

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE COLETORES SOLARES

 <https://doi.org/10.56238/sevened2024.037-104>

Newton G. C. Leitea

Departamento de Mecânica e Energia - DME Centro de Fontes Renováveis de Energia - CFRE
Faculdade de Tecnologia - FAT
Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ
E-mail: nleite@fat.uerj.br
ORCID: 0000-0001-8570-5218

Luiz Carlos B. S. Reisa

Departamento de Mecânica e Energia - DME Centro de Fontes Renováveis de Energia - CFRE
Faculdade de Tecnologia - FAT
Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ
E-mail: bevilaqua@fat.uerj.br
ORCID: 0000-0002-3176-5546

Maurício A. Zanardia

Departamento de Mecânica e Energia - DME Centro de Fontes Renováveis de Energia - CFRE
Faculdade de Tecnologia - FAT
Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ
E-mail: mauricio_zanardi@uol.com.br
ORCID: 0000-0002-0844-6344

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi investigar a associação de dois importantes dispositivos de engenharia, o termossifão bifásico e o coletor solar. Um ciclo para obtenção de alto vácuo foi montado para a fabricação de termossifões, que foram inseridos em tubos de vidro evacuados para compor a estrutura de um protótipo de coletor solar. O protótipo foi operado durante um período de oito meses, durante o qual dois outros coletores solares foram testados simultaneamente para fins de comparação. Os outros dois coletores foram comprados no mercado, um dos quais já incluía os termossifões, enquanto o outro funcionava sem eles. As leituras de temperatura foram feitas na entrada e saída do coletor, bem como no abastecimento de água principal e no tanque de armazenamento. Os dados de temperatura foram analisados e puderam ser condensados em apenas dois períodos de 24 horas, pois apresentaram comportamento reprodutível. Um calorímetro permitiu estimar a quantidade de energia armazenada, que neste caso utilizou vinte períodos de 24 horas para análise. Concluiu-se que o coletor solar que utiliza o termossifão pode atingir temperaturas mais altas na saída do coletor, mas o tanque de armazenamento pode interferir, causando uma diminuição na temperatura da água que chega ao consumidor.

Palavras-chave: Coletor solar. Termossifão. Estudo experimental.

1 INTRODUÇÃO

O termossifão é um dispositivo que pode ser chamado de supercondutor de calor, apesar de sua construção relativamente simples. Desde que o nome termossifão surgiu por volta de 1928, relatado por Japkise (1973), esse dispositivo vem sendo estudado e aprimorado, pois apresenta grande potencial no transporte de calor. A literatura é extensa e abrange tanto a parte experimental quanto a teórica, como pode ser visto nos trabalhos de Faghri (1995) e também de Peterson (1994).

Os coletores solares são de vários tipos, dependendo de sua finalidade, conforme mostrado nos trabalhos de Abdel-Dayem, et al., 1999, Azzolin, et al., 2018, Fan e Furbo (2007), Ismail. et al., 2016, Kalogirou (2003), Kalogirou (2004) e Vejen, et al., 2004. A literatura tem propagado os benefícios oferecidos pelas fontes renováveis, bem como os problemas ambientais relacionados ao uso de fontes de energia convencionais e, como parte da solução, o uso de vários tipos de coletores como placa plana, composto parabólico, tubo de vácuo, calha parabólica, lente Fresnel, etc. Soluções para aquecimento solar de água, aquecimento e resfriamento de ambientes, O calor em processos industriais, sistemas de geração de vapor, dessalinização, aplicações químicas, entre outros, são exaustivamente estudados. Como visto, os sistemas que utilizam energia solar podem ser aplicados a uma ampla gama de problemas e proporcionam benefícios significativos, por isso devem ser utilizados sempre que possível.

Este estudo tem como objetivo comparar coletores solares que utilizam a tecnologia de termossifão bifásico com coletores convencionais. Foram estudados três modelos de coletores, dois com a presença de termossifões bifásicos, sendo que um deles foi inteiramente construído em laboratório, enquanto o outro foi adquirido comercialmente e um não utilizou o termossifão. Todos os coletores usados eram feitos de tubos de vidro evacuados duplos e tinham tanques de armazenamento idênticos.

2 EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL

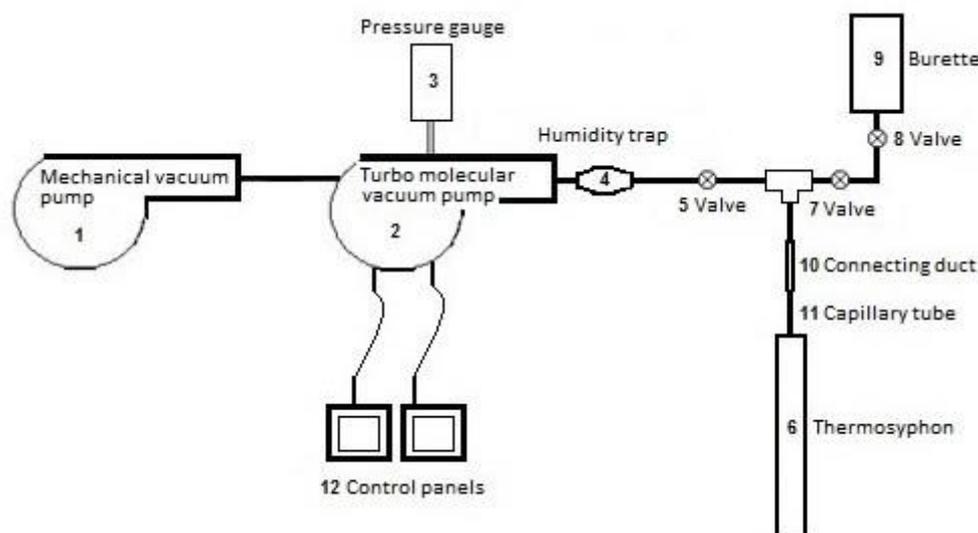
2.1 CONSTRUÇÃO DO CIRCUITO DE VÁCUO

O projeto de pesquisa começou com a montagem de um sistema capaz de produzir alto vácuo. Este sistema foi montado usando duas bombas acopladas em série. A bomba de vácuo mecânica de palhetas rotativas da série Pascal-SD, modelo 2005 SD, marca ADIXEN, com duplo estágio e vazão de bombeamento de 5,4 m³/h, com vácuo final de 0,2 Pa, foi conectada em série a uma bomba de vácuo turbo molecular de arrasto, modelo HiPace 80 DN 63 ISO-K, conforme mostrado na Fig. 1.

Essa configuração permitiu que a estrutura interna da bomba turbo molecular fosse protegida durante o processo inicial de geração de vácuo, até o limite operacional seguro da bomba turbomolecular. Após a ativação da bomba turbomolecular, a bomba mecânica é desligada manualmente e, em seguida, espera-se o tempo necessário para atingir o vácuo necessário dentro do termossifão. Durante esta fase, apenas a válvula 5 está aberta. Assim que o vácuo adequado é

alcançado, a bomba de vácuo turbo molecular é desligada através do painel de controle e o processo de enchimento do termossifão com o fluido de trabalho começa. A válvula 5 está fechada, a válvula 7 está aberta e a válvula 8 serve como válvula de controle de nível para permitir que o termossifão seja preenchido com a quantidade desejada de fluido de trabalho. Após o enchimento, as válvulas 7 e 8 são fechadas e o tubo capilar é preso por dois alicates de face plana, a luva de conexão é quebrada e o tubo capilar é selado com solda de prata. O circuito foi bem otimizado, com soluções de engenharia muito interessantes como, por exemplo, o coletor de umidade, que em sistemas mais sofisticados geralmente envolve técnicas caras onde equipamentos e/ou substâncias baixam a temperatura do fluido de trabalho na tentativa de congelá-lo e consequentemente evitar que ele retorne à bomba. Nesse sistema, foi utilizado um componente que causava perda de pressão por reter toda a umidade, que atendeu muito bem às necessidades do projeto. Todo o circuito de vácuo foi criado com o objetivo de fabricar termossifões bifásicos com vácuo suficiente para o seu bom funcionamento. O menor vácuo obtido foi de 0,08 Pa e o mais alto de 0,1 Pa.

Figura 1. Circuito de vácuo.



Fonte: Do autor.

2.2 CONSTRUÇÃO DE TERMOSSIFÃO BIFÁSICO

Antes de os tubos de cobre serem conectados ao circuito de vácuo, eles passaram por um rigoroso processo de limpeza interna manual com acetona para evitar a contaminação do fluido de trabalho com resíduos sólidos. Em seguida, suas extremidades foram seladas com tampas apropriadas usando solda de prata, e um dos lados recebeu um tubo capilar, como mostra a Fig. 2, que foi responsável por conectar o termossifão ao sistema de vácuo. No final do processo de enchimento e selagem, eles tiveram que passar por uma verificação da quantidade de fluido de trabalho que cada um recebeu. A verificação foi feita pesando o tubo de cobre antes e depois do enchimento com o fluido de trabalho, usando uma balança de precisão de 5,10⁻⁷ kg da marca KALA.

Dez termossifões bifásicos foram construídos para compor o coletor solar testado, onde cada tubo foi preenchido com 30% de seu volume total com água destilada, que foi utilizada como fluido de trabalho. O menor erro no processo de envase foi de 2,2% e o maior de 17,2%. As características geométricas dos tubos foram: 1,8 m de comprimento; diâmetro externo de $1,21 \times 10^{-2}$ m e volume interno de $2,1 \times 10^{-4}$ m³.

Figura 2. Detalhe da tampa do termossifão – sem limpeza externa.



Fonte: Do autor.

Para testar o funcionamento dos termossifões bifásicos construídos, foram utilizados dois procedimentos: primeiro, uma extremidade dos tubos foi imersa em água fervente a aproximadamente 100 °C, enquanto a outra extremidade foi inspecionada manualmente para observar o tempo de aquecimento da extremidade e o ruído causado pelo processo de troca de calor; No segundo procedimento, os tubos foram sacudidos até produzirem um ruído semelhante à colisão de dois metais. Esses métodos simples de inspeção mostraram-se bastante confiáveis, pois quando esses fenômenos não foram observados durante a operação dos tubos que apresentaram problemas relacionados a vazamentos.

2.3 CONSTRUÇÃO DE COLETOR SOLAR

A construção do protótipo começou com a montagem da estrutura metálica principal que foi responsável por acomodar e suportar o peso dos tubos de vácuo duplos com os termossifões bifásicos. A parte interna do coletor, que é a região por onde circula a água, mostrada na Fig. 3, foi construída com um sistema rosqueado, que não apresentou grandes problemas de montagem ou vazamentos. O termossifão pode ser encaixado perfeitamente no coletor usando um anel rosqueado que foi soldado a ele, conforme mostrado na Fig. 4. Em seguida, foi montado o próprio coletor, começando com a colocação dos termossifões, verificando se havia vazamentos no fluxo de água quente, montando os tubos duplos evacuados e, por fim, enchendo a caixa de isolamento do coletor com spray de poliestireno expandido.

Figura 3. Detalhes múltiplos.



Fonte: Do autor.

Figura 4. Sistema de acoplamento roscado.

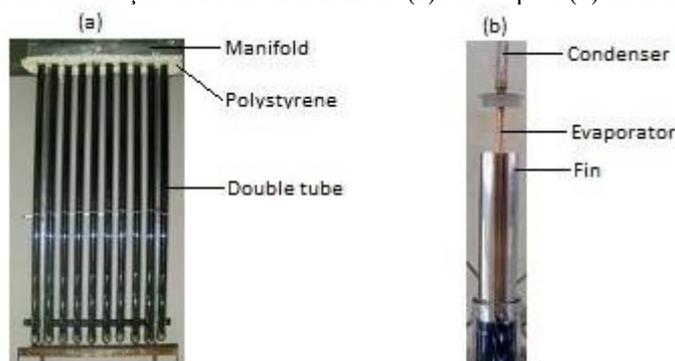


Fonte: Do autor.

O objetivo era construir um coletor solar com tubos duplos evacuados disponíveis comercialmente, mas adaptando termossifões bifásicos em seu interior. A Fig. 5(a) mostra uma visão geral do protótipo que foi fabricado, que teve sua estrutura modificada quando comparada aos adquiridos no mercado. As aletas são geralmente usadas para melhorar o desempenho da troca de calor entre o termossifão e as paredes internas do tubo duplo, como pode ser visto na Fig. 5 (b), que elucida o uso de uma aleta de alumínio ao redor de um tubo de calor no coletor solar disponível comercialmente. No protótipo, apenas os efeitos radiativos foram predominantes no processo de troca de calor na região onde está localizado o evaporador do termossifão bifásico, dispensando o uso de uma aleta que proporciona aumento de área e transporte de calor por condução térmica.

Após o processo de montagem do protótipo, ele foi levado para uma estação de teste adequada e três modelos de coletores solares ASUS foram cuidadosamente instalados na mesma posição. Todos foram montados voltados para o norte geográfico com um ângulo de inclinação de 28° . Os tanques de armazenamento utilizados tinham um volume de 200 litros e todos os tubos e conexões eram devidamente isolados e mantinham comprimentos e curvaturas semelhantes. Após algumas horas de operação, todos os modelos foram monitorados com uma câmera termográfica para detectar pequenos vazamentos que pudessem comprometer os testes.

Figura 5. Detalhes de construção dos coletores solares: (a) Protótipo e (b) Coletor solar comercial.



Fonte: Do autor.

Ao consultar os manuais que acompanham os coletores vendidos no mercado, observou-se que alguns deles incluem o termo tubos de calor. Para dirimir a dúvida, um dos supostos tubos de calor – Fig. 5(b) – foi aberto e seu fluido de trabalho foi quantificado e analisado quimicamente pelo Departamento de Química e Meio Ambiente da UERJ-FAT. Um fluido semelhante à água destilada foi encontrado, mas misturado com um pó que foi identificado como uma mistura de cobre e óxido de cobre. A parte líquida ocupava aproximadamente 4,02% do volume total e a descoberta mais interessante é que o tubo não era um tubo de calor conforme anunciado no manual do fabricante, mas sim um termossifão bifásico. Neste caso, não está claro se foi simplesmente uma confusão por parte da pessoa que escreveu os manuais ou se há algum erro conceitual intrínseco na definição entre tubo de calor e termossifão por parte dos fabricantes.

2.4 AQUISIÇÃO E ARMAZENAMENTO DE DADOS

Para rastrear os dados necessários para a análise do coletor, termopares com fio de compensação foram fabricados para reduzir os custos do projeto. O fio utilizado foi composto por uma liga de Chromel-Alumel, conhecida no mercado como fio condutor com o código KX, com diâmetro de 1,8 mm, que é adequada para trabalhar com termopares do tipo K. Os registros das temperaturas de entrada e saída de água no coletor foram feitos por um sistema automatizado de aquisição de dados de oito canais – Fieldlogger da Novus Produtos Eletrônicos Ltda.

Todos os termopares foram calibrados com base na temperatura de fusão do gelo, temperatura ambiente (comparada com um sensor YOKOGAWA Thermo Collector TM10) e temperatura de ebulição da água, considerando a altitude da cidade de Resende - RJ.

A partir da comparação dos resultados, foram extraídas curvas de ajuste para cada termopar. Em seguida, equações de correção de primeiro grau foram utilizadas para minimizar o erro dos termopares. A temperatura da água armazenada nos tanques de armazenamento também foi monitorada por meio de um calorímetro, permitindo assim contabilizar a produção de energia na forma de calor. Amostras diárias de quantidades semelhantes de água foram extraídas dos coletores em horários pré-

estabelecidos. Conhecendo as temperaturas envolvidas no processo, que foram lidas pelos termopares e obtidas pelo calorímetro, e utilizando a equação de conservação de energia para calcular o calor sensível, foi possível obter o valor do ganho de energia na forma de calor ao longo do período analisado. É importante ressaltar que antes de cada coleta, sempre eram descartados 3 litros de água, garantindo assim que a água analisada sempre vinha de dentro do tanque de armazenamento e não da tubulação, apesar de ter sido utilizada uma seção muito curta do duto na posição de extração de água. Foram calculadas as incertezas experimentais quanto aos resultados do ganho de energia na forma de calor, e os valores encontrados foram insignificantes.

3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O objetivo era medir a temperatura da água na saída do coletor e também no ponto de consumo, quantificando assim a energia acumulada em uma massa de água definida. Três modelos de coletores solares foram testados simultaneamente: coletor 1 da marca ASUS, que é composto por tubos de vidro evacuados duplos e termossifões bifásicos com aletas; coletor 2 da marca ASUS, composto por tubos de vidro duplos evacuados e sem termossifões bifásicos; e coletor 3 da marca ASUS, composto por tubos de vidro duplos evacuados e termossifões bifásicos construídos no Centro de Fontes Renováveis de Energia da UERJ – FAT. Todos os coletores possuíam 10 tubos de vidro compondo a mesma área externa. Vale ressaltar que no coletor de tubo duplo evacuado, a água penetra no interior do tubo de vidro, enquanto no coletor que utiliza o termossifão, a região interna não tem contato com a água. Portanto, existem diferenças de construção no coletor nas situações de conjunto e também entre os coletores 1 e 3, embora menos pronunciadas. Isso causará alterações no padrão de fluxo de água dentro do coletor, impondo alterações na vazão e queda de pressão, não permitindo assim uma semelhança completa entre os modelos testados.

Os testes foram realizados durante um período de oito meses e, como houve reprodutibilidade qualitativa dos resultados. Dois períodos específicos foram escolhidos para apresentação. Os gráficos apresentados na sequência foram construídos em um período de 24 horas, iniciando às 12:00h de um dia e terminando às 12:00h do dia seguinte. Para maior comodidade durante a construção das figuras, o eixo x utiliza uma faixa de 12 a 36 configurando um período de 24 h. Na trigésima sexta hora, foram registradas para análise as leituras de temperatura na entrada e saída do coletor 1, 2, 3, da água proveniente da rede de abastecimento e da água captada na saída do tanque de armazenamento por calorímetro.

Com os valores experimentais em mãos, o cálculo do calor armazenado em cada coleção de calorímetros em um período de 24 horas pôde ser obtido e serviu para fins de comparação dos coletores. Com as suposições apropriadas e assumindo que não houve mudança de fase, a equação de conservação de energia pode ser escrita na forma:

$$Q = m c_p \Delta T \quad (1)$$

em que: Q = representa o calor armazenado no fluido contido no calorímetro, [kJ] m = massa de água contida no calorímetro, [kg]

c_p = calor específico da água a pressão constante, [kJ/kgK]

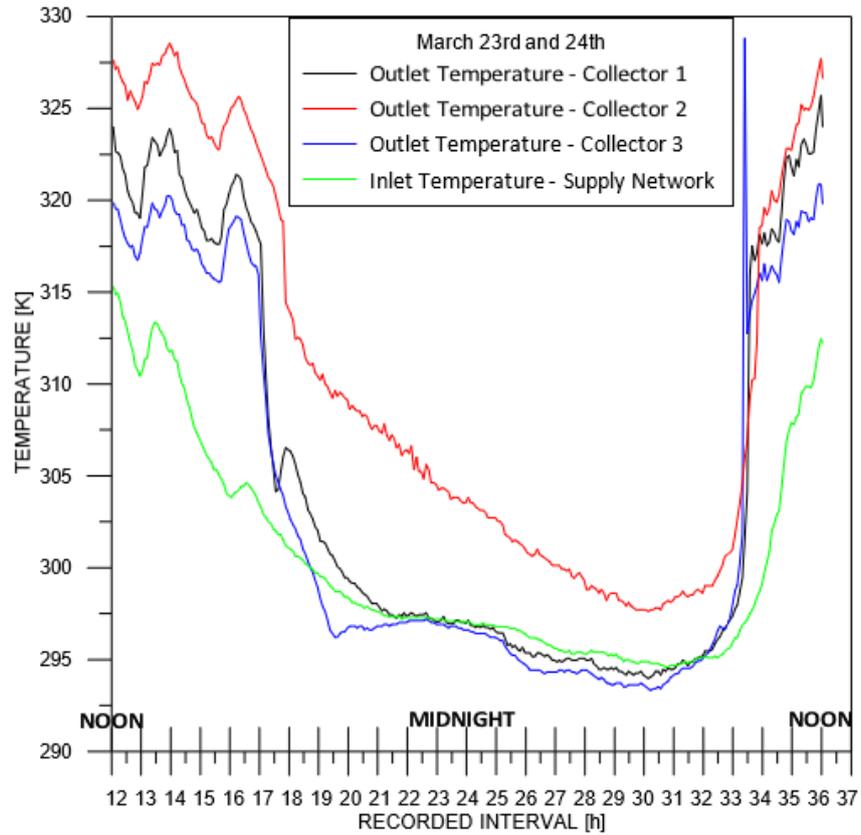
ΔT = diferença de temperatura entre a água recolhida pelo calorímetro e a água proveniente da rede de abastecimento, [K]

3.1 ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA

Fig. (6) mostra o valor da temperatura em função do tempo na saída do coletor e também na rede de abastecimento de água que os alimenta. O coletor 2 apresenta temperaturas mais elevadas que os demais no período da tarde – 12h00 às 18h00 – mas é praticamente igual ao coletor 1 no período da manhã – 35h a 36h. O coletor 3 apresenta um padrão de temperatura sempre inferior aos demais no período mencionado. O mesmo padrão foi encontrado na Fig. (10), que foi um dia nublado com temperaturas mais baixas da água de alimentação. A diferença é que, neste caso, o coletor 1 superou os demais e o coletor 3 continuou a fornecer as temperaturas mais baixas. O conjunto de gráficos mostrado na Fig. (7), Fig. (8) e Fig. (9) apresenta a diferença de temperatura entre a região de entrada e saída do coletor para todos os modelos de coletores no período entre 23 e 24 de março. A maior diferença de temperatura considerando 12h como referência foi encontrada no coletor 2, enquanto os coletores 1 e 3 com menores diferenças obtiveram praticamente o mesmo valor. Maiores diferenças de temperatura no coletor são certamente uma indicação da obtenção de um valor mais alto na força de empuxo, que é responsável pelo bom funcionamento dos sistemas passivos. É importante ressaltar que as vazões mássicas para os coletores eram diferentes. Nos coletores com termossifões, a perda de carga é menor, pois o fluido flui diretamente através do coletor, enquanto no outro coletor o fluxo deve passar por todo o tubo de aquecimento. Como a vazão mássica é menor, para o mesmo calor coletado, as temperaturas alcançadas foram maiores. Para o dia nublado, os valores da diferença de temperatura entre a região de entrada e saída das variedades foram mostrados no conjunto de gráficos representados pela Fig. (11), Fig. (12) e Fig. (13). Nota-se que os valores da diferença de temperatura dos coletores 1 e 2 são semelhantes e superiores aos do coletor 3, tomando 12h como tempo de referência.

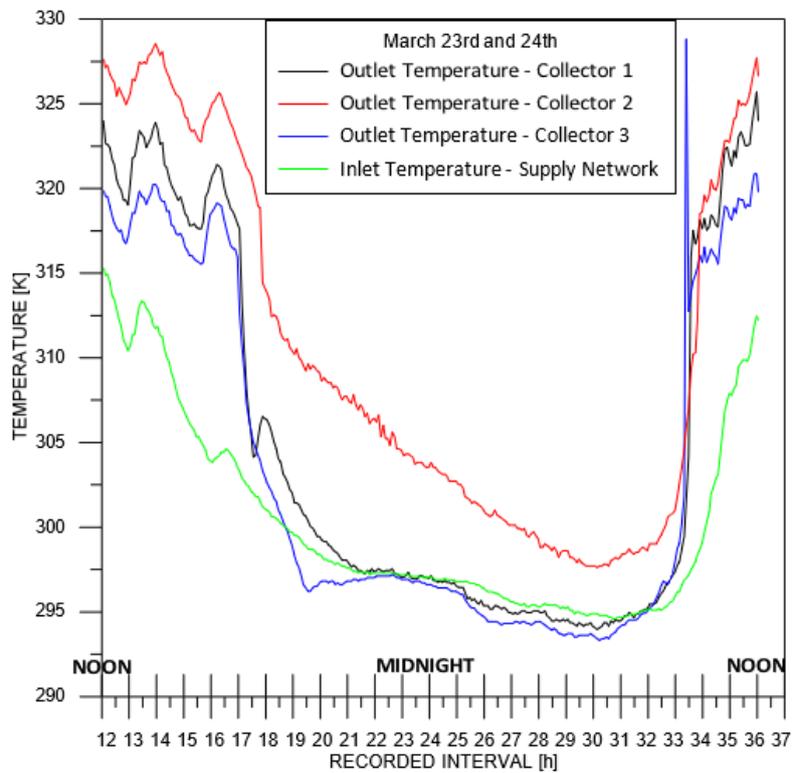
Um fenômeno de inversão de temperatura entre a região de entrada e saída foi capturado nos coletores 1 e 3 que utilizam a tecnologia de termossifão bifásico. Essa inversão que ocorre aproximadamente entre 18 h e 34 h deve ser causada pela queda na temperatura do ar ambiente. O termossifão bifásico não funcionará, mas a estrutura de cobre pode atuar como uma barbatana. Isso é mostrado na Fig. (7), Fig. (9), Fig. (11) e Fig. (13). Este fenômeno de inversão de temperatura não ocorre no coletor 2, como corroborado pela Fig. (8) e Fig. (12).

Figura 6. Temperatura entre as 12h de um dia até as 12h do dia seguinte.



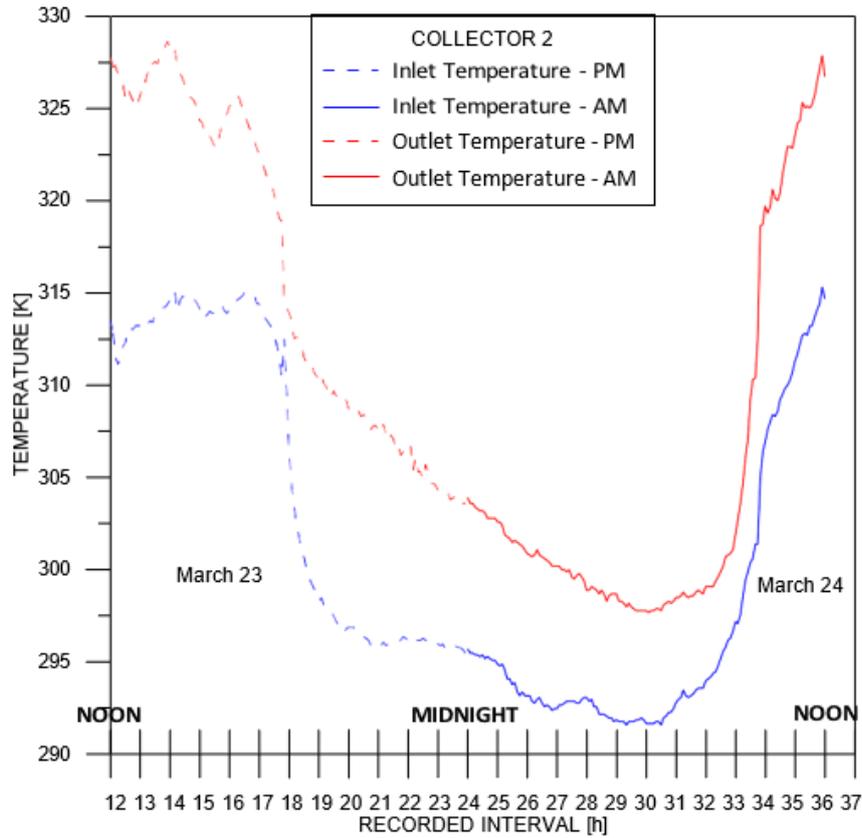
Fonte: Do autor.

Figura 7. Temperatura entre as 12h de um dia até as 12h do dia seguinte.



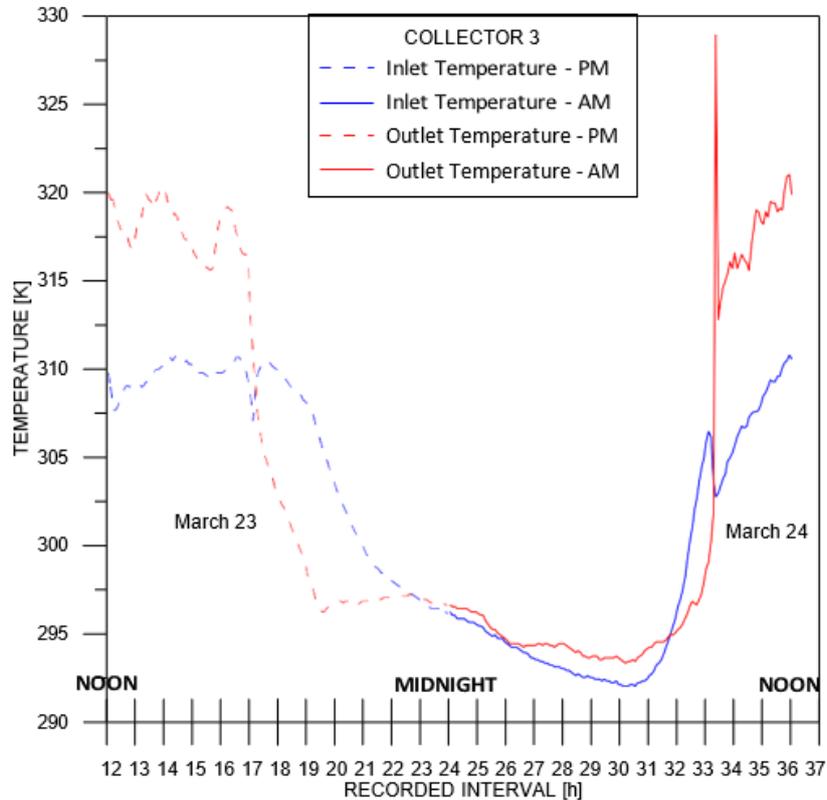
Fonte: Do autor.

Figura 8. Temperatura entre as 12h de um dia até as 12h do dia seguinte.



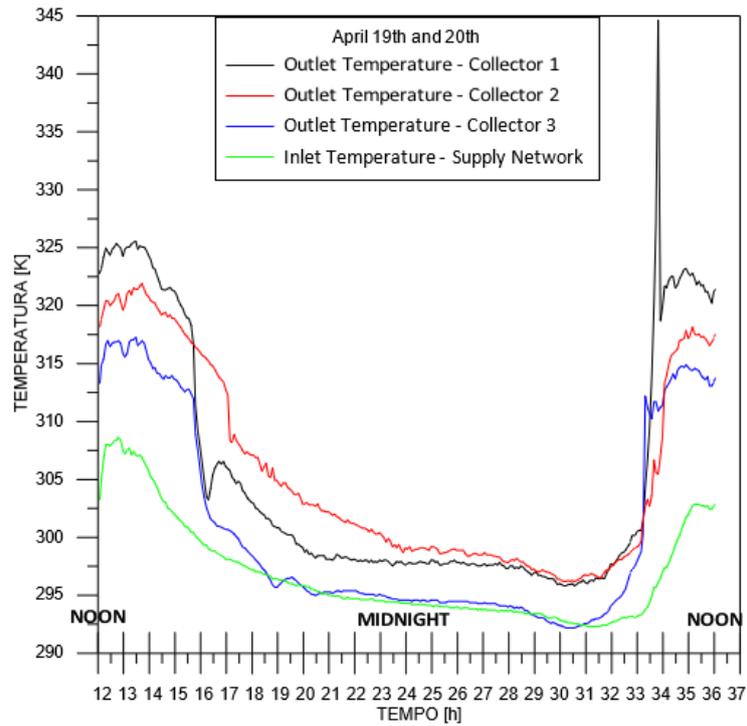
Fonte: Do autor.

Figura 9. Temperatura entre as 12h de um dia até as 12h do dia seguinte.



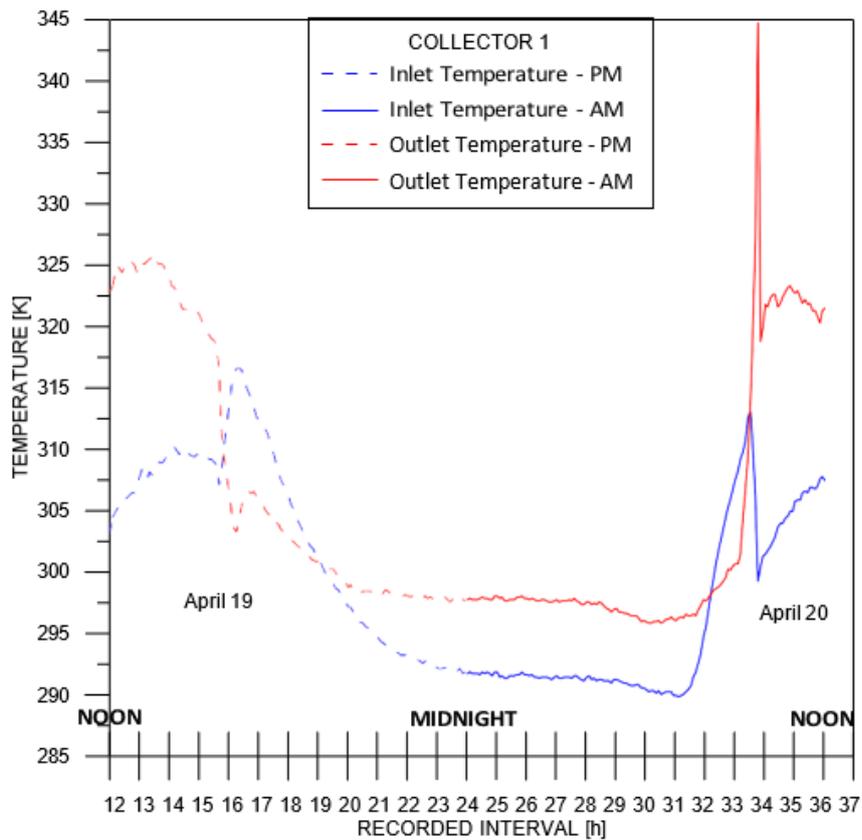
Fonte: Do autor.

Figura 10. Temperatura entre as 12h de um dia até as 12h do dia seguinte.



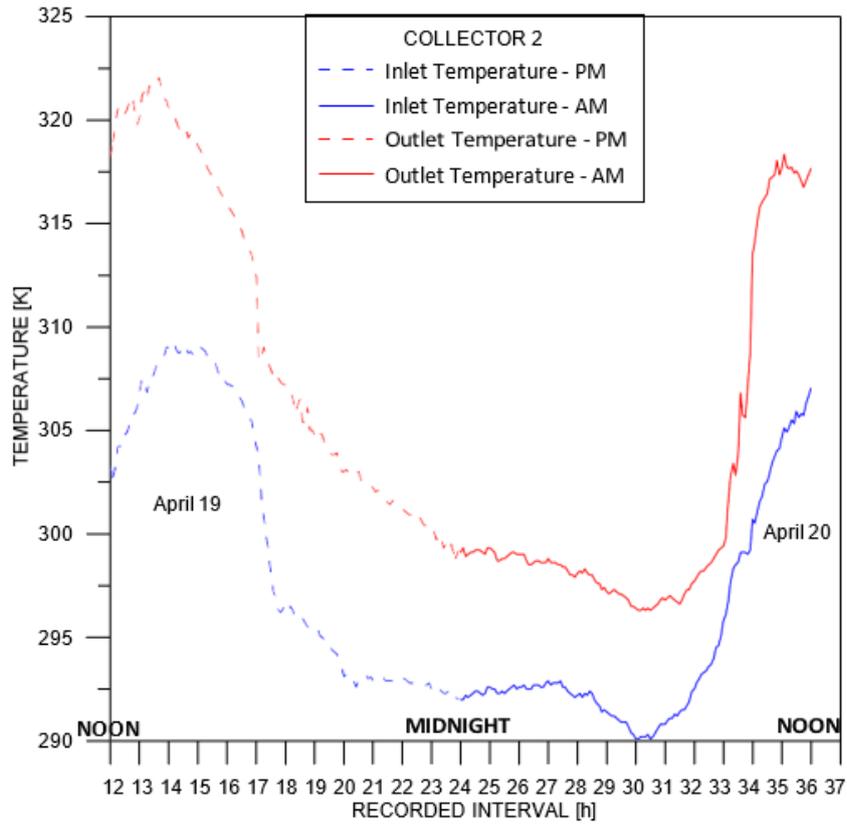
Fonte: Do autor.

Figura 11. Temperatura entre as 12h de um dia até as 12h do dia seguinte.



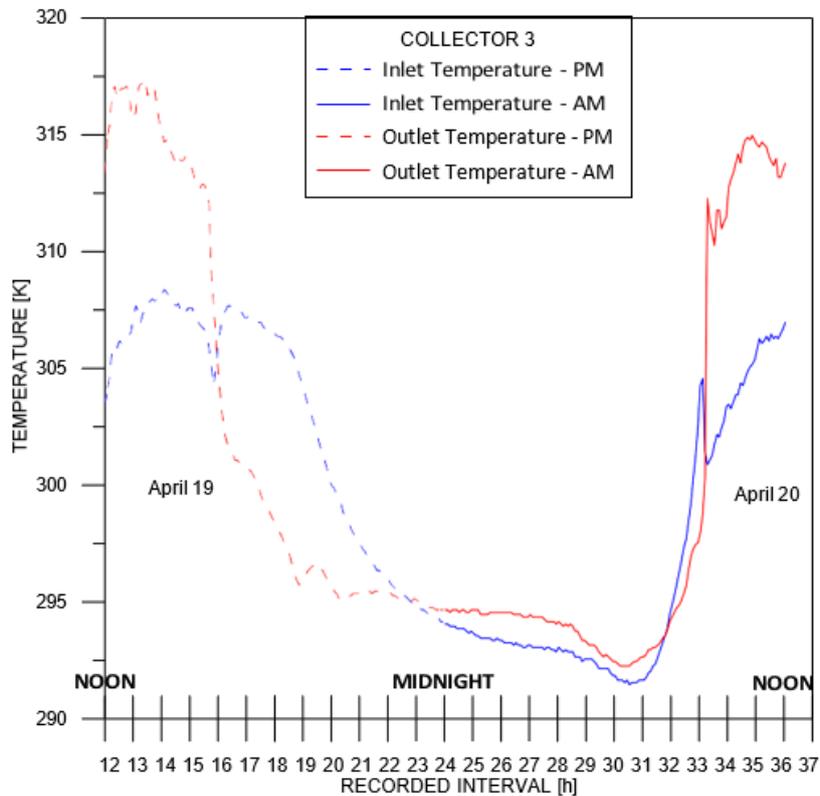
Fonte: Do autor.

Figura 12. Temperatura entre as 12h de um dia até as 12h do dia seguinte.



Fonte: Do autor.

Figura 13. Temperatura entre as 12h de um dia até as 12h do dia seguinte.



Fonte: Do autor.

3.2 ACUMULAÇÃO DE ENERGIA

A energia acumulada na massa de água contida no calorímetro foi medida durante um período de 20 dias, abrangendo os meses de março, abril e maio. Esse período foi escolhido por apresentar variações climáticas mais acentuadas, como variações de temperatura ambiente, dias nublados e dias chuvosos na região onde o teste foi realizado, quando comparado com o período de oito meses. A Tabela (1) mostra os resultados obtidos com o uso da Eq. (1) para encontrar a energia acumulada e seus respectivos desvios percentuais entre cada coletor, nas situações em que a temperatura levada em consideração foi a do tanque de armazenamento e também a da saída do coletor.

Tabela 1. Soma da energia acumulada para cada coletor durante o período de vinte dias.

Coletor Solar	Tanque de armazenamento [kJ]	Desvio [%]	Saída do coletor [kJ]	Desvio [%]
1	125.7	D12 = 22,9%	338,6 kJ	D12 = 20,0%
2	154.5	D23 = 10,5%	282,2 kJ	D23 = 57,5%
3	139.8	D31 = 11,2%	179,2 kJ	D31 = 89,0%

Fonte: Do autor.

É importante esclarecer que a energia armazenada dentro do tanque foi o valor para o período de tempo considerado e a energia na energia do coletor é um valor médio ao meio-dia. Os resultados apontam que o coletor sem termossifão proporcionou mais energia acumulada dentro do tanque de armazenamento por um longo período, enquanto o coletor com o termossifão capta mais energia no curto período próximo ao meio-dia. Isso pode ser explicado quando o processo de aquecimento é analisado. A energia é transferida de forma mais eficiente para o fluido pelo termossifão, mas durante o período sem radiação solar, o termossifão atua como um diodo térmico. Este fato pode ser confirmado pelas curvas de temperatura, que mostram que a temperatura de saída do coletor atinge a temperatura ambiente. Toda a energia armazenada no coletor é perdida. No coletor tubular, há uma grande quantidade de água dentro dos tubos que também armazena energia. Mesmo durante a ausência de radiação solar, parte da energia coletada durante o dia permanecerá na massa d'água e será transferida para o tanque.

Os resultados da energia acumulada a partir da temperatura que representa o tanque de armazenamento mostram a superioridade do coletor 2, que não utiliza a tecnologia de termossifão bifásico, seguido do coletor 3, que foi o protótipo construído, e por fim do coletor 1, que é vendido no mercado, ambos com o termossifão bifásico instalado. O maior desvio percentual (D) encontrado foi entre os modelos 1 e 2. Agora, quando a temperatura na saída do coletor é levada em consideração, o coletor 1 se destaca, ocupando o primeiro lugar, seguido pelos coletores 2 e 3. Em termos de desvio percentual, todos os tipos de coletores começam a se afastar uns dos outros, especialmente os modelos 1 e 3, com um valor de 89%.



Os resultados sugerem que a tecnologia de termossifão bifásico, quando usada corretamente, pode atingir as temperaturas mais altas na saída do coletor; No entanto, isso não significa que o consumidor desfrutará desses níveis de temperatura em um período de longo prazo. Como todos os coletores utilizados neste trabalho eram da mesma marca, foram instalados de forma estritamente idêntica e ocuparam a mesma área externa para coleta de energia solar, parece que os processos térmicos e fluidodinâmicos dentro do tanque de armazenamento são fortemente afetados pela forma como a energia solar é captada. Também foi possível notar que, em relação às temperaturas medidas na saída do coletor, o protótipo foi comprometido pela não utilização de uma aleta como foi feito no coletor 1.

4 DECLARAÇÕES FINAIS

Este estudo conclui que:

- Os coletores solares de tubo evacuado duplo com termossifão operando em sistema passivo apresentam níveis mais altos de temperatura da água na saída do coletor.
- Os processos térmicos e fluidodinâmicos em tanques de armazenamento podem ser influenciados pelo modelo de coletor utilizado para captar a energia solar, resultando em uma queda na temperatura da água que chega ao consumidor.
- Os sistemas ativos – o uso de bombas – podem beneficiar coletores solares que usam tecnologia de termossifão bifásico, melhorando o coeficiente interno do filme dentro do coletor e também reduzindo a estratificação que ocorre dentro dos reservatórios.
- A remoção da aleta que cobre o termossifão bifásico só pode ser realizada se houver um projeto adequado do termossifão, para compensar a perda de área de captação de energia solar.
- O coletor solar sem o termossifão bifásico é mais barato e parece atender bem os consumidores domésticos, mas o coletor solar com tecnologia de termossifão bifásico tem grande potencial para uso industrial.

CONFIRMAÇÕES

Os autores agradecem à instituição onde trabalham, a Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, por fornecer a infraestrutura física necessária para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeceriam também às agências de fomento CNPq e FAPERJ pelo financiamento dos equipamentos utilizados durante os testes experimentais.



REFERÊNCIAS

ABDEL-DAYEM, A. M.; MEYER-PITTRO, R.; RUSS, W.; MOHAMAD, M. A. How to select a collector? *Applied Energy*, v. 64, p. 159–164, 1999.

AZZOLIN, M.; MARIANI, A.; MORO, L.; TOLLOTTO, A.; TONINELLI, P.; DEL COL, D. Mathematical model of a thermosyphon integrated storage solar collector. *Renewable Energy*, v. 128, p. 400–415, 2018.

FAGHRI, A. *Heat pipe science and technology*. Taylor & Francis, 1995.

FAN, J.; SHAH, L. J.; FURBO, S. Flow distribution in a solar collector panel with horizontally inclined absorber strips. *Solar Energy*, v. 81, p. 1501–1511, 2007.

ISMAIL, K. A. R.; ZANARDI, M. A.; LINO, F. A. M. Modeling and validation of a parabolic solar collector with a heat pipe absorber. *Advances in Energy Research*, v. 4, p. 299–323, 2016.

JAPKISE, D. *Advances in thermosyphons technology*. Academic Press, 1973.

KALOGIROU, S. A. Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 30, p. 231–295, 2004.

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

PETERSON, G. P. *An introduction to heat pipes: Modeling, testing, and applications*. John Wiley & Sons Inc., 1994.

VEJEN, N. K.; FURBO, S.; SHAH, L. J. Development of 12.5 m² solar collector panel for solar heating plants. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, v. 84, p. 205–223, 2004.