

METODOLOGIA PARA A CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DE ENSAIOS PARA COLETORES SOLARES

METHODOLOGY FOR THE CONSTRUCTION OF A TEST BENCH FOR SOLAR COLLECTORS

Emilly Késsia da Costa Cavalcanti

ekccc@discente.ifpe.edu.br

Meydson Siqueira Costa da Silva

mscs@discente.ifpe.edu.br

Manoel Henrique de Oliveira Pedrosa Filho

manoel@pesqueira.ifpe.edu.br

RESUMO

Os coletores solares são dispositivos projetados para captar a radiação solar e convertê-la em energia térmica. Para garantir a eficiência e a confiabilidade desses equipamentos, é fundamental a realização de ensaios experimentais durante as etapas de desenvolvimento e validação. Assim, o objetivo é desenvolver o projeto e a construção de uma bancada de ensaios de coletores solares térmicos para verificar a eficiência de coletores. A metodologia utilizada foi a pesquisa experimental, empregada no projeto, construção e avaliação do desempenho da bancada de ensaios de coletores solares térmicos. Durante o desenvolvimento da bancada, a configuração inicial do sistema permitiu identificar aspectos técnicos que poderiam ser aprimorados para atender de forma mais adequada às condições necessárias aos ensaios experimentais. A partir dessa etapa, foram realizados ajustes na configuração hidráulica e no sentido de circulação do fluido térmico, considerando os princípios da convecção natural e as condições operacionais requeridas para a obtenção de medições confiáveis. Essas adequações contribuíram para o aperfeiçoamento da bancada experimental, possibilitando maior estabilidade operacional e melhor representatividade dos resultados obtidos. Ao final do desenvolvimento, a bancada demonstrou desempenho satisfatório no monitoramento das principais variáveis envolvidas na avaliação de coletores solares térmicos, como temperatura, irradiância solar e vazão do fluido. Dessa forma, o sistema desenvolvido constitui uma ferramenta adequada para a realização de ensaios experimentais, permitindo a análise do comportamento térmico dos coletores solares em diferentes condições de operação e servindo como base para futuras pesquisas e aprimoramentos tecnológicos.

Palavras-chave: Coletores solares. Eficiência. Bancada de testes. Energia térmica.

ABSTRACT

Solar collectors are devices designed to capture solar radiation and convert it into thermal energy. To ensure the efficiency and reliability of these systems, it is essential to perform experimental tests during the development and validation stages. Thus, the objective is to develop the design and construction of a thermal solar collector test bench to evaluate the efficiency of solar collectors. The methodology adopted was experimental research, applied to the design, construction, and performance evaluation of the thermal solar collector test bench. During the development of the test bench, the initial system configuration made it possible to identify technical aspects that could be improved to better meet the requirements of the experimental tests. Based on this stage, adjustments were made to the hydraulic configuration and to the direction of the thermal fluid circulation, taking into account the principles of natural convection and the operating conditions required to obtain reliable measurements. These improvements contributed to the optimization of the experimental test bench, providing greater operational stability and more representative experimental results. At the end of the development process, the test bench demonstrated satisfactory performance in monitoring the main variables involved in the evaluation of thermal solar collectors, such as temperature, solar irradiance, and fluid flow rate. Therefore, the developed system proved to be a suitable tool for conducting experimental tests, enabling the analysis of the thermal behavior of solar collectors under different operating conditions and serving as a basis for future research and technological improvements.

Keywords: Solar Collectors. Efficiency. Test Bench. Thermal Energy.

1 INTRODUÇÃO

A energia térmica é uma forma de energia que está diretamente relacionada à temperatura dos corpos e à movimentação das partículas que compõem a matéria. Ela desempenha um papel fundamental em nossa vida cotidiana, sendo utilizada em diversas aplicações, desde o aquecimento de ambientes até processos industriais. Uma das maneiras mais notáveis de utilizar a energia térmica é com o aproveitamento da energia solar por meio de coletores solares (Pereira *et al.*, 2013).

Os coletores solares são dispositivos tecnológicos projetados para captar a radiação solar e transformá-la em energia térmica, que pode ser utilizada para aquecer água, ambientes ou até mesmo em processos industriais que demandem calor. Funcionam por meio de superfícies absorvedoras que retêm a energia solar, transferindo o calor para um fluido térmico, geralmente água ou ar, que circula por tubulações. Esse princípio relativamente simples é altamente eficiente, especialmente em regiões com alta incidência solar (Carrión-Chamba, Murillo-Torres e Monteiro-Izquierdo, 2022).

Além de sua eficiência energética, os coletores solares desempenham um papel importante na promoção da sustentabilidade ambiental. A adoção dessa tecnologia contribui diretamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa, uma vez que seu funcionamento não gera poluentes atmosféricos nem resíduos nocivos.

De acordo com Carrión-Chamba, Murillo-Torres e Monteiro-Izquierdo (2022), essa tecnologia ganha ainda mais relevância diante da crescente demanda por soluções energéticas que conciliem desenvolvimento econômico e responsabilidade ambiental, especialmente em setores como o residencial, o comercial e o industrial.

Para garantir a eficiência e a confiabilidade desses coletores solares, é essencial realizar ensaios e testes criteriosos durante seu desenvolvimento e fabricação. E é nesse contexto que a construção de uma bancada de ensaios específica para coletores solares térmicos se mostra necessária e relevante.

Portanto, o problema de pesquisa, envolve a seguinte questão norteadora: como construir uma bancada de testes controlados e de baixo custo que permitam avaliar o desempenho e a eficiência de coletores solares disponíveis no IFPE Campus Pesqueira?

A construção dessa bancada envolverá a seleção e o dimensionamento dos componentes necessários, como sensores de temperatura. Serão considerados os parâmetros e as metodologias de ensaio estabelecidos pelas normas técnicas NBR 17003 (ABNT, 2021), visando assegurar a confiabilidade e a comparabilidade dos resultados obtidos.

Ao final deste trabalho, espera-se que a bancada de ensaios de coletores solares térmicos esteja pronta para ser utilizada, contribuindo para o avanço da pesquisa e do desenvolvimento nessa área, além de auxiliar na seleção e na otimização de coletores solares mais eficientes e sustentáveis e servir também de apoio nas aulas da disciplina de Energia Solar Térmica do curso de Engenharia Elétrica do IFPE Campus Pesqueira e como demonstração em eventos.

Logo, a construção dessa bancada representa um importante passo para o aprimoramento e a disseminação da tecnologia de energia solar térmica, contribuindo para a promoção de fontes de energia limpas e renováveis.

Assim, o objetivo geral do estudo é desenvolver o projeto e a construção de uma bancada de ensaios de coletores solares térmicos, para verificar a eficiência de coletores. Tem-se como objetivos específicos: projetar e realizar a construção da bancada de ensaios de coletores solares térmicos; realizar ensaios experimentais utilizando coletores solares térmicos na bancada construída; analisar os resultados obtidos nos ensaios e compará-los; e obter a curva característica.

A metodologia utilizada foi a pesquisa experimental, usada para projetar, construir e avaliar o desempenho da bancada de ensaios de coletores solares térmicos. A pesquisa experimental, Conforme Creswell e Creswell (2023), a pesquisa experimental permite testar hipóteses por meio da manipulação controlada das variáveis independentes e da observação de seus efeitos sobre as variáveis dependentes.

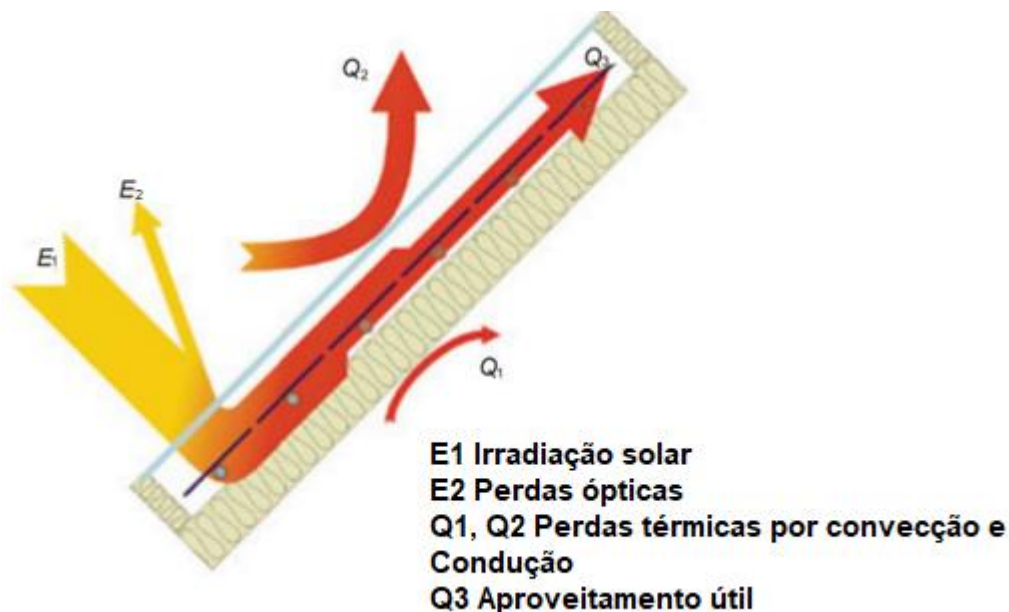
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Coletores solares

Os coletores solares desempenham um papel essencial na conversão da energia solar em calor, funcionando como dispositivos que capturam a radiação solar e a transferem para um fluido de trabalho, geralmente água ou um fluido térmico específico. O processo começa com a incidência da radiação solar na superfície do coletor, que contém elementos como cobertura de vidro, aletas e tubos condutores (Cavalcante, 2023).

Conforme ilustrado na Figura 1, há um fluxo energético de um coletor solar plano, ilustrando o caminho da energia solar desde sua incidência até seu aproveitamento, bem como as perdas envolvidas no processo.

Figura 1 – Fluxo energético no coletor solar



Fonte: Rodrigues e Matajs (*apud* Cavalcante, 2023, p. 20).

Para ter uma melhor compreensão do fluxo, entende-se cada variável da seguinte forma:

- E_1 – Irradiação Solar, é a energia recebida diretamente do Sol.
- E_2 – Perdas Ópticas, é a parte da energia solar que é refletida pela cobertura do coletor ou não é absorvida adequadamente, sendo, portanto, perdida por reflexão ou absorção ineficiente dos materiais transparentes (como o vidro).
- Q_1 e Q_2 – Perdas Térmicas por Convecção e Condução, indicam o calor que se perde para o ambiente devido aos processos de convecção (movimento do ar aquecido ao redor do coletor) e condução (transferência de calor para as estruturas do coletor ou para o ambiente ao redor).
- Q_3 – Aproveitamento Útil, é a energia térmica efetivamente absorvida e transferida para o fluido que circula no interior do coletor solar, como água ou ar. Corresponde à energia útil que pode ser utilizada, por exemplo, para aquecimento de água.

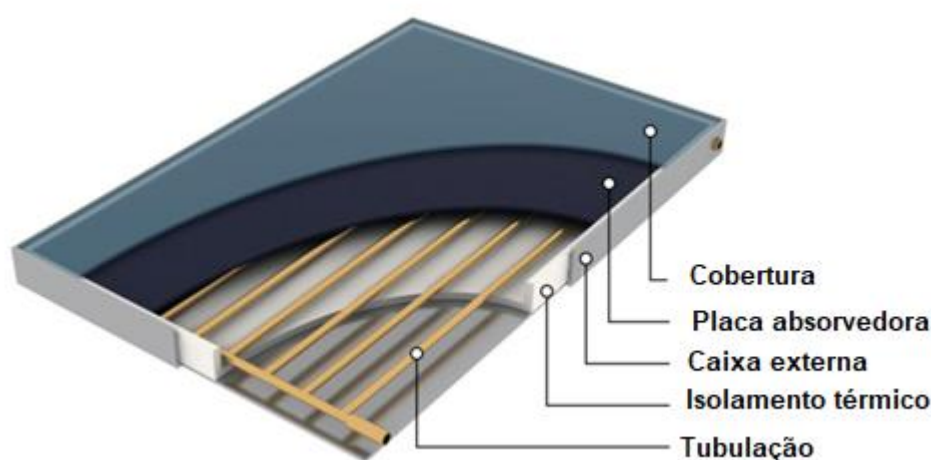
Logo, o fluxo energético evidencia que nem toda a radiação solar incidente é convertida em calor utilizável, pois parte é perdida por reflexões (ópticas) e outra parte por dispersão térmica, demonstrando a importância de projetos eficientes e materiais adequados para maximizar o aproveitamento da energia solar nos coletores.

Para maximizar o aproveitamento da radiação solar incidente, diversas técnicas têm sido desenvolvidas. Uma das mais eficazes é a aplicação de tinta preta seletiva na chapa absorvedora, que aumenta consideravelmente a capacidade de absorção da radiação (Begman *et al.*, 2019).

Essa técnica reduz a refletividade da superfície, garantindo que uma maior quantidade de energia solar seja convertida em calor utilizável. O uso de vidros com baixa reflexão ajuda a minimizar as perdas ópticas, permitindo que mais radiação chegue às aletas e seja transferida ao fluido. Esses avanços, aliados a um design otimizado e a materiais de alta qualidade, contribuem para um aumento significativo no rendimento do sistema.

Nos coletores solares planos, a radiação solar incide de maneira uniforme em toda a área da superfície coletora. Esses dispositivos são projetados para aquecer a água a temperaturas adequadas para uso sanitário e outras finalidades. A estrutura típica desse tipo de coletor pode ser visualizada na Figura 2.

Figura 2 – Esquema de coletor solar plano

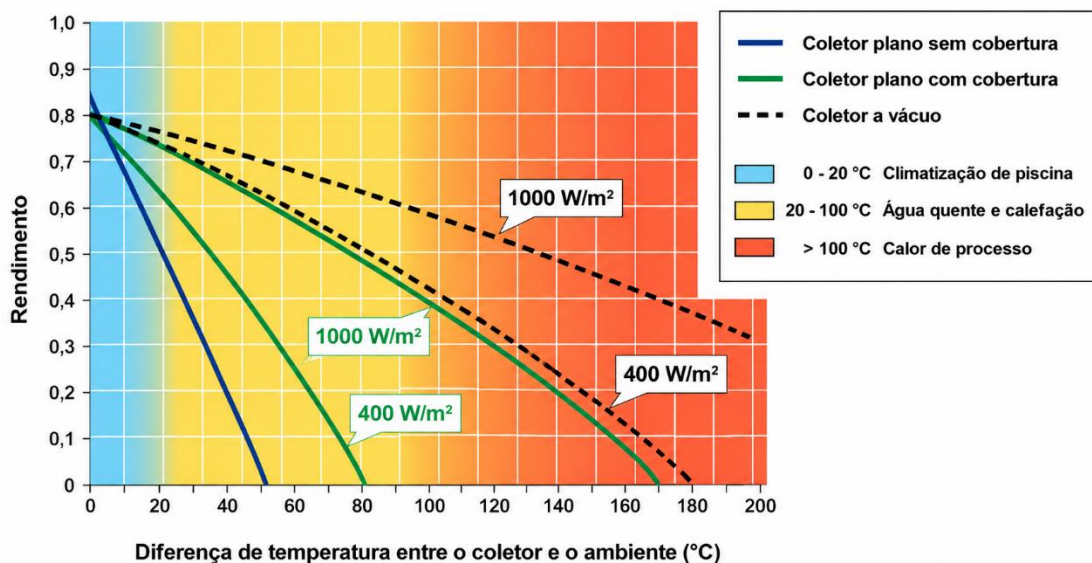


Fonte: Sindigás (2011, p. 13).

2.2 Curva característica

A curva característica (Figura 3) de um coletor solar plano geralmente representa a eficiência térmica em função da diferença de temperatura entre o coletor e o ambiente, normalizada pela irradiância solar incidente. A curva característica mostra como a eficiência diminui à medida que a diferença de temperatura entre o coletor (T_m) e o ambiente (T_{amb}) aumenta. Em condições ideais (baixa diferença térmica), a eficiência se aproxima da máxima teórica ($\eta_0=75\%$) mas declina devido às perdas térmicas lineares e quadráticas.

Figura 3 – Curva característica



Fonte: Sindigás (2011, p. 16).

A Figura 3 mostra um gráfico de rendimento de diferentes tipos de coletores solares em função da diferença de temperatura entre o coletor e o ambiente externo, expressa em graus Celsius (°C). No eixo vertical (y), tem-se o rendimento do coletor solar, variando de 0 a 1 (ou 0% a 100%). No eixo horizontal (x), está representada a diferença de temperatura entre o coletor e o ambiente, que varia de 0 °C a 180 °C. O gráfico apresenta três tipos de coletores solares e compara seus desempenhos em diferentes condições térmicas e níveis de irradiância solar.

Os tipos de coletores representados:

- Linha azul (coletor plano sem cobertura): Possui o menor rendimento geral e perde rapidamente eficiência à medida que a diferença de temperatura aumenta. Indicado para usos de baixa temperatura, como aquecimento de piscinas.
- Linha verde (coletor plano com cobertura): Apresenta melhor rendimento que o sem cobertura, mantendo-se eficaz em aplicações com diferença de temperatura moderada, como aquecimento de água e sistemas de calefação residencial.
- Linha preta tracejada (coletor a vácuo): Tem o melhor desempenho entre os três tipos, mantendo rendimento elevado mesmo em altas diferenças de temperatura. Esse tipo é mais adequado para aplicações de alta temperatura, como processos industriais (acima de 100 °C).

As curvas são mostradas para diferentes níveis de irradiância solar: 1000 W/m² e 400 W/m², o que demonstra que a eficiência do coletor também depende da intensidade da radiação solar incidente. Em geral, quanto maior a irradiância, maior o rendimento.

Portanto, o gráfico da Figura 3 evidencia que a escolha do tipo de coletor solar deve considerar tanto a diferença de temperatura desejada quanto a irradiância solar local. Coletores planos simples são indicados para usos com baixa exigência térmica, enquanto coletores a vácuo são mais eficientes para aplicações que demandam altas temperaturas, pois apresentam menor perda térmica e maior rendimento.

Com a substituição da norma NBR 15747-2 (2009) pela NBR 17003 (2021), os procedimentos para determinação do rendimento térmico de coletores solares planos

foram atualizados, incorporando diretrizes mais atuais e abrangentes para ensaios de desempenho térmico. A nova norma estabelece que os testes devem ser realizados em condições que simulem o mais fielmente possível o ambiente de operação real dos coletores, incluindo métodos experimentais padronizados, critérios de precisão nas medições e condições meteorológicas de referência.

A norma NBR 17003 (2021) define que o coletor deve ser submetido a operação sob radiação solar, com monitoramento de grandezas como irradiância, temperatura do fluido de trabalho, vazão, temperatura ambiente e velocidade do vento, assegurando que o equipamento opere em regime quase estacionário.

As equações empregadas na determinação do desempenho térmico dos coletores solares utilizam variáveis, parâmetros e coeficientes amplamente adotados na literatura técnica e nas normas aplicáveis. Para facilitar a compreensão das expressões matemáticas apresentadas neste estudo, o Quadro 1 apresenta a descrição dos principais símbolos, suas respectivas definições e unidades de medida.

Quadro 1 – Símbolos e variáveis utilizados nas equações de desempenho térmico dos coletores solares

Símbolo	Descrição	Unidade
Q_u	Potência térmica útil instantânea transferida ao fluido	W
$\dot{m}$	Vazão mássica do fluido de trabalho	kg/s
C_p	Calor específico do fluido (água)	J/(kg·K)
T_s	Temperatura de saída da água no coletor	°C
T_e	Temperatura de entrada da água no coletor	°C
T_{amb} ou T_α	Temperatura ambiente	°C
t_m	Temperatura média do fluido no coletor	°C
ΔT	Diferença entre as temperaturas de saída e entrada do fluido (($T_s - T_e$))	°C
A_c	Área de abertura (área útil) do coletor solar	m ²
G_T ou G	Irradiância solar incidente no plano do coletor	W/m ²
F_R	Fator de remoção de calor do coletor	Adimensional
(F')	Fator de eficiência da placa absorvedora	Adimensional
U_L	Coeficiente global de perdas térmicas	W/(m ² ·K)
$\tau\alpha$	Produto entre a transmitância da cobertura e a absorptância da placa absorvedora	Adimensional
η	Rendimento (eficiência) térmico do coletor	Adimensional ou %
η_0	Rendimento óptico do coletor (eficiência sem perdas térmicas)	Adimensional
a_1	Coeficiente linear de perdas térmicas	W/(m ² ·K)
a_2	Coeficiente quadrático de perdas térmicas	W/(m ² ·K ²)
T_m^*	Diferença de temperatura reduzida	m ² ·K/W

Fonte: Adaptado de Freitas (2017) e ABNT NBR 17003 (2021).

Com base nesses dados, calcula-se a potência térmica útil instantânea extraída pelo fluido de trabalho (Q_u), Equação 1 (Freitas, 2017), permitindo-se a avaliação do rendimento térmico do coletor solar para diferentes temperaturas de entrada do fluido. Essa abordagem atualizada proporciona maior confiabilidade e comparabilidade nos resultados dos ensaios de eficiência de coletores solares.

$$Q_u = mC_p(T_s - T_e) \quad (1)$$

Outra forma de se determinar a potência útil total de um coletor solar é a partir da diferença entre a energia solar absorvida pelo sistema e as perdas térmicas associadas, conforme indicado na Equação 2 (Freitas, 2017).

$$Q_u = A_c F_R [G_T(\tau\alpha) - U_L(T_e - T_\infty)] \quad (2)$$

O fator de remoção de calor do coletor, representado por F_R , expressa a eficiência com que o coletor transfere calor da superfície absorvedora para o fluido térmico. Ele é definido como a razão entre a quantidade real de calor útil transferido da placa absorvedora para a água (Q_u) e o valor teórico que seria transferido caso toda a superfície da placa estivesse à mesma temperatura da água na entrada do coletor. Já T_{amb} corresponde à temperatura do ambiente, m representa a vazão mássica da água, C_p é o calor específico da água, T_s e T_e são, respectivamente, as temperaturas de saída e de entrada da água no coletor.

No caso do coletor solar plano, seu rendimento térmico é caracterizado pela razão entre a energia útil absorvida e a radiação solar incidente sobre sua área de cobertura, sendo esse rendimento obtido por meio da Equação 3 (Freitas, 2017).

$$n = \frac{Q_u}{A_c G_t} = F_R \left[(\tau\alpha) - \frac{U_L(T_e - T_{amb})}{G_T} \right] \quad (3)$$

A expressão correspondente (Equação 3) fornece detalhes importantes sobre os limites de desempenho desses dispositivos, evidenciando que, à medida que a temperatura do coletor (T_e) se eleva, ocorrem maiores perdas térmicas.

Com isso, é possível determinar pontos experimentais do rendimento térmico em função da temperatura média do coletor, revelando um comportamento linear. No entanto, esse comportamento pode apresentar dispersões, atribuídas à influência de variáveis não controladas ou não consideradas no modelo. Para representar de forma mais precisa o desempenho do coletor, é necessário aplicar um ajuste estatístico por meio do método dos mínimos quadrados, que possibilita a construção de uma curva representativa com base nos dados coletados em testes. Essa curva reflete as características teóricas de operação do coletor (Freitas, 2017).

Entre os modelos de regressão mais utilizados estão o de perdas lineares e o de perdas quadráticas. A forma mais comum encontrada na literatura é o modelo linear, onde o termo $F_R(\tau\alpha)$ indica a fração da radiação absorvida pelo coletor, enquanto $F_R U_L$ representa as perdas térmicas proporcionais à diferença de temperatura entre o coletor e o ambiente.

No modelo quadrático, além dos termos lineares, inclui-se uma parcela adicional em que essa diferença de temperatura é elevada ao quadrado, permitindo uma descrição mais abrangente das perdas de calor. Essa formulação geral é apresentada na Equação 4.

$$n = n_0 - a_1 T_{m^*} - a_2 G (T_{m^*})^2 \quad (4)$$

Nesse modelo, os coeficientes a_1 e a_2 são obtidos por meio de experimentação, sendo que o parâmetro η_0 corresponde a $F'(\tau\alpha)$, o qual representa o rendimento térmico do coletor sob condições ideais de operação, ou seja, sem perdas térmicas.

A variável denominada diferença de temperatura reduzida (T_{m^*}), apresentada na Equação 5, é utilizada para normalizar a diferença térmica entre o coletor e o ambiente. Já a temperatura média do fluido de transferência de calor (t_m) é definida pela Equação 6, sendo calculada a partir da média aritmética entre as temperaturas de entrada e saída do fluido no coletor.

$$T_{m^*} = \frac{t_m - t_{amb}}{G} \quad (5)$$

$$t_m = t_e + \frac{\Delta T}{2} \quad (6)$$

Em que ΔT representa a diferença entre as temperaturas na entrada e na saída do coletor solar.

Os resultados são exibidos por meio de gráficos, nos quais o eixo vertical representa o rendimento térmico (η), enquanto o eixo horizontal indica a razão entre a diferença de temperatura do fluido na entrada do coletor e a temperatura ambiente, dividida pela radiação solar incidente no plano do coletor, conforme exemplificado na Figura 3.

Portanto, a análise gráfica, associada às equações experimentais, permite compreender a relação entre temperatura, irradiância e eficiência, e identificar os limites técnicos de cada tipo de coletor. A incorporação da norma NBR 17003 (2021) trouxe maior rigor e padronização aos ensaios de desempenho, elevando a confiabilidade dos dados obtidos em laboratório e sua aplicabilidade prática.

2.3 Estudos comparativos

2.3.1 Rosa, Manea e Krenzinger (2011)

O trabalho desenvolvido por Rosa, Manea e Krenzinger (2011) descreve o projeto, a construção e a instrumentação de uma bancada de testes para coletores solares térmicos, realizada no Laboratório de Energia Solar da UFRGS (LABSOL). O objetivo principal foi permitir a avaliação do desempenho térmico de diferentes tipos de coletores solares, especialmente os tubulares à vácuo, conforme os critérios estabelecidos pela norma brasileira NBR 15747-2 (2009).

A estrutura da bancada foi projetada para suportar dois coletores simultaneamente e possibilitar o giro da plataforma em 360°, garantindo a variação da incidência solar ao longo do dia e evitando superaquecimento quando não em uso. A construção utilizou perfis metálicos e componentes que garantem robustez, estabilidade e segurança na operação.

Foram utilizados sensores de temperatura de alta precisão, conforme exigência da norma (com resolução melhor que 0,02 °C e precisão inferior à 0,05 °C na medição diferencial). A aquisição de dados foi feita por um sistema Agilent34970A. A vazão da água foi controlada por uma bomba Texius (modelo TBHX-BR), e medida com um sensor Signet 2000 Micro Flow, previamente calibrado. Também foram monitoradas a radiação direta (com um pireliômetroNIP – Eppley), a radiação global (com piranômetroCM11 – Kipp&Zonen) e a velocidade do vento.

O coletor testado foi um modelo de tubos evacuados com 20 tubos, instalado com inclinação de 45°. Durante os testes, foram obtidos valores de calor útil (Q_u), radiação sobre a área de abertura (GAa) e sobre a área do absorvedor (GAabs), além da eficiência térmica relativa a essas áreas.

Os dados preliminares indicaram eficiências térmicas que variaram, por exemplo, entre 49,1% e 77,4% para a área de abertura e entre 58,6% e 92,4% para a área do absorvedor. O experimento também evidenciou que a correta definição das áreas envolvidas (abertura, absorvedor e área bruta) é crucial para a comparação entre coletores, evitando conclusões errôneas sobre desempenho. A bancada demonstrou ser adequada para realizar ensaios conforme os critérios da norma, incluindo flexibilidade para testes simultâneos de diferentes tipos de coletores.

A validade dos resultados obtidos foi garantida porque todos os requisitos normativos foram cumpridos, desde a construção da bancada e o controle de variáveis climáticas até a calibração dos equipamentos e uso de sensores com precisão exigida. O uso de parâmetros como a diferença de temperatura entre entrada e saída do fluido, a radiação incidente e a vazão ajustada conforme a área do coletor, permitiu determinar a eficiência térmica de forma confiável e comparável com outros ensaios técnicos (Rosa, Manea e Krenzinger, 2011).

2.3.2 Manea (2012)

O experimento descrito na dissertação de Manea (2012) teve como objetivo o desenvolvimento de uma bancada experimental para ensaios de coletores solares de tubos de vidro a vácuo, visando a caracterização de seu desempenho térmico conforme normas técnicas.

A bancada foi construída no Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e equipada com instrumentação cuidadosamente calibrada. Um dos principais dispositivos desenvolvidos foi um medidor da diferença de temperatura entre a entrada e saída da água no coletor, com incerteza inferior a 0,05 °C.

Os ensaios consideraram a diferença de temperatura da água (entrada e saída do coletor), vazão mássica, irradiação solar e temperatura ambiente.

Foram realizados testes com dois tubos à vácuo individualmente, com diferentes superfícies seletivas: (Al-N/SS/Cu) e (Al-N/Al). Os experimentos visaram determinar o coeficiente de transferência de calor dos tubos e as propriedades ópticas de absorção. Também foi ensaiado um coletor completo, composto por tubos de vidro a vácuo com transferência direta, sob regime permanente.

Os principais resultados do experimento indicaram que a metodologia adotada foi eficaz, permitindo a obtenção de parâmetros relevantes para futuras simulações. Observou-se que o tubo com superfície seletiva do tipo (Al-N/SS/Cu) apresentou um desempenho térmico superior em comparação ao tubo com superfície (Al-N/Al). Constatou-se ainda que os coletores compostos por tubos de vidro à vácuo demonstraram maior eficiência em situações nas quais a diferença entre a temperatura da água e a temperatura ambiente era mais acentuada (Manea, 2012).

O experimento conduzido por Manea (2012) seguiu os procedimentos estabelecidos pela NBR 15747-2 (2009), que, na época, era uma das principais referências internacionais para avaliação do desempenho térmico de coletores solares térmicos. Essa norma especifica métodos de ensaio padronizados para determinar a eficiência térmica de coletores solares, garantindo reprodutibilidade, confiabilidade e comparabilidade entre diferentes equipamentos e pesquisas.

A NBR 15747-2 (2009) exigia que os testes fossem realizados em condições controladas, com monitoramento de variáveis essenciais como: temperatura de entrada e saída do fluido térmico; vazão; radiação solar incidente no plano do coletor; e temperatura ambiente e estabilidade do regime de operação (regime permanente ou quase-estacionário).

Assim, os resultados foram considerados válidos porque respeitaram os critérios técnicos, os parâmetros de medição e os métodos estatísticos recomendados pela norma NBR 15747-2 (2009), o que assegura que os dados obtidos representam fielmente o comportamento térmico dos coletores testados. Essa validação é fundamental para comparações com outros estudos e também para aplicação dos dados em simulações energéticas de sistemas solares térmicos.

2.3.3 Freitas (2017)

A dissertação de Freitas (2017), apresentada à Universidade Federal da Paraíba, teve como objetivo realizar a caracterização térmica de um coletor solar de placa plana, combinando análise numérica e ensaios experimentais. O trabalho buscou especialmente avaliar o impacto da aplicação de uma película plástica entre o vidro e a placa absorvedora sobre o rendimento térmico do sistema.

O experimento foi conduzido no Laboratório de Energia Solar (LES) da UFPB, onde uma bancada de testes foi adaptada para avaliar coletores solares planos em diferentes condições. A montagem contou com sensores de temperatura (termopares e termorresistores), medidores de radiação solar, sensores de vento e um sistema de aquisição de dados desenvolvido em LabVIEW, com interface gráfica para visualização em tempo real.

Além dos testes físicos, foi desenvolvida uma simulação numérica unidimensional, resolvida pelo Método dos Volumes Finitos, usando linguagem MATLAB. O modelo leva em consideração os fenômenos de transferência de calor por condução, convecção e radiação nos diferentes componentes do coletor (vidro, plástico, placa absorvedora, fluido e isolante).

Os principais parâmetros controlados e avaliados foram: temperaturas na entrada e saída do fluido; vazão volumétrica (entre 1,0 e 2,0 L/min), radiação solar incidente; inclinação do coletor (22°); e composição e configuração dos coletores (com e sem película plástica adicional).

Os principais resultados obtidos no estudo indicaram que a inserção de uma película plástica entre o vidro e a placa absorvedora proporcionou um ganho

significativo de desempenho, resultando em um aumento de aproximadamente 44% no rendimento térmico do coletor solar.

Os resultados numéricos provenientes do modelo computacional desenvolvido mostraram-se coerentes com os dados experimentais, o que contribuiu para a validação do modelo proposto. Observou-se também que a temperatura média do fluido e da placa absorvedora foi mais elevada nas configurações que utilizaram dupla cobertura (vidro + plástico), o que evidencia uma redução das perdas térmicas nesse arranjo. De modo geral, os coletores modificados apresentaram maior eficiência em condições de operação contínua, confirmando o potencial da alteração na estrutura do equipamento (Freitas, 2017).

No que se refere à norma técnica que foi utilizada, os testes foram conduzidos com base nos requisitos da NBR 15747-2 (2009), norma que, na época, regulamentava os procedimentos para avaliação do desempenho térmico de coletores solares planos. Essa norma estabelecia critérios rigorosos, como medições de temperatura com alta precisão (incerteza inferior a 0,05 °C), controle da vazão do fluido de trabalho, registro da radiação solar incidente no plano do coletor e o monitoramento das condições meteorológicas, como temperatura ambiente e velocidade do vento. A conformidade com esses critérios garantiu a confiabilidade e a validação dos resultados obtidos ao longo do experimento.

Os resultados foram validados por estarem em conformidade com os requisitos da norma: a bancada experimental foi equipada com sensores calibrados e os dados foram adquiridos de forma contínua, permitindo o cálculo preciso do rendimento térmico instantâneo e médio dos coletores. Logo, a comparação entre os resultados simulados e medidos comprova a confiabilidade da modelagem.

2.3.4 Ara e Sowmy (2020)

No estudo desenvolvido por Ara e Sowmy (2020), foi realizada uma análise térmica de um coletor solar plano utilizando modelagem numérica por fluidodinâmica computacional (CFD), com posterior validação experimental em um simulador solar em ambiente controlado. O objetivo principal foi obter a curva de eficiência térmica do coletor por meio da simulação e verificar sua precisão comparando-a com os dados obtidos experimentalmente.

A etapa experimental consistiu na instalação de um coletor solar em uma bancada de testes equipada com circuito hidráulico e instrumentação térmica de alta precisão (termorresistências PT100). A água foi circulada no interior do coletor, e as temperaturas de entrada e saída, a vazão do fluido e a radiação solar incidente foram monitoradas. A irradiância foi fornecida por um simulador solar composto por lâmpadas, com o mapeamento da radiação realizado por meio de piranômetro.

Sete pontos experimentais, com diferentes temperaturas de entrada da água, foram coletados sob regime permanente, permitindo o cálculo da eficiência térmica instantânea e da temperatura média reduzida do coletor, conforme equações normalizadas. Esses dados permitiram traçar uma curva de eficiência de segundo grau, ajustada por regressão.

Paralelamente, foi desenvolvido um modelo tridimensional em CFD (usando ANSYS Fluent), baseado em um único tubo do coletor, considerando simetria e simplificações geométricas. A simulação incluiu três zonas principais: ar (entre o vidro e a placa), fluido (no interior do tubo) e isolante térmico. As condições de contorno incluíram convecção forçada, radiação solar (modelo Solar Ray Tracing) e troca térmica por condução e radiação.

Os parâmetros utilizados foram: a vazão mássica da água no coletor (kg/s); temperaturas de entrada e saída do fluido; temperatura ambiente; irradiância solar (W/m^2); e a geometria e propriedades térmicas do coletor.

A curva obtida via CFD demonstrou excelente concordância com os resultados experimentais, com desvio médio inferior a 5%, validando o modelo numérico para previsão da eficiência térmica média do coletor. Além da curva de eficiência, os resultados de simulação forneceram contornos de temperatura e velocidade, revelando gradientes térmicos importantes na placa absorvedora e circulação natural de ar entre a placa e o vidro.

Os ensaios experimentais seguiram os critérios da NBR 15747-2 (2009), que regulamenta os métodos de ensaio para coletores solares térmicos. Essa norma estabelece diretrizes para medições precisas de temperatura, irradiância e vazão sob regime permanente, além do cálculo da eficiência térmica instantânea com base em condições padronizadas. Logo, a aderência a essa norma garante a comparabilidade e confiabilidade dos resultados obtidos.

A boa correspondência entre os dados simulados e os dados obtidos em laboratório validou o modelo proposto. O desvio padrão residual entre os pontos experimentais e a curva CFD foi de apenas 4,58%, evidenciando a robustez do modelo como ferramenta para prever o comportamento térmico de coletores solares planos.

2.3.5 Santos (2023)

O trabalho desenvolvido por Santos (2023), no Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, apresenta uma proposta experimental detalhada de avaliação do desempenho térmico de coletores solares utilizando nanofluidos de grafeno em concentrações de 5 ppm, 10 ppm e 20 ppm, comparativamente ao coletor convencional com água destilada.

A autora realizou os testes utilizando uma bancada experimental instrumentada e posicionada em campo aberto, com aquisição contínua de dados de radiação solar e temperatura, além da aplicação dos parâmetros descritos pela NBR 17003:2021, especialmente no que se refere ao cálculo da eficiência térmica instantânea dos coletores solares.

Os testes seguiram as diretrizes de medição conforme a norma NBR 17003:2021, considerando:

- Irradiância global $\geq 800 \text{ W/m}^2$;
- Registro da temperatura de entrada, saída e ambiente em intervalos regulares;
- Cálculo da eficiência térmica (η) com base na equação padrão da NBR 17003, considerando a razão de temperatura reduzida ($T_m - T_a / G$), onde T_m é a temperatura média do fluido, T_a é a temperatura ambiente e G é a irradiância;
- Validação da estabilidade da irradiância e das condições ambientais, conforme exigido para ensaios de desempenho térmico.

A dissertação de Santos (2023) representa um avanço metodológico por aplicar experimentalmente as diretrizes da NBR 17003:2021 em um contexto de novos materiais funcionais (grafeno), além de demonstrar a importância do controle de estabilidade térmica, ótica e física dos nanofluidos utilizados.

O trabalho também destaca que, apesar das vantagens térmicas do nanofluido de baixa concentração, seu uso requer cuidados específicos com preparação, dispersão e tempo de operação, o que reforça a importância da normatização de ensaios de durabilidade e confiabilidade, ainda não plenamente tratados pela norma.

3 METODOLOGIA

3.1 Métodos

O estudo foi construído com base em uma revisão de literatura, que, segundo Creswell e Creswell (2023), consiste em um levantamento sistemático de materiais já publicados sobre um determinado tema, abrangendo fontes como livros, artigos científicos, teses, dissertações, normas técnicas e demais documentos relevantes. Esse tipo de pesquisa é fundamental para a consolidação de um referencial teórico sólido, pois permite ao pesquisador conhecer o estado da arte do tema investigado, identificar lacunas existentes, mapear diferentes abordagens metodológicas e conceituais, e embasar criticamente as escolhas feitas ao longo do trabalho.

No contexto do presente estudo, a pesquisa bibliográfica serve como ponto de partida para compreender os fundamentos teóricos da energia solar, o funcionamento e os tipos de coletores solares térmicos, bem como os principais parâmetros técnicos que influenciam seu desempenho. A pesquisa bibliográfica fornece ainda suporte para a definição de diretrizes técnicas e operacionais voltadas à elaboração de um projeto de bancada experimental, assegurando que a proposta esteja alinhada com os conhecimentos mais atualizados disponíveis na literatura especializada.

Para a concepção e construção da bancada de ensaios, foi adotada a pesquisa experimental, cuja finalidade é testar hipóteses e analisar, em condições controladas, os efeitos de variáveis específicas sobre determinado objeto de estudo. Essa abordagem metodológica foi essencial para o desenvolvimento prático do projeto, permitindo não apenas projetar e montar a bancada de maneira funcional e eficiente, mas também realizar experimentações sistemáticas com coletores solares térmicos.

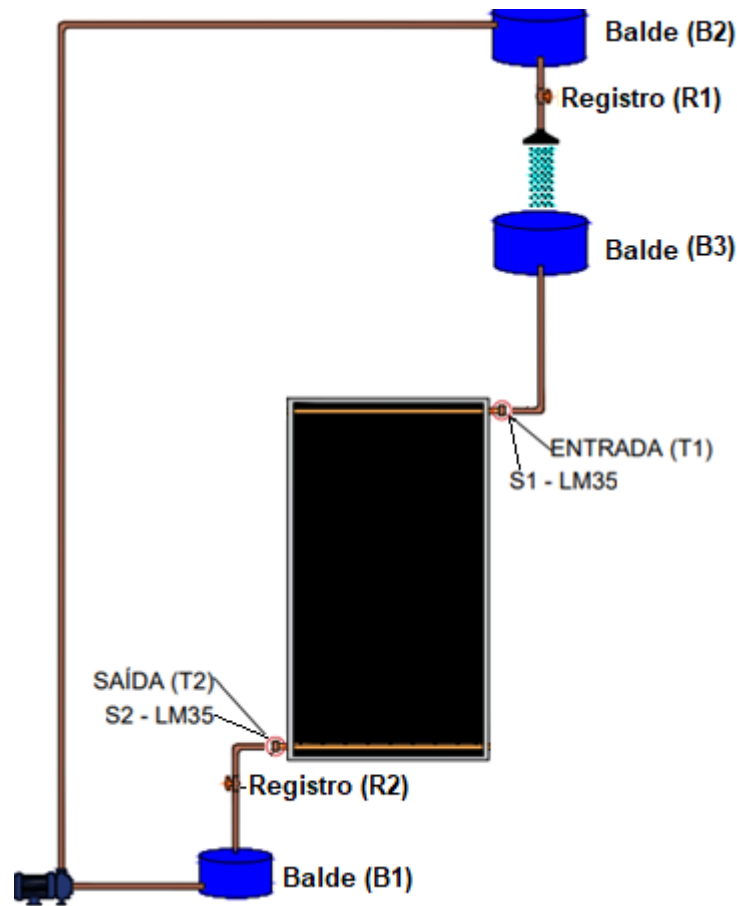
A pesquisa experimental, conforme descrita por Gil (2007), envolve uma sequência estruturada de etapas, sendo elas a definição clara do problema, a identificação e controle das variáveis independentes e dependentes, o estabelecimento de condições de observação e medição, e a coleta e análise de dados empíricos.

No presente trabalho, a aplicação dessa metodologia possibilitou a obtenção de dados quantitativos sobre o comportamento térmico dos coletores em diferentes condições de operação como variações na irradiância solar, na vazão do fluido térmico e na diferença de temperatura entre o coletor e o ambiente. Esses dados são fundamentais para validar o desempenho dos coletores solares e gerar informações comparativas, que poderão orientar melhorias no design, na eficiência energética e na aplicabilidade desses sistemas em contextos reais.

Esta construção será descrita em duas partes:

3.1.1 Parte 1 - Projeto hidráulico conceitual da bancada

Figura 4 – Layout da Bancada e do sistema hidráulico



Fonte: Os autores.

O sistema hidráulico apresentado é composto por três reservatórios, identificados como B1, B2 e B3, onde os reservatórios B2 e B3 possuem capacidade de 25 litros cada. O sistema conta também com dois sensores de temperatura do tipo LM35, denominados S1 e S2, dois dispositivos reguladores de fluxo, referenciados como registros R1 e R2, além de uma bomba para recirculação do fluido.

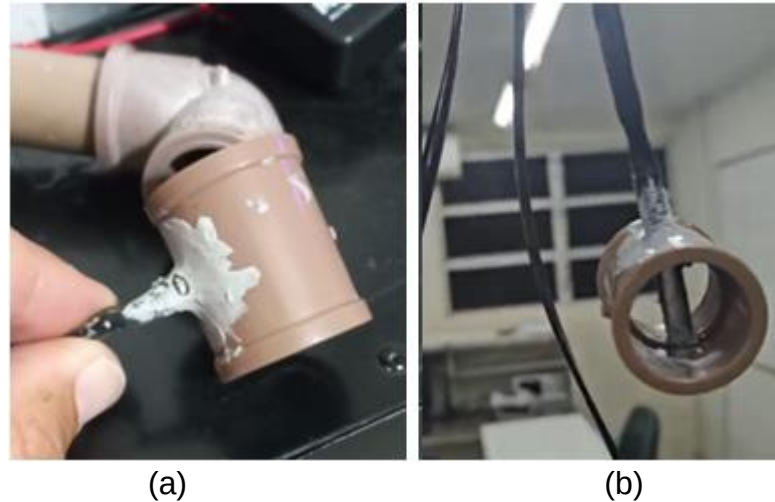
O circuito hidráulico é fechado, permitindo a circulação contínua da água. Inicialmente, o reservatório B2 é abastecido com água, que é gradualmente transferida para o reservatório B3 por meio de um chuveiro (dispositivo de gotejamento), o qual promove a perda térmica do fluido. A água então ingressa no coletor através da entrada T1, onde a temperatura é monitorada pelo sensor S1. Após o percurso pelo coletor, o fluido é escoado pela saída T2, cuja temperatura é aferida pelo sensor S2, e é armazenado no reservatório B1.

Com a ativação da bomba, a água é recirculada, retornando ao reservatório B2 e reiniciando o ciclo descrito, garantindo a manutenção do fluxo e o processo de troca térmica do sistema.

3.1.2 Parte 2 – Descrição da obtenção das grandezas do processo da bancada

São utilizados 2 sensores de temperatura da água LM35, um para entrada e um para saída, os quais convertem a temperatura para um sinal elétrico tendo como constante de acordo com o seu datasheet 10 mV/°C.

Figura 5 – Montagem do sensor LM35: a) vista externa b) vista interna



Fonte: Os autores.

Para a montagem do LM35 foi empregada uma luva de PVC de $\frac{3}{4}$, preenchida com pasta térmica, e um tubo de alumínio para garantir melhor transferência de calor. Inicialmente, abriu-se um furo lateral na luva (Figura 5a), pelo qual se introduziu o tubo de alumínio. Em seguida, o sensor LM35 foi encaixado dentro desse tubo (Figura 5b), de modo a ficar em contato direto com a água, aumentando sua sensibilidade térmica.

A medição da irradiância usou um piranômetro Splite2 (Figura 6a), instrumento projetado para quantificar a radiação solar global incidente sobre uma superfície plana. O SP-Lite2 opera com base no princípio fotovoltaico, convertendo a energia solar recebida em um sinal de tensão proporcional à irradiância em W/m^2 .

Esse tipo de sensor é amplamente empregado em estudos de desempenho de sistemas fotovoltaicos, climatologia e monitoramento ambiental, garantindo precisão nas medições da radiação solar, fator essencial para análises de eficiência energética e comportamento térmico em diferentes condições de insolação.

Todos os dados experimentais, com exceção da temperatura ambiente, foram registrados automaticamente por meio de um datalogger modelo CR-10X, conforme ilustrado na Figura 6b. Esse equipamento, fabricado pela empresa Campbell Scientific, é amplamente utilizado em pesquisas científicas e aplicações de monitoramento ambiental e energético devido à sua alta precisão, confiabilidade e capacidade de armazenamento de dados. O CR-10X foi configurado para realizar a leitura contínua de sensores conectados à bancada de ensaio.

Figura 6 – a) Piranômetro SP-lite2 b) Datalogger CR-10X



Fonte: Os autores.

A temperatura ambiente utilizada no experimento foi obtida a partir da estação solarimétrica instalada no campus Pesqueira do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE), pertencente à Rede Solarimétrica de Pernambuco (REDESOLPE) (www.redesolpe.com.br).

Essa estação conta com sensores meteorológicos calibrados e operando de forma contínua, sendo responsável pela coleta de dados climáticos como temperatura do ar, irradiância solar, umidade relativa e velocidade do vento. As medições são registradas automaticamente e disponibilizadas para fins acadêmicos e de pesquisa, garantindo a confiabilidade e a representatividade dos dados utilizados no estudo.

Por falta de um medidor adequado, a vazão foi medida com um recipiente de 0,5 litros, onde foi obtida a vazão da norma, que é de 1 litro/minuto (Figura 7).

Figura 7 – Medidor de vazão



Fonte: Os autores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esse tópico vai apresentar os resultados obtidos com o estudo experimental, elencando os materiais usados, os processos de fabricação da bancada e do sistema hidráulico e elétrico, bem como os desafios encontrados com a reformulação do projeto e os resultados finais dos testes após a reformulação do sistema.

4.1 Materiais

2 baldes de 25 litros;
 1 balde de 15 litros;
 1 cano PVC de $\frac{3}{4}$ ";
 1 cola de cano;
 Conexões (5 flanges $\frac{3}{4}$ ", joelhos e curvas);
 1 bomba elétrica solar 12 V; e
 2 sensores térmicos LM35.

4.2 Processos de fabricação e montagem da bancada e do sistema

Para a construção da bancada, foi necessária a construção de um sistema de resfriamento de água, o qual envolveu o uso de bomba, baldes e sensores. A Figura 8 mostra o sistema depois de montado, a qual documenta a estrutura física e os elementos que compõem a bancada de testes de coletores solares térmicos,

evidenciando uma montagem de baixo custo, porém funcional, voltada à análise do desempenho do coletor em condições reais de campo. Esse tipo de instalação é essencial para avaliar variáveis como ganho térmico, perda de calor, eficiência e comportamento do sistema em diferentes horários e condições climáticas.

Figura 8 – Sistema de resfriamento de água



Fonte: Os autores.

Com relação ao posicionamento, de acordo com o Sindigás (2011) para a instalação de coletores solares a inclinação deve ser próxima à latitude do local, acrescida de 10° . Logo, a inclinação ideal dos coletores solares em Pesqueira (PE) é de aproximadamente 18° em relação ao plano horizontal, pois Pesqueira está localizada aproximadamente na latitude 8° Sul, voltada para o norte geográfico (por estar no hemisfério sul), para otimizar a captação de radiação solar ao longo do ano. Assim, a bancada foi construída com uma inclinação $15,8^\circ$ (Figura 9a) e azimute de 209° (Figura 9b).

O azimute define o ângulo em relação ao norte geográfico no plano horizontal. No hemisfério sul, como é o caso de Pesqueira (PE), a orientação ideal dos coletores solares é para o norte geográfico (azimute 0°), pois essa direção garante maior tempo de exposição à radiação solar direta ao longo do dia e do ano. No caso, o azimute da bancada é de 209° , o que significa que os coletores estão voltados para o sudoeste, ou seja, 79° a oeste do norte ideal (0°).

Figura 9 – Medição da: a) inclinação do coletor e b) azimute do coletor



(a)

(b)

Fonte: Os autores.

Contudo, mesmo que essas condições não sejam plenamente atendidas, o sistema ainda pode operar, embora com um rendimento reduzido. Para compensar essa perda de eficiência, é possível ampliar a área dos coletores.

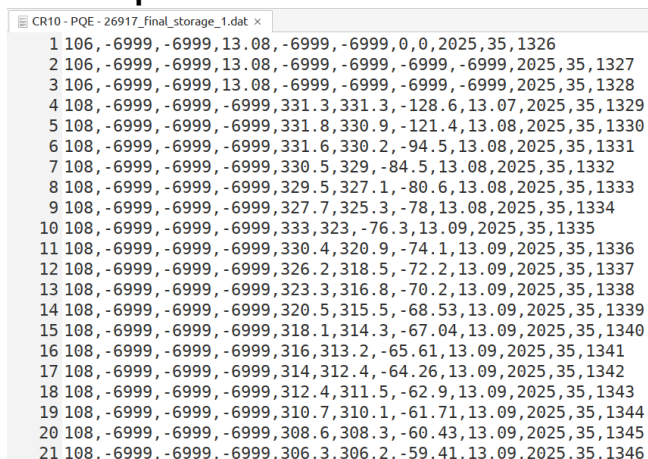
4.3 Tratamento dos dados

O tratamento dos dados refere-se ao processo de organização, interpretação e análise dos dados brutos coletados por meio dos sensores acoplados ao sistema experimental. Esses dados, originalmente registrados em formato digital pelo datalogger modelo CR-10X, necessitam ser estruturados e convertidos em informações compreensíveis e relevantes para a análise do desempenho térmico dos coletores solares. A Figura 10 ilustra um exemplo dos dados obtidos diretamente do datalogger, que foram coletados em intervalos regulares de um minuto durante os ensaios.

Para a extração e manipulação dessas informações, utilizou-se o software LoggerNet, desenvolvido pela Campbell Scientific, o qual é amplamente reconhecido por sua eficiência na comunicação com dataloggers e na gestão de grandes volumes de dados ambientais e energéticos. Por meio dessa ferramenta, os dados foram baixados da memória interna do CR-10X e organizados em planilhas tabulares, possibilitando a visualização cronológica das variáveis monitoradas, como temperatura de entrada e saída da água, irradiância solar, tempo de ensaio, e em alguns casos, a vazão do fluido térmico.

Após a exportação, os dados foram submetidos a um processo de filtragem para eliminação de valores inconsistentes, ruídos ou registros fora da faixa operacional esperada. Em seguida, foi realizada a tratativa estatística e gráfica desses valores, com o objetivo de gerar curvas de desempenho, identificar padrões de comportamento térmico e avaliar a eficiência dos coletores solares sob diferentes condições experimentais. Essa etapa é fundamental para transformar os registros eletrônicos em evidências concretas que sustentem as conclusões do estudo, permitindo ainda a comparação entre modelos de coletores e diferentes configurações operacionais.

Figura 10 – Exemplo de dados brutos obtidos do datalogger



CR10 - PQE - 26917_final_storage_1.dat x

1	106	-6999	-6999	13.08	-6999	-6999	0	0	2025	35	1326
2	106	-6999	-6999	13.08	-6999	-6999	-6999	-6999	2025	35	1327
3	106	-6999	-6999	13.08	-6999	-6999	-6999	-6999	2025	35	1328
4	108	-6999	-6999	-6999	331.3	331.3	-128.6	13.07	2025	35	1329
5	108	-6999	-6999	-6999	331.8	330.9	-121.4	13.08	2025	35	1330
6	108	-6999	-6999	-6999	331.6	330.2	-94.5	13.08	2025	35	1331
7	108	-6999	-6999	-6999	330.5	329	-84.5	13.08	2025	35	1332
8	108	-6999	-6999	-6999	329.5	327.1	-80.6	13.08	2025	35	1333
9	108	-6999	-6999	-6999	327.7	325.3	-78	13.08	2025	35	1334
10	108	-6999	-6999	-6999	333	323	-76.3	13.09	2025	35	1335
11	108	-6999	-6999	-6999	330.4	320.9	-74.1	13.09	2025	35	1336
12	108	-6999	-6999	-6999	326.2	318.5	-72.2	13.09	2025	35	1337
13	108	-6999	-6999	-6999	323.3	316.8	-70.2	13.09	2025	35	1338
14	108	-6999	-6999	-6999	320.5	315.5	-68.53	13.09	2025	35	1339
15	108	-6999	-6999	-6999	318.1	314.3	-67.04	13.09	2025	35	1340
16	108	-6999	-6999	-6999	316	313.2	-65.61	13.09	2025	35	1341
17	108	-6999	-6999	-6999	314	312.4	-64.26	13.09	2025	35	1342
18	108	-6999	-6999	-6999	312.4	311.5	-62.9	13.09	2025	35	1343
19	108	-6999	-6999	-6999	310.7	310.1	-61.71	13.09	2025	35	1344
20	108	-6999	-6999	-6999	308.6	308.3	-60.43	13.09	2025	35	1345
21	108	-6999	-6999	-6999	306.3	306.2	-59.41	13.09	2025	35	1346

Fonte: Os autores.

O tratamento inicial dos dados foi feito por meio de um código em Python (Figura 11), o qual além de renomear as colunas como Tin, Tout, GHI (que correspondem à Te, Ts, G respectivamente), cálculo da hora, das temperaturas e irradiância a partir das constantes dos sensores.

Figura 11 – Trecho do código para cálculo das grandezas

```
local = '/home/manoel/Documents/D/REDESOLPE/ESTSOL - PQE/'
arquivo = 'CR10 - PQE - 26917_final_storage_1.dat'
dados = pd.read_csv(local+arquivo, sep=',')
dados = dados.rename(columns={'-6999': 'ch1', '-6999.1': 'ch2', '13.08': 'ch3', '-6999.2': 'Tin', '-6999.3': 'Tout',
                              '0': 'GHI', '0.1': 'vbat', '2025': 'ano', '35': 'doy', '1326': 'horario'})
dados['hora_dec'] = (dados['horario']//100) + (dados['horario']-(dados['horario']//100)*100)/60
dados['minuto'] = dados['horario']-100*(dados['horario']//100)
dados['hora'] = (dados['horario']//100)
dados['10min'] = dados['minuto']//2
dados['Tin'] = dados['Tin']/10
dados['Tout'] = dados['Tout']/10
dados['diftemp'] = dados['Tout'] - dados['Tin']
dados['GHI'] = dados['GHI'] * 15.805133 # splite serial 172809 GHI em W/m²
```

Fonte: Os autores.

Ainda sobre o código, o trecho de código apresentado na Figura 12 obtém a temperatura ambiente do servidor da REDESOLPE e junta ele com as outras grandezas.

Figura 12 – Trecho do código para obtenção da temperatura ambiente

```
try:
    cnx2 = sq.create_engine('mysql+mysqlconnector://{0}:{1}@{2}/{3}'.
                           format(database_username, database_password, database_ip, database_name))
    print('Realizando consulta no banco de dados')
    consulta = 'SELECT dia, mes, ano, hora, minuto, temperatura_ambiente\'
               \' from PE_IFPE_PESQUEIRA where ano = 2025 and mes>1'
    dados_temp = pd.read_sql(consulta, con=cnx2)
except Exception as e:
    print(e)

dados_temp['doy'] = list(map(solar.doy, dados_temp['ano'], dados_temp['mes'], dados_temp['dia']))
dados = pd.merge(dados, dados_temp, how='left', on=(['doy', 'ano', 'hora', 'minuto']))
dados = dados.drop(['106', 'ch1', 'ch2', 'ch3', 'vbat'], axis=1)
dados = dados.rename(columns={'temperatura_ambiente': 'Tamb'})
```

Fonte: Os autores.

A Figura 13 apresenta o trecho do código que faz a implementação das equações do coletor.

Figura 13 – Trecho do código para implementação das equações

```
dados['Eout'] = m*c*(dados['Tout']-dados['Tin']) # em W
dados['Ein'] = dados['GHI']*area # em W
dados['eficiencia'] = dados['Eout']/dados['Ein']
dados['tmm'] = (((dados['Tout']+dados['Tin'])/2)-dados['Tamb'])/dados['GHI']
```

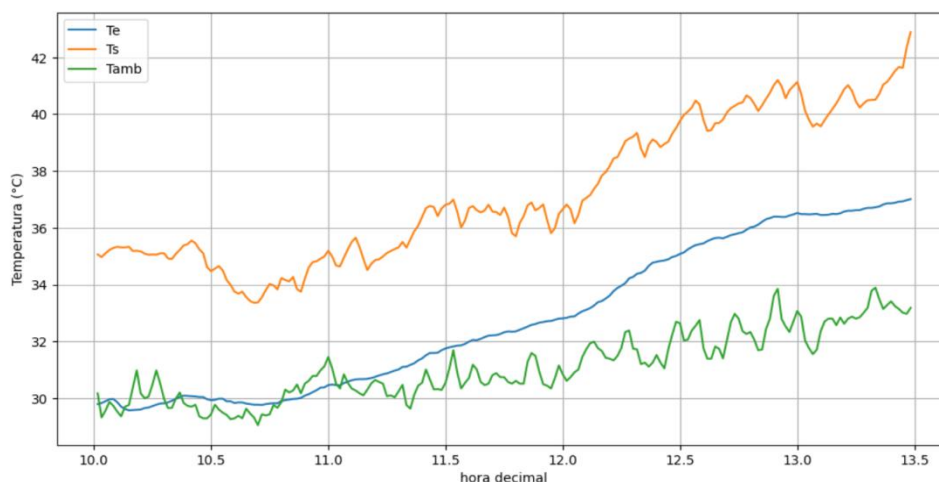
Fonte: Os autores.

4.4 Desafios do projeto

O planejamento inicial do sistema de resfriamento de água permitiu avaliar o comportamento térmico do circuito e identificar oportunidades de aprimoramento em sua configuração. Observou-se que a temperatura de entrada apresentou comportamento semelhante à temperatura de saída, conforme ilustrado no Gráfico 1,

indicando a necessidade de adequações no sistema para proporcionar maior eficiência no resfriamento da água.

Gráfico 1 – Resultado do teste inicial do dia 19/02/2025



Fonte: Os autores.

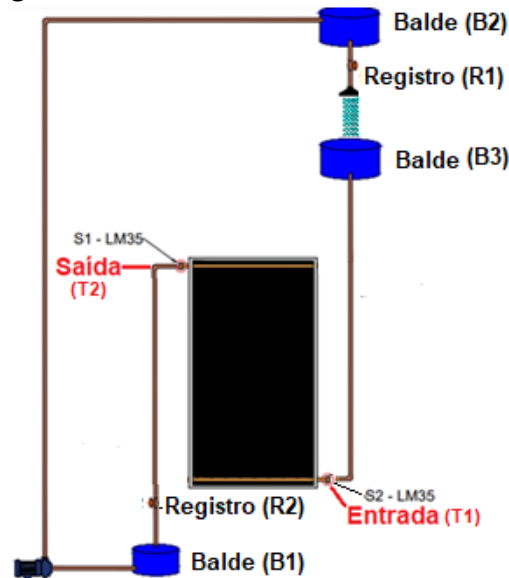
O Gráfico 1 mostra a evolução das temperaturas ao longo do tempo decimal, destacando três curvas: a temperatura de entrada (T_e) em azul; a temperatura de saída (T_s) em laranja; e a temperatura ambiente (T_{amb}) em verde. Observa-se que a temperatura de saída (T_s) apresenta um aumento contínuo e expressivo ao longo do período analisado, o que indica aquecimento da água pelo sistema.

No entanto, a análise da eficiência do coletor solar é comprometida nesta configuração, pois a temperatura de entrada (T_e) já se encontra consideravelmente acima da temperatura ambiente (T_{amb}) desde o início da medição.

Idealmente, T_e deveria ser igual ou muito próxima a T_{amb} , permitindo que o ganho térmico observado em T_s refletisse exclusivamente a atuação do coletor. Como T_e já se apresenta elevada, esse pré-aquecimento interfere diretamente no valor final de T_{out} , dificultando a avaliação precisa do desempenho térmico do coletor solar e comprometendo a determinação de sua eficiência real.

Outra situação observada foi o sentido do fluxo estar de cima para baixo no planejamento inicial (Figura 14). O princípio observado está relacionado à convecção natural, um fenômeno físico fundamental no transporte de calor em fluidos. Em um sistema térmico, como um coletor solar, esse princípio atua de forma que o fluido mais quente, ao ter menor densidade tende naturalmente a subir, enquanto o fluido mais frio, mais denso, tende a descer. Isso pode reduzir a eficiência da circulação térmica, dificultar o aquecimento adequado da água e exigir o uso de bombas ou mecanismos externos para forçar o fluxo, o que poderia ser evitado com uma orientação mais adequada.

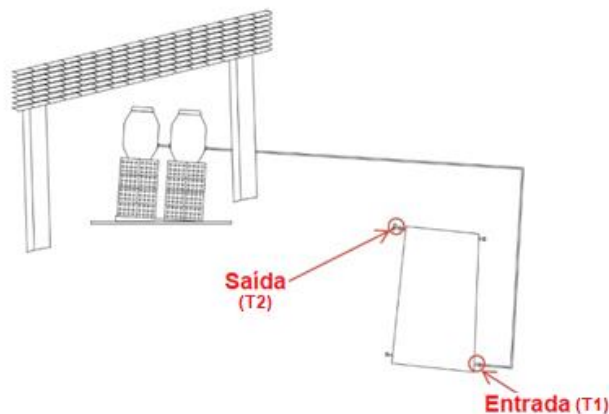
Figura 14 – Sentido de fluxo inverso



Fonte: Os autores.

Dessa forma, com esses resultados insatisfatórios, foi feita a reformulação do sistema hidráulico, saindo de um sistema fechado, para um sistema aberto com maior volume de água e vazão controlada, para um maior controle da temperatura de entrada (Figura 15).

Figura 15 - Esboço do layout reformulado do sistema hidráulico



Fonte: Os autores.

Na reformulação do sistema, a capacidade de armazenamento de água foi ampliada de 25 litros para 100 litros, proporcionando maior vazão contínua e tempo prolongado de ensaio até o esvaziamento completo dos reservatórios.

Para essa modificação, foram utilizadas duas bombonas de 50 litros cada, posicionadas sob a cobertura do telhado, com o objetivo de minimizar a absorção de calor e, conseqüentemente, manter a temperatura de entrada da água o mais próxima possível da temperatura ambiente sem ser aquecida diretamente pelo sol durante a realização dos testes, como na montagem anterior.

O abastecimento das bombonas ocorre por meio de uma mangueira conectada à rede de água corrente, sendo o sistema deixado em repouso durante o período noturno.

Dessa forma, as condições térmicas da água são preservadas para os ensaios realizados nas primeiras horas da manhã, o que favorece a aferição da eficiência térmica do coletor solar em avaliação. Para essa reformulação, foram aproveitados todas as grandezas e sensores da montagem anterior, mudando apenas o layout e a capacidade de armazenamento da água, como mostra a Figura 16.

A Figura 16 apresenta a nova configuração do sistema experimental utilizado para ensaios de avaliação térmica de um coletor solar de baixo custo. O coletor, construído com manta asfáltica de coloração escura, está disposto em um suporte de tijolos, posicionado de forma inclinada para favorecer o escoamento da água.

Ao fundo, observa-se o sistema de alimentação hidráulica composto por galões plásticos e tubulações de PVC, responsável pelo armazenamento e condução da água. A estrutura foi instalada em um ambiente externo com incidência solar direta, junto a um muro de pedras que serve como proteção lateral e possível barreira térmica natural. A simplicidade da montagem reflete o caráter experimental e acessível da proposta, mantendo a funcionalidade para os testes de eficiência térmica.

Figura 16 – Sistema hidráulico reformulado

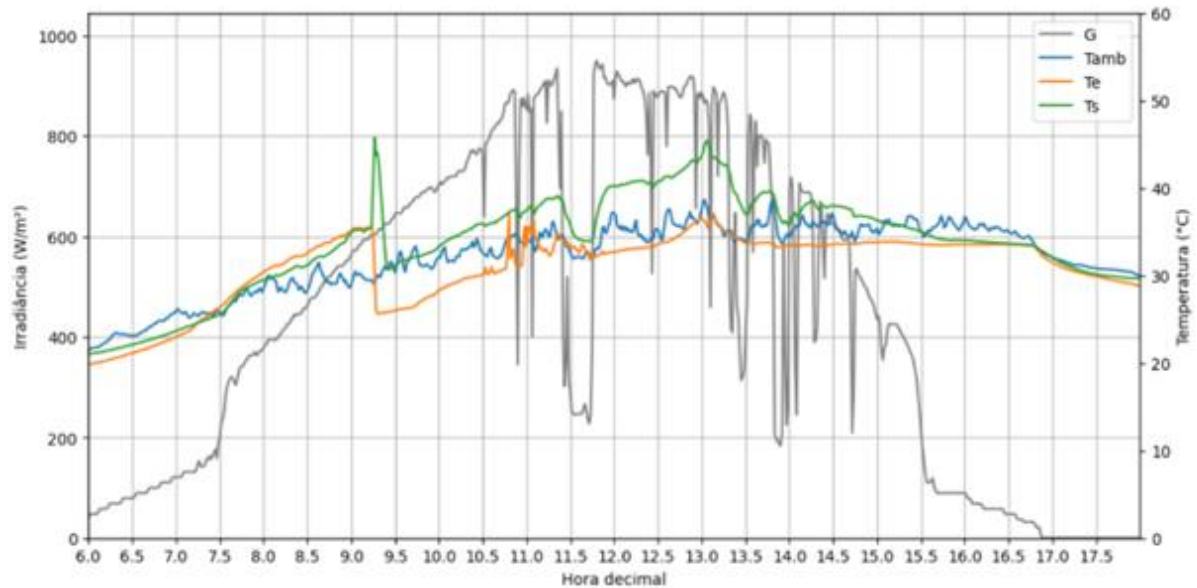


Fonte: Os autores.

4.5 Resultados finais

Os primeiros resultados válidos depois da reformulação do sistema foram obtidos em 29/04/2025 (Gráfico 2), que foi o primeiro dia que apresentou céu claro (G) por um bom período de tempo de teste.

Gráfico 2 – Resultados do teste do dia 29/04/2025



Fonte: Os autores.

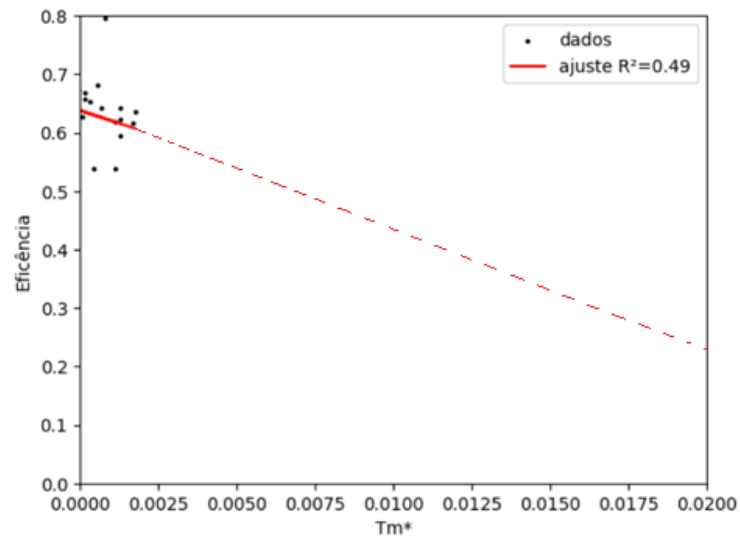
O Gráfico 2 ilustra a variação da irradiância solar global horizontal (G) e das temperaturas do sistema ao longo do dia, em função da hora decimal. A irradiância (em cinza), medida em W/m^2 , é representada no eixo vertical à esquerda, enquanto as temperaturas (em $^{\circ}C$) estão no eixo vertical à direita. As curvas com exceção da cinza mostram a temperatura ambiente (T_{amb} – azul), a temperatura de entrada da água no coletor (T_e – laranja) e a temperatura de saída da água (T_s – verde).

Observa-se que a irradiância (G) começa a aumentar a partir das 6h, atingindo seu pico entre aproximadamente 10h e 13h, com instabilidades e quedas acentuadas indicando a presença de nuvens ou sombreamentos intermitentes. Após às 14h, a irradiância começa a decair de forma mais acentuada até praticamente zerar ao final da tarde.

Quanto às temperaturas, nota-se um aumento gradual tanto na temperatura de entrada (T_e) quanto na de saída da água até por volta das 12h, acompanhando o crescimento da irradiância. A temperatura de saída (T_s), como esperado, se mantém superior à de entrada (T_e) durante a maior parte do dia, evidenciando o aquecimento da água pelo coletor solar.

No entanto, em alguns momentos, especialmente nas horas de instabilidade da irradiância, as curvas se aproximam ou até se cruzam brevemente, o que pode indicar perda de eficiência temporária do sistema. A temperatura ambiente (T_{amb}) apresenta variação mais suave ao longo do dia, situando-se abaixo das temperaturas da água, o que confirma o funcionamento térmico do sistema de aquecimento. A curva característica gerada para esse dia de teste é apresentada pelo Gráfico 3.

Gráfico 3 – Curva característica para o teste do dia 29/04/2025



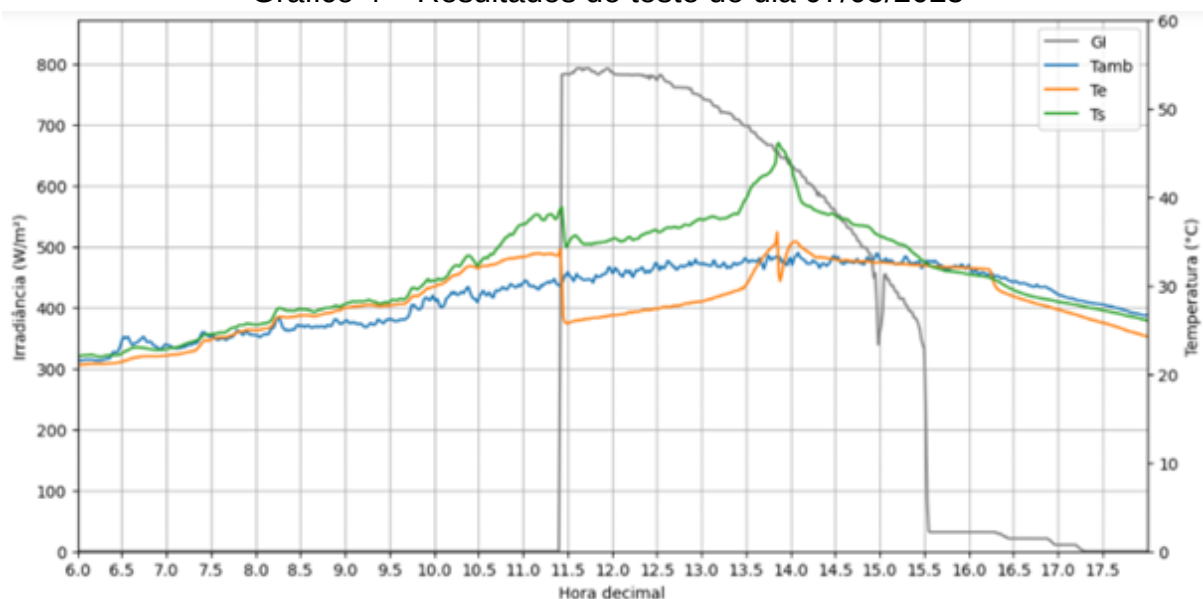
Fonte: Os autores.

O Gráfico 3 revela uma tendência de queda na eficiência com o aumento de diferença de temperatura reduzida (Tm^*), como esperado teoricamente para coletores solares, indicando que a eficiência térmica diminui à medida que a temperatura média do fluido aumenta em relação à irradiância incidente.

No entanto, o valor de R^2 relativamente baixo indica que outros fatores podem ter influenciado os resultados experimentais, como limitações no sistema ou condições ambientais variáveis durante o teste.

Outros testes feitos começaram a apresentar resultados não satisfatórios, representando limitações no sistema e nos parâmetros dos testes, apresentando resultados como mostra o Gráfico 4.

Gráfico 4 – Resultados do teste do dia 07/05/2025



Fonte: Os autores.

A Gráfico 4 ilustra o desempenho térmico de um coletor solar experimental ao longo de um dia, com medições iniciadas às 6hrs e encerradas por volta das 15h30. Durante o período da manhã, observa-se um aumento progressivo da irradiância solar (G), que ultrapassa os 800 W/m^2 por volta das 11h30, indicando condições de céu claro.

Esse crescimento da radiação favorece a elevação da temperatura ambiente (T_{amb}), da água de entrada (T_e) e, principalmente, da temperatura de saída da água (T_s), que atinge valores superiores a 45°C .

O intervalo entre 11h30 e 15h30 representa o ponto de maior eficiência do sistema, com o coletor conseguindo aquecer significativamente a água, o que é evidenciado pela diferença entre T_e e T_s . Pequenas oscilações nas curvas podem estar relacionadas à variações no fluxo de água ou à troca de galões, como indicado pela queda abrupta na temperatura de entrada ao final da manhã.

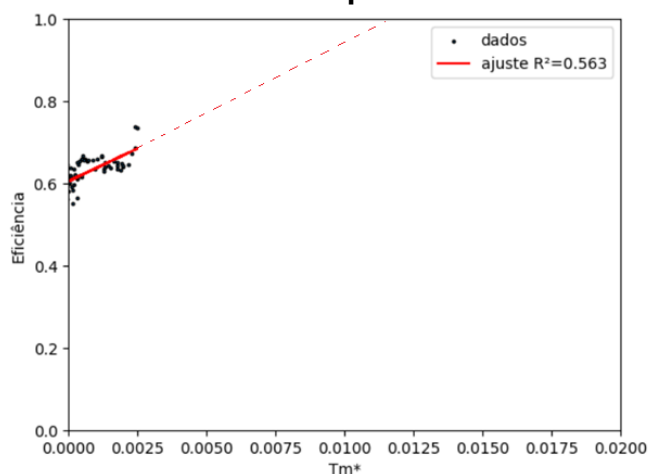
Por volta das 15h30, observa-se uma interrupção brusca, causada pelo esvaziamento dos galões de água, o que impossibilitou a continuidade do ensaio. Com o fim do fluxo contínuo, a troca térmica no coletor cessou, provocando o término das leituras.

Apesar disso, os resultados obtidos durante o período ativo do teste demonstram que o coletor, mesmo construído com materiais de baixo custo, apresentou bom desempenho térmico sob condições favoráveis de insolação.

Porém, observando-se o Gráfico 5, a curva característica obtida não corresponde ao esperado, uma vez que ela é crescente. Os motivos podem ser diversos como: falhas no controle de fluxo, interferências externas ou limitações estruturais da bancada. Esses dados reforçam a conclusão de que o sistema de ensaio apresenta limitações significativas, sendo necessário aprimorar seus parâmetros e configuração para garantir medições mais consistentes e representativas em testes futuros.

Para esse dia de teste, a curva característica gerada, é apresentada no Gráfico 5 que mostra inconsistência com o comportamento típico esperado para coletores solares térmicos. O baixo valor de R^2 , aliado à inclinação positiva da curva de ajuste, revela que o sistema não operou em condições ideais ou que há falhas nos parâmetros coletados. Isso reforça a necessidade de ajustes nos testes experimentais e na instrumentação utilizada, de modo a obter curvas características mais confiáveis e representativas.

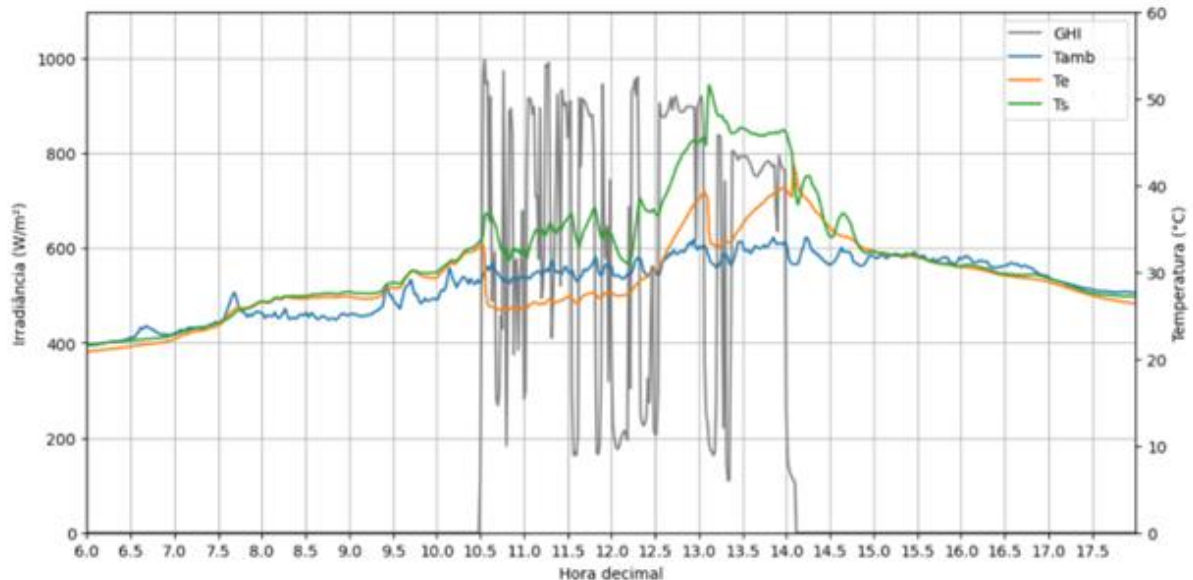
Gráfico 5 – Curva característica para o teste do dia 07/05/2025



Fonte: Os autores.

Outro dia de teste a ser apresentado é o dia 05/05/2025, que apresenta um dia de céu nublado (Gráfico 6).

Gráfico 6 – Resultados do teste do dia 05/05/2025

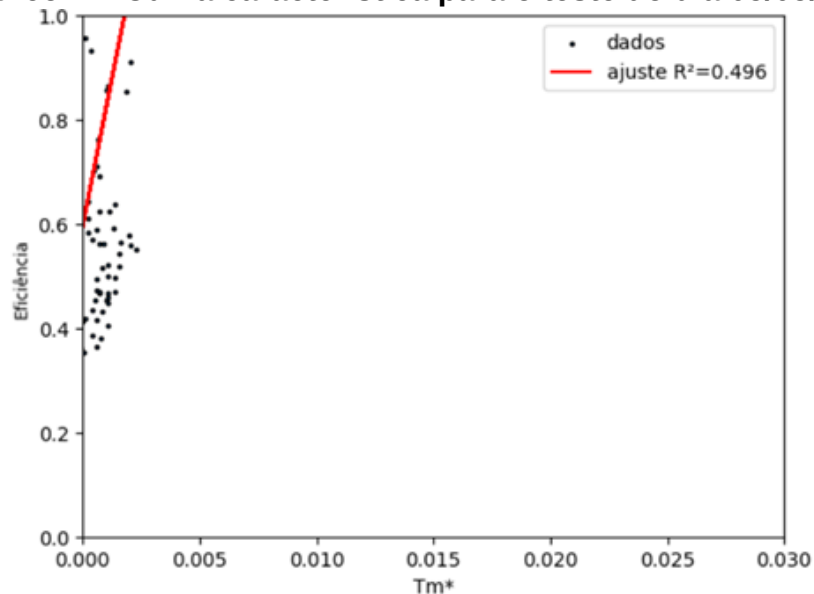


Fonte: Os autores.

Este foi claramente um dia com céu nublado e instável, especialmente entre as 10hrs e 13h30, com fortes oscilações na radiação solar (G). Essas variações influenciaram diretamente a temperatura de saída do coletor (Ts), o que prejudica o desempenho térmico e a análise da eficiência do sistema.

Para esse teste, a curva característica apresentada é mostrada no Gráfico 7.

Gráfico 7 – Curva característica para o teste do dia 05/05/2025



Fonte: Os autores.

Observa-se que a maioria dos pontos está concentrada em valores muito baixos de T_m^* , o que indica que a diferença térmica entre o fluido e o ambiente foi pequena em relação à radiação solar incidente. Esse comportamento é típico de dias em que a irradiância se mantém baixa ou sofre oscilações frequentes, impedindo o coletor de atingir temperaturas mais elevadas ou um regime térmico estabilizado.

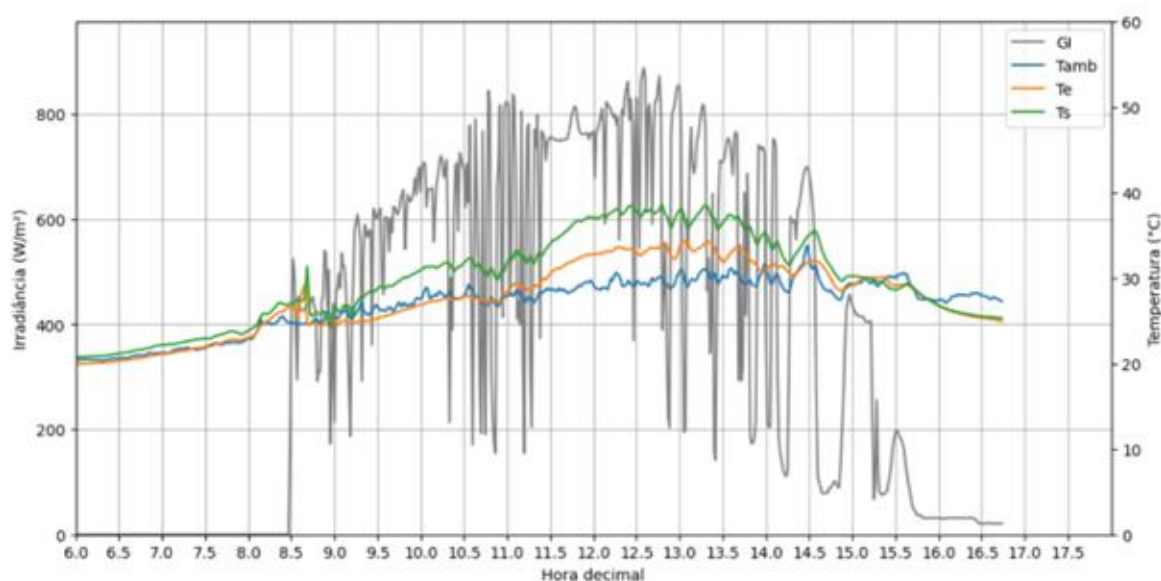
Apesar de algumas eficiências aparentarem serem elevadas (variando de 0,4 a 0,7), a significativa dispersão dos dados aponta para instabilidades operacionais, como variações de vazão, entrada de nuvens rápidas ou oscilações abruptas da irradiância, aspectos característicos de céu nublado com nuvens intermitentes.

No dia 10/06/2025, foi realizado um experimento com o sistema em teste, no qual se utilizou uma mangueira conectada diretamente à entrada do circuito hidráulico. Essa configuração teve como finalidade assegurar uma vazão massiva constante, atendendo aos critérios estabelecidos pela norma técnica NBR 17003:2021, que regula procedimentos para avaliação de sistemas solares térmicos. Durante o ensaio, foram monitoradas e registradas diversas variáveis climáticas e operacionais ao longo do dia.

O Gráfico 8 apresenta os resultados desse teste, ilustrando a evolução da irradiância solar global horizontal (G) e das temperaturas ambiente (T_{amb}), de entrada (T_e) e de saída (T_s) do sistema. A partir do início da manhã até o final da tarde, observa-se uma dinâmica típica de dias com boa incidência solar, ainda que com oscilações que indicam possíveis passagens de nuvens.

As informações reunidas neste gráfico oferecem uma visão geral do desempenho térmico do sistema frente à variabilidade da condição solar ao longo do período de medição, permitindo futuras análises sobre a eficiência e comportamento térmico do equipamento sob condições reais de operação.

Gráfico 8 – Resultado do teste do dia 10/06/2025



Fonte: Os autores.

Com base nos dados apresentados, observa-se que a irradiância solar global (G) aumentou progressivamente até aproximadamente 12h, alcançando picos

superiores a 800 W/m^2 . Entre 10h e 14h, no entanto, ocorreram variações abruptas e instabilidades na irradiância, sugerindo oscilações na radiação solar, possivelmente causadas por cobertura de nuvens ou sombreamentos temporários.

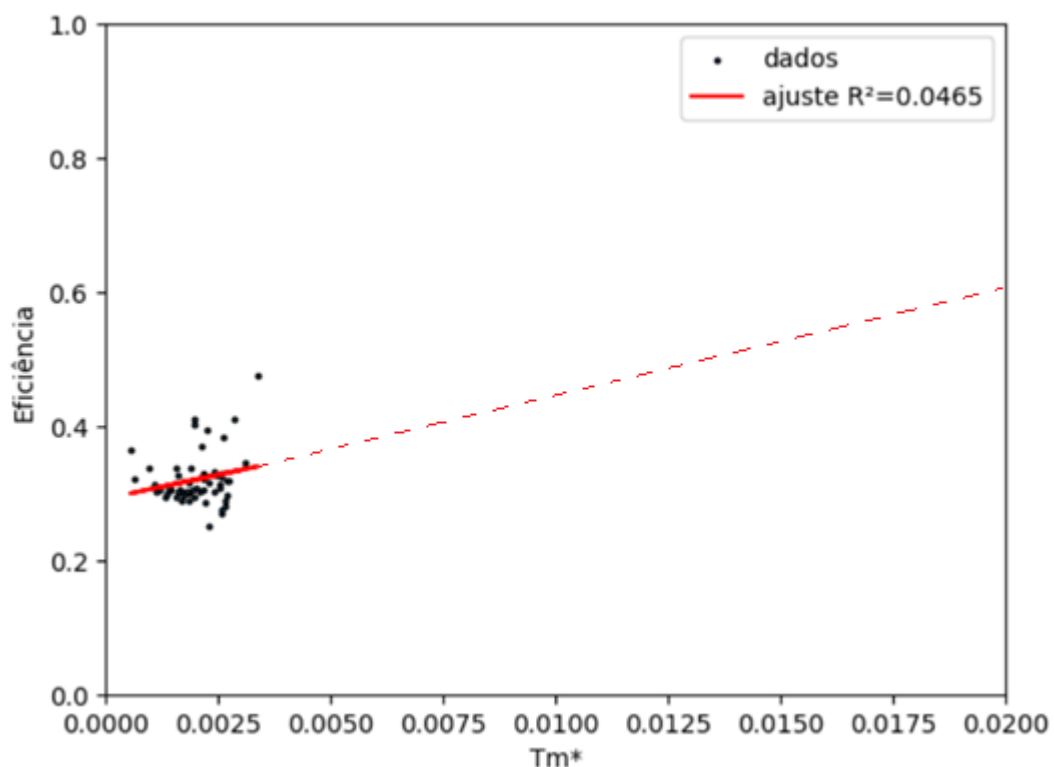
As temperaturas de entrada (T_e) e saída (T_s) da água no coletor acompanharam a elevação da irradiância, sendo que a temperatura de saída (T_s) se manteve consistentemente superior à de entrada (T_e), o que evidencia um ganho térmico efetivo por parte do coletor. A temperatura ambiente (T_{amb}) permaneceu relativamente estável ao longo do dia, com um leve aumento até por volta das 14hrs, seguido de um declínio, comportamento típico de um dia com boa incidência solar.

A diferença entre as temperaturas de entrada e saída demonstra que o coletor estava operando ativamente, promovendo o aquecimento da água. Esse resultado indica que, mesmo sem um controle automatizado ideal da vazão, o sistema apresentou um desempenho térmico satisfatório e funcional.

O teste foi realizado com o sistema reformulado, utilizando uma ligação direta da mangueira ao sistema de abastecimento. Essa configuração teve como objetivo manter a temperatura de entrada da água (T_e) próxima à temperatura ambiente, assegurando maior confiabilidade na determinação da eficiência térmica do coletor, além de garantir uma vazão mássica constante durante os ensaios.

Contudo, a curva (Gráfico 9) não reflete o comportamento teórico típico esperado, que geralmente apresenta declínio da eficiência com o aumento de T_m^* (inclinação negativa). A inclinação positiva e o baixo R^2 indicam que os dados coletados não estão consistentes o suficiente para representar adequadamente o desempenho térmico do coletor. Logo, a ligação direta da mangueira resolveu parcialmente o problema da Temperatura de entrada (T_e) elevada, mas o controle de vazão ainda pode estar irregular, impactando a estabilidade térmica do sistema.

Gráfico 9 – Curva característica para o teste do dia 10/06/2025



Fonte: Os autores.

Dessa forma, embora a modificação com a ligação direta da mangueira tenha sido eficaz para manter a temperatura de entrada (T_e) mais próxima da temperatura ambiente (T_{amb}), a instabilidade na vazão parece ter comprometido a confiabilidade dos resultados.

O comportamento observado no Gráfico 9, com tendência de eficiência crescente em relação a T_m^* e coeficiente de determinação (R^2) muito baixo, evidencia que o sistema ainda carece de ajustes mais precisos, especialmente no controle da vazão. Para garantir uma avaliação mais fiel do desempenho térmico do coletor solar, é necessário aperfeiçoar os parâmetros operacionais, assegurando condições de ensaio mais controladas e representativas da teoria.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A bancada experimental desenvolvida demonstrou-se eficiente no monitoramento das variáveis essenciais ao estudo de coletores solares, como a temperatura e a irradiância solar, além de permitir o controle da vazão do fluido. Essas funcionalidades possibilitam a observação prática do funcionamento dos coletores, promovendo uma melhor compreensão do seu comportamento em diferentes condições operacionais.

Apesar da estrutura atual não atender plenamente aos requisitos da norma NBR 17003:2021, especialmente no que se refere à manutenção da vazão massiva constante, a bancada se mostrou funcional e valiosa para fins acadêmicos e didáticos.

Dessa forma, embora a meta de aferir com precisão a eficiência dos coletores conforme a normatização ainda não tenha sido plenamente alcançada, os resultados obtidos até aqui são promissores. A continuidade deste trabalho, com foco na melhoria e adequação do sistema, poderá elevar o nível de controle e estabilidade dos ensaios, viabilizando futuramente a obtenção de resultados mais robustos e em conformidade com os padrões técnicos exigidos.

REFERÊNCIAS

ARA, Paulo José Schiavon; SOWMY, Daniel Setrak. Análise térmica de coletor solar plano via simulação CFD validada experimentalmente por teste em simulador solar. *In: VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar*, Fortaleza, 01 a 05 de junho de 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15747-2 – **Sistemas solares térmicos e seus componentes – Coletores solares – Parte 2:** Métodos de ensaio para determinação do desempenho térmico. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 17003:2021 — **Sistemas solares térmicos e seus componentes:** coletores solares — Requisitos gerais e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. 85 p.

BERGMAN, Theodore L. *et al.* **Incropera: Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 8. ed. [S. l.]: LTC, 2019.

CARRIÓN-CHAMBA, W.; MURILLO-TORRES, W.; MONTERO-IZQUIERDO, A. Una revisión de los últimos avances de los colectores solares térmicos aplicados en la industria. **Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología**, n. 27, p. 59-73, 2022.

CAVALCANTE, R. L. P. **Estudo de um coletor solar para aquecimento de água com grade absorvedora em duas configurações: com e sem aletas**. 2023. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2023.

CRESWELL, J. W.; CRESWELL, J. D. **Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches**. 6th ed. Thousand Oaks: SAGE, 2023.

FREITAS, Diogenes Linard Aquino. **Caracterização numérica e experimental de um coletor solar de placa plana**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, 2017.

MANEA, Tiago Francisco. **Desenvolvimento de uma bancada para ensaios de coletores solares de tubos de vidro a vácuo**. 2012. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

PEREIRA, P. T. S.; *et al.* **Energia solar térmica: perspectivas do presente e do futuro**. 2010.

ROSA, F. N.; MANEA, T. F.; KRENZINGER, A.; CARDOSO, I. A. **Projeto e construção de uma bancada de testes para coletores solares no LABSOL-UFRGS**. In: COMUNICACIÓN 434 – TEMA 8. Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica, 2011.

SINDIGÁS – Sindicato Nacional das Empresas Distribuidoras de Gás Liquefeito de Petróleo. **Manual técnico para projeto e construção de sistemas de aquecimento solar e gás natural**. 1. ed. São Paulo: Sindigás, 2011. 100 p.

SOLETROL. **Aquecedores Solares de Água: Manual Técnico**. In: SOLETROL. São Manoel - SP, 2021. Disponível em: <https://www.soletrol.com.br/extras/manuais/pdfs/manual-tecnico.pdf>. Acesso em: 17 fev. 2025.

SANTOS, Gabriela Soares. **Avaliação do desempenho de coletores solares utilizando nanofluidos de grafeno em água destilada**. 2023. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.