

Artigo

Teste experimental e simulação de um aquecedor solar automatizado baseado em concentrador de calha parabólica

João Vitor Ferreira Nunes ^[1], Taciano Amaral Sorrentino ^[2]

^[1] UFERSA, Engenharia Mecânica; aluno; joaovitor.ferreira@hotmail.com

^[2] UFERSA, Departamento de Ciências Naturais, Matemática e Estatística; orientador; taciano@ufersa.edu.br

Data da defesa: 10/10/2023;

Resumo: O presente trabalho teve como objetivos a reforma, aprimoramento, automação e validação de resultados de um concentrador de calha parabólica já existente, destinado ao aquecimento de água com temperatura igual ou superior a 50 °C. A estrutura anterior da calha não resistia a temperaturas de trabalho superiores a uma média de 40 °C, a falta do sistema de seguidor solar também era um fator que implicava em ajustes manuais ao decorrer do dia. As limitações de resistência a temperatura e do sistema de seguidor solar foram sanadas com uma superfície reflexiva mais resistente e do sistema de automação. Para validação do processo de operação do aquecedor foram realizados testes de campo e os principais parâmetros avaliados ao decorrer dos testes foram o comportamento da temperatura da água no interior do aquecedor, no reservatório de água, além da incidência de radiação solar. Os melhoramentos realizados na calha permitiram que a temperatura desejada fosse alcançada. Uma possível aplicação do aquecedor solar automatizado é no aquecimento da água em réchauds em restaurantes self-service nos horários de almoço.

Palavras-chave: Aquecedor solar; Energia solar térmica; Calha parabólica.

1. INTRODUÇÃO

A energia solar é uma das mais promissoras fontes de energia renovável, visto que é livre, abundante, tem seus impactos ambientais assumidos como insignificantes e tem capacidade para satisfazer a demanda mundial de energia. Por ser um país extenso e ter parte do seu território localizada próximo a linha do Equador, o Brasil recebe altos índices de radiação solar distribuídos ao longo de todo o ano, fazendo com que este se destaque quanto ao potencial de aproveitamento da energia solar. A energia solar concentrada tem despertado muito interesse nos últimos anos, dentre as formas de utilização de energia solar. Esta tecnologia utiliza superfícies altamente reflexivas para concentrar os raios solares em um receptor central, o que possibilita alcançar temperaturas mais altas. Dentre os sistemas de energia solar concentrada, o coletor de calha parabólica (parabolic trough collector, PTC) é considerado a tecnologia de maior viabilidade e comercialmente madura. O PTC apresenta vantagens como alta densidade de potência, durabilidade, versatilidade e geralmente é utilizado em operações que exigem temperaturas até 400 °C [1].

Diante disso, o desenvolvimento do trabalho segue na busca pelo aproveitamento mais eficiente da energia solar térmica. Para aprimorar o ganho térmico a partir da radiação solar, houve reforma do PTC, no qual foram incrementados os sistemas de automação e transmissão mecânica, permitindo que a calha pudesse operar de forma autônoma durante o período de funcionamento. Para reduzir o atrito do eixo rotacional do PTC, utilizou-se rolamentos nas extremidades do eixo.

O aquecedor solar automatizado tem o potencial de captar os raios solares de forma mais eficaz, pois os sensores do tipo LDR (light dependent resistor) instalados, auxiliam no posicionamento da superfície refletora do PTC, permitindo que os raios solares incidam perpendicularmente sobre a superfície da calha ao decorrer do

tempo. O protótipo desenvolvido utiliza bomba de água com circulação constante, garantindo que a diferença da temperatura de entrada e saída da água no tubo focal seja inferior a 10°C para volume de água até 20 litros.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para que a energia térmica fosse gerada de forma mais eficiente, foi utilizado o sistema de seguidor solar, de forma a orientar a rotação da calha, garantindo que a superfície de abertura da calha permaneça perpendicular aos raios solares incidentes no decorrer do dia.

O sistema conhecido como seguidor solar (solar tracking) têm como função colocar os painéis solares/concentradores com suas superfícies voltadas em posição perpendicular aos raios de Sol incidentes. Desta maneira, as mudanças na posição do sol durante o dia, e dependendo da estação do ano, são compensadas com o reposicionamento do módulo, permitindo que, dentro de um mesmo intervalo de tempo, mais energia (radiação) seja coletada e transformada em energia elétrica/térmica [2]. O seguidor solar auxilia no aumento da absorção da radiação solar, essa representação pode ser observada no Gráfico 1.

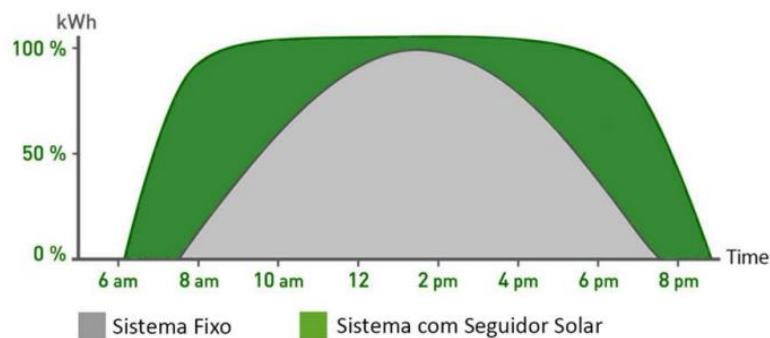


Gráfico 1. Comparação entre a energia gerada por um sistema fixo e outro com seguidor solar. [3]

Para o desenvolvimento do projeto, foram utilizados os componentes listados a seguir;

Calha parabólica

Um coletor solar de calha parabólica usa um espelho em forma de cilindro parabólico para refletir e concentrar as radiações solares em direção a um tubo receptor localizado na linha de foco da parabólica cilindro. O receptor absorve as radiações recebidas e as transforma em energia térmica, sendo este último transportado e recolhido por um meio fluido que circula dentro do tubo receptor. Este método de coleta solar concentrada tem a vantagem de alta eficiência e baixo custo, e pode ser utilizado tanto para captação de energia térmica, quanto para geração de energia elétrica ou para ambos [2].

Foi modelado no SolidWorks o protótipo da calha parabólica utilizada nos experimentos, conforme representado na figura 1.

Na figura 2, é representado a calha em desenho explodido, o corpo de polietileno é indicado pelos números 1 e 2, no qual a parte interna é totalmente revestida por camadas de espelhos, a tampa de acrílico é indicada pelo número 3, o tubo focal no qual a água irá percorrer o seu interior é representando pelo número 4, o furo representado pelo número 5, recebe a introdução do tubo focal, a estrutura de amarração e suporte feita em alumínio é indicada pelos números 6,7,8 e 9.



Figura 1. Calha parabólica

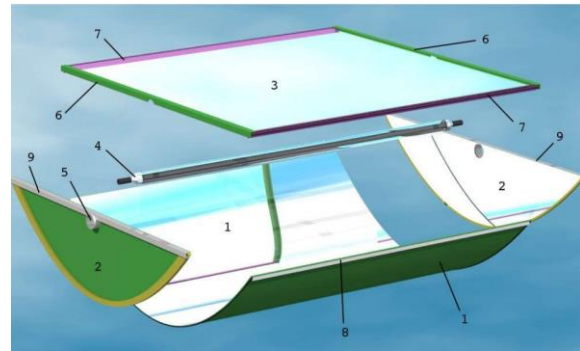


Figura 2. Componentes da calha parabólica.[4]

Sistema de controle e transmissão mecânica

Para o sistema de controle, foi utilizado uma plataforma de prototipagem eletrônica Arduino Uno (mostrado na Figura 04), possibilitando a rotação da calha em tempo real devido aos dados dos componentes de entrada e saída. Na Figura 3 é possível visualizar os fotossensores (LDR'S) instalados paralelamente a superfície do aquecedor solar, o LDR tem capacidade de variar a resistência de acordo com a intensidade luminosa que incide sobre a sua superfície, desse modo, quando a resistência entre os dois LDR's são divergentes, o Arduino processa os dados e envia sinal elétrico para o driver do motor de passo, que faz o motor girar a calha no sentido necessário para igualar a incidência de luz nos dois sensores.



Figura 3. LDR's instalados na estrutura do PTC

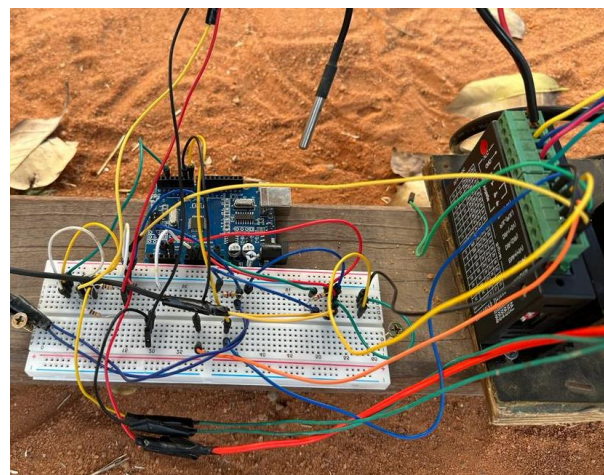


Figura 4. Sistema de controle do PTC

Os motores de passo são dispositivos eletromecânicos que convertem pulsos elétricos em movimentos mecânicos que geram variações angulares discretas. O rotor ou eixo de um motor de passo é rotacionado em pequenos incrementos angulares, denominados “passos”, quando pulsos elétricos são aplicados em uma determinada sequência nos terminais deste. A rotação de tais motores é diretamente relacionada aos impulsos elétricos que são recebidos, bem como a sequência a qual tais pulsos são aplicados reflete diretamente na direção a qual o motor gira. A velocidade que o rotor gira é dada pela frequência de pulsos recebidos e o tamanho do ângulo rotacionado é diretamente relacionado com o número de pulsos aplicados [5].

Na Figura 5 mostra o motor de passo acoplado ao eixo do sistema de transmissão rotativo da calha, para suavizar o movimento, o eixo rotativo da calha e do sistema de transmissão, são equipados com rolamentos nas suas extremidades.



Figura 5. Sistema de transmissão rotativa (autoria própria).

Todos os testes de campo foram realizados com vazão constante de água em torno de 4,545 L/min. A Mini Bomba de Água Arduino RHONDAMAQ foi criada especialmente para o desenvolvimento de projetos de prototipagem, incluído automação residencial (doméstica) e protótipos robóticos baseados em plataformas microcontroladoras [6]. O fabricante afirma que a bomba tem vida útil de até 3500 horas e suporta trabalhar com a temperatura da água até 80 °C [6]. Na Figura 6 mostra a bomba de água utilizada no aquecedor solar.



Figura 6. Bomba de água RHONDAMAC.

Na Figura 7, é apresentada a calha revestida de um filme de prata, superfície utilizada para refletir os raios solares, porém em decorrência das altas temperaturas o filme descolava gradativamente da superfície, desconfigurando a incidência solar para o tubo focal da calha. Diversos métodos de fixação do filme de prata a superfície da calha foram utilizados, como por exemplo o uso de cola de alta fixação, sem sucesso. Na Figura 8 é mostrado o desenvolvimento da nova superfície da calha, totalmente revestida por fitas de mini espelhos, a nova camada reflexiva se comportou de forma eficiente, resistindo as temperaturas submetidas.

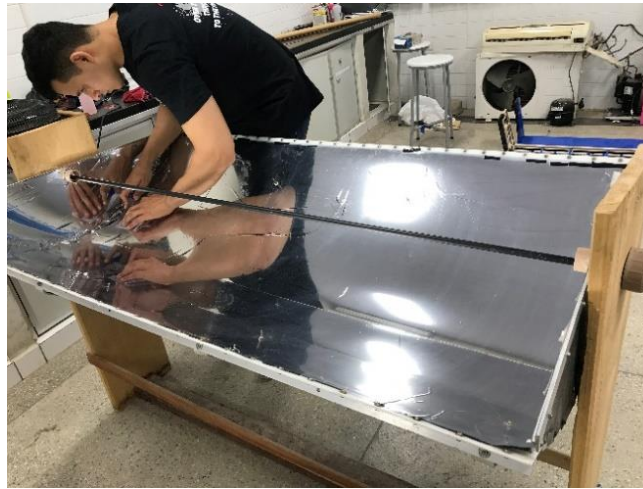


Figura 7. Camada de filme de prata



Figura 8. Camada reflexiva de espelhos.

Para garantir a convergência dos raios solares para o tubo focal, ajustes finos foram realizados com o auxílio de um nível a laser modelo Thaf 3D Gv-12, na Figura 9 é possível observar a luminosidade linear do laser na superfície da calha. A partir do direcionamento de reflexão de luz, parafusos nas laterais da calha foram ajustados de forma a obter maior convergência para tubo focal. A calha foi deslocada paralelamente a superfície de apoio (piso) e mantendo a distância perpendicular do laser, de forma a analisar toda a superfície reflexiva. Na Figura 10 é representado os pontos de luz refletidos em direção ao tubo focal.

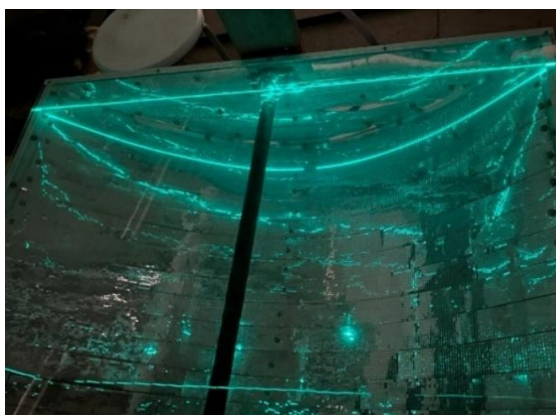


Figura 9. Incidência luminosa

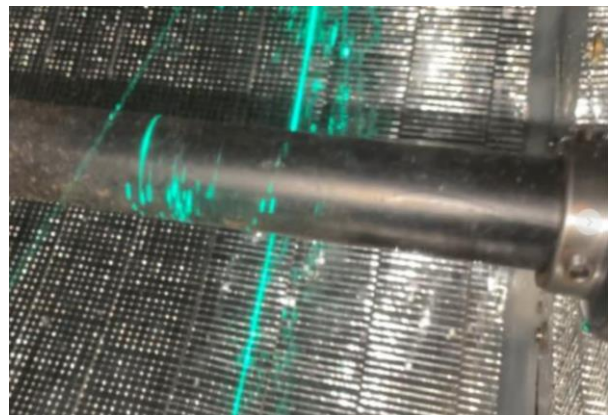


Figura 10. pontos de reflexão de luz.

Os testes experimentais foram realizados no campus da UFERSA Mossoró, a calha foi posicionada de forma a captar os raios solares de forma direta ao decorrer do dia. Na Figura 11, é mostrado a localização da calha, é notável que calha tem sua superfície totalmente livre para entrada dos raios solares.



Figura 11. Experimento de campo, aquecedor automatizado.

Além dos sensores de temperatura (Termopares) instalados no tubo focal e reservatório de água, foi realizado o acompanhamento do gradiente de temperatura com uma câmera térmica modelo Flir C5, dessa forma, foi possível validar o desenvolvimento do experimento. Na Figura 12 é mostrado o tubo focal com gradiente de temperatura com cores mais quente do que os periféricos, seguindo o modelo do aquecedor de calha parabólica. Na figura 13, em um outro período do experimento, é mostrado o reservatório de água utilizado, pelo gradiente de cores, é possível notar que a temperatura da água se aproxima de um mesmo valor.

Para medir a transmitância luminosa da tampa de acrílico, foi utilizado o medidor modelo Z162-A da Carfilm mostrado na Figura 14. Para obtenção dos resultados para fim de cálculo, foi utilizado uma média das medidas realizadas ao decorrer da tampa de acrílico.



Figura 14. medidor de transmissão.

Desempenho térmico

Para calcular o coeficiente de perda térmica (UL), o ganho de energia útil (Qu), eficiência ótica (Nop), obtenção da temperatura no reservatório (TWf) e o coeficiente de convecção entre a tampa de acrílico e o ar (Hw) foi utilizado as equações 1,2,3,4.e 5 .

$$U_L = \left[\frac{A_r}{(h_w + h_{r,c-a}) A_g} + \frac{1}{h_{r,r-c}} \right]^{-1} \quad (1) [7].$$

$$I \cdot \eta_{op} \cdot W \cdot L = Q_u + U_L \cdot A_r (T_r - T_a) \quad (2) [8].$$

$$\eta_{op} = \rho_M \cdot \tau_c \cdot \tau_e \cdot \alpha_r \cdot \gamma \cdot \cos \theta \quad (3) [8].$$

$$T_{wf} = T_{wi} + \frac{\Delta T}{m C_{pw}} [(Q_u - Q_L) - U_s - A_s (T_{wi} - T_a)] \quad (4) [9].$$

$$h_w = 0,59 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{0,25} \quad (5) [10].$$

Constantes da calha e da água

W=0.847 - largura de abertura (m)

L=1.481 - comprimento de abertura (m)

D_0=0.0508 - diâmetro externo tubo (m)

m_f=0.07575 - vazão mássica da água (kg/s)

c_ag=4186 - calor específico da água (J/kg.K)

A_ap=W*L - área de abertura (m²) (suposta mesma área da tampa)

A_c=W*L - área da tampa

A_r= L*2*pi()* (D_0/2) - área do tubo receptor (m²)

p=(2*W+2*L) - perímetro de abertura

A_s= (0.49*2*pi()* (0.275/2)+pi()* (0.275/2)^2) - área da superfície do reservatório

k=0.25 - condutividade térmica do PET (W/m².°C)

Constantes para eficiência térmica e coeficientes de transferência de calor

rho=0.9 - reflectância da superfície refletora

tau_c= 0.9 - transmissividade da tampa de acrílico

alfa_r= 0.96 - absorvância do tubo receptor (aço pintado de preto)

epsilon_r= 0.88 - emissividade do tubo receptor

epsilon_c=0.95 - emissividade do acrílico

alfa_c=0.05 - absorvância do acrílico

gamma= 0.92 - fator de interceptação

theta= 0 - ângulo de incidência

sigma= 5.67037442E-8 - constante de Stefan-Boltzmann(kg s⁻³ K⁻⁴)

3. RESULTADOS

As figuras 12 e 13, corroboram com o comportamento observado nas medidas de temperatura dos termopares ilustrados no gráfico 2, a superfície de acrílico também foi analisada por um termômetro digital infravermelho.

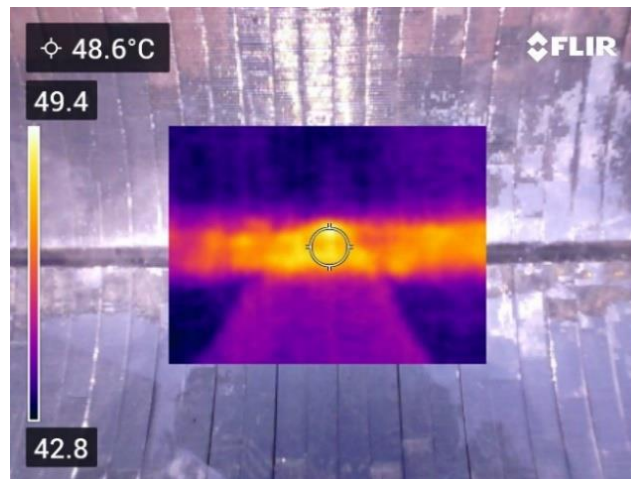


Figura 12. Gradiente térmico da superfície da calha parabólica.

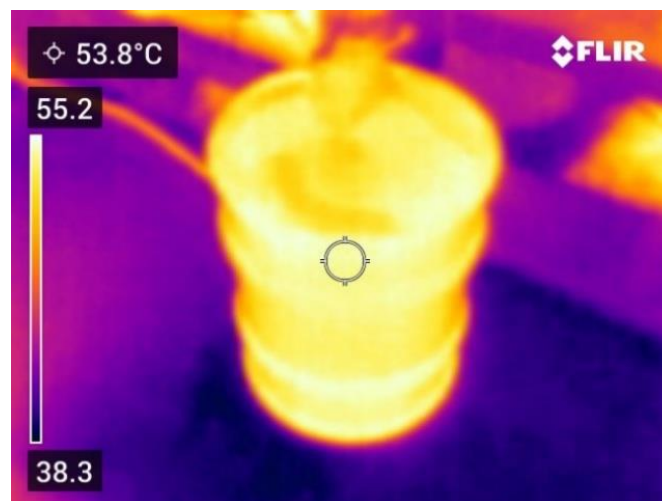


Figura 13. Gradiente térmico do reservatório de água.

No gráfico 2, São mostrados os dados obtidos ao decorrer do experimento, relação da temperatura do reservatório de 20 litros, temperatura do tubo receptor, temperatura ambiente e irradiância total. Os dados de temperatura do tubo receptor, reservatório e irradiância total foram armazenados a cada 2 segundos, dessa forma foi possível traçar o gráfico de forma fiel ao experimento.

É possível observar no Gráfico 2, que a temperatura do tubo focal e do reservatório são próximas da temperatura ambiente no início do teste de campo, momento em que a calha entra em operação por volta das 09:00 horas, ao decorrer do tempo as temperaturas do tubo e do reservatório são elevadas, período em que os raios solares incidem de forma direta e indiretamente para o tubo receptor.

Respeitando a literatura e atuando de forma lógica, o tubo receptor tem sua temperatura mais elevada do que a temperatura do reservatório, pois parte da energia que efetivamente chega ao tubo receptor e aquece a água é perdida no trajeto até o reservatório e por processos de transferência de calor no reservatório.

A irradiância total mostrada no gráfico 2, tem diversos pontos de oscilações em decorrência de fatores que bloqueiam os raios solares como as nuvens, a humidade do ar pode implicar na oscilação da incidência solar.

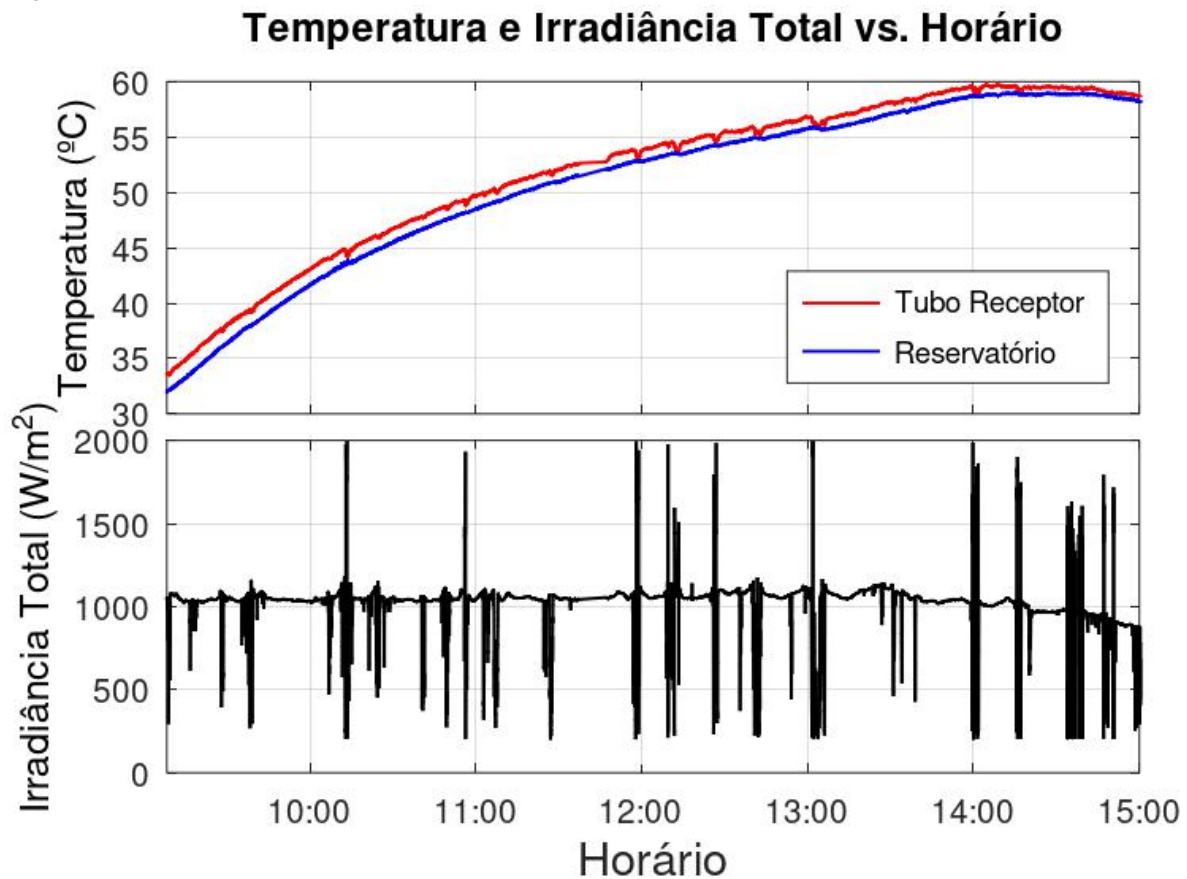


Gráfico 2.

No gráfico 3 é mostrado a relação entre a temperatura experimental e a temperatura teórica ao decorrer do tempo, visto que a temperatura teórica é calculada a partir dos dados de entrada da temperatura ambiente. A curva do modelo teórico se coloca acima da experimental entre 9h e 10h, mas depois a temperatura calculada aumenta mais lentamente que a experimental e se distancia dessa à medida que o tempo decorre. Nota-se também um declínio mais acentuado na temperatura teórica do que na experimental após as 14h quando o nível de irradiação passa a diminuir, conforme se pode ver no Gráfico 3. A discrepância observada entre as temperaturas talvez se deva ao uso de coeficientes de transferência de calor sobrestimados nos termos que descrevem as perdas térmicas do reservatório no modelo. Um fator complicador na simulação foi a quantidade de medições realizadas da temperatura ambiente, da qual dependem as quantidades de energia perdidas pelo concentrador e pelo reservatório. A temperatura ambiente foi medida a cada 300 segundos, diferente das temperaturas do tubo e do reservatório, que foram medidas a cada 2 segundos. Acharmos que uma maior quantidade de valores disponíveis da temperatura ambiente favoreceria a concordância entre as curvas já que no modelo teórico foi considerado que a temperatura ambiente se mantém constante ao longo dos 300 segundos entre uma medida da temperatura ambiente e a próxima.

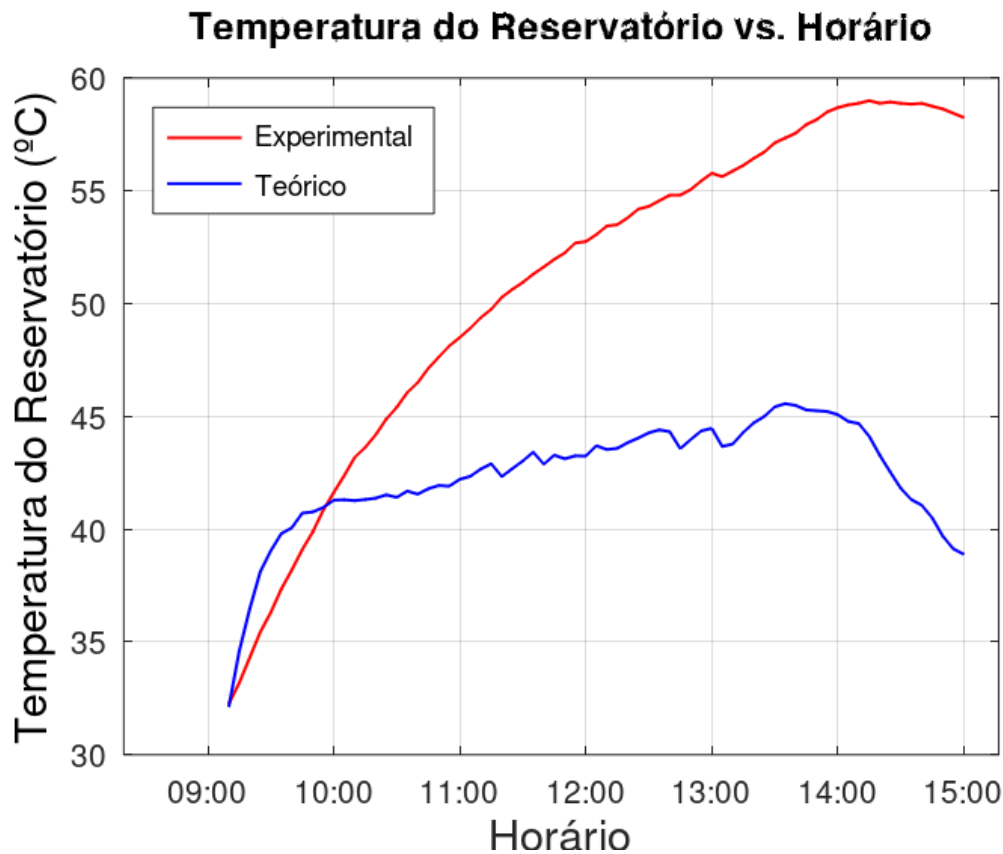


Gráfico 3.

4. CONCLUSÃO

O trabalho foi desenvolvido utilizando a metodologia de forma a obter maior ganho energético. O Aquecedor solar automatizado operou de forma autônoma durante os experimentos ao qual foi submetido, a rotação da calha ao decorrer do dia, permitiu receber a radiação solar de forma direta. Durante o experimento foi possível notar os raios de sol incidindo de forma direta e indireta ao redor do tubo, os níveis de temperatura do tubo focal e do reservatório foram medidos a cada 2 segundos, gerando alto nível de confiabilidade da curva traçada no Gráfico 2.

A Irradiação solar média de $1004,4 \text{ W/m}^2$ foi fundamental para obtenção dos resultados térmicos, no teste de campo, a temperatura do recipiente de água contendo volume total de 20 litros, foi elevada de 32°C para 59°C , expressando um ganho de temperatura em 84,3%.

O aquecedor pode ser destinado a diversas aplicações térmicas de média temperatura, nesse caso a aplicação é destinada ao aquecimento de cubas alimentícias, sendo assim o PTC é uma alternativa em relação ao uso de resistências elétricas para o aquecimento da água de réchauds, impactando positivamente em impactos ambientais e na redução de custos com eletricidade.

Como sugestão para trabalhos futuros sugere-se que seja desenvolvido isolamento térmico para as mangueiras de circulação de água e das laterais da superfície de acrílico, para melhor monitoramento térmico pode ser instalado um termopar entre a superfície refletora e a tampa da calha;

5. AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa recebeu financiamento da Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA);

Agradeço ao programa PIVIC e PIBIT da PROPPG/UFERSA por ter investido no presente trabalho.

Agradeço ao meu orientador pelo suporte e dedicação ao desenvolvimento do projeto, agradeço a UFERSA por ter concedido espaço físico no laboratório de Máquinas Elétricas e Subestações para os devidos aprimoramentos do protótipo, e a equipe CACTUS BAJA por dar suporte ferramental.

6. REFERÊNCIAS

- [1] DESENVOLVIMENTO DE UM COLETOR SOLAR DE CALHA PARABÓLICA ESTACIONÁRIO COM RESERVATÓRIO TÉRMICO. 2019. 86 p. Dissertação (Pós-graduação) - Universidade Federal de Viçosa, [S. l.], 2019.
- [2] OLIVEIRA, Millene Layla Gomes. SEGUIDOR SOLAR PARA UM PASTEURIZADOR DE CALHA PARABÓLICA. 2016. 28 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia, Ufersa, Mossoró, 2016.
- [3] PASSOS, Fabiano. SEGUIDOR SOLAR – TRACKER: VANTAGENS E DESVANTAGENS PARTE 1. 2016. Disponível em: . Acesso em: 24 set. 2023.
- [4] XIAO, Gang. Manual making of a parabolic solar collector. Nice, France: Université de Nice, 2007.
- [5] MOTOR DE PASSO, 2008, Niterói. **Motor de Passo** [...]. [S. l.]: Felipe Goncalves Brites / Vinicius Puga de Almeida Santos, 2008.
- [6] BOMBA De Água 110psi: RHONDAMAC. In: **Mini Bomba de Água Arduíno RHONDAMAQ**. RHONDAMAC, 25 jul. 2023. Disponível em: https://www.rhondamaq.com.br/MLB-1293316449-bomba-de-agua-110psi-com-2mts-mangueira-_JM. Acesso em: 1 out. 2023.
- [7] DESENVOLVIMENTO DE UM COLETOR SOLAR DE CALHA PARABÓLICA ESTACIONÁRIO COM RESERVATÓRIO TÉRMICO. 2019. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa, [S. l.], 2019.
- [8] SOUDANI, Mohammed. Experimental and theoretical study of Parabolic trough collector (PTC) with a flat glass cover in the region of algerian sahara (Ouargla). **Journal of Mechanical Science and Technology**, [S. l.], p. 1-7, 15 abr. 2017.
- [9] WATER heating by Parabolic Trough Collector with storage in the Ouargla region of Algerian Sahara. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], p. 1-3, 21 ago. 2019.
- [10] EQUAÇÕES e calculadora de coeficientes de transferência de calor por convecção. [S. l.], 15 jun. 2021. Disponível em: <https://referenciabibliografica.net/a/pt-br/ref/abnt>. Acesso em: 1 out. 2023.