand and its consequent challenges, as the sun is an inexhaustible source of heat that has a high potential for development. High-pressure vacuum tube solar collectors, when impacted by solar irradiance, transfer heat as an energy source to the working fluid, heating it. In residential applications, water heating can significantly affect energy consumption. In this context, the use of solar collectors, in addition to being sustainable, can be a cost-effective option. Solar collectors assisted by thermosyphons are more efficient and operate at higher temperatures compared to conventional solar collectors. This study aims to determine the thermal performance of a high pressure vacuum solar collector (assisted by thermosyphons) positioned at an inclination of 25° (the latitude of Ponta Grossa/PR). Experimental tests were performed for different meteorological conditions lasting 7 hours in each test. According to the First Law of Thermodynamics, the experimental values of controlled thermal efficiency were 41.9% on a cloudy day and 81% on a sunny day, values that exceed the efficiency value of 30% obtained by conventional solar collectors. Therefore, it is concluded that the vacuum tube solar collector is a viable and sustainable alternative for water heating.

Keywords: Solar Energy, Solar Collector, Heat Pipe, Thermal Performance, Experimental.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Média mensal de irradiação global horizontal no Brasil.....	16
Figura 2 – Diagrama esquemático de um coletor solar de tubos evacuados assistido por termossifões.....	21
Figura 3 – Funcionamento de um termossifão.....	23
Figura 4 – Diagrama Esquemático do Aparato Experimental.....	25
Figura 5 – Interface <i>EasyWeather</i> TM	30
Figura 6 – Guia rápido do piranômetro <i>Kipp & Zonen</i> TM CMP3.....	45

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Coletor solar de placa plana.....	18
Fotografia 2 – Coletor solar de tubo evacuado.....	19
Fotografia 3 – Coletor solar de tubo de calor.....	20
Fotografia 4 – Sistema fechado de circulação de água a alta pressão.....	26
Fotografia 5 – Pátio Externo ao Laboratório de Energia Solar (LabSolar/DAMEC).....	28
Fotografia 6 – Piranômetro e estação meteorológica.....	29
Fotografia 7 – Montagem experimental de um coletor solar de tubos à vácuo de alta pressão.....	31

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Matriz Energética Mundial 2019.....	11
Gráfico 2 – Matriz Energética Brasileira 2019.....	12
Gráfico 3 – Velocidade do vento em função do horário no dia 20/09/2021.....	34
Gráfico 4 – Variação da irradiância solar em função do horário em um dia nublado....	34
Gráfico 5 – Variação da temperatura da água do coletor solar em função do horário em um dia nublado.....	35
Gráfico 6 – Eficiência térmica do coletor solar de tubos de alta pressão em um dia nublado.....	36
Gráfico 7 – Velocidade do vento em função do horário no dia 27/09/2021.....	38
Gráfico 8 – Variação da irradiância solar em função do horário em um dia ensolarado.....	38
Gráfico 9 – Variação da temperatura da água do coletor solar em função do horário em um dia ensolarado.....	39
Gráfico 10 – Eficiência térmica do coletor solar de tubos de alta pressão em um dia ensolarado.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados experimentais obtidos em um dia de sol entre nuvens.....	33
Tabela 2 – Eficiência térmica calculada através dos dados experimentais.....	36
Tabela 3 – Dados experimentais obtidos em um dia ensolarado.....	37
Tabela 4 – Eficiência térmica calculada através dos dados experimentais.....	40

SUMÁRIO

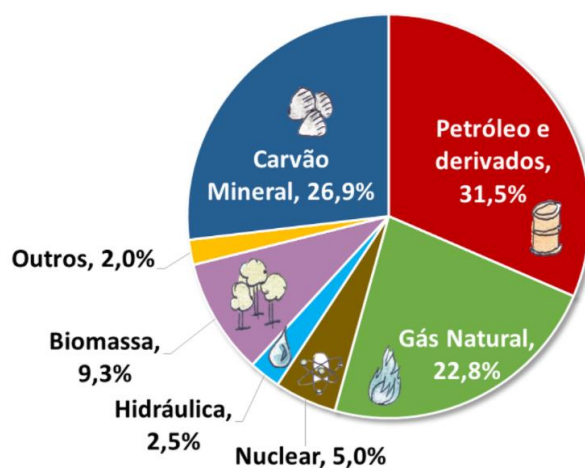
1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Objetivos.....	13
1.1.1	Objetivo Geral.....	13
1.1.2	Objetivos Específicos.....	13
1.2	Justificativa.....	13
1.3	Descrição do trabalho.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1	Energia.....	15
2.1.1	Energia Solar.....	15
2.2	Coletores Solares.....	17
2.2.1	Coletores Solares de Placa Plana.....	18
2.2.2	Coletores Solares de Tubos Evacuados.....	19
2.2.3	Coletores Solares de Tubos Evacuados Assistidos por Tubos de Calor.....	20
3	METODOLOGIA.....	25
3.1	Aparato Experimental.....	25
3.1.1	Sistema fechado de circulação de água.....	26
3.1.2	Dados Meteorológicos.....	28
3.2	Procedimento Experimental.....	30
3.3	Incertezas Experimentais.....	32
4	RESULTADOS.....	33
4.1	Dia nublado (sol entre nuvens).....	33
4.2	Dia ensolarado.....	37
5	CONCLUSÕES.....	39
	REFERÊNCIAS.....	41
	ANEXO A.....	44

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento industrial e da população é inquestionável a necessidade de maior geração de energia. Essa demanda crescente está sendo atendida predominantemente por fontes não renováveis. Dados demonstram que as usinas termoelétricas à combustíveis fósseis, e também as usinas nucleares, corresponderam por aproximadamente 26% da oferta interna de energia elétrica em 2015 no Brasil frente a uma diminuição na geração hidráulica de 81% para 62% entre 2011 e 2015, em parte proveniente da forte estiagem. Devido a esse fato, as emissões de carbono na geração de energia elétrica subiram de 82 para 137 kgCO₂/MWh no período analisado (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016).

O mundo possui uma matriz energética composta em sua maioria por fontes não renováveis, como o petróleo, gás natural, carvão mineral e o urânio. Enquanto as principais fontes renováveis presentes são biomassa, hidráulica, lenha e carvão vegetal (Gráfico 1) (IEA, 2020).

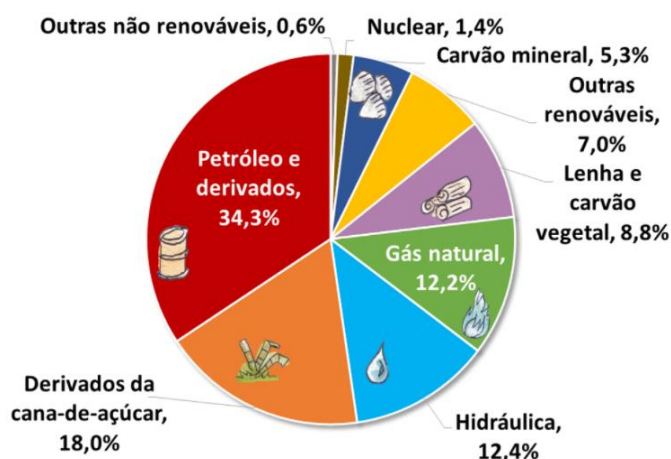
Gráfico 1 – Matriz Energética Mundial 2019



Fonte: IEA (2020)

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN, 2020), o Brasil é o país que mais utiliza fontes renováveis, tais como derivados de cana-de-açúcar, hidráulica, lenha, carvão entre outras renováveis. Cerca de 46,2% de sua matriz energética é formada por essas fontes, conforme mostra o Gráfico 2.

Gráfico 2 – Matriz Energética Brasileira 2019



Fonte: BEN (2020)

Há uma participação relevante de hidrelétricas na matriz energética brasileira, o que diferencia o país a respeito de aspectos ambientais e emissões de gases poluentes. Todavia o recurso hídrico está sujeito à incidência de chuvas, e em períodos de estiagem, a oferta de energia diminui, o que acaba gerando risco ao sistema energético e o aumento dos preços da energia no país. Cenário vivenciado no ano de 2021 no Brasil devido à escassez hídrica.

É crucial para o desenvolvimento sustentável do país que haja inovação e desenvolvimento de tecnologias que utilizem como fontes recursos energéticos naturais. A aplicação de tecnologias que buscam o uso da eficiência energética e a sustentabilidade da produção asseguram e possibilitam menores impactos ambientais (ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2017).

Considerando o sol como uma fonte de energia inesgotável para o planeta Terra, há muito ainda a se desenvolver para explorar de forma adequada essa fonte alternativa para que seja possível suprir todas as demandas energéticas. A energia solar apresenta grande potencial e ainda é pouco utilizada no cenário energético, com isso, ela vem motivando a procura por inovações tecnológicas para melhor aproveitar essa fonte abundante e barata (KABIR *et al.*, 2018).

De acordo com Fontana (2019), a energia solar pode ser aproveitada como fonte de energia térmica e elétrica, por meio do aquecimento de fluidos e da conversão a partir de painéis fotovoltaicos entre outros.

Coletores solares são dispositivos que recebem radiação solar e transferem energia para o fluido de trabalho, normalmente água. Eles devem ser construídos de acordo com as normas da ABNT, considerando as especificações do projeto, como faixa de temperatura, pressão e resistência de exposição à irradiação solar (ESPÍRITO SANTO, 2017).

Os coletores solares de tubos evacuados assistidos por termossifões, também conhecido como coletores solares de tubo a vácuo de alta pressão, consistem em um tubo de calor e/ou termossifão dentro de um tubo evacuado, utilizando de uma superfície otimizada para absorção de irradiação solar e de um mecanismo para a atenuação dos efeitos de convecção e condução na perda de calor do dispositivo (KALONGIROU, 2003).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) em Engenharia Mecânica é investigar experimentalmente o desempenho térmico de um coletor solar de tubos a vácuo de alta pressão.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desse TCC são:

- Montar um aparato experimental para testes de desempenho de um coletor solar de tubos a vácuo de alta pressão;
- Testar experimentalmente um coletor solar assistido por termossifões sob diferentes condições meteorológicas (dia ensolarado e dia nublado).

1.2 Justificativa

Os coletores solares de tubos a vácuo de alta pressão têm maior eficiência, operam em temperaturas mais altas (na faixa de 70°C até 100°C) e podem ser mais

compactos do que os coletores solares convencionais. Esses coletores solares assistidos por termossifões são amplamente utilizados na Europa, nos Estados Unidos da América, no Canadá e em alguns países da Ásia. No Brasil e na América Latina, eles estão começando a serem utilizados, porém sua tecnologia de construção é estrangeira (BATALHA *et al.*, 2017). Nesse contexto, é de grande relevância a realização desse estudo, de forma que possa impulsionar através do uso dessa tecnologia o aproveitamento do recurso solar em aquecimento de fluidos, seja para uso industrial ou residencial.

1.3 Descrição do Trabalho

No Capítulo 1 foi introduzido o assunto a ser estudado nesse Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica, contextualizando energia e coletores solares. Também foram apresentados os objetivos gerais e específicos bem como a justificativa que motivou a escolha do tema.

No Capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica, trazendo maiores informações através de trabalhos e artigos científicos sobre o assunto abordado na introdução, bem como são listados tipos de coletores solares, dando ênfase ao coletor solar de tubos a vácuo de alta pressão, que é o foco do trabalho realizado.

No Capítulo 3 é retratada a metodologia, onde foram apresentados todo o sistema e instrumentação utilizados, bem como todo o procedimento experimental para realização do presente trabalho.

No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir do procedimento experimental mencionado no Capítulo 3. Esses resultados são expressos através de tabelas e gráficos com detalhamento dos dados experimentais.

No Capítulo 5 são apontadas as conclusões do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica.

Finalmente, após as Referências Bibliográficas utilizadas no TCC, o Anexo A, tem como objetivo apresentar o guia de instruções do piranômetro utilizados durante os testes experimentais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Energia

O ritmo acelerado do crescimento mundial vem mudando o setor elétrico, aumentando a necessidade de redes mais robustas e novas fontes de energia. Para a próxima década está previsto um aumento de 80% na necessidade de transmissão e distribuição de energia no mundo (IEA, 2020).

A utilização de energias renováveis vem crescendo dia após dia e no Brasil a capacidade foi ampliada em 4,5% entre 2018 e 2019. Sendo a energia hidrelétrica a maior fonte e a energia solar o centro desse avanço, com um aumento em 2019 de 37,6% de potência instalada em relação a 2018. Com a diminuição dos custos a partir de políticas de apoio, a geração de energia fotovoltaica custa menos que novas usinas a carvão ou a gás natural em grande parte dos países (IEA, 2020; ANEEL, 2020).

2.1.1 Energia Solar

A energia fornecida pelo sol para a atmosfera terrestre chega a cerca de $1,5 \cdot 10^{18}$ kWh anualmente, o que é equivalente a 104 vezes o percentual de consumo mundial de energia nesse período. Grande parte das fontes de energia hoje utilizadas – hidráulica, biomassa, eólica, combustíveis fósseis e energia dos oceanos – são formas indiretas de energia solar. Portanto é indiscutível a importância dessa energia para a vida em nosso planeta (ANEEL, 2005; BIANCHINI, 2013).

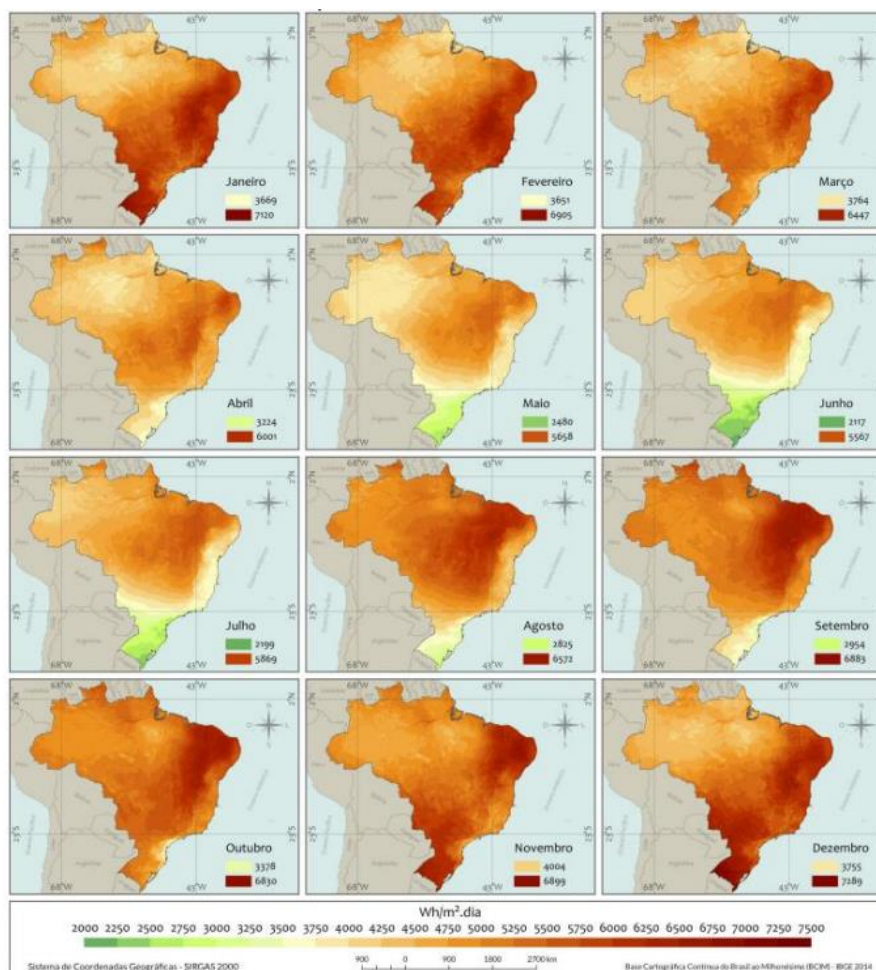
O sol emite energia em forma de radiação eletromagnética. Quando parte da energia é interceptada pela Terra, a radiação de comprimentos de onda distintos interage de forma diferente com os componentes atmosféricos e sofre processos de absorção e espalhamento. A absorção ocorre com moléculas de ozônio (O_3), oxigênio (O_2), dióxido de carbono (CO_2) e vapor d'água. Enquanto o processo de espalhamento da radiação solar é produzido por moléculas de gases atmosféricos e particulados em suspensão. Os processos físicos citados costumam diminuir a irradiância solar e como consequência há o valor máximo de irradiância na superfície terrestre, em torno de $1.000W/m^2$. Esse valor máximo ocorre no momento em que o sol está na posição mais

elevada de modo que a radiação solar percorre a menor espessura de atmosfera (PEREIRA *et al.*, 2017).

A irradiância solar em uma superfície é composta por suas componentes direta, difusa e refletida. A direta apresenta direção de incidência na linha imaginária entre a superfície e o Sol e representa a parcela que não sofreu os processos radioativos de absorção e espalhamento que ocorrem na atmosfera. A componente difusa engloba a radiação vinda de todas as demais direções que são consequência do processo físico de espalhamento. E por fim, a componente refletida ou albedo, é a parte refletida de radiação ao atingir o solo na qual é pouco significativa (PEREIRA *et al.*, 2017; BIANCHINI, 2013).

A Região Sul do Brasil possui a menor média anual de irradiação solar, entretanto ocupa o primeiro lugar no aproveitando da insolação durante o ano. Na Figura 1, são ilustrados os mapas da média mensal de irradiação solar global horizontal no Brasil.

Figura 1 – Média mensal de irradiação global horizontal no Brasil



Fonte: PEREIRA *et al.* (2017)

O aquecimento solar, a geração de eletricidade, a climatização de ambientes são apenas alguns exemplos do avanço atingido nos últimos anos. Um avanço significativo foi conseguido nas últimas décadas tanto no aproveitamento térmico para atendimento de demandas residenciais ou processos industriais, quanto para conversão em eletricidade. (SHAFIEIAN *et al.*, 2019).

A utilização de sistemas solares térmicos é um método eficaz para enfrentar a elevada procura de energia e os seus consequentes desafios e tem um amplo potencial de desenvolvimento. O aquecimento solar de água é a primeira e mais comum aplicação de sistemas solares térmicos. Como a energia solar só é acessível durante o dia, os coletores solares são os componentes mais importantes de todos os sistemas movidos a esse tipo de energia, pois são os responsáveis por absorver a radiação solar e transmiti-la ao fluido de trabalho, para seu aproveitamento posterior (SHAFIEIAN *et al.*, 2019).

2.2 Coletores Solares

Coletores solares são tipos de trocadores de calor utilizados para absorver a energia recebida do sol, e transferi-la para o fluido de trabalho. O fluido de trabalho carrega a energia solar para utilização imediata ou para um reservatório de armazenamento de energia térmica a ser utilizado para demandas diárias, noturnas ou período nublado. O desempenho térmico do coletor solar impacta diretamente no desempenho global do sistema solar térmico (SHUKLA, 2013, apud SHAFIEIAN *et al.*, 2019).

Os coletores solares devem possuir alta capacidade de absorção e transmissão de radiação térmica. No entanto, existem algumas perdas relacionadas a transferência de calor, tanto de mecanismos convectivos quanto pela radiação térmica da superfície responsável pela absorção da irradiação solar. Desse modo, é desejável a menor emitância possível, visando a redução das perdas térmicas (DUFFIE & BECKMAN, 1980 apud SIQUEIRA, 2009).

Fundamentalmente, existem três tipos de coletores solares: coletores solares de placa plana (CSPPs); coletores solares de tubos evacuados (CSTEs), também conhecidos como coletores solares a vácuo de baixa pressão; e coletores solares de

tubos evacuados assistidos por tubos de calor (CSTCs), também conhecidos como coletores solares a vácuo de alta pressão.

2.2.1 Coletores Solares de Placa Plana

Os coletores solares de placa plana, ilustrados na Fotografia 1, são fabricados e utilizados em uma ampla gama de formas. Embora esses coletores solares sejam duráveis, baratos e fabricados facilmente, a sua aplicação é viável técnica e economicamente apenas em climas quentes e ensolarados e/ou durante o verão. Isso acontece pois sua eficiência atinge 75% nesse período, porém cai para menos de 40% quando a intensidade da radiação solar e a temperatura ambiente não são altas o suficiente. Esses coletores solares também não trabalham bem com umidade e temperaturas de funcionamento muito elevadas, pois esses fatores afetam a sua durabilidade e diminuem a eficiência global do sistema de energia solar em que são utilizados. Para melhorar o desempenho desse coletor solar seu custo operacional e de manutenção aumentariam potencialmente (KALOGIROU, 2014 apud SHAFIEIAN *et al.*, 2018).

Fotografia 1 – Coletor solar de placa plana



Fonte: GreenSolar (2019)

2.2.2 Coletores Solares de Tubos Evacuados

Os coletores solares de tubos evacuados foram introduzidos para resolver os desafios enfrentados pelos coletores solares de placa plana, especialmente para

melhorar a sua eficiência a altas temperaturas de funcionamento. Em linhas gerais esse tipo de coletor solar possui absorvedores e transmissores à vácuo e seletivos no espaço entre as duas camadas de tubos de vidro, para diminuir as perdas térmicas, melhorando o desempenho do coletor solar mesmo em ambientes com temperatura mais baixa e menor radiação solar, situações encontradas em condições climáticas frias (WINDOW, 1984 apud SHAFIEIAN *et al.*, 2018).

Esses coletores solares possuem um custo inicial elevado, entretanto o seu custo de manutenção é baixo. Na China, a utilização desse tipo de coletor solar aumentou de 88% em 2003 para 95% em 2009 (LEE, 2011 apud SHAFIEIAN *et al.*, 2018). Além do cuidado necessário para manusear esse tipo de coletor solar devido a sua matéria prima e fragilidade, a grande desvantagem do coletor solar a vácuo de baixa pressão é a possibilidade do sobreaquecimento. Pois ele pode ultrapassar facilmente o limite de temperatura para aplicações domésticas de 100°C (RASSAMAKIN, 2013 apud SHAFIEIAN *et al.*, 2018).

Fotografia 2 – Coletor solar de tubos evacuados



Fonte: Autoria Própria (2021)

2.2.3 Coletores Solares de Tubos Evacuados Assistidos por Tubos de Calor

Os coletores solares de tubos evacuados assistidos por tubos de calor, também conhecidos como coletores solares a vácuo de alta pressão, foram introduzidos para superar as limitações dos primeiros dois grupos de coletores solares, aproveitando as vantagens das tecnologias de tubo de calor assistido por gravidade e dos coletores solares de tubos evacuados (SHAFIEIAN *et al.*, 2019). Eles são um novo tipo de coletor solar que podem absorver e transferir energia solar de forma mais eficiente. São também capazes de absorver energia e transferi-la para o fluido de trabalho com as mais baixas resistências térmicas e hidráulicas (AZAD, 2008 apud SHAFIEIAN *et al.*, 2018).

Fotografia 3 – Coletor solar de tubos evacuados com tubos de calor

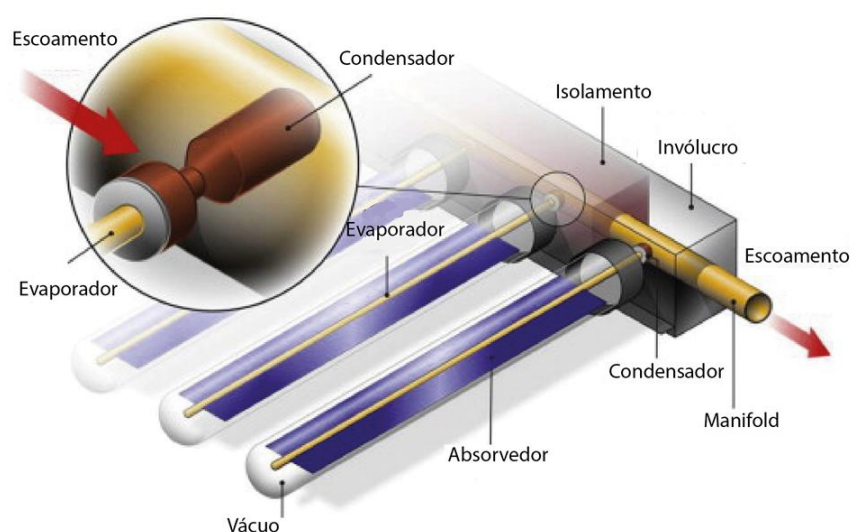


Fonte: Autoria Própria (2021)

Nesses coletores solares, os tubos de calor e/ou termossifões funcionam com a aplicação do calor latente de vaporização ao invés de calor sensível e a transferência de calor ocorre apenas por processo de mudança de fase do fluido de trabalho. Conseqüentemente há a redução da queda de temperatura, aumento da capacidade de transferência de calor, diminuição da área de contato necessária e do peso (BEJAN, 2003 apud SHAFIEIAN *et al.*, 2019).

Conforme é ilustrado na Figura 2, para o funcionamento do coletor solar de tubos a vácuo de alta pressão, os evaporadores dos termossifões estão localizados dentro dos tubos de vidro evacuados, de forma que a radiação solar incidente transfira energia ao fluido de trabalho dos termossifões, e, posteriormente, para a água a alta pressão que estará passando nos condensadores dos termossifões através de um *manifold*.

Figura 2 – Diagrama esquemático de um coletor solar de tubos evacuados assistido por termossifões.



Fonte: Adaptado de Rossi et al. (2021).

Entre as vantagens do tubo de calor assistido pela gravidade (termossifão) há a facilidade na circulação do fluido de trabalho, eliminando a necessidade de dispositivos mecânicos para impulsionamento. Além disso, eles são capazes de controlar sua temperatura de funcionamento, evitando o sobreaquecimento como ocorre nos coletores solares a vácuo de baixa pressão. Ressalta-se também a longa duração de funcionamento e a baixa probabilidade de congelamento e corrosão (BIENERT *et al.*, 1976 apud SHAFIEIAN *et al.*, 2019).

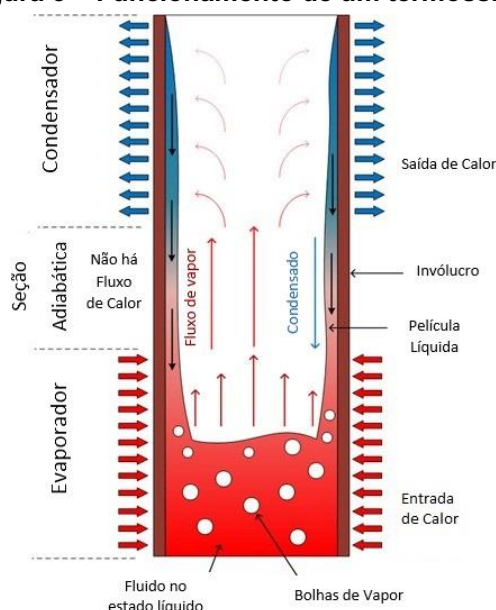
Por essas características e vantagens, os coletores solares de tubos a vácuo de alta pressão tornaram-se uma opção muito atrativa nos últimos anos, principalmente para uso doméstico devido sua facilidade na instalação.

2.2.3.1 Termossifões

Os termossifões são constituídos por tubos metálicos evacuados e hermeticamente fechados, preenchidos por um fluido de trabalho. Os termossifões são semelhantes aos tubos de calor, pois ambos operam em um ciclo bifásico fechado e utilizam o calor latente de vaporização para transferir calor por pequenos gradientes de temperatura, sendo assim altamente eficientes (REAY *et al.*, 2014). A diferença entre esses dispositivos passivos de transferência de calor é que o fluido de trabalho retorna à seção do evaporador devido à capilaridade nos tubos de calor, enquanto nos termossifões isso ocorre devido à gravidade, portanto o condensador deve estar sempre acima do evaporador (KRAMBECK *et al.*, 2021).

Um termossifão pode possuir de duas a três regiões que recebem o nome de evaporador, seção adiabática e condensador, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 3. O evaporador é a região que contém o fluido de trabalho no estado líquido, sendo então aquecido por uma fonte quente e ocasionando a evaporação do fluido de trabalho, que, devido à diferença de pressão, desloca-se para a região mais fria, denominada de condensador. No condensador o vapor gerado anteriormente dissipa energia como calor para uma fonte fria e é condensado, retornando ao evaporador como líquido. A seção adiabática está localizada entre o evaporador e o condensador, podendo ou não fazer parte da configuração do termossifão, pois não realiza troca térmica com o ambiente externo (MANTELLI, 2021).

Figura 3 – Funcionamento de um termossifão.



Fonte: Adaptado de Dimbarre (2021)

Os tubos de calor e/ou termossifões são um dos mais eficientes dispositivos de transferência de calor com maior condutividade térmica efetiva em comparação com o próprio cobre. A escolha do fluido de trabalho adequado afeta o desempenho dos termossifões significativamente e depende muito das propriedades dos fluidos de trabalho. Dentre as propriedades destacam-se: boa estabilidade térmica, boa molhabilidade, pressão de vapor equivalente com a temperatura de trabalho, alto calor latente de vaporização, alta condutividade térmica, baixa viscosidade nas formas líquidas e de vapor e uma alta tensão superficial (WALLIN, 2012 apud SHAFIEIAN *et al.*, 2019).

2.2.3.2 Eficiência Térmica

Em um coletor solar de tubos evacuados assistido por termossifões, a água a ser aquecida atinge o primeiro termossifão na seção do *manifold* com a maior diferença de temperatura entre ela e o condensador do termossifão. A água absorve energia térmica e sua temperatura aumenta enquanto ela se move em direção ao próximo termossifão. Conseqüentemente, a temperatura da água na saída de cada termossifão é igual à temperatura de entrada no próximo termossifão dentro do *manifold*.

A eficiência térmica ou eficiência de Primeira Lei Termodinâmica do coletor solar ($\eta_{I,coletor\ solar}$) pode ser determinada como (AZAD, 2008):

$$\eta_{I,coletor\ solar} = \frac{\dot{m}_{\acute{a}gua} c_{p,\acute{a}gua} (T_{sai,\acute{a}gua} - T_{ent,\acute{a}gua})}{G_{solar} A_{coletor\ solar}}, \quad (1)$$

sendo que, $\dot{m}_{\acute{a}gua}$ é a vazão mássica de água dentro do *manifold* do coletor solar [kg/s], $c_{p,\acute{a}gua}$ é o calor específico a pressão constante da água [J/kgK] e $T_{sai,\acute{a}gua}$ e $T_{ent,\acute{a}gua}$ são as temperaturas médias de saída e de entrada da água no *manifold* do coletor solar [°C], respectivamente, $A_{coletor\ solar}$ é a área do coletor solar [m²] e G_{solar} é a irradiância solar [W/m²].

3 METODOLOGIA

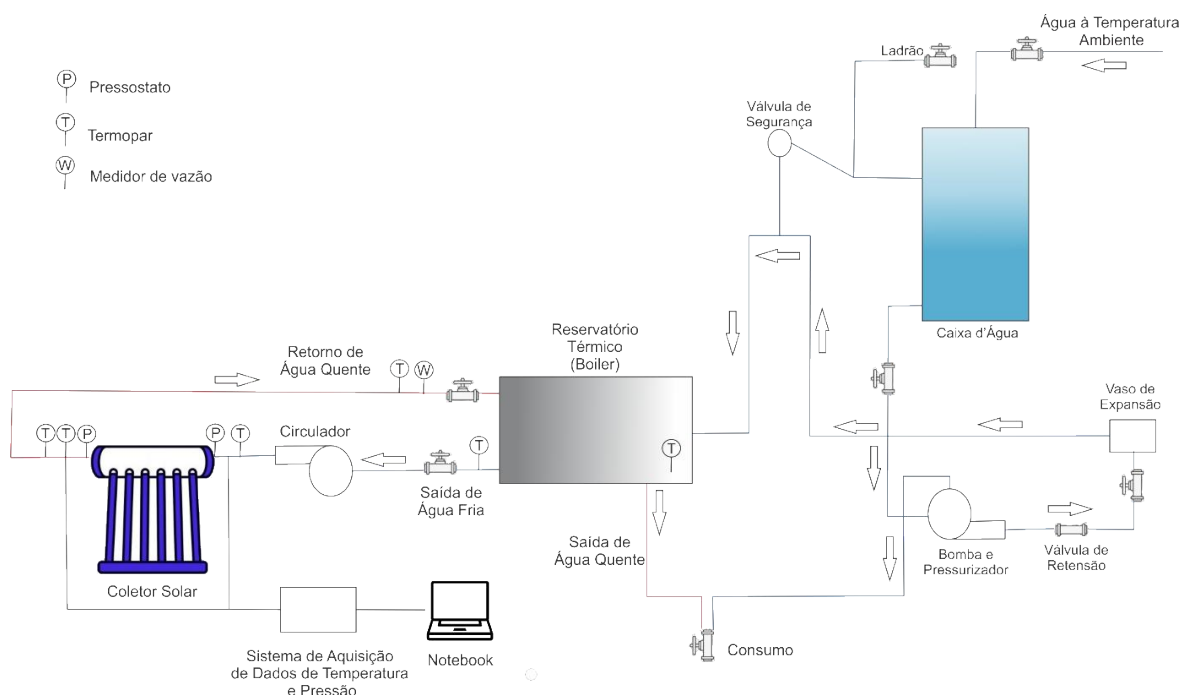
Neste capítulo são apresentados o aparato experimental, os procedimentos experimentais e a método de análise de incerteza que foram utilizados na execução desse Trabalho de Conclusão de Curso. Essa pesquisa científica é de natureza aplicada, com abordagem qualitativa-quantitativa e de caráter exploratório, que utiliza procedimentos teórico-experimentais.

Os testes experimentais foram executados no Laboratório de Energia Solar (LabSOLAR) vinculado ao Programa de Pós-Graduação (Mestrado) em Engenharia Mecânica (PPGEM) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Campus Ponta Grossa*.

3.1 Aparato Experimental

O aparato experimental utilizado para o desenvolvimento do presente TCC é representado esquematicamente na Figura 4, onde é composto por um sistema fechado de circulação de água a alta pressão e por um coletor solar de tubos evacuados assistido por dez termossifões, que são descritos em detalhes nas seções subsequentes.

Figura 4 – Diagrama esquemático do aparato experimental



Fonte: Autoria Própria (2021)

3.1.1 Sistema fechado de circulação de água

O sistema fechado de circulação de água a alta pressão, mostrado na Fotografia 4, é composto por uma caixa d'água *Fortlev™* com capacidade de 310 litros, um reservatório térmico (*boiler*) *Ribersol™* com capacidade de 100 litros, um conjunto bomba *HIODA™ HP500AH 1/2HP* e pressostato *Laspa™ LS-8*, um vaso de expansão *HIODA™* com capacidade de 24 litros, válvula de segurança com manômetro, tubos, conexões e acessórios, painel de comando elétrico com controlador *Tholz™ TLZ*, válvula de retenção, medidor de vazão eletromagnético *Krohne™* e circulador *HIODA™ HBS/100*. Esse sistema está instalado em um mezanino interno existente no Laboratório de Energia Solar (LabSOLAR) – Sala J1-012.

Fotografia 4 – Sistema fechado de circulação de água a alta pressão



Fonte: Autoria Própria (2021)

A caixa d'água tem como função simular o funcionamento de uma residência, atuando como reservatório para fornecimento de água para todo o sistema. Ao sair do reservatório a água passa por um sistema bomba-pressostato que possui como função pressurizar a rede de água do sistema fechado de circulação, permitindo o preenchimento do reservatório térmico (*boiler*). O pressostato atua de forma a ligar e desligar a bomba, ligando-a quando há um desequilíbrio de pressão na rede e

desligando-a no estado de equilíbrio. Toda a tubulação da rede de água fria é de tubo de PVC soldável *Tigre™* de 25mm de diâmetro. Antes de chegar ao reservatório térmico (*boiler*) a água fria passa pelo vaso de expansão, que atua como um equipamento de segurança e proteção, tendo como função absorver e regularizar qualquer variação de pressão brusca no sistema, enchendo quando há picos de pressão e esvaziando em quedas de pressão, suavizando tais variações. Além disso, uma válvula de segurança é utilizada para evitar que a rede trabalhe a pressões maiores que 4 bar. Na outra extremidade do reservatório térmico (*boiler*) encontram-se a saída de água para o coletor solar, o retorno da água e também a saída de água para o consumo. Na saída de água foi utilizado um circulador de água, responsável pela circulação de água na rede quente do sistema, ao passo que no retorno de água foi instalado um medidor de vazão eletromagnético. As tubulações utilizadas para saída e retorno de água são de cobre com 22mm, enquanto que a tubulação do consumo é feita em tubo *Aquaterm Tigre™* de 25mm de diâmetro.

Na Fotografia 4 há um sistema de aquisição de dados do medidor de vazão eletromagnético *Krohne™*, um sistema de aquisição de dados *Agilent™* 34970A com um multiplexador de 20 canais *Agilent™* 34901A e um *notebook Dell™*. A partir desses equipamentos foi realizada a aquisição dos dados de temperatura e de pressão na entrada e na saída da água no *manifold* do coletor solar de tubos evacuados assistido por termossifões bem como as temperaturas na entrada e na saída do reservatório térmico (*boiler*). Para tal, foram utilizados termopares do tipo K *Omega Engineering™* e transdutores de pressão *IFM™* PN2024. A vazão volumétrica também foi medida durante os testes experimentais.

As tubulações de saída e retorno da água da rede quente seguem até um pátio externo ao Laboratório de Energia Solar (LabSOLAR) no exterior do Bloco J1 da UTFPR/Ponta Grossa – Fotografia 5. Tais tubulações foram então conectadas a mangueiras e essas mangueiras conectadas no coletor solar de tubos a vácuo de alta pressão, permitindo a saída e retorno da água ao reservatório térmico. O coletor solar de tubos evacuados assistido por termossifões foi instalado no piso do referido pátio externo. Todas as tubulações da rede quente possuem isolamento térmico de polietileno expandido, sendo que as tubulações no exterior do bloco também possuem uma camada de isolamento refletivo. Dessa forma foi reduzido os efeitos externos de perdas de calor no percurso realizado pela água.

Fotografia 5 – Pátio Externo do Laboratório de Energia Solar (LabSOLAR/DAMEC)



Fonte: Autoria Própria (2021)

3.1.2 Dados Meteorológicos

Na Fotografia 6 pode ser observado um piranômetro *Kipp&ZonenTM CMP3* que foi utilizado para obtenção da irradiância solar e uma estação meteorológica que foi responsável por coletar dados para análise das condições meteorológicas durante a execução dos testes experimentais. Nota-se que o piranômetro está inclinado a 25° correspondente a inclinação do coletor solar de tubos a vácuo de alta pressão.

Fotografia 6 - Piranômetro e estação meteorológica



Fonte: Autoria Própria (2021)

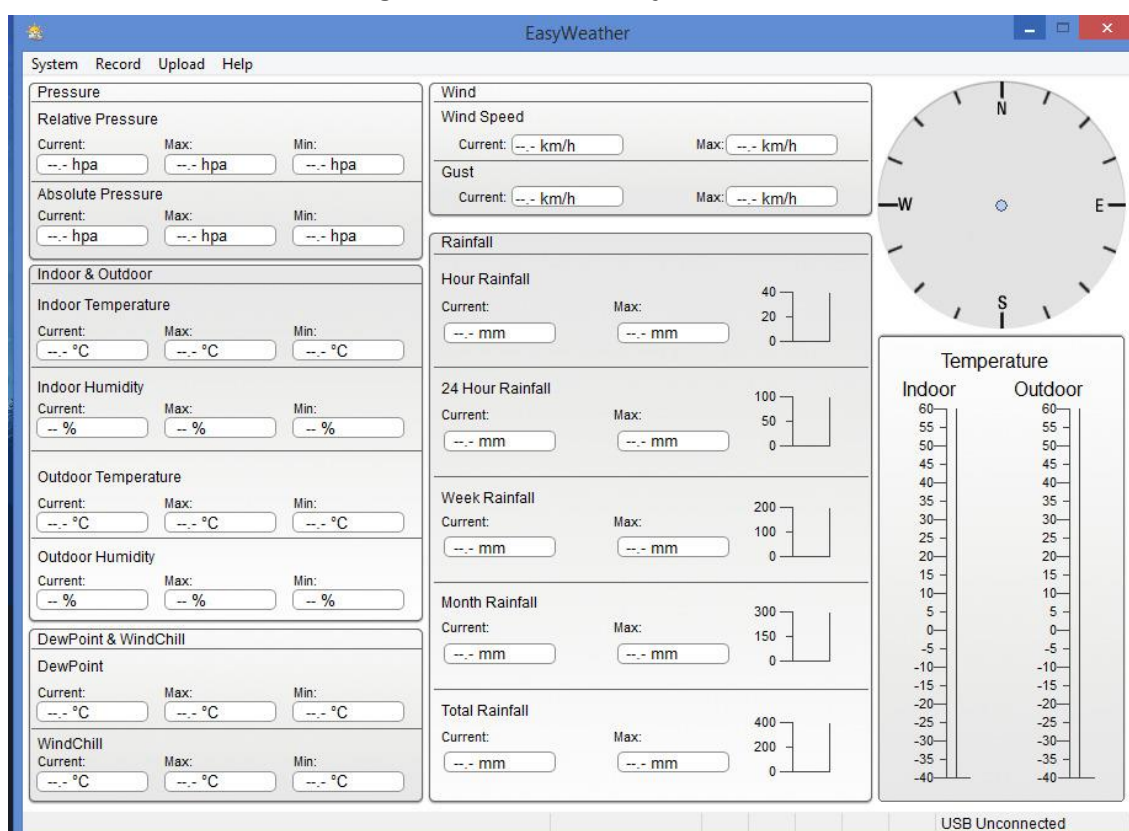
A irradiância solar obtida através do piranômetro, foi calculada utilizando a Equação (2), que foi descrita também no guia de instruções do piranômetro, no Anexo A (KIPP & ZONEN, 2018).

$$G_{solar} = \frac{U_{emf}}{S}, \quad (2)$$

sendo que, G_{solar} representa a irradiância solar em $[W/m^2]$, U_{emf} é a voltagem de saída em $[\mu V]$ e S é a sensibilidade do aparelho, cujo valor é de $18,64 \mu V/W/m^2$.

Os dados obtidos pela estação meteorológica foram armazenados através do *software* da fabricante, chamado *EasyWeather*TM, uma imagem da interface gráfica é mostrada na Figura 5. Para maiores informações sobre a estação meteorológica, é possível acessar o site do fabricante com o *QR Code* que está disponível abaixo da Figura 5.

Figura 5 – Interface *EasyWeather*TM



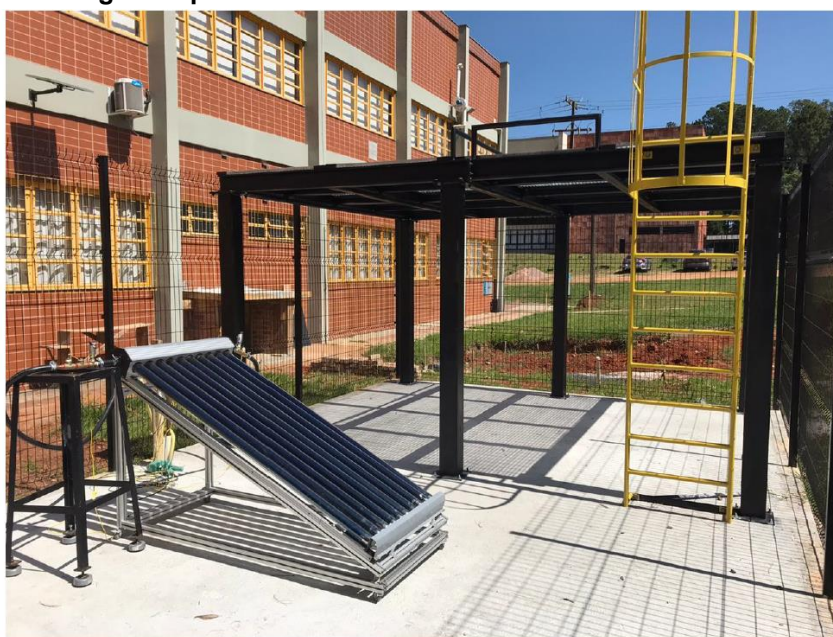
3.2 Procedimento Experimental

Para execução dos testes experimentais, o procedimento consiste em inicialmente ligar o sistema de aquisição de dados descrito na Fotografia 4, realizar a fixação das mangueiras entre o coletor solar de tubos a vácuo de alta pressão e o circuito fechado de circulação forçada de água, e então ligar a tubulação de água. Foram utilizadas mangueiras hidráulicas de 20 bar (300 psi) com diâmetro de 22mm – 7/8" onde foram adaptados termopares *Omega Engineering™* do tipo K para medição da temperatura de entrada e de saída do coletor.

O desempenho térmico do coletor solar de tubos a vácuo de alta pressão foi obtido a partir da determinação das temperaturas de operação utilizando termopares posicionados estrategicamente no sistema experimental e de um sistema de aquisição de dados. Os valores de irradiância solar foram obtidos utilizando o piranômetro. Os testes experimentais com esse coletor solar de tubos evacuados assistido por dez termossifões foram executados para verificar o desempenho térmico do coletor solar sob condições reais de operação em diferentes condições meteorológicas.

Na Fotografia 7 é mostrada uma fotografia da área externa do LabSOLAR/DAMEC com o coletor solar de tubos à vácuo de alta pressão que foi utilizado para realização dos testes experimentais.

Fotografia 7 – Montagem experimental de um coletor solar de tubos a vácuo de alta pressão



Fonte: Aatoria própria (2021)

Como mencionado anteriormente, o coletor solar de tubos a vácuo de alta pressão que foi estudado nesse Trabalho de Conclusão de Curso é composto por 10 tubos evacuados contendo em seu interior termossifões de cobre, um *manifold* de cobre para passagem de água sobre os condensadores dos termossifões e uma estrutura de perfil de alumínio estrutural leve de 40mm por 40mm, que foi projetado com as dimensões de 1,80m na horizontal, 0,85m na vertical e 2,00m na diagonal. Esse suporte foi inclinado a 25°, que é o ângulo correspondente a latitude da cidade de Ponta Grossa no estado do Paraná: 25°05'42" Sul.

3.3 Incertezas Experimentais

Todo procedimento experimental está sujeito a incertezas, tanto de calibração e precisão do instrumento utilizado, quanto de aquisição de dados. Portanto foi realizada uma análise de incertezas experimentais para estimar esse valor, através do método de incerteza descrito por Holman (1994).

Tendo como princípio a combinação de incerteza de grandeza relacionada, Kline & McClintok (1953) propuseram que a incerteza ΔR de um resultado $R = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ com medidas em x_1, x_2, \dots, x_n pode ser expressa por:

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \partial x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \partial x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \partial x_n\right)^2}. \quad (3)$$

Na análise de incerteza foram consideradas apenas as grandezas medidas experimentalmente na Equação (1), ou seja, as temperaturas de entrada e saída de água no *manifold* e a irradiância solar.

4 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais do desempenho térmico de um coletor solar de tubos a vácuo de alta pressão considerando duas condições meteorológicas: dia nublado (condição de sol entre nuvens) e dia ensolarado. Os testes experimentais foram executados considerando uma vazão volumétrica de água no *manifold* do coletor solar de 0,8 m³/h, com o coletor solar inclinado a 25°, conforme a latitude de Ponta Grossa, com duração de aproximadamente 7 horas. A incidência da irradiação solar foi medida através do piranômetro e os dados meteorológicos foram obtidos a partir da estação meteorológica. Adotou-se como calor específico a pressão constante da água o valor de 1,012 kJ/kgK e para a área do coletor solar o valor de 1,572m² (SHAFIEIAN *et al.*, 2019).

4.1 Dia Nublado (Sol entre Nuvens)

O teste experimental realizado em um dia de sol entre nuvens, condição de “dia nublado”, com duração de 7 horas, tem seus resultados apresentados em intervalos de 1 hora, sendo que a leitura durante o experimento foi de 10 em 10 segundos. Na Tabela 1 são apresentados o instante do tempo em que a medição foi realizada, as temperaturas de entrada e saída da água no *manifold* do coletor solar de tubos a vácuo de alta pressão e a irradiância solar.

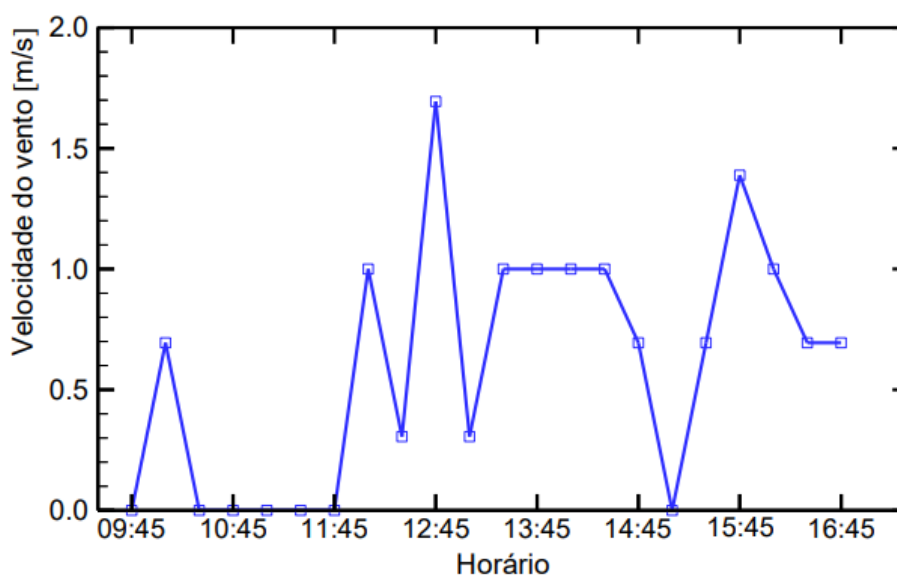
Tabela 1 – Dados experimentais obtidos em um dia de sol entre nuvens

Horário [h]	Temperatura na Entrada do Coletor Solar [°C]	Temperatura na Saída do Coletor Solar [°C]	Irradiância Solar Direta [W/m ²]
09:45	23,1	23,7	550,0
10:45	27,0	28,6	733,9
11:45	30,1	32,0	857,3
12:45	33,4	35,2	919,1
13:45	36,2	38,0	899,0
14:45	38,4	40,3	807,7
15:45	39,9	41,6	602,3
16:45	40,5	41,5	340,1

Fonte: Autoria Própria (2021)

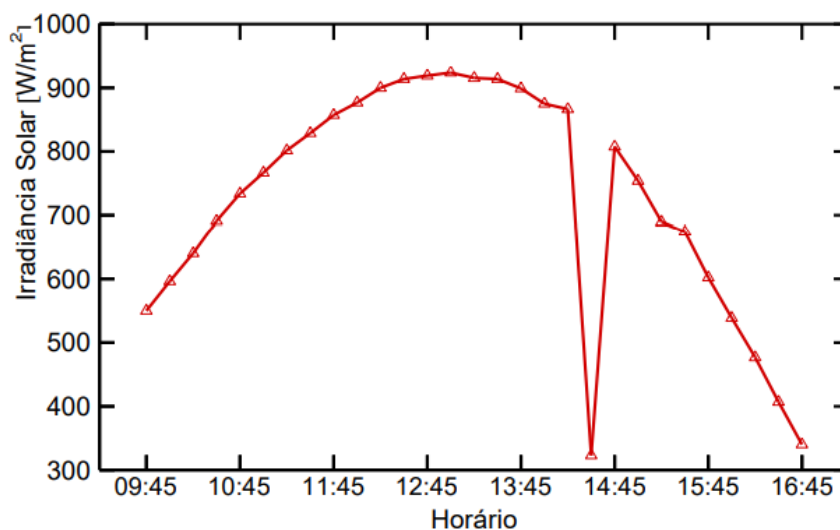
Com base nos dados obtidos através da estação meteorológica, para esse teste experimental, executado no dia 20 de setembro de 2021, a temperatura ambiente média foi de 22,0°C, umidade relativa do ar foi em média de 76% e a variação da velocidade do vento durante o dia, em [m/s], foi apresentada no Gráfico 3. Pode ser observado que a velocidade do vento chegou a atingir 1,7m/s em torno das 12:30. No Gráfico 4 pode ser observada a variação da irradiância solar em função do horário do dia 20/09/2021.

Gráfico 3 – Velocidade do vento em função do horário no dia 20/09/2021



Fonte: Autoria Própria (2021)

Gráfico 4 – Variação da irradiância solar em função do horário em um dia nublado

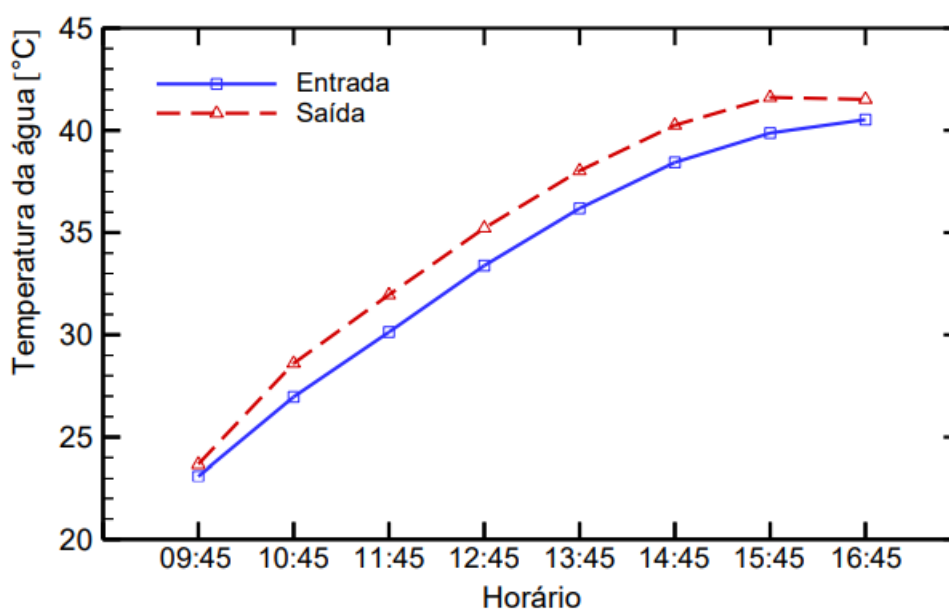


Fonte: Autoria Própria (2021)

É possível observar que em determinados pontos do Gráfico 4, como próximo as 14:45, a irradiância solar cai abruptamente, isso ocorre devido a formação de nuvens no céu no momento em que estava sendo realizado o teste experimental.

No Gráfico 5 é apresentado o comportamento das temperaturas de entrada e saída de água no coletor solar de tubos a vácuo de alta pressão em função do horário em que foram realizadas as medições experimentais. À medida que o fluido de trabalho (água) passa pelos condensadores dos termosifões no *manifold*, sua temperatura aumenta.

Gráfico 5 – Variação da temperatura da água do coletor solar em função do horário em um dia nublado



Fonte: Autoria Própria (2021)

Pode-se notar que as maiores diferenças de temperatura entre a entrada e a saída da água no *manifold* do coletor solar, com média de 1,8°C, são encontrados no intervalo de tempo entre 12:45 e 13:45, o que coincide com os maiores índices de irradiância solar, em torno de 900 W/m².

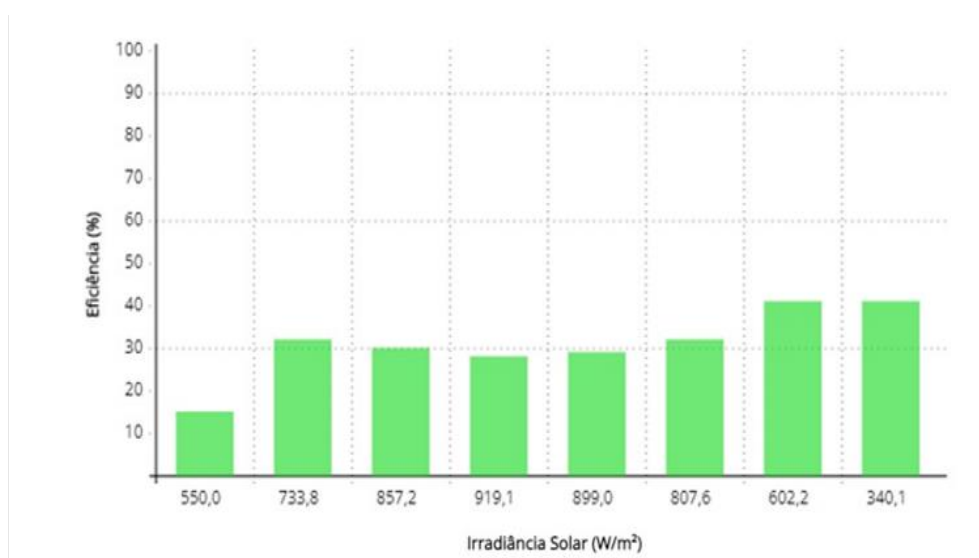
Na Tabela 2 são apresentados os resultados obtidos para cálculo da eficiência térmica do coletor solar de tubos a vácuo de alta pressão através da Primeira Lei da Termodinâmica. No Gráfico 6 é apresentado o comportamento da eficiência térmica do coletor solar de tubos a vácuo em função da irradiância solar durante o dia nublado.

Tabela 2 – Eficiência térmica calculada através dos dados experimentais

Horário [h]	ΔT [°C]	Irradiância Solar Direta [W/m ²]	Eficiência Térmica [%]	Incerteza Experimental [%]
09:45	0,6	550,0	15,1	±4,8
10:45	1,6	733,8	32,2	±4,8
11:45	1,8	857,2	30,6	±4,8
12:45	1,8	919,1	28,8	±4,8
13:45	1,8	899,0	29,5	±4,8
14:45	1,8	807,6	32,5	±4,8
15:45	1,7	602,2	41,7	±4,8
16:45	1,0	340,1	41,9	±4,8

Fonte: Autoria Própria (2021)

Gráfico 6 – Eficiência térmica do coletor solar de tubos a vácuo de alta pressão em um dia nublado



Fonte: Autoria Própria (2021)

Conforme a Equação (1) para o cálculo da eficiência térmica, as grandezas de temperatura e irradiância solar são diretamente proporcionais. Portanto mesmo que a diferença de temperatura da água na entrada e na saída do *manifold* do coletor solar seja menor a eficiência acaba aumentando. A maior eficiência térmica obtida nesse teste experimental do dia 20 de setembro de 2021 foi de 41,9% às 16:45.

4.2 Dia Ensolarado

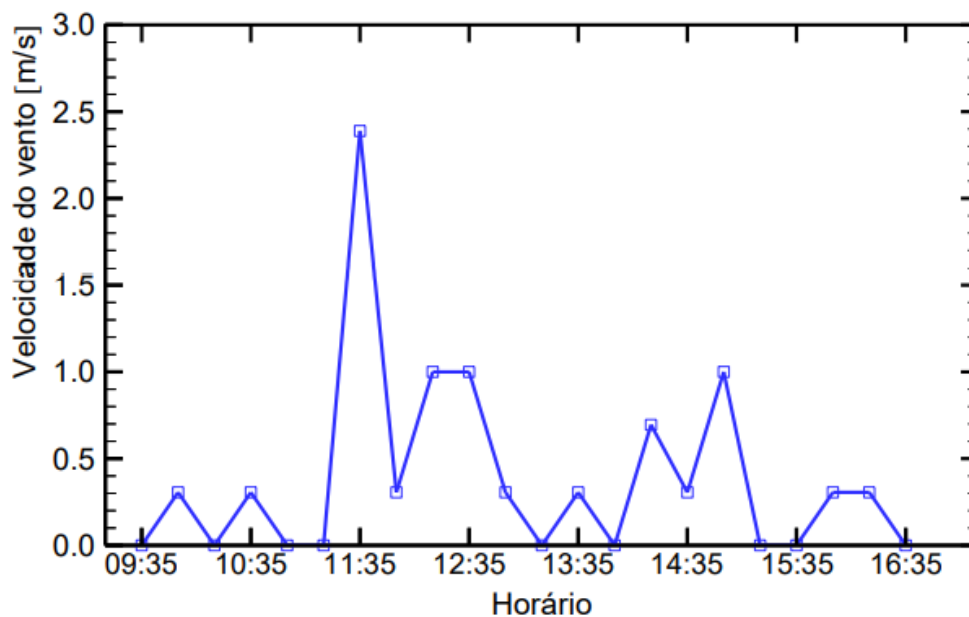
O coletor solar de tubos a vácuo de alta pressão considerando vazão volumétrica da água de 0,8 m³/h e inclinação de 25° foi testado experimentalmente para um dia ensolarado com duração de 7 horas de teste. Este teste ocorreu no dia 27 de setembro de 2021. Seus resultados são apresentados através da Tabela 3, em intervalos de 1 hora.

Tabela 3 – Dados experimentais obtidos em um dia ensolarado

Horário [h]	Temperatura na Entrada do Coletor Solar [°C]	Temperatura na Saída do Coletor Solar [°C]	Irradiância Solar Direta [W/m ²]
09:35	26,3	27,3	477,9
10:35	28,4	29,7	711,7
11:35	31,4	32,7	880,2
12:35	34,5	36,9	1.025,9
13:35	37,4	39,3	1.079,7
14:35	39,3	41,2	1.070,2
15:35	43,4	45,2	792,7
16:35	43,9	44,9	560,8

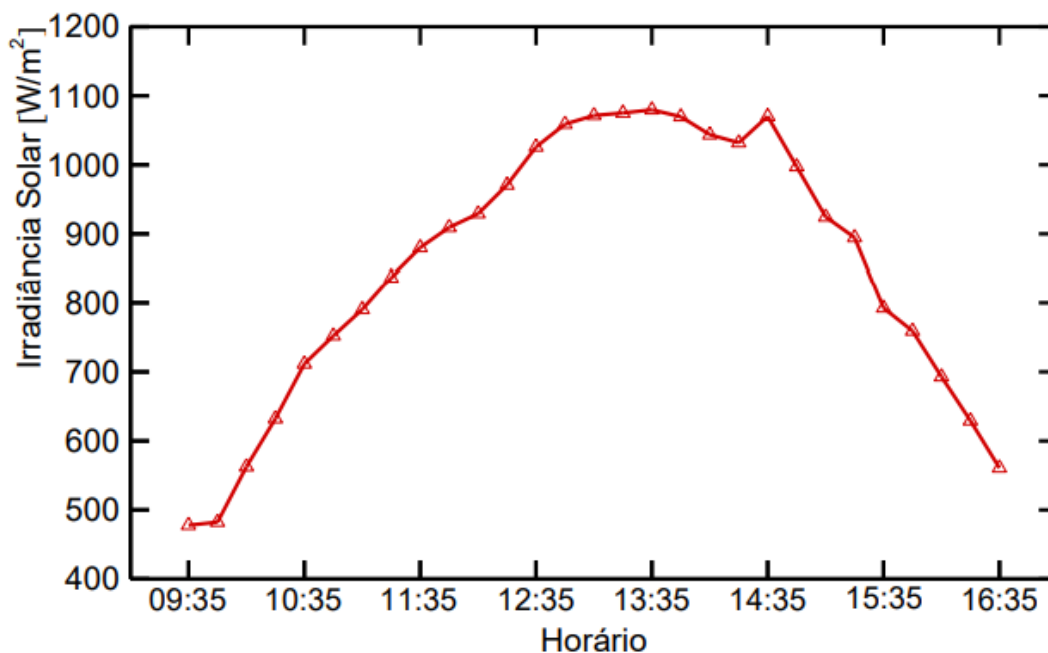
Fonte: Autoria Própria (2021)

Em relação às condições meteorológicas, no dia do teste experimental a temperatura ambiente média foi de 24,0°C, umidade relativa do ar foi em média de 54% e a velocidade do vento chegou a atingir 2,4m/s por volta das 11:30, conforme Gráfico 7.

Gráfico 7 – Velocidade do vento em função do horário no dia 27/09/2021

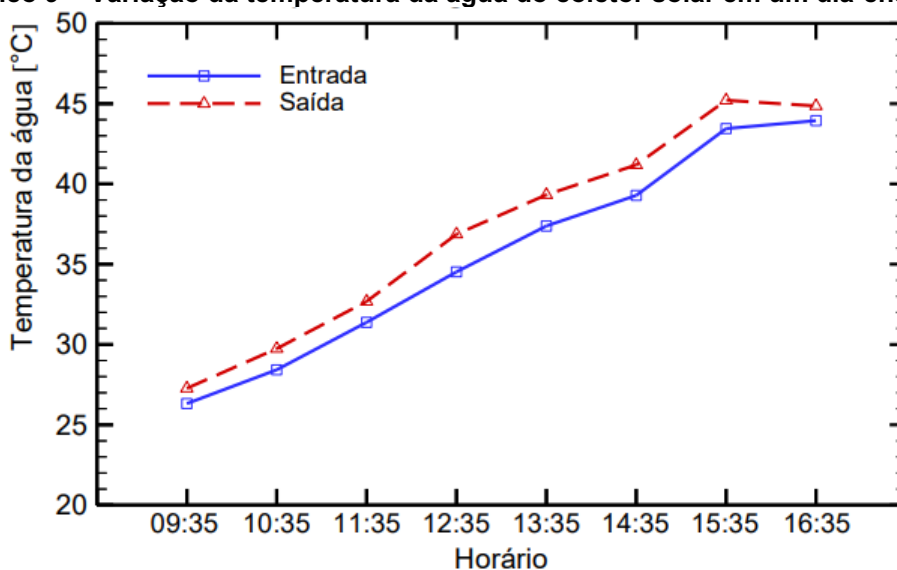
Fonte: Autoria Própria (2021)

Nos Gráficos 8 e 9 são apresentadas as variações da irradiância solar e da temperatura da água na entrada e na saída no *manifold* do coletor solar em função do horário, respectivamente.

Gráfico 8 – Variação da irradiância solar em função do horário em um dia ensolarado

Fonte: Autoria Própria (2021)

Gráfico 9 – Variação da temperatura da água do coletor solar em um dia ensolarado



Fonte: Autoria Própria (2021)

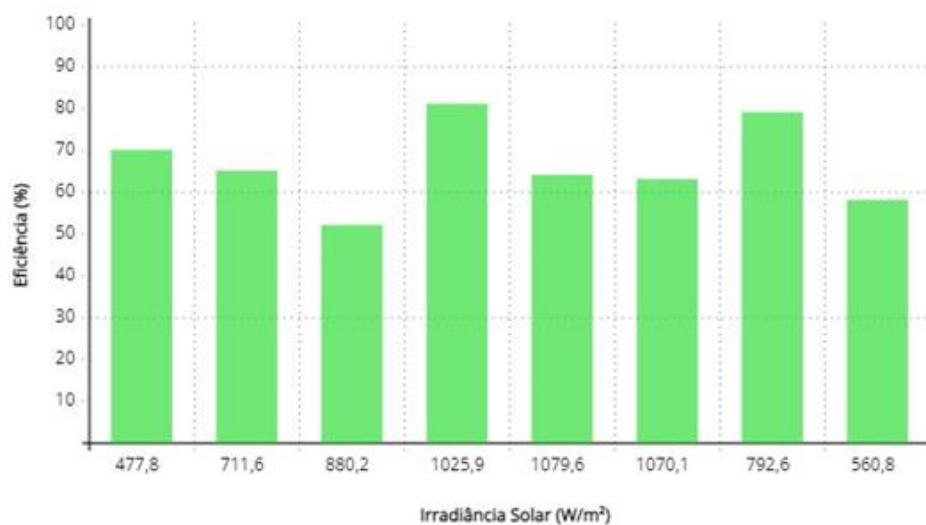
É perceptível que as temperaturas envolvidas alcançaram valores mais elevados nesse experimento considerando um dia ensolarado, com a temperatura de saída da água do coletor solar atingindo 45,0°C. Devido à ausência de nuvens, pode ser observado também uma maior irradiância solar, onde o ponto máximo está deslocado mais para a direita em relação ao Gráfico 4 considerando um dia nublado. Ou seja, o valor foi crescente por um maior período de tempo até atingir seu ponto máximo e começar a decrescer. Dessa forma, foram construídos a Tabela 4 e o Gráfico 10 para tratamento dos dados experimentais e cálculo da eficiência térmica do coletor solar de tubos a vácuo de alta pressão.

Tabela 4 – Eficiência térmica calculada através dos dados experimentais

Horário [h]	ΔT [°C]	Irradiância Solar Direta [W/m ²]	Eficiência Térmica [%]	Incerteza Experimental [%]
09:35	1,0	477,9	70,8	±4,8
10:35	1,3	711,7	66,0	±4,8
11:35	1,3	880,2	52,7	±4,8
12:35	2,3	1.025,9	81,4	±4,8
13:35	1,9	1.079,7	64,1	±4,8
14:35	1,9	1.070,2	63,2	±4,8
15:35	1,8	792,7	79,1	±4,8
16:35	0,9	560,8	58,2	±4,8

Fonte: Autoria Própria (2021)

Gráfico 10 – Eficiência térmica do coletor solar de tubos de alta pressão em um dia ensolarado



Fonte: Autoria Própria (2021)

Como consequência dos maiores valores de temperatura e irradiância solar alcançados durante os testes experimentais considerando um dia ensolarado, tem-se uma maior eficiência térmica do coletor solar, dado que foram alcançadas temperaturas mais altas. Sendo a maior diferença de temperatura entre a entrada e a saída de água no *manifold* do coletor solar o valor 2,3°C onde resultou na eficiência de Primeira Lei da Termodinâmica de 81,4%. Os valores de irradiância solar que ultrapassam 1.000 W/m² comprovam o sol pleno durante o experimento realizado.

Conforme proposto na Metodologia de TCC, foi realizada uma análise da incerteza experimental do procedimento executado. Como os valores do calor específico a pressão contrante da água ($C_{p,água}$), e da área do coletor solar ($A_{coletor\ solar}$) foram tabelados, no cálculo da incerteza foram consideradas apenas as incógnitas da Equação (1) que foram medidas experimentalmente. Dessa forma, como apresentado nas Tabelas 2 e 4, o valor de incerteza experimental para a eficiência térmica do coletor solar de tubos a vácuo de alta pressão foi de $\pm 4,8\%$ para todos os casos considerados.

5 CONCLUSÕES

Neste Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica foi realizada uma investigação experimental do desempenho térmico de um coletor solar de tubos a vácuo de alta pressão, através da montagem do aparato experimental e execução de testes experimentais sob condições reais de operação em dias de diferentes condições meteorológicas na cidade de Ponta Grossa no estado do Paraná durante o final do mês de setembro de 2021.

Dos resultados experimentais obtidos, foi possível o cômputo da eficiência do coletor solar por meio da aplicação da Primeira Lei da Termodinâmica. A eficiência térmica atingiu um valor de 41,9% às 16:45 em um dia nublado (de sol entre nuvens) e 81,4% às 12:35 em um dia ensolarado. Pode ser notado que a irradiância solar para o dia que havia nuvens chegou ao valor máximo de 919 W/m². Enquanto para o dia de tempo aberto ultrapassou o valor de sol pleno de 1.000 W/m² em mais de uma das medições coletadas. Para ambos os casos, quando se inicia a queda da incidência solar as temperaturas de entrada e saída da água no *manifold* do coletor solar começam a estabilizar, o que gera uma menor diferença de temperaturas em função do tempo.

Ressalta-se que os coletores solares convencionais (do tipo placa plana) operam com eficiência térmica na faixa de 30%. Para os coletores solares de tubos a vácuo de alta pressão, também conhecidos como coletores solares de tubos evacuados assistidos por termossifões, Shafieian *et al.* (2019) encontraram valores em torno de 85% em seu experimento. Portanto, conclui-se que os resultados experimentais alcançados neste estudo são satisfatórios e condizentes com a literatura.

Destaca-se ainda que o presente Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica contribui de forma a impulsionar mais estudos sobre coletores solares de tubos evacuados assistidos por termossifões, no âmbito da Graduação e da Pós-Graduação (Mestrado) em Engenharia Mecânica no Laboratório de Energia Solar (LabSOLAR) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Campus* Ponta Grossa.

Como sugestão para trabalhos futuros de forma a dar continuidade ao estudo desenvolvido, recomenda-se realizar testes experimentais para o coletor solar de tubos a vácuo de alta pressão em meses com maior índice de irradiância solar como

dezembro, janeiro e fevereiro, onde será possível ter o coletor solar operando com maior potencial energético e por consequência chegará a temperaturas mais elevadas. Dessa forma será possível realizar o uso da água quente armazenada pelo reservatório térmico e verificar seu impacto na eficiência térmica do coletor solar.

REFERÊNCIAS

ANEEL, **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2ed. Brasília, 2005

BATALHA, L. E. B.; AMARAL, M. C.; ARAÚJO, M. R. D. G. **Estudo teórico e experimental de um coletor solar assistido por termossifões**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

BIANCHINI, H. M. **Avaliação Comparativa de Sistemas de Energia Solar Térmica**. 2013. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Rio de Janeiro Escola Politécnica. Rio de Janeiro, 2013.

DIMBARRE, V. V. **Investigação experimental do comportamento térmico de termossifões aplicados a coletores solares utilizando nanofluido de óxido de grafeno**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2021.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Relatório Síntese ano base 2019**. Balanço Energético Nacional (BEN) 2020. Rio de Janeiro, maio, 2020.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020 ano base 2019**. Rio de Janeiro, 2019.

ESPÍRITO SANTO, M. **Análise experimental de diferentes configurações de termossifões para aplicação em coletor solar**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

FONTANA, E. S. B. **Concepção de um sistema de circulação fechado para estudo experimental de coletores solares**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019.

GREEN SOLAR, **Commercial Solar System In Hopkins MO**. Disponível em: <<https://www.greensolartechnologies.com/portfolio>> Acesso em 01 set. 2021.

HARVEST HORTICULTURE, **Professional Weather Station WT1081**. Disponível em: <<https://harvesthort.com/products/professional-weather-station-wt1081-new>> Acesso em 10 ago. 2021.

IEA (International Energy Agency). **SNAPSHOT of Global PV Markets 2020**, ISBN 978-3-906042-94-7, 2020.

IEA (International Energy Agency) – **World Energy Outlook**, 2020 Disponível em: <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/8b420d70-b71d-412d-a4f0-869d656304e4/BrazilianPortuguese-Summary-WEO2020.pdf>> Acesso em 01 ago. 2021.

KALOGIROU, S. **The potential of solar industrial process heat applications**. Applied Energy, v. 76, n. 4, p. 337-361, 2003

KIPP & ZONEN. **Instruction Sheet – Pyranometers – CMP3**, 2018. Disponível em: <<https://www.kippzonen.com/Download/81/Instruction-Sheet-Pyranometers-CMP3>> Acesso em 03 nov. 2021.

KLINE, S.J. & MCCLINTOCK, F.A. **Analysis of Uncertainty in Single-Sample Experiments**. *Mechanical Engineering*, v. 75, p. 3-9, 1953.

KRAMBECK, L., BARTMEYER, G.A., FUSÃO, D., SANTOS, P.H.D., ANTONINI ALVES, T., 2018. **Thickness Influence of the Copper Powder Sintered Capillary Structure in the Thermal Performance of Heat Pipes**. 17th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering November 25th-28th, 2018, Águas de Lindóia, SP, Brazil.

MANTELLI, M. B. H. Notas de Aula: **Tubos de calor e Termossifões**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

MME - Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2016: Ano base 2015** / Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

PEREIRA, E. B., et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2017

RASSAMAKIN, B., KHAIRNASOV, S., ZARIPOV, V., RASSAMAKIN, A. & ALFOROVA, O. **Aluminum Heat Pipes Applied in Solar Collectors**. *Solar Energy*, v. 94, p. 145-154, 2013.

REAY, D.A., KEW, P.A. & McGLEN, R.J. **Heat Pipes: Theory, Design and Applications**. 6ed. Waltham: Elsevier, 2014.

ROSSI, Giovane Nogueira & MOREIRA, Samuel Heusi. **Estudo numérico experimental de um protótipo de coletor solar compacto assistido por termossifões**. 2021. 88f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2021.

SHAFIEIAN, Abdellah; KHIADANI, Mehdi; NOSRATI, Ataollah. **A review of latest developments, progress, and applications of heat pipe solar collectors.** Disponível em: <
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032118305239?via%3Dihub>> Acesso em 10 ago. 2021.

SHAFIEIAN, Abdellah; KHIADANI, Mehdi; NOSRATI, Ataollah. **Theoretical modelling approaches of heat pipe solar collectors in solar systems: A comprehensive review.** Disponível em: <
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X19309090?via%3Dihub>> Acesso em 10 ago. 2021.

SHAFIEIAN, Abdellah; KHIADANI, Mehdi; NOSRATI, Ataollah. **Strategies to improve the thermal performance of heat pipe solar collectors in solar systems: A review.** Disponível em: <
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890419300366?via%3Dihub>> Acesso em: 10 ago. 2021.

SHAFIEIAN, Abdellah; KHIADANI, Mehdi; NOSRATI, Ataollah. **Thermal performance of an evacuated tube heat pipe solar water heating system in cold season.** Disponível em: <
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431118347392?via%3Dihub>> Acesso em 10 ago. 2021.

SIQUEIRA, D. A. **Estudo De Desempenho Do Aquecedor Solar De Baixo Custo.** 2009. 125 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2009.

ANEXO A

Guia de instruções do piranômetro CMP3 da *Kipp & Zonen*TM

Figura 6 - Guia rápido do piranômetro Kipp & Zonen™ CMP3

Instruction Sheet
Anleitung • Folleto • Vahvõttekirje • Hoja del Instrucciones

OTT HydroMet

KIPP & ZONEN
— an OTT IP67 instrument —

CMP3
Piranometer

€ 2000 W/m²

0.3 kg (Poids: 0.3 kg)

CE IP 67
-40°C to 85°C
-40°F to 176°F

Installation
Installation • Instalación • Instalação

Mechanical
Mechanisch • Mecânica • Mecânica

Electrical
Elektrisch • Eléctrica • Elétrica

User Information
Anwendungs-Information • Informação Utilizador • Informação para el Usuario

Maintenance
Wartung • Manutenção • Manutenção

Specifications
Spezifikationen • Specifications • Especificaciones

1 Radiometer
Radiômetro • Radiômetro • Radiômetro

2 Sun screen
Ecran solaire • Ecran solar • Ecran solar

3 Test reports
Rapport de essais • Informe de pruebas • Informe de pruebas

4 Cable
Cabo • Cabo • Cabo

5 Pyranometer Fixing Kit
Aparato de montagem • Kit de fixação • Kit de fixação

6 Instruction sheet
Anleitung • Folleto • Vahvõttekirje • Hoja del Instrucciones

7 Keep original packaging for recalibration
Conserve l'emballage original pour le recalibrage • Guarde el embalaje original para el recalibración

3 Unobstructed horizon
Horizonte non ostacolato • Horizonte sin obstáculos • Horizonte sin obstáculos

4 Level instrument
Nivelar el instrumento • Nivelar el instrumento • Nivelar el instrumento

5 Mount with screws, washers and nuts
Montar con tornillos, arandelas y tuercas • Montar con los tornillos, arandelas y tuercas • Montar con los tornillos, arandelas y tuercas

6 Mount sun screen
Montar el sombrero solar • Montar el sombrero solar • Montar el sombrero solar

7 Release set-up
Liberar o setup • Liberar o setup • Liberar o setup

1 Radiometer Connection
Conectar el Radiômetro • Conectar el Radiômetro • Conectar el Radiômetro

Wire	Function	Connect With
Red	+	+ (PH)
Blue/White/Black	-	- (Lo)
Shield	Grounding	Ground

2 Connect to ground if radiometer not grounded
Conectar a tierra si el radiómetro no lo está

1 Sensor Height
Sensor Height • Hauteur de l'Aligner de l'Aligner

136 mm

10 mm

65 mm

85.2 mm (2x)

max. 100m

1 MΩ Impedance
1 MΩ Impedance • Impedancia • Impedancia

Calculate Irradiance
Calculer l'irradiance • Calcular la Irradiance • Calcular la Irradiance

$$E_{\text{Solar}} = \frac{U_{\text{mf}}}{S}$$

E_{Solar} [W/m²] = Irradiance
Irradiation • Irradiation • Irradiation

U_{mf} [μV] = Output Voltage
Output Voltage • Voltage • Voltage

S [μV/Wm²] = Sensitivity
Sensitivity • Sensibilité • Sensibilidad

Typical Values
Typische Werte • Valores Típicos • Valores Típicos

Fully clouded
Totalmente nublado • Totalmente nublado • Totalmente nublado

Sunny partly clouded
Parcialmente nublado • Parcialmente nublado • Parcialmente nublado

Clear and Sunny
Cielo despejado • Cielo despejado • Cielo despejado

50 to 120 W/m² | 120 to 500 W/m² | 500 to 1000 W/m²

Read this document carefully before installation.
Warranty is 5 years from date of invoice, subject to correct installation and use. Kipp & Zonen accepts no liability for any loss or damages arising from incorrect use of the instrument. For more information on our products, their warranty and CE/FCC validity, for the latest product support information please visit our website.

Lesen Sie dieses Dokument sorgfältig vor der Installation.
Die Garantie beträgt 5 Jahre ab Rechnungsdatum, vorausgesetzt eine korrekte Installation und Nutzung. Kipp & Zonen übernimmt keine Haftung für mögliche Verluste oder Beschädigungen, die durch den falschen Gebrauch des Produktes entstehen. Nicht autorisierte Änderungen können die Garantie und die CE/FCC-Konformität aufheben. Die neuesten Produktinformationen finden Sie auf unserer Internetseite.

Lisez ce document soigneusement avant installation.
La garantie est de 5 ans à dater de la facture, pour une installation et une utilisation correctes. Kipp & Zonen n'accepte aucune responsabilité quant à la perte ou aux dommages résultant d'une utilisation incorrecte de l'instrument. Pour plus d'informations sur nos produits, leur garantie et la validité CE/FCC, consultez notre site web pour tout renseignement "support produit".

Lea este documento cuidadosamente antes de la instalación.
La garantía es de 5 años a partir de la fecha de facturación y está condicionada a una instalación y utilización correctas. Kipp & Zonen no acepta ninguna responsabilidad por pérdidas o daños resultantes de un uso incorrecto del producto. Las modificaciones no autorizadas pueden anular la garantía y la validez CE/FCC. Para obtener más información sobre nuestros productos, su garantía y la validez CE/FCC, consulte nuestro sitio web para obtener información de soporte al cliente.

Spectral range
Spectral range • Espectro • Espectro espectral

300 to 2800 nm

Response time
Response time • Tiempo de respuesta • Tiempo de respuesta

0 to 200 W/m²

Non linearity
Non linearity • No linealidad • No linealidad

± 2.5%

Temperature stability
Temperature stability • Estabilidad de temperatura • Estabilidad de temperatura

± 4.5%

Temperature dependence of zero offset
Temperature dependence of zero offset • Dependencia de la temperatura de la offset de cero • Dependencia de la temperatura de la offset de cero

± 2.5 W/m²

Temperature dependence of sensitivity
Temperature dependence of sensitivity • Dependencia de la temperatura de la sensibilidad • Dependencia de la temperatura de la sensibilidad

± 1.5%

Zero offset
Zero offset • Offset de cero • Offset de cero

± 1.5 W/m²

Temperature dependence of zero offset
Temperature dependence of zero offset • Dependencia de la temperatura de la offset de cero • Dependencia de la temperatura de la offset de cero

± 1.5 W/m²

Temperature dependence of sensitivity
Temperature dependence of sensitivity • Dependencia de la temperatura de la sensibilidad • Dependencia de la temperatura de la sensibilidad

± 1.5%

Delivery Contents
Lieferumfang • Contenido de la Lieferung • Contenido de la Lieferung



Fonte: Kipp e Zonen (2018)