



ConBRepro

XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



IA nas Engenharias

29 nov. a 01
de dezembro 2023

Análise Experimental do Desempenho Térmico de um Coletor Solar do Tipo Placa Plana

Luan de Oliveira Tavares

Departamento Acadêmico de Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Ponta Grossa)

Victor Vaurek Dimbarre

Departamento Acadêmico de Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Ponta Grossa)

Felipe Mercês Biglia

Departamento Acadêmico de Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Curitiba)

Felipe Barreto Campelo Cruz

Departamento Acadêmico de Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Ponta Grossa)

Paulo Henrique Dias dos Santos

Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade Federal da Paraíba (João Pessoa)

Thiago Antonini Alves

Departamento Acadêmico de Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Ponta Grossa)

Resumo: O consumo global de energia aumenta ano após ano e a preocupação com os impactos ambientais resultantes da geração dessa energia também cresce. Torna-se cada vez mais imperativo o desenvolvimento de tecnologias para geração de energia mais eficientes, especialmente aquelas voltadas para fontes de energia renovável. Entre as fontes renováveis, a energia solar possui um vasto potencial para suprir as necessidades energéticas globais, dadas suas disponibilidade e características ambientais. A captação da energia solar pode ocorrer tanto na forma de energia térmica quanto elétrica, dependendo do modelo de coletor solar utilizado. Coletores solares que captam energia na forma de calor tendem a ter um custo inferior em comparação aos coletores fotovoltaicos. Apesar de os coletores térmicos possuírem aplicações mais restritas do que os fotovoltaicos, seu custo reduzido os torna uma opção mais viável para determinadas aplicações. Este trabalho tem como objetivo avaliar experimentalmente a eficiência térmica de um coletor solar comercial do tipo placa plana. Os testes experimentais foram realizados no Laboratório de Energia Solar (LabSOLAR/UTFPR/Ponta Grossa). Com o coletor solar posicionado com inclinação de 25°, foram coletados dados de vazão volumétrica e temperaturas do fluido de trabalho na entrada e na saída do equipamento, além de dados de irradiação solar. A eficiência térmica média do coletor solar do tipo placa plana foi calculada em $68,6\% \pm 7,3\%$.

Palavras-chave: Fontes de energia renovável, Energia solar, Desempenho Térmico.

Experimental Analysis of Thermal Performance of a Flat-Plate Solar Collector

Abstract: Global energy consumption increases year after year, and concern about the environmental impacts resulting from this energy generation grows as well. The need for more efficient energy generation technologies, especially those focused on renewable energy sources, is

becoming increasingly imperative. Among renewable sources, solar energy has significant potential to meet global energy needs, given its availability and environmental characteristics. Harnessing solar energy can occur in the form of thermal or electrical energy, depending on the solar collector model used. Solar collectors that capture energy as heat tend to have a lower cost compared to photovoltaic collectors. Although thermal collectors have more restricted applications than photovoltaics, their lower cost makes them a more viable option for specific uses. This work aims to experimentally evaluate the thermal efficiency of a commercial flat-plate solar collector. The experimental tests were conducted at the Solar Energy Laboratory (LabSOLAR/UTFPR/Ponta Grossa). With the solar collector positioned at a 25° inclination, data on volumetric flow, working fluid temperatures at the inlet and outlet of the equipment, and solar radiation data were collected. The average thermal efficiency of the flat-plate solar collector was calculated at 68.6% ± 7.3%. These results are in accordance with the values provided by the manufacturer of the solar collector.

Keywords: Renewable energy sources, Solar energy, Thermal performance.

1. Introdução

O cenário energético global enfrenta um grande déficit. Em 2020, devido à pandemia de COVID-19 causada pelo novo coronavírus, SARS-CoV-2, a demanda energética global teve o maior recuo desde a Segunda Guerra Mundial. No entanto, com a recuperação da economia global em 2021, houve um aumento de 4,6%, ultrapassando em 0,5% os níveis pré-pandemia.

Como consequência da recuperação econômica, os níveis de emissão de CO₂ também voltaram a aumentar. Com a escassez de combustíveis fósseis, seu consequente aumento de preço e o seu potencial poluidor, cada vez mais alternativas sustentáveis tomam foco na geração de energia limpa. De acordo com o Balanço Energético Nacional 2021 (EPE, 2021), a Oferta Interna de Energia (OIE) Brasileira em 2020 foi 48,4% proveniente de fontes renováveis, o que representa um aumento de 2,5% em relação ao ano anterior. Mesmo com o crescimento registrado ainda há muito espaço para melhorias.

As fontes energéticas, classificadas entre renováveis ou não renováveis, se diferem pelo tempo necessário para reposição na energia utilizada. Fontes como nuclear e fóssil necessitam de um horizonte de tempo extremamente grande para serem renovadas, por isso são classificadas como não renováveis. Enquanto as fontes renováveis, como eólica, solar, maremotriz, geotérmica ou até mesmo biomassa, são repostas pela natureza imediatamente ou em ciclos curtos de tempo (GOLDEMBERG, 2006).

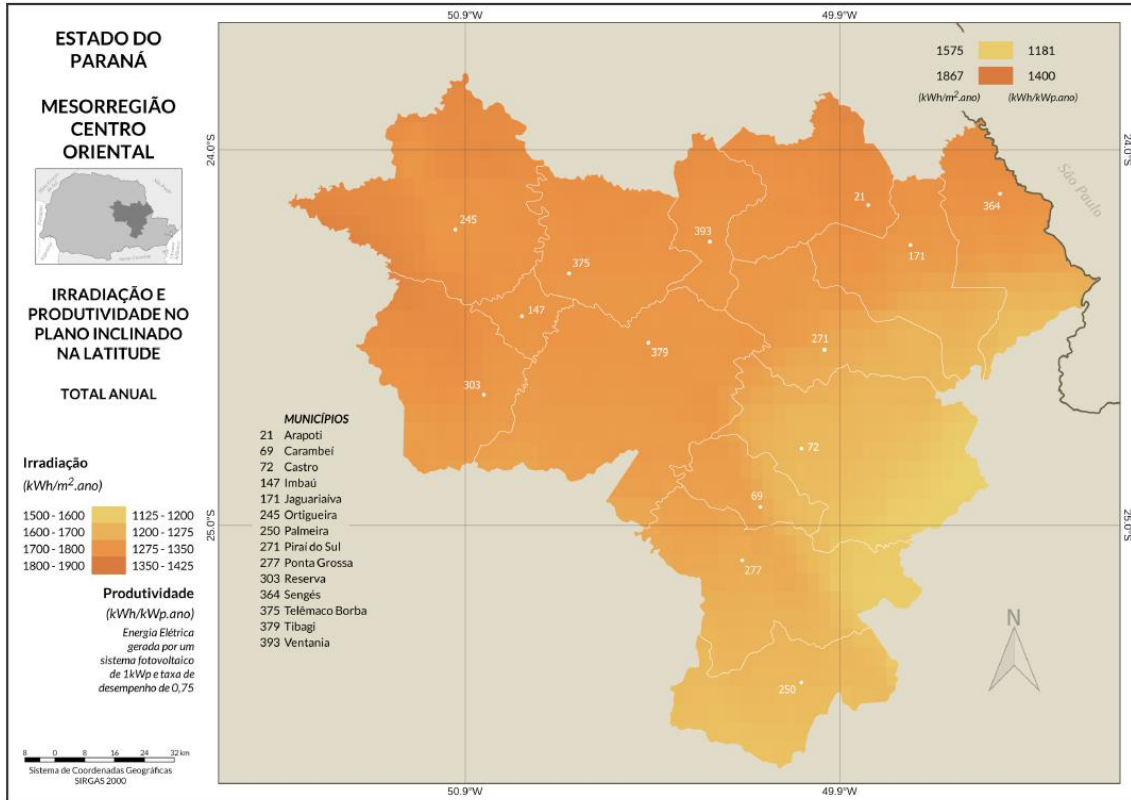
Fontes de energia não renováveis, como combustíveis fósseis, são responsáveis por emissão de gases do efeito estufa e tem estoque limitado, e, embora tenham tecnologia de exploração mais bem desenvolvidas, são prejudiciais ao meio ambiente e a escassez tende a encarecê-las, tornando-as menos acessíveis. Por outro lado, fontes de energia renováveis tem impacto ambiental muito menores quando comparadas as não renováveis (BOZIO, 2018).

Os dados da Agência Internacional de Energia (IEA, 2021) em 2020 houve um aumento de 3% no uso de fontes renováveis em comparação a 2019. No mundo em 2021, 29% da energia gerada proveu de fontes renováveis. Embora no Brasil a geração de energia vinda de fontes renováveis seja maior quando comparado com o restante do mundo, o crescimento brasileiro registrado é inferior.

A principal fonte de energia brasileira são os reservatórios hídricos, as hidrelétricas. Entre 2007 e 2017 a representatividade das hidrelétricas se manteve estagnada, enquanto biocombustíveis e fontes eólicas avançaram. A vasta extensão territorial do Brasil, somado a disponibilidade de luz solar, torna a captação de energia solar, seja térmica ou fotovoltaica, uma possibilidade interessante, principalmente para lugares afastados de grandes centros urbanos (GAMBETA *et al.*, 2018).

No mapa apresentado na Figura 1, disponibilizado pelo Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná (TIEPOLO *et al.*, 2017), pode ser verificado que a cidade de Ponta Grossa está localizada em uma região de irradiação solar intermediária do estado. A irradiação solar na Mesorregião Centro Oriental do Paraná é de aproximadamente 1.700 kWh/m²/ano. Desse total, o mês de dezembro é o maior contribuidor com irradiação solar de 4 a 5 kWh/m²/dia.

Figura 1 – Irradiação solar e produtividade na mesorregião centro oriental



Fonte: Tiepolo *et al.* (2017)

Um coletor solar do tipo placa plana consiste em uma superfície absorvedora plana que em seu interior encontra-se uma serpentina em cobre que fica enclausurada sob vidro temperado e revestida por uma pintura especial para altas temperaturas com suporte em alumínio e acabamento em PET isolante - Figura 2. Tal combinação intensifica a captura de calor e reduz as perdas ao ambiente.

Figura 2 – Diagrama esquemático de coletor solar do tipo placa plana



Fonte: Adaptado de www.alternative-energy-tutorials.com (2023)

Eles são uma alternativa mais acessível para utilização da energia solar. Com custos de instalação e de manutenção mais baixos, quando comparados às placas fotovoltaicas, que exigem instalação elétrica complexa, essa opção se torna mais viável para situações em que a finalidade seja o aquecimento de água. Ainda, dentre os coletores térmicos, os do tipo placa plana possuem construção simples, os tornando a alternativa de menor investimento para captação de energia solar.

Com o aumento do custo de energia devido às crises hídricas periódicas e escassez de combustíveis fósseis, se faz necessário alternativas para produção de energia, tanto doméstica como industrial. O uso de coletores solares para aquecimento de água é uma realidade para muitas aplicações e se torna cada vez mais vantajoso e necessário.

Neste contexto, no presente trabalho foi feita uma análise experimental do desempenho térmico de um coletor solar do tipo placa plana sob condições meteorológicas reais.

2. 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-CP/PG) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Campus* Ponta Grossa.

Para a realização dessa análise experimental foi utilizado um coletor solar do tipo placa plana da marca *Komeco*[®] da Linha *Princess*, Modelo KOCS PR 1.0. Uma fotografia desse coletor solar plano é mostrada na Figura 3. Esse coletor solar possui 10 tubos de cobre de 22mm de diâmetro e com área coletora de 1m².

Figura 3 – Coletor solar do tipo placa plana: *Komeco*[®] 1.0 *Princess*



Fonte: Komeco (2023)

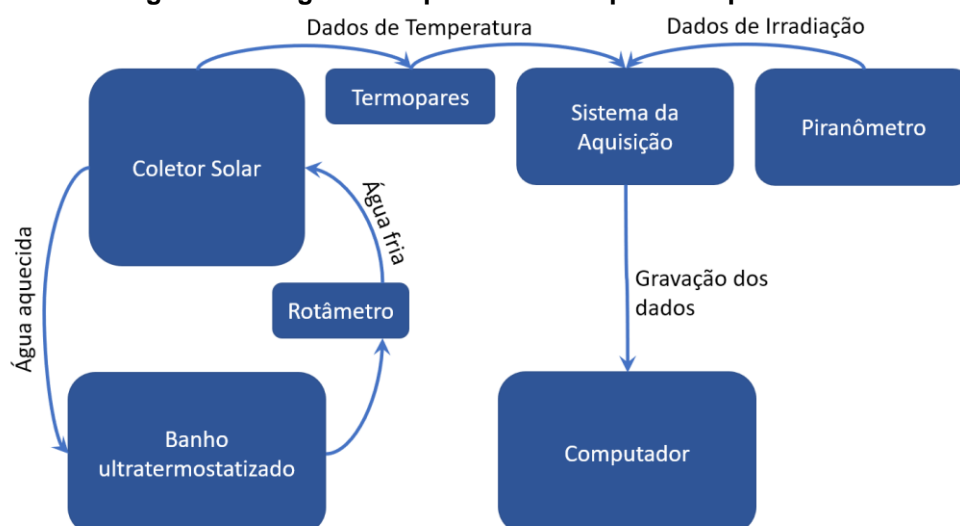
O aparato utilizado nos testes experimentais, representado na Figura 4 e ilustrado esquematicamente na Figura 5, foi composto pelo coletor solar do tipo placa plana *Komeco*[®], por um sistema de aquisição de dados *Agilent*[®] 34970A contendo um multiplexador *Agilent*[®] 34901A de 20 canais, um painel de conectores de termopares do tipo K *Omega Engineering*[®], um computador portátil *Dell*[®], um banho ultratermostaticado *SOLAB*[®] SL130, um rotâmetro com válvula reguladora de área variável *Omega Engineering*[®] FL-2051 e um piranômetro *Kipp & Zonen*[®] CMP3.

Figura 4 – Aparato experimental



Fonte: Autoria Própria (2023)

Figura 5 – Diagrama esquemático do aparato experimental



Fonte: Autoria Própria (2023)

A vazão volumétrica da água dentro do coletor solar foi controlada através do banho ultratermostatizado e do rotâmetro com válvula reguladora de área variável. Durante todos os testes experimentais a vazão volumétrica no sistema foi de aproximadamente 0,50L/min. A temperatura de entrada da água no coletor solar nos testes experimentais foi mantida constante em aproximadamente 18°C através do banho ultratermostatizado. Essa condição de entrada da água no coletor solar é baseada em Xiao *et al.* (2022).

O comportamento térmico foi avaliado por intermédio da utilização de termopares *Omega Engineering*[®] do tipo K, posicionados na entrada e na saída do coletor solar.

Os dados de radiação solar incidente (irradiação solar) foram capturados pelo piranômetro (sensor solar) fixado próximo ao coletor solar do tipo placa plana. A incidência de irradiação solar instantânea, foi calculada a partir da Equação 1 (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 $13,58\mu V/W/m^2$ de acordo com seu certificado de calibração fornecido pelo fabricante.

A eficiência térmica ou eficiência de Primeira Lei Termodinâmica de um coletor solar do tipo placa plana ($\eta_{l,coletor\ solar}$) pode ser determinada de acordo com a Equação 2 (AZAD, 2008).

$$\eta_{l,coletor\ solar} = \frac{\rho_{\acute{a}gua} Q_{\acute{a}gua} c_{p,\acute{a}gua} (T_{sai,\acute{a}gua} - T_{ent,\acute{a}gua})}{G_{solar} A_{coletor\ solar}}, \quad (2)$$

sendo que, $\rho_{\acute{a}gua}$ é a massa específica da água [kg/m³], $Q_{\acute{a}gua}$ é a vazão volumétrica de água dentro do coletor solar [m³/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 do coletor solar [°C], respectivamente, e $A_{coletor\ solar}$ é a área do coletor solar [m²].

O coletor solar do tipo placa plana foi instalado em um suporte de alumínio estrutural com rodízios. A inclinação de trabalho do coletor solar plano foi de 25° - latitude da cidade de Ponta Grossa/PR/Brasil: 25° 05' 42" Sul, conforme modelo proposto por Bezerra (1990).

Para o armazenamento dos dados experimentais foi utilizado o *software Agilent® Benchlink Data Logger* em sua terceira versão. Esses dados foram coletados e registrados a cada 120s (2min) e, posteriormente, tratados no *software Microsoft® Excel*, visando a avaliação do desempenho térmico do coletor solar do tipo placa plana. 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 15 leituras, ou seja, valores médios referentes ao um intervalo de 30 minutos. Dessa forma, os dados foram registrados em intervalos de 2 minutos e exibidos em gráficos por meio de média móvel de 30 minutos, mostrando a tendência a cada meia hora.

As medições experimentais foram realizadas de forma direta, quando se tem apenas uma grandeza envolvida e o resultado pode ser aferido diretamente com o instrumento de medição, ou de forma indireta, quando uma ou mais grandezas são relacionadas por meio de uma equação matemática (MENDES, 2012).

A Tabela 1 apresenta as incertezas das grandezas utilizadas para cálculo da eficiência térmica do coletor solar do tipo placa plana.

Tabela 1 – Incertezas Experimentais

Grandeza	Instrumento de Medição	Incerteza	Unidade
Vazão Volumétrica	Rotâmetro	±50	cm ³ /min
Temperatura	Tipo K	±0,25	°C
Irradiação Solar	Piranômetro	±1%	W/m ²

Fonte: Autoria Própria (2023)

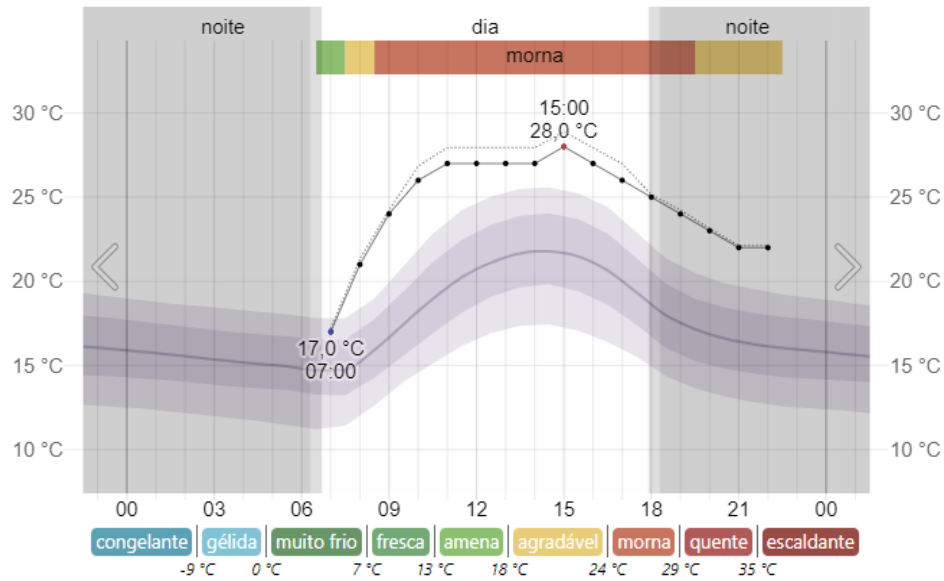
3. Resultados

Os resultados experimentais para o coletor solar foram coletados das 10h às 17h do dia 28 de abril de 2022 nas dependências do Laboratório de Energia Solar da UTFPR/Ponta Grossa. A inclinação de trabalho foi de 25°, conforme a latitude de Ponta Grossa/PR/Brasil. A vazão volumétrica da água no sistema fechado foi de aproximadamente 0,50L/min e a sua temperatura de entrada no coletor solar foi mantida constante em 18°C.

Os dados meteorológicos para a cidade de Ponta Grossa/PR durante o dia de realização dos testes experimentais em condições reais de operação de um coletor solar foram obtidos através do *site Weatherspark* após seleção do município brasileiro e do dia 28 de abril de 2022. Destaca-se que não houve precipitação de chuva nesse dia.

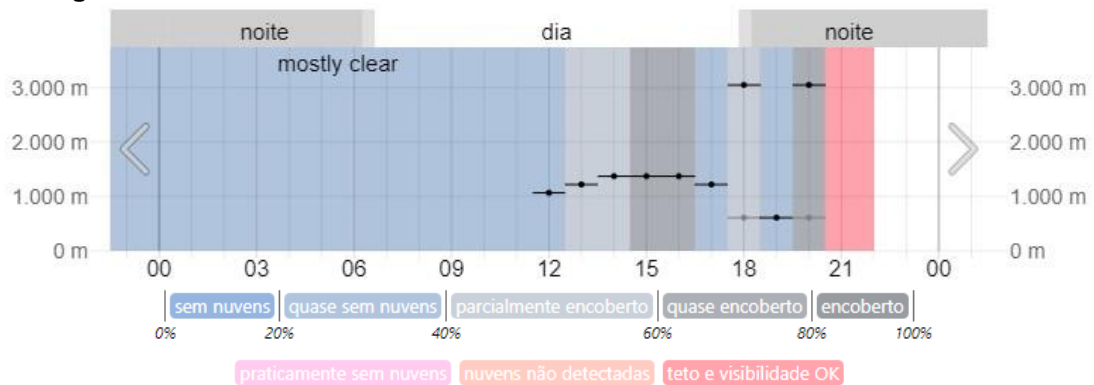
A Figura 6 apresenta a distribuição da temperatura ambiente durante o dia dos testes experimentais, medida aproximadamente 2m acima da superfície em um campo aberto.

Figura 6 – Temperatura ambiente no dia 28 de abril de 2022 em Ponta Grossa/PR



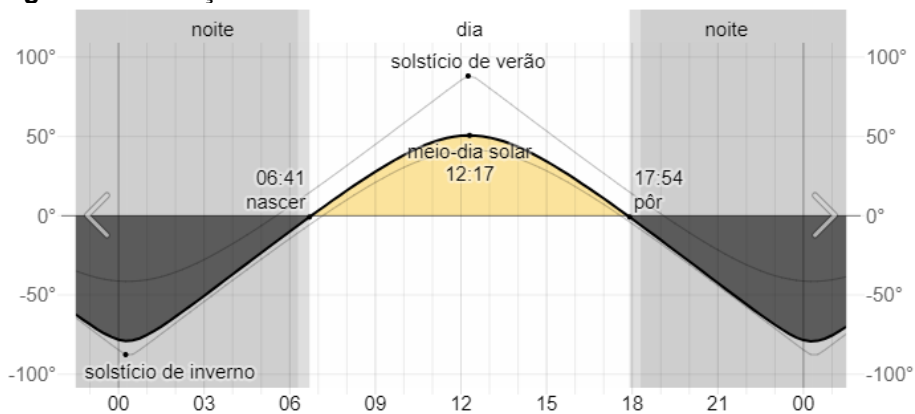
Na Figura 7 é mostrada a cobertura de nuvens no céu durante o dia, onde a nebulosidade é indicada com cores codificadas conforme a porcentagem do céu encoberto.

Figura 7 – Cobertura de nuvens no dia 28 de abril de 2022 em Ponta Grossa/PR



A Figura 8 mostra a elevação solar na data da investigação experimental, onde as áreas em amarelo e cinza indicam dia e noite, respectivamente.

Figura 8 – Elevação solar no dia 28 de abril de 2022 em Ponta Grossa/PR



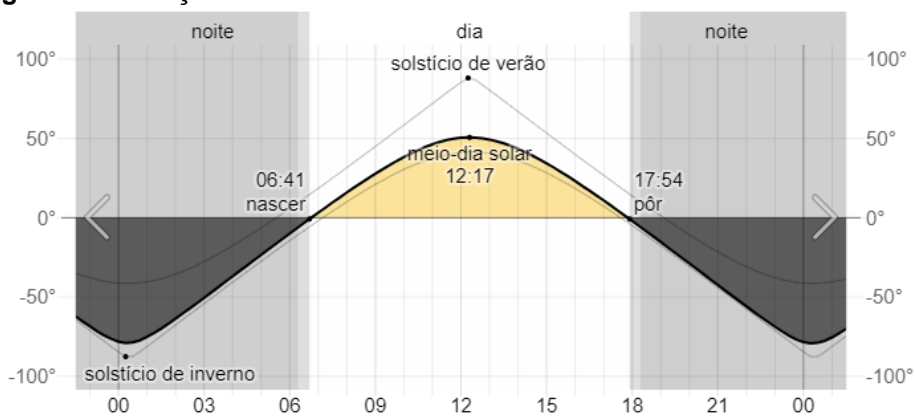
A Figura 9 apresenta a velocidade do vento, enquanto na Figura 10 é mostrada a direção do vento durante o dia em que os testes experimentais para determinação do desempenho térmico de um coletor solar plano foram executados.

Figura 9 – Velocidade do vento no dia 28 de abril de 2022 em Ponta Grossa/PR



Fonte: <https://weatherspark.com> (2023)

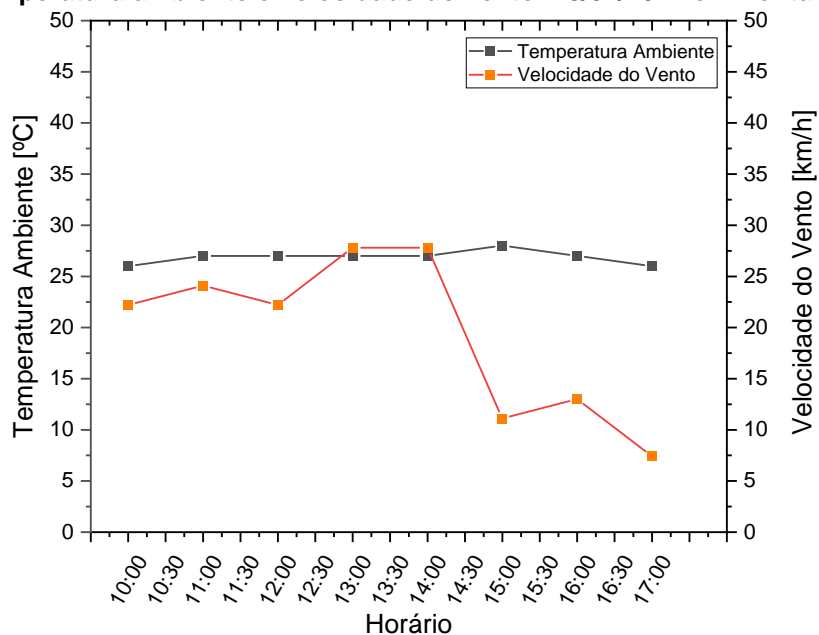
Figura 10 – Direção do vento no dia 28 de abril de 2022 em Ponta Grossa/PR



Fonte: <https://weatherspark.com> (2023)

N Figura 11 são apresentadas as distribuições de temperatura ambiente e de velocidade do vento no período dos testes experimentais.

Figura 11 – Temperatura ambiente e velocidade do vento: 28/04/2022 em Ponta Grossa/PR

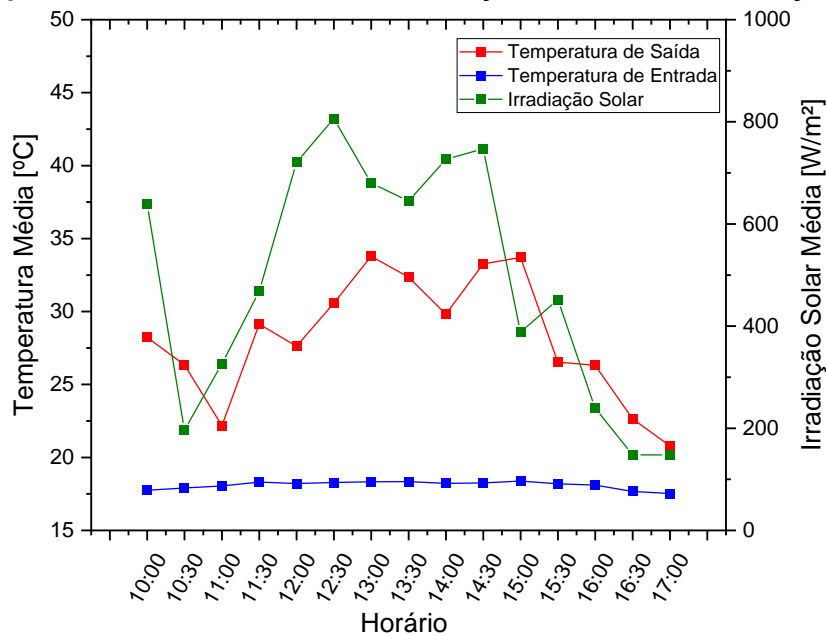


Fonte: Autoria Própria (2023)

Durante a execução dessa análise experimental, das 10h às 17h, a temperatura ambiente variou entre 26°C e 28°C enquanto a velocidade do vento ficou entre 2,06m/s (7,4km/h) e 7,72m/s (27,8km/h). A direção predominante do vento foi o Norte (N) no início dos testes e a partir do meio-dia a predominância dos ventos foi a direção Noroeste (NO). O céu permaneceu com poucas nuvens (boa visibilidade) no período de testes experimentais.

Na Figura 12 são apresentados, em função do horário, os resultados experimentais encontrados para as temperaturas médias de entrada e de saída da água no coletor solar do tipo placa plana e a de irradiação solar média considerando intervalos de 30 minutos.

Figura 12 – Temperaturas de entrada e saída e irradiação solar médias em função do horário



Fonte: Autorial Própria (2023)

Como a temperatura de entrada da água no coletor solar foi mantida constante em 18,0°C, por meio do banho ultratermostatizado, sua temperatura de saída no coletor solar do tipo placa plana variou de acordo com o nível incidência de radiação solar. É possível notar que o gradiente de temperatura da água entre a saída e a entrada do coletor solar teve seu maior valor, 15,5°C, por volta de 13h, onde apresentou uma maior irradiação solar média (806W/m²). Com a constante retirada de energia na forma de calor do fluido de trabalho, a máxima temperatura atingida pela água na saída do coletor solar plano foi de 33,8°C perto das 13h.

A irradiação solar média durante os testes experimentais foi de 511,4W/m², com picos em torno de 1.000W/m² entre às 13:00 e 13:30. Na última hora dos testes experimentais do desempenho térmico do coletor solar plano, entre às 16h e 17h, a irradiação solar média foi inferior a 200W/m², proporcionando um menor aquecimento da água observado pelos menos gradientes de temperatura, ΔT .

As temperaturas médias na entrada e na saída do coletor solar bem como a irradiação solar média durante toda a investigação experimental são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores médios durante os testes experimentais

Parâmetro	Valor
Temperatura Média de Entrada	18,1°C
Temperatura Média de Saída	28,2°C
Irradiação Solar Média	511,4W/m ²

Fonte: Autorial Própria (2023)

Para o cômputo da eficiência térmica média do coletor solar plano, as propriedades termodinâmicas da água foram encontradas através do *software EES™ (Engineering Equation Solver™)*, obtidas na temperatura média entre as temperaturas de entrada e saída da água no coletor solar: 23,15°C. A eficiência térmica média do coletor solar do tipo placa plana calculada foi de 68,6%±7,3%. Esse valor experimental encontrado está de acordo com o valor da eficiência térmica fornecida pelo fabricante do equipamento.

4. Conclusões

Neste trabalho foi realizada uma análise experimental do desempenho térmico de um coletor solar do tipo placa plana comercial, através da montagem do aparato experimental e execução de testes experimentais sob condições meteorológicas reais na cidade de Ponta Grossa no estado do Paraná. Os resultados experimentais para o coletor solar foram coletados das 10h às 17h do dia 28 de abril de 2022 nas dependências do Laboratório de Energia Solar (LabSOLAR) vinculado ao Programa de Pós-Graduação *Multicampi* (Mestrado) em Engenharia Mecânica (PPGEM-CP/PG) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Campus* Ponta Grossa. A inclinação de trabalho do coletor solar plano foi de 25° - latitude da cidade de Ponta Grossa/PR/Brasil: 25° 05' 42" Sul. A vazão volumétrica da água no sistema fechado foi de aproximadamente 0,50L/min e a sua temperatura de entrada no coletor solar foi mantida constante em aproximadamente 18°C. Essa condição de entrada é baseada em Xiao et al. (2022). Dos resultados experimentais obtidos, foi possível o cômputo da eficiência do coletor solar plano por meio da aplicação da Primeira Lei da Termodinâmica. A eficiência térmica média do equipamento foi de 68,6%±7,3% - dentro das especificações fornecidas pelo fabricante. Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a execução de testes experimentais para o coletor solar plano 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. Também é indicado a realização de testes de desempenho térmico de coletores solares de placa plana de baixo custo, desenvolvidos com materiais recicláveis.

Referências

- AZAD, E. **Theoretical and experimental investigation of heat pipe solar collector.** Elsevier: Experimental Thermal and Fluid Science, Teerã, 2008.
- ALTERNATIVE-ENERGY-TUTORIALS. **Flat Plate Collector.** Disponível em: <<https://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-hot-water/flat-plate-collector.html>> Acesso em: 13 jun. 2023.
- BEZERRA, A. M. **Energia Solar – Aquecedor Solar.** São Paulo, Livraria Nobel S.A. 1990.
- BOZIO, D. M. **Perspectivas Das Energias Renováveis E Não Renováveis Nas Matrizes Energéticas E Elétricas.** 18f Monografia de Especialização, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2018.
- EPE, **Relatório Síntese 2021, ano base 2020, 2021.**
- GAMBETA, R. *et al.* **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 7: Energia Limpa e Acessível.** EMBRAPA, 2018.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energias renováveis: um futuro sustentável. **Revista USP**, São Paulo (SP), n.72, p. 6-15, 2007.

IEA, **Global Energy Review 2021**, Assessing the effects of economic recoveries on

KIPP & ZONEN. **The Working Principle of a Thermopile Pyranometer**. Disponível em: <<https://www.kippzonen.com/News/572/The-Working-Principle-of-a-Thermopile-Pyranometer>>. Acesso em: 28 fev. 2023.

KOMEKO. **Manual do Usuário e de Instalação**. 2021.

KOMEKO. **Coletor Solar Linha Princess**. Disponível em: <<https://www.komeco.com.br/coletor-solar-linha-princess/>> Acesso em: 28 jun. 2023.

MENDES, A., **Metrologia e Incerteza de Medição** - Conceitos e Aplicações. Grupo GEN., 2012.

MOREIRA, J. R. S. **Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética**. 2. ed GEN LTC. Rio de Janeiro: 2021.

TIEPOLO, G. M. *et al.* **Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná**. 1. ed. Curitiba, 2017.

Weather Spark. Disponível em: <<https://weatherspark.com/h/d/29814/2022/4/28/Historical-Weather-on-Thursday-April-28-2022-in-Ponta-Grossa-Brazil>>. Acesso em: 15 mai. 2023.

XIAO *et al.* Influence of operating conditions on solar energy utilization efficiency of flat plate solar collector. **Renewables: Wind, Water, and Solar**. v. 9, n. 2., 2022.