



C A P Í T U L O 3

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM SISTEMA DE COLETORES SOLARES DE TUBOS EVACUADOS ASSISTIDOS POR TERMOSSIFÕES

Gustavo Vinícius Vieira Mello

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR); Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Ponta Grossa

Allefe Jardel Chagas Vaz

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR); Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Ponta Grossa

Humberto Ianczkovski

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR); Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Ponta Grossa

Vinícius Mariani Lenart

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR); Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Ponta Grossa

Thiago Antonini Alves

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR); Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Ponta Grossa

RESUMO: Diante do crescente desenvolvimento industrial e populacional, a demanda por geração de energia está em constante aumento. Sistemas solares térmicos surgem como uma solução promissora para enfrentar esses desafios, aproveitando o sol como uma fonte de calor inesgotável. Coletores solares de tubos evacuados assistidos por termossifões demonstram grande eficiência. O aquecimento de água em aplicações residenciais, por meio desses coletores solares, pode reduzir consideravelmente o consumo de energia. Além de serem sustentáveis, os coletores solares de tubos evacuados de alta pressão podem ser economicamente vantajosos. Comparados aos coletores solares convencionais, eles são mais eficientes e operam em temperaturas mais elevadas. Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho térmico de um sistema de três coletores solares de tubos evacuados assistidos por termossifões, utilizando água como fluido de trabalho. Testes experimentais foram conduzidos ao longo de um dia da primavera de 2023 na cidade de Ponta Grossa/PR. Através

da Primeira Lei da Termodinâmica foi observado que a eficiência térmica tanto dos coletores colares analisados individualmente, quanto do sistema variou entre 59% e 85%, sob condições meteorológicas reais. Os resultados indicam que um sistema de coletores solares de tubos evacuados assistidos por termosifões pode ser uma alternativa viável e sustentável para o aquecimento de água.

PALAVRAS-CHAVE: Termossifões, Energia Solar, Coletor Solar, Desempenho Térmico, Experimental.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE THERMAL PERFORMANCE OF A SYSTEM OF THERMOSYPHON-ASSISTED EVACUATED TUBE SOLAR COLLECTORS

ABSTRACT: Against of the growing industrial and population development, the demand for energy generation is constantly increasing. Solar thermal systems emerge as a promising solution to address these challenges, harnessing the sun as an inexhaustible heat source. Evacuated tube solar collectors assisted by thermosyphons demonstrate great efficiency. Water heating in residential applications through these solar collectors can considerably reduce energy consumption. In addition to being sustainable, high pressure evacuated tube solar collectors can be economically advantageous. Compared to conventional solar collectors, they are more efficient and operate at higher temperatures. This work aims to evaluate the thermal performance of a system of three evacuated tube solar collectors assisted by thermosyphons, using water as the working fluid. Experimental tests were conducted over a day in the spring of 2023 in the city of Ponta Grossa/PR. Through the First Law of Thermodynamics, it was observed that the thermal efficiency of both the individually analyzed solar collectors and the system ranged between 59 and 85% under real weather conditions. The results indicate that a system of evacuated tube solar collectors assisted by thermosyphons can be a viable and sustainable alternative for water heating.

KEYWORDS: Thermosyphon. Solar Energy. Solar Collectors. Experimental Thermal Performance.

INTRODUÇÃO

De acordo com os dados fornecidos pela *International Energy Agency* (IEA, 2022), sobre a divisão percentual da produção energética mundial, a produção advinda de fontes não renováveis, como do petróleo e derivados (29,5%), carvão mineral (26,8%) e gás natural (23,7%), representa um total de 80% da produção de energia global. A energia nuclear representa 5%. Enquanto que as fontes consideradas renováveis são responsáveis por uma parcela ínfima de 15% do total, essa porcentagem está alocada em outros (2,5%), fotovoltaica e eólica, somada a biomassa (9,8%) e hidráulica (2,7%).

Das informações do Balanço Energético Nacional de 2022 – BEN 2022 (EPE, 2022), a distribuição da matriz energética no Brasil apresenta particularidades em relação à matriz energética global. A principal é que no Brasil as fontes renováveis totalizam 44,8%, somando hidráulica (11%), lenha e carvão vegetal (8,7%), derivados de cana-de-açúcar (16,4%) e outras renováveis (8,7%). A energia nuclear representa 1,3%. Os não renováveis de combustíveis fósseis totalizam 53,9%.

A utilização dos combustíveis fósseis como fontes de energia contribui para o aumento da emissão de gases de efeito estufa, o que acelera o processo de mudanças climáticas. Portanto, é fundamental buscar alternativas energéticas limpas e renováveis, como a energia solar, que apresenta um grande potencial para a redução da dependência de combustíveis fósseis e para a mitigação de impactos ambientais (Goldemberg, 2007).

O Brasil é um país com um clima tropical e possui mais de 92% do seu território localizado acima do Trópico de Capricórnio, possuindo um enorme potencial para o uso de energia solar (Tessaro, 2006). Conforme descrito no Atlas Brasileiro de Energia Solar, a irradiação solar média diária varia entre 3,50Wh/m² e 6,25Wh/m².

O presente trabalho possui o foco em coletores solares de tubos evacuados assistidos por termosifões como sistemas térmicos que absorvem a radiação solar e a transformam em calor, que é transferido para o fluido. De acordo com o Plano Nacional de Eficiência Energética de 2011 – PNEf 2011 publicado pelo Ministério de Minas e Energia (MME, 2011), a adoção dos sistemas de aquecimento solar de água pode levar a uma economia de até 2,2 TWh/ano em 2030.

JUSTIFICATIVA

Os termosifões são dispositivos passivos que operam em ciclos bifásicos e têm vantagens em relação a outros sistemas térmicos. Huang *et al.* (2017) demonstraram que o uso de termosifões em coletores solares de um sistema de aquecimento solar resultou em um aumento de cerca de 30% na eficiência térmica, tornando a energia solar mais eficiente e economicamente viável. A pesquisa nessa área é crucial para o desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis, contribuindo para a transição energética para fontes limpas e renováveis.

OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral realizar uma investigação experimental do desempenho térmico de um sistema contendo três coletores solares de tubos evacuados assistidos por termosifões, contribuindo para o desenvolvimento de soluções tecnológicas mais eficientes e sustentáveis para a geração de energia solar térmica.

MATERIAIS E MÉTODOS

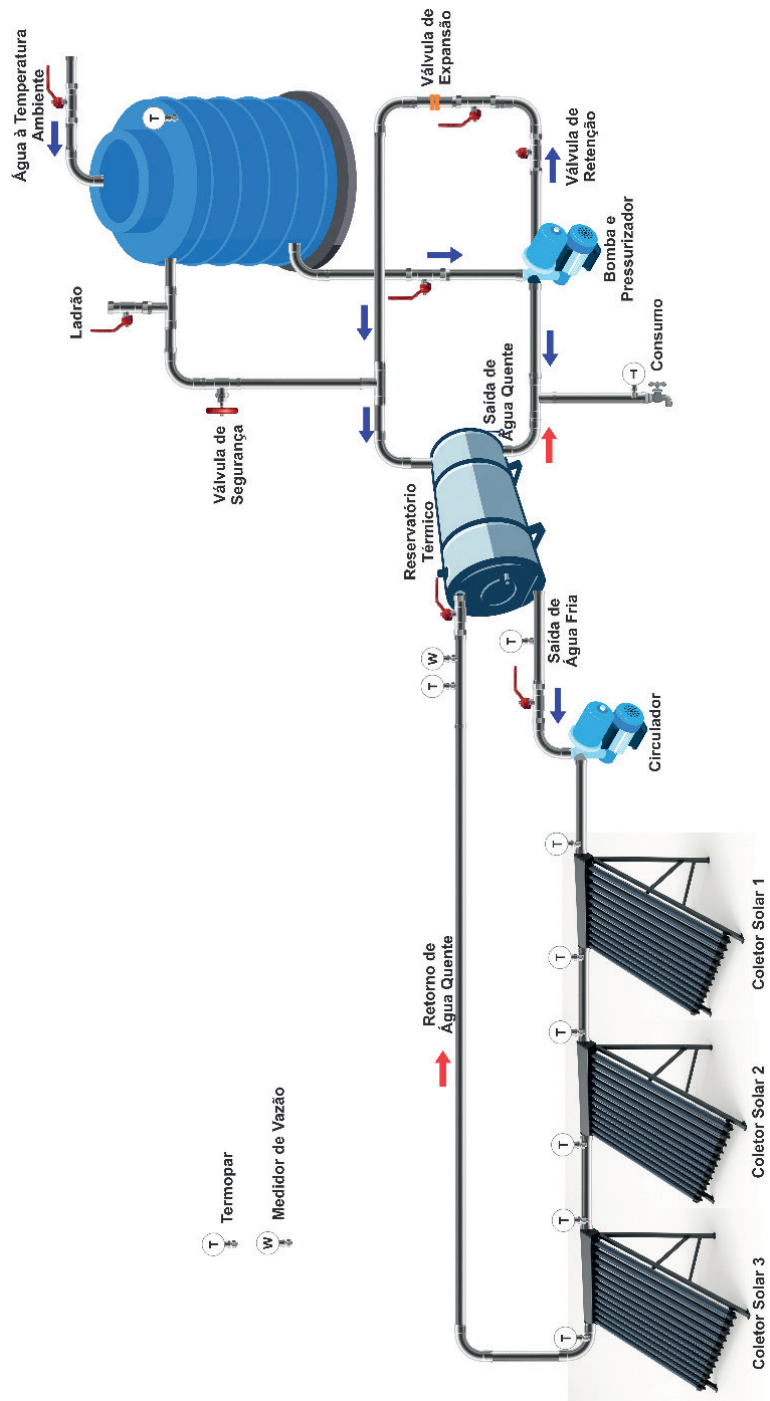
Os testes experimentais foram executados no Laboratório de Energia Solar (LabSOLAR) vinculado ao Programa de Pós-Graduação *Multicampi* (Mestrado) em Engenharia Mecânica (PPGEM) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Campus* Ponta Grossa.

Aparato experimental

O aparato experimental utilizado é mostrado no diagrama esquemático da Figura 1. Ele é composto por um sistema fechado de circulação de água em alta pressão e por um sistema em série de três coletores solares de tubos evacuados assistidos por dez termossifões cada.

O sistema fechado de circulação de água em alta pressão, ilustrado na Figura 2, consiste em diversos componentes: uma caixa d'água *Fortlev*TM de 310L, um reservatório térmico *Riberso*TM de 100L, um conjunto bomba *Hioda*TM HP500AH de 1/2HP e pressostato *Laspa*TM LS-8, um vaso de expansão *Hioda*TM de 24L, uma válvula de segurança com manômetro, tubos, conexões, acessórios, um painel de comando elétrico com controlador *Tholz*TM TLZ, uma válvula de retenção, um medidor de vazão eletromagnético *IFM*TM SM7120 e um circulador de água *Hioda*TM HBS/100. Esse sistema está instalado no mezanino interno localizado no Laboratório de Energia Solar (LabSOLAR),

FIGURA 1. Diagrama esquemático do aparato experimental.



Fonte: Autoria própria (2025).

FIGURA 2. Sistema de circulação de água em alta pressão.



Fonte: Autoria própria (2025)

Para a aquisição dos dados experimentais, um sistema composto pelo medidor de vazão eletromagnético *IFM™* SM7120, por um sistema de aquisição de dados *Agilent™* 34970A com um multiplexador de 20 canais *Agilent™* 34901A e por um computador *Dell™* foram utilizados. Esses equipamentos possibilitaram a coleta de dados de vazão volumétrica, temperatura e pressão na entrada e saída da água nos *manifolds* dos coletores solares de tubos evacuados assistido por termossifões, assim como as temperaturas na entrada e saída do reservatório térmico (*boiler*). Termopares do tipo K *Omega Engineering™* e transdutores de pressão *Salcas™* SA-1000H foram utilizados nessas medições.

As tubulações que conduzem a água de saída e retorno são direcionadas para um pátio localizado fora do Laboratório de Energia Solar (LabSOLAR), na área externa do Bloco J1 da UTFPR/ Ponta Grossa – Figura 3. Essas tubulações foram conectadas a mangueiras e, por sua vez, essas mangueiras foram conectadas aos coletores solares de tubos evacuados assistidos por termossifões. Essa configuração permite que a água flua do reservatório térmico para os coletores solares e retorne ao reservatório térmico. Três coletores solares *SolarVAC™* de tubos evacuados assistidos por termossifões estão instalados no piso do pátio externo do LabSOLAR. Todas as tubulações possuem isolamento térmico de polietileno expandido, e as tubulações localizadas na área externa do bloco possuem uma camada adicional de isolamento refletivo. Essas medidas visam reduzir as perdas de calor durante o percurso percorrido pela água e minimizar os efeitos externos.

FIGURA 3. Pátio externo do Laboratório de Energia Solar da UTFPR/Ponta Grossa.



Fonte: Autoria própria (2025)

Procedimento experimental

Para a execução dos testes experimentais, o procedimento consistiu em seguir algumas etapas. Primeiramente, foi necessário ligar o sistema de aquisição de dados mostrado na Figura 2. Na sequência, foram fixadas as mangueiras que conectam os coletores solares ao circuito fechado de circulação forçada de água em alta pressão. Feito isso, uma vazão volumétrica de aproximadamente 7,0L/min foi ajustada na tubulação do sistema. Foram utilizadas mangueiras hidráulicas de 20bar (300psi) com um diâmetro de 22mm (7/8") e foram adaptados termopares do tipo K da *Omega Engineering*TM para medir as temperaturas de entrada e saída da água nos coletores solares.

Os testes experimentais com o sistema em série de três coletores solares de tubos evacuados assistidos por termossifões foram executados para avaliar o desempenho térmico do sistema sob condições reais de operação nas condições meteorológicas da primavera de 2023 na cidade de Ponta Grossa, estado do Paraná, na Região Sul do Brasil. Esses coletores solares SolarVAC®, Figura 4, são assistidos cada um por dez termossifões de cobre contendo água como fluido de trabalho, possuem também, *manifold* em cobre para a passagem de água nos condensadores dos termossifões e estrutura leve de perfil de alumínio de 40mm por 40mm. Eles estão inclinados a 25°, que corresponde à latitude da cidade de Ponta Grossa: 25°05'42" Sul, conforme modelo proposto por Bezerra (1990).

FIGURA 4. Sistemas de três coletores solares de tubos evacuados assistidos por termossifões.



Fonte: Autoria própria (2025)

Para o armazenamento dos dados experimentais foi utilizado o *software Agilent™ Benchlink Data Logger v3*. Esses dados foram coletados e registrados a cada 30s e, posteriormente, tratados no *software Microsoft™ Excel*, visando a avaliação do desempenho térmico do sistema de coletores solares. Ressalta-se ainda que, visando suavizar as variações abruptas na coleta de dados, que podem ser provenientes de nuvens que cobriram a cúpula do piranômetro durante os testes experimentais, foram utilizadas médias móveis em conjuntos de 60 leituras, ou seja, valores médios referentes ao um intervalo de 30min. Dessa forma, os dados foram registrados em intervalos de 30s e exibidos em gráficos por meio de média móvel de 30min, mostrando a tendência a cada meia hora.

Parâmetros de interesse

Os valores de radiação solar incidente, irradiação solar ou irradiância solar, foram obtidos utilizando um piranômetro *Kipp & Zonen™ CMP3* que está acompanhando a inclinação de 25° do suporte dos coletores solares. A irradiância solar obtida através das medidas da voltagem de saída do piranômetro foi calculada através da Equação (1), conforme descrito no guia de instruções do fabricante (Kipp & Zonen, 2018):

$$G_{solar} = \frac{U_{emf}}{S}, \quad (1)$$

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 equipamento utilizado, cujo valor é de $23,72 \mu V/W/m^2$.

Conforme descrito por Azad (2008), a eficiência térmica ou eficiência de Primeira Lei da Termodinâmica, de um coletor solar de tubos evacuados assistido por termossifões, $\eta_{l,coletor solar}$ pode ser determinada como:

$$\eta_{l,coletor solar} = \frac{\dot{m}_{\text{água}} c_{p,\text{água}} (T_{\text{sai,água}} - T_{\text{ent,água}})}{G_{solar} A_{coletor solar}}, \quad (2)$$

sendo que, $\dot{m}_{\text{água}}$ é a vazão mássica de água dentro do *manifold* do coletor solar $[kg/s]$, $c_{p,\text{água}}$ é o calor específico a pressão constante da água $[J/kgK]$ e $T_{\text{sai,água}}$ e $T_{\text{ent,água}}$ são as temperaturas médias de saída e de entrada da água no *manifold* do coletor solar $[K]$, respectivamente, $A_{coletor solar}$ é a área do coletor solar $[m^2]$ e G_{solar} é a irradiância solar $[W/m^2]$.

A eficiência térmica ou eficiência de Primeira Lei da Termodinâmica para um sistema contendo mais de um coletor solar de tubos evacuados assistido por termossifões, $\eta_{l,sistema'}$ pode ser determinar como:

$$\eta_{l,sistema} = \frac{\dot{m}_{\text{água}} c_{p,\text{água}} (T_{\text{sai sistema,água}} - T_{\text{entra sistema,água}})}{N_{coletor solar} G_{solar} A_{coletor solar}}, \quad (3)$$

sendo que, $\dot{m}_{\text{água}}$ é a vazão mássica de água dentro do sistema de coletores solares $[kg/s]$, $c_{p,\text{água}}$ é o calor específico a pressão constante da água $[J/kgK]$ e $T_{\text{sai sistema,água}}$ e $T_{\text{entra sistema,água}}$ são as temperaturas médias de saída e de entrada da água no sistema de coletores solares $[K]$, respectivamente, $N_{coletor solar}$ é a quantidade de coletores solares existentes no sistema, $A_{coletor solar}$ é a área de um único coletor solar $[m^2]$ e G_{solar} é a irradiância solar $[W/m^2]$.

Incertezas Experimentais

A incerteza padrão combinada é usada para determinar a incerteza total de uma grandeza que é função de várias outras grandezas medidas, cada uma com sua própria incerteza e pode ser descrita, de acordo com Holman (2011), como:

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \partial x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \partial x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \partial x_n\right)^2}, \quad (4)$$

sendo que, R é a grandeza derivada, x_1, x_2, \dots, x_n são as grandezas medidas, $\partial x_1, \partial x_2, \dots, \partial x_n$ são as incertezas padrão associadas às grandezas medidas e $\partial R / \partial x_i$ são as derivadas parciais de R em relação a cada x_i .

RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados da análise experimental do desempenho térmico do sistema em série de três coletores solares de tubos evacuados assistidos por termosifões sob condições meteorológicas reais de um dia de primavera na cidade de Ponta Grossa/PR. Esses resultados experimentais foram coletados no dia 08 de novembro de 2023, em um período de 6 horas, correspondendo ao horário das 10h até 16h, nas dependências do Laboratório de Energia Solar (LabSOLAR) da UTFPR/Ponta Grossa. Para a execução dos testes experimentais foi considerada uma vazão volumétrica de água de aproximadamente 7,0L/min, uma inclinação de 25° nos coletores solares, de acordo com a latitude de Ponta Grossa/PR/Brasil. Para a área de cada coletor solar, o valor foi de 1,572m² (Shafieian *et al.*, 2019).

Condições meteorológicas

Os dados meteorológicos para a cidade de Ponta Grossa, estado do Paraná, Região Sul do Brasil, durante a execução dos testes experimentais em condições reais de operação de um sistema de coletores solares foram obtidos através do *site* ©WeatherSpark¹ após a seleção desse município brasileiro e do dia 08 de novembro de 2023. Destaca-se que não ocorreu precipitação de chuva nesse dia de primavera.

Na Figura 5 é apresentada a distribuição de temperaturas ambientes durante os testes experimentais, essa temperatura foi medida a 2m acima da superfície em um campo aberto. Na Figura 6 é apresentada a condição de cobertura de nuvens no céu durante o dia, onde a nebulosidade é indicada com cores codificadas de acordo com a porcentagem de céu encoberto. Na Figura 7 é ilustrada a elevação solar no dia da execução dos testes experimentais, sendo que as áreas em amarelo e cinza indicam dia e noite, respectivamente. Na Figura 8 é apresentada a direção dos ventos enquanto que na Figura 9 é mostrada a velocidade do vento durante a investigação experimental.

¹ <https://pt.weatherspark.com/h/d/29814/2023/11/8/Condições-meteorológicas-históricas-em-quarta-feira-8-de-novembro-de-2023-em-Ponta-Grossa-Paraná-Brasil>

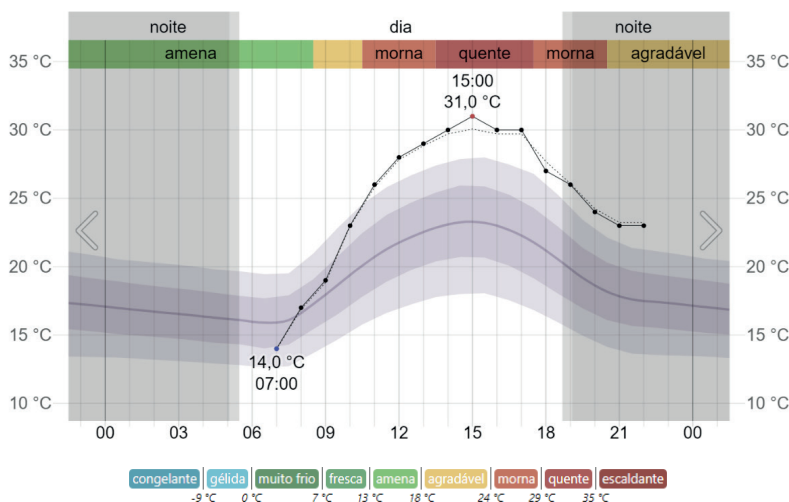
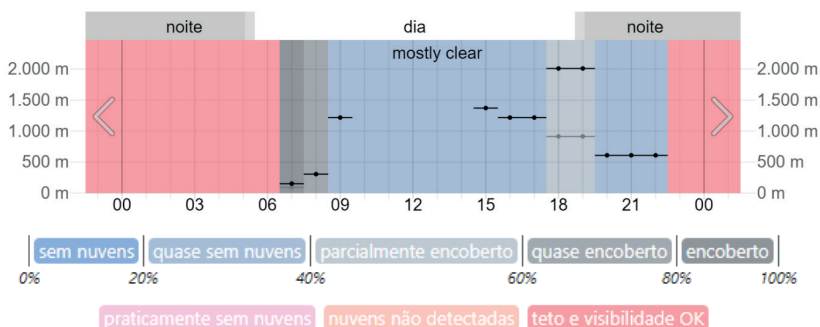
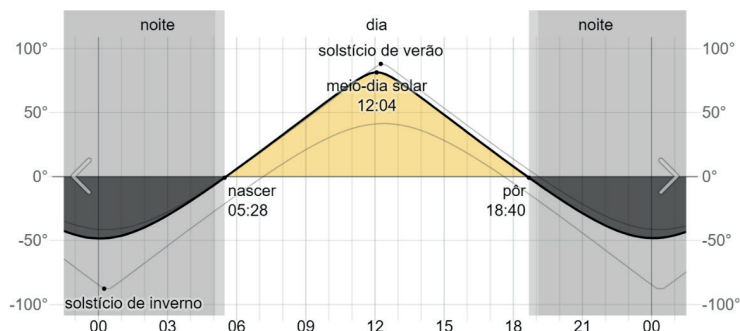
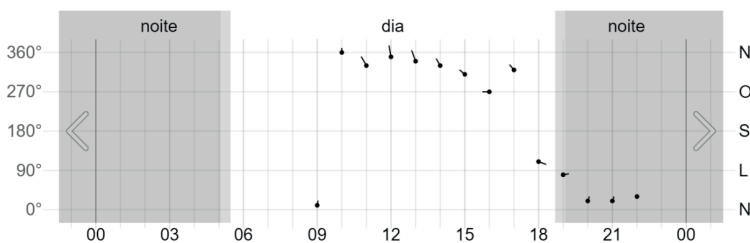
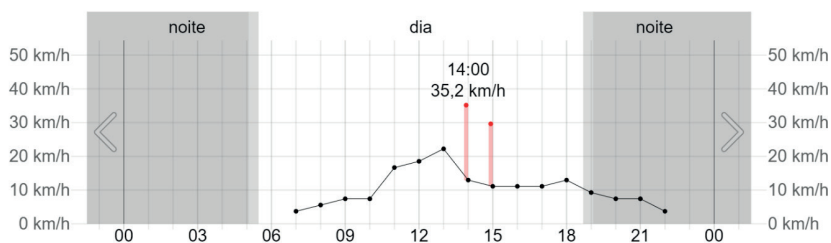
FIGURA 5. Temperatura ambiente em Ponta Grossa/PR no dia 08/11/2023.**FIGURA 6.** Condição de cobertura de nuvens em Ponta Grossa/PR no dia 08/11/2023.**FIGURA 7.** Elevação solar em Ponta Grossa/PR no dia 08/11/2023.

FIGURA 8. Direção dos ventos em Ponta Grossa/PR no dia 08/11/2023.

Fonte: ©WeatherSpark (2025).

FIGURA 9. Velocidade do vento em Ponta Grossa/PR no dia 08/11/2023.

Fonte: ©WeatherSpark (2025).

A Tabela 1 apresenta os resultados médios horários da temperatura ambiente, da velocidade e direção dos ventos e as condições de nebulosidade durante a execução dos testes experimentais em Ponta Grossa/PR no dia 08 de novembro de 2023.

TABELA 1. Condições meteorológicas em Ponta Grossa/PR no dia 08/11/2023.

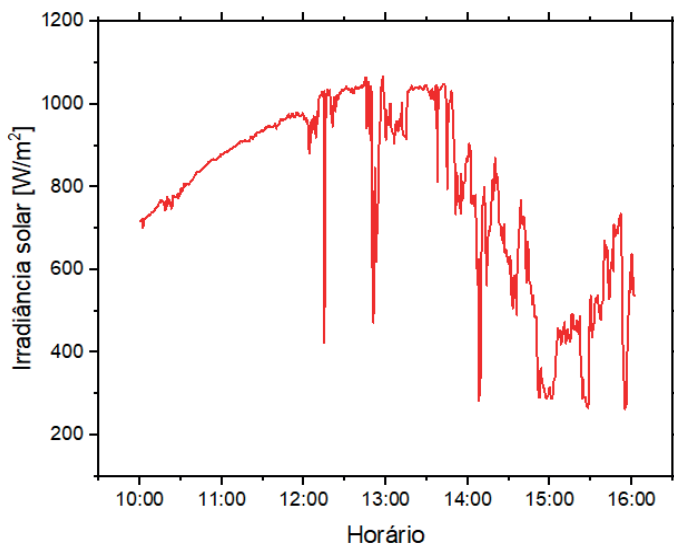
Horário	T_{amb} [°C]	V_{vento} [km/h]	Direção do Vento	Visibilidade
10:00	23	7,4	N	Teto e visibilidade OK
11:00	26	16,7	NO	Teto e visibilidade OK
12:00	28	18,5	N	Teto e visibilidade OK
13:00	29	22,2	N	Teto e visibilidade OK
14:00	30	13,0	NO	Teto e visibilidade OK
15:00	31	11,1	NO	Quase sem nuvens (1.372m)
16:00	30	11,1	O	Quase sem nuvens (1.219m)

Fonte: ©WeatherSpark (2025).

Durante os testes experimentais, das 10h às 16h, no dia 08 de novembro de 2023, na primavera, a temperatura ambiente variou entre 23°C e 31°C enquanto a velocidade do vento ficou entre 7,4km/h e 22,2km/h. A direção predominante do vento foi o Norte (N) e Nordeste (NO). O céu permaneceu ensolarado com ótima visibilidade até às 14h e, então, ele apresentou uma condição de quase sem nuvens até o final da execução dos testes experimentais.

Na Figura 10 é apresentado o comportamento da irradiância solar instantânea em função do tempo para o horário compreendido entre 10h e 16h durante a execução dos testes experimentais. Pode ser observado a influência da condição de cobertura de nuvens na radiação solar incidente no aparato experimental.

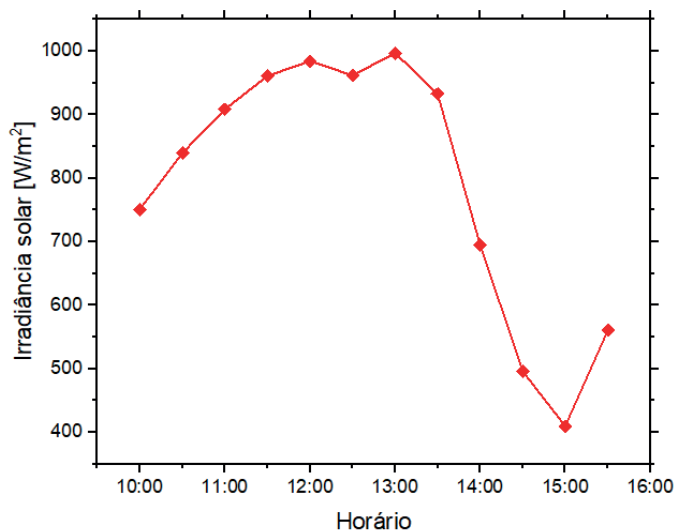
FIGURA 10. Irradiância solar instantânea em função do horário em Ponta Grossa no dia 08/11/2023.



Fonte: Autoria própria (2025)

Na Figura 11 são apresentados os valores da irradiância solar média (G_{solar}) para cada período de 30min durante a investigação experimental. A irradiação solar média durante os testes experimentais foi de 791W/m², com picos em torno de 1.000W/m² entre às 12:30 e 13:30. No final dos testes experimentais, a partir das 14:30, a irradiância solar média foi inferior a 600W/m².

FIGURA 11. Irradiância solar média em função do horário em Ponta Grossa/PR no dia 08/11/2023.



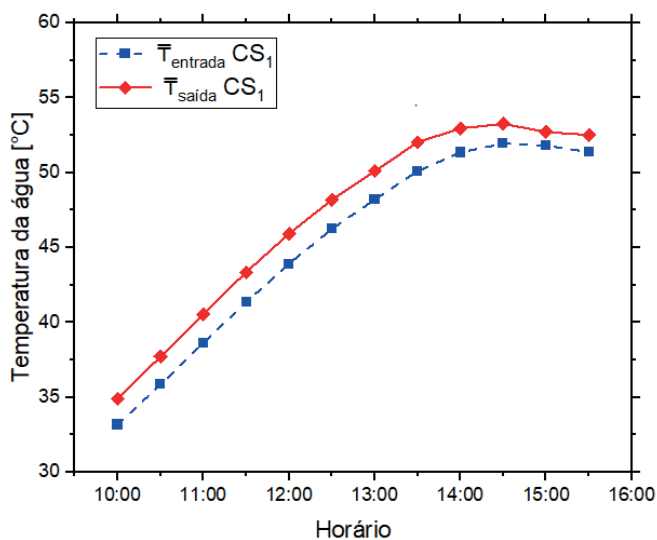
Fonte: Autoria própria (2025).

As condições meteorológicas estáveis e quase sem nuvens proporcionaram um cenário favorável para avaliar o desempenho térmico do sistema dos coletores solares de tubos evacuados assistidos por termossifões durante a primavera de 2023 na cidade de Ponta Grossa/PR, Região Sul do Brasil. Ressalta-se que ao realizar a investigação experimental em um dia predominantemente ensolarado com quase sem nuvens, pode ser garantida uma melhor exposição à radiação solar, o que é importante para a análise do desempenho térmico do sistema de aquecimento térmico de água. Essa escolha permite obter resultados mais consistentes e confiáveis sobre a eficiência térmica do sistema em condições reais de operação e irradiância solar para a estação do ano estudada.

Aquecimento da água

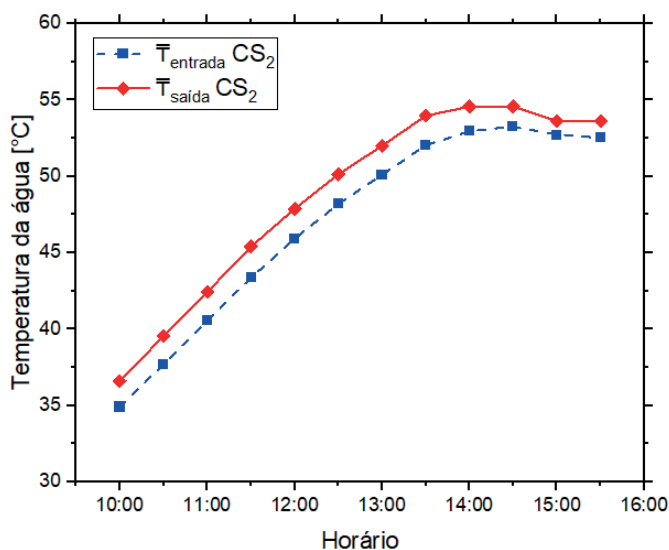
Nas Figuras 12, 13 e 14 são apresentados, em função do horário, os resultados experimentais encontrados para as temperaturas médias de entrada e de saída da água no Coletor Solar 1 (CS_1), no Coletor Solar 2 (CS_2) e no Coletor Solar 3 (CS_3), respectivamente, considerando intervalos de 30 minutos.

FIGURA 12. Temperaturas médias de entrada e de saída no Coletor Solar 1 em função do horário.



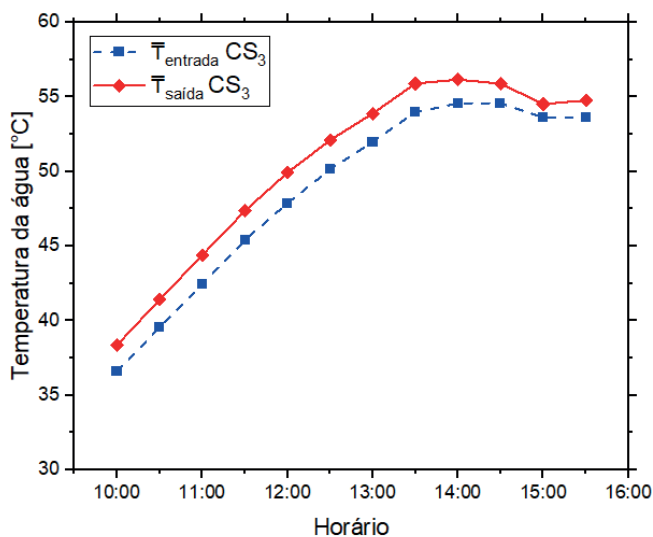
Fonte: Autoria própria (2025).

FIGURA 13. Temperaturas médias de entrada e de saída no Coletor Solar 2 em função do horário.



Fonte: Autoria própria (2025).

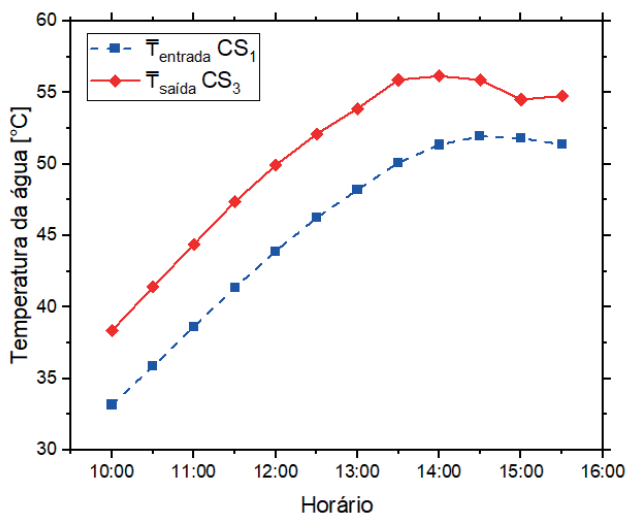
FIGURA 14. Temperaturas médias de entrada e de saída no Coletor Solar 3 em função do horário.



Fonte: Autoria própria (2025).

Na Figura 15 são apresentados, em função do horário, os resultados experimentais encontrados para as temperaturas médias de entrada e de saída da água no sistema em série de três coletores solares considerando intervalos de 30 minutos.

FIGURA 15. Temperaturas médias de entrada e de saída no sistema em função do horário.



Fonte: Autoria própria (2025).

Ao analisar o comportamento das temperaturas médias de entrada e de saída da água nos coletores solares, de um modo geral para todos os casos estudados, à medida que a água passa pelos condensadores dos termosifões no *manifold* dos coletores solares de tubos evacuados assistidos por termosifões, sua temperatura aumenta. Pode ser observado ainda que as temperaturas aumentam gradualmente durante a execução dos testes experimentais, atingindo um pico por volta das 14h, com a temperatura de saída sempre superior à temperatura de entrada. Durante esse período inicial, também podem ser encontradas as maiores diferenças entre as temperaturas de saída e de entrada nos coletores solares. Após o pico, há uma pequena diminuição nas temperaturas médias de entrada e de saída e em seus gradientes. Esse comportamento indica que o sistema em série de três coletores solares de tubos evacuados assistidos por termosifões está efetivamente aquecendo a água, com um desempenho térmico melhor durante as horas de maior irradiância solar.

Eficiência térmica

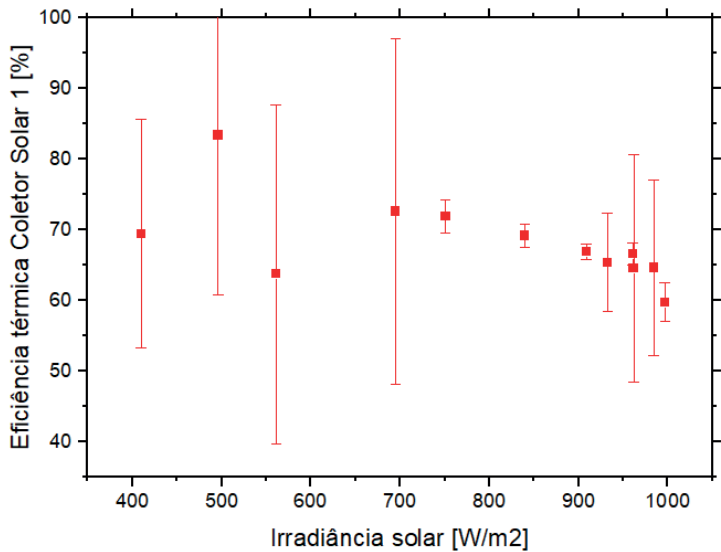
Na Tabela 2 e na Figura 16 são apresentados os resultados obtidos para a eficiência térmica do Coletor Solar 1 considerando valores médios para cada intervalo de 30 minutos de testes experimentais. Os valores das incertezas experimentais também são apresentados na Tabela 2.

TABELA 2. Eficiência térmica no Coletor Solar 1 para cada 30 minutos de testes experimentais.

Horário	G_{solar} [W/m ²]	ΔT_{CS1} [°C]	Eficiência Térmica $\eta_{I,CS1}$ [%]	Incerteza Experimental [%]
10:00 – 10:30	751	1,7	72,0	± 2,3
10:30 – 11:00	840	1,8	69,2	± 1,7
11:00 – 11:30	908	1,9	66,9	± 1,1
11:30 – 12:00	961	2,0	66,6	± 1,5
12:00 – 12:30	984	2,0	64,7	± 12,4
12:30 – 13:00	962	2,0	64,6	± 16,2
13:00 – 13:30	997	1,9	59,7	± 2,8
13:30 – 14:00	932	1,9	65,4	± 7,0
14:00 – 14:30	695	1,6	72,6	± 24,4
14:30 – 15:00	496	1,3	83,4	– 22,5
15:00 – 15:30	410	0,9	69,5	± 16,2
15:30 – 16:00	561	1,1	63,7	± 24,0

Fonte: Autoria própria (2025).

FIGURA 16. Eficiência térmica do Coletor Solar 1 em função da irradiância solar.



Fonte: Autoria própria (2025).

Na Tabela 3 e na Figura 17 são apresentados os resultados obtidos para a eficiência térmica do Coletor Solar 2 considerando valores médios para cada intervalo de 30 minutos de testes experimentais. Os valores das incertezas experimentais também são apresentados na Tabela 3.

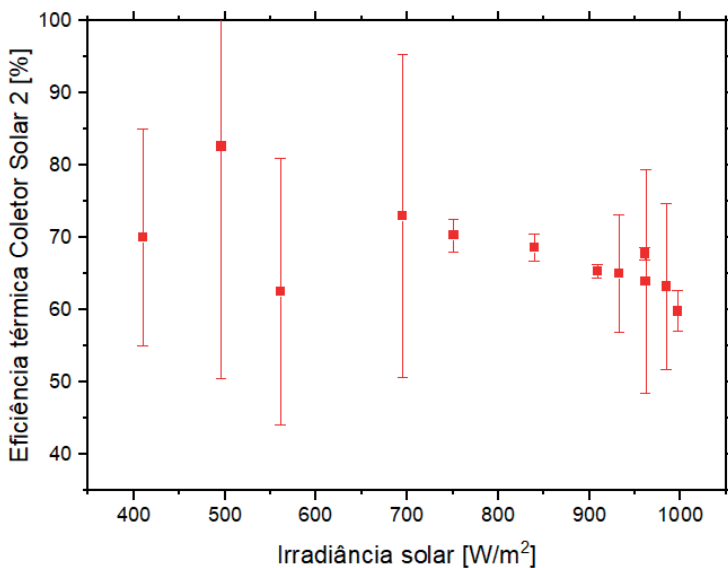
TABELA 3. Eficiência térmica no Coletor Solar 2 para cada 30 minutos de testes experimentais.

Horário	G_{solar} [W/m²]	ΔT_{CS2} [°C]	Eficiência Térmica	Incerteza Experimental [%]
			$\eta_{I,CS2}$ [%]	
10:00 – 10:30	751	1,7	70,3	± 2,3
10:30 – 11:00	840	1,8	68,6	± 1,9
11:00 – 11:30	908	1,9	65,4	± 1,0
11:30 – 12:00	961	2,0	67,8	± 0,9
12:00 – 12:30	984	2,0	63,2	± 11,5
12:30 – 13:00	962	1,9	64,0	± 15,5
13:00 – 13:30	997	1,9	59,8	± 2,9
13:30 – 14:00	932	2,0	65,1	± 8,1
14:00 – 14:30	695	1,6	73,0	± 22,3

14:30 – 15:00	496	1,3	82,6	- 32,1
15:00 – 15:30	410	0,9	70,1	± 15,0
15:30 – 16:00	561	1,1	62,5	± 18,5

Fonte: Autoria própria (2025).

FIGURA 17. Eficiência térmica do Coletor Solar 2 em função da irradiância solar.



Fonte: Autoria própria (2025).

Na Tabela 4 e na Figura 18 são apresentados os resultados obtidos para a eficiência térmica do Coletor Solar 3 considerando valores médios para cada intervalo de 30 minutos de testes experimentais. Os valores das incertezas experimentais também são apresentados na Tabela 4.

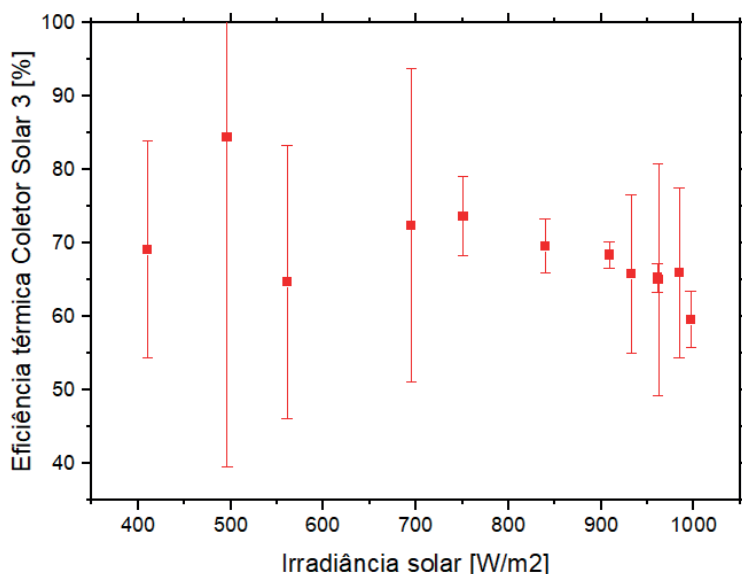
TABELA 4. Eficiência térmica no Coletor Solar 3 para cada 30 minutos de testes experimentais.

Horário	G_{solar} [W/m²]	ΔT_{CS3} [°C]	Eficiência Térmica	Incerteza Experimental [%]
			$\eta_{I,CS3}$ [%]	
10:00 – 10:30	751	1,8	73,7	± 5,4
10:30 – 11:00	840	1,9	69,6	± 3,7
11:00 – 11:30	908	2,0	68,4	± 1,7

11:30 – 12:00	961	2,0	65,3	$\pm 1,9$
12:00 – 12:30	984	2,0	66,0	$\pm 11,6$
12:30 – 13:00	962	2,0	65,1	$\pm 15,8$
13:00 – 13:30	997	1,9	59,6	$\pm 3,9$
13:30 – 14:00	932	1,9	65,8	$\pm 10,8$
14:00 – 14:30	695	1,6	72,4	$\pm 21,3$
14:30 – 15:00	496	1,3	84,4	$- 44,9$
15:00 – 15:30	410	0,9	69,1	$\pm 14,8$
15:30 – 16:00	561	1,2	64,7	$\pm 18,6$

Fonte: Autoria própria (2025).

FIGURA 18. Eficiência térmica do Coletor Solar 3 em função da irradiância solar.



Fonte: Autoria própria (2025).

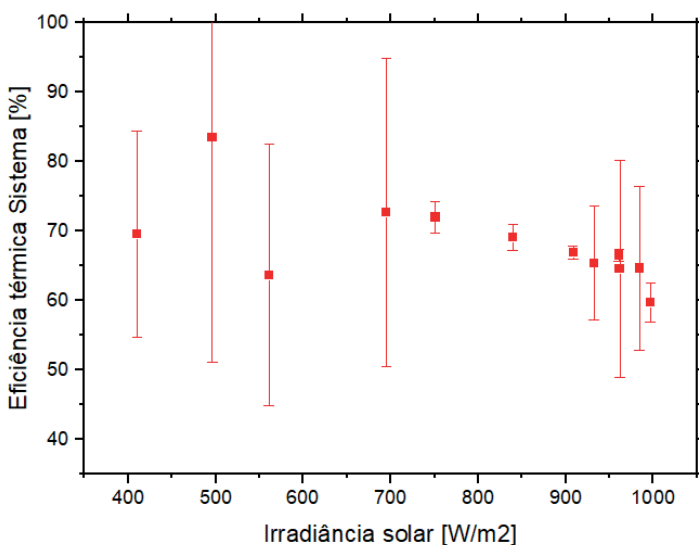
E, finalmente, na Tabela 5 e na Figura 19 são apresentados os resultados encontrados para a eficiência térmica para o sistema de três coletores solares de tubos evacuados assistidos por termosifões considerando valores médios para cada intervalo de 30 minutos de testes experimentais. Os valores das incertezas experimentais também são apresentados na Tabela 5.

TABELA 5. Eficiência térmica do sistema de três coletores solares para cada 30min de testes.

Horário	G_{solar} [W/m ²]	$\Delta T_{sistema}$ [°C]	Eficiência Térmica $\eta_{sistema}$ [%]	Incerteza Experimental [%]
10:00 – 10:30	751	5,2	72,0	± 2,3
10:30 – 11:00	840	5,5	69,1	± 1,9
11:00 – 11:30	908	5,8	66,9	± 1,0
11:30 – 12:00	961	6,0	66,6	± 0,9
12:00 – 12:30	984	6,0	64,6	± 11,8
12:30 – 13:00	962	5,9	64,5	± 15,6
13:00 – 13:30	997	5,7	59,7	± 2,9
13:30 – 14:00	932	5,8	65,4	± 8,1
14:00 – 14:30	695	4,8	72,7	± 22,2
14:30 – 15:00	496	3,9	83,5	- 32,4
15:00 – 15:30	410	2,7	69,5	± 14,9
15:30 – 16:00	561	3,4	63,7	± 18,8

Fonte: Autoria própria (2025).

FIGURA 18. Eficiência térmica do sistema de coletores solares em função da irradiância solar.



Fonte: Autoria própria (2025).

Ao analisar a eficiência térmica individual de cada um dos coletores solares que compõe o sistema, foi possível verificar que a eficiência térmica, baseada na Primeira Lei da Termodinâmica, está variando entre 59,7% e 83,4% para o Coletor Solar 1, entre 59,8% e 82,6% para o Coletor Solar 2 e entre 59,6% e 84,4% para

Coletor Solar 3. Esses valores estão de acordo com os relatados na literatura por Shafieian *et al.* (2019) em torno de 85% em condições operacionais favoráveis. Finalmente, considerando o sistema em série de três coletores solares de tubos evacuados assistidos por termosifões, pode ser notado que a eficiência térmica global do sistema variou entre 59,7% e 83,5%.

CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi realizada uma investigação experimental do desempenho térmico de um sistema em série de três coletores solares de tubos evacuados assistidos por termosifões. O estudo incluiu a montagem do aparato experimental e a execução de testes experimentais sob condições reais de operação e meteorológicas, na cidade de Ponta Grossa, estado no Paraná, Região Sul do Brasil, durante a primavera, no dia 08 de novembro de 2023. Os dados coletados permitiram o cálculo da eficiência térmica dos coletores solares utilizando a Primeira Lei da Termodinâmica. A análise dos resultados mostrou que, os coletores solares apresentaram uma eficiência térmica máxima em torno de 85%. A eficiência térmica global do sistema dos três coletores solares também ficou próxima a esse valor. Esses resultados indicam uma consistência entre os coletores solares quando operam em um sistema combinado, aproveitando de maneira mais eficiente a energia solar disponível e potencializando o aquecimento da água. Comparando os resultados experimentais encontrados para as eficiências térmicas individuais e global do sistema dos coletores solares de tubos evacuados assistidos por termosifões, em até 85% (Shafieian *et al.*, 2019), com os valores típicos de eficiência térmica de coletores solares convencionais de placa plana (em torno de 30%), pode ser concluído que esses resultados encontrados são satisfatórios e consistentes com a literatura existente.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

AZAD, E. Theoretical and experimental investigation of heat pipe solar collector. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 32, n. 8, p. 1666-1672, 2008.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. *Estudos Avançados*, v. 21, n. 59, p. 7-20, 2007.

EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA): Matriz Energética e Elétrica, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em :15 maio 2024.

HUANG, B.; ZHANG, X.; WANG, S.; CAI, W.; XIONG, R. Experimental study on a thermosyphon solar water heater with a heat pipe inserted into the condenser. *Energy Conversion and Management*, v. 135, p. 277-284, 2017.

KIPP & ZONEN: Instruction Sheet – Pyranometers – CMP3, 2018. Disponível em: <<https://www.kippzonen.com/Download/81/Instruction-Sheet-Pyranometers-CMP3>>. Acesso em: 16 julho 2024.

MME (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA): Plano Nacional de Eficiência Energética. 2011. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/ee/publicacoes-e-estudos/PlanoNacionalEficinciaEnergeticaPDF.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2024.

SHAFIEIAN, A.; KHIADANI, M.; NOSRATI, A. Theoretical modelling approaches of heat pipe solar collectors in solar systems: A comprehensive review. *Solar Energy*, v. 193, p. 227-243, 2019.

TESSARO, A. R.; SOUZA, S. N. M.; RICIERI, R. P.; FERRUZI, Y. Desempenho de um Painel Fotovoltaico Acoplado a um Rastreador Solar. Anais do Encontro de Energia no Meio Rural, Vol. 6, Campinas, Brasil, 2006.