

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM PROTÓTIPO DE COLETOR SOLAR COMPACTO ASSISTIDO POR TERMOSIFÕES

Samuel Heusi Moreira, samuelmoreira@alunos.utfpr.edu.br¹
Giovane Nogueira Rossi, giovanerossi@alunos.utfpr.edu.br¹
Pedro Leineker Ochoski Machado, pedmac@alunos.utfpr.edu.br¹
Gabriel Nunes Maia Junior, gabrielnmjunior@hotmail.com¹
Thiago Antonini Alves, antonini@utfpr.edu.br¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Mecânica, Departamento Acadêmico de Física, Rua Doutor Washington Subtil Chueire, 330, Jardim Carvalho, 84017-220, Ponta Grossa, PR, Brasil.

Resumo. A busca por soluções reais que satisfaçam a demanda crescente de energia no cenário global tem sido o foco de muitas pesquisas da comunidade científica mundial e, tanto fontes quanto tecnologias renováveis têm sido buscadas para a substituição dos combustíveis fósseis, não renováveis e com elevado potencial de degradação ambiental. No âmbito da sustentabilidade destacam-se pesquisas relacionadas à energia solar. Esse tipo de energia renovável é utilizada em coletores solares, tanto para uso industrial como para uso doméstico, com o intuito de aquecer uma quantidade de água armazenada e desta forma reduzir o consumo de energia elétrica. Os coletores solares assistidos por termosifões, ou também chamados de coletores solares à vácuo, são alternativas viáveis para a utilização de aquecimento de água e atuam diretamente sobre uma parcela significativa do consumo de energia. Eles são mais eficientes, operam em temperaturas superiores e podem ser mais compactos em comparação aos coletores solares convencionais. Neste contexto, no presente trabalho é apresentada uma investigação experimental de um protótipo de um coletor solar compacto assistido por termosifões utilizado em aquecimento de água doméstica, contribuindo significativamente ao desenvolvimento sustentável.

Palavras chave: Termossifão. Energia Solar. Coletor Solar.

Abstract. The search for real solutions that satisfy the growing demand for energy on the global stage has been the focus of much research by the global scientific community and both sources and renewable technologies have been sought to replace fossil fuels, non-renewable and with high potential for ambient degradation. In terms of sustainability, research related to solar energy stands out. This type of renewable energy is used in solar collectors, both for industrial and domestic use, in order to heat a quantity of stored water and thus reduce the consumption of electricity. Solar collectors assisted by thermosyphons, or also called vacuum solar collectors, are viable alternatives for the use of water heating and act directly on a significant portion of energy consumption. They are more efficient, operate at higher temperatures and can be more compact compared to conventional solar collectors. In this context, the present work presents an experimental investigation of a prototype of a compact solar collector assisted by thermosyphons used in domestic water heating, contributing significantly to sustainable development.

Keywords: Thermosiphon. Solar energy. Solar Collector.

1. INTRODUÇÃO

De forma simplificada, o conceito de energia solar está baseado no aproveitamento da luz e do calor fornecido pela radiação solar. A energia do sol origina-se de um processo termonuclear que converte toneladas de hidrogênio em hélio a cada segundo, gerando calor e radiação eletromagnética. O calor mantém-se na superfície solar, sendo responsável por manter o processo termonuclear, ao passo que a radiação é emitida para a vizinhança, atingindo a superfície terrestre com uma pequena fração de seu total. Tal fração poderia fornecer toda a energia necessária para o planeta Terra, porém as atuais tecnologias não possuem capacidade de aproveitar esse potencial energético ao todo (Kabir *et al.*, 2018).

A energia solar pode ser aproveitada por tecnologias passivas ou ativas. Por definição, as tecnologias passivas não fazem a transformação da luz ou energia térmica em outra forma de energia, sendo utilizada majoritariamente para aquecimento de residências, por exemplo. Já as tecnologias ativas estão caracterizadas principalmente pelo uso de tecnologias fotovoltaicas e também tecnologias térmicas, como coletores solares (Kabir *et al.*, 2018).

Os coletores solares têm os fundamentos básicos de um trocador de calor que transforma a energia provida do sol (radiante) em energia térmica (interna). A energia captada do sol é transferida, geralmente, para um fluido de trabalho em movimento pelo coletor solar. Para um bom funcionamento, os coletores solares necessitam estarem posicionados preferencialmente para o norte e com a inclinação da latitude, ou inclinação da latitude somada 10° , dependendo da região e da proximidade da linha do Equador. Dentre os tipos de coletores solares podem se destacar os não concentradores e os concentradores. Os não concentradores permanecem com a área absorvedora de radiação solar constante enquanto os concentradores contêm uma superfície côncava na qual focalizam os raios solares em uma área absorvedora aumentando o fluxo de radiação solar (irradiação solar) (Silva, 2015).

Dentre os tipos de coletores solares, o compacto assistido por termossifões é uma tecnologia que merece destaque. Este tipo de coletor solar tem se mostrado uma alternativa viável para o aquecimento de água (Espírito Santo, 2017). Por ser assistido por dispositivos (termossifões) que operam em um ciclo bifásico fechado e utilizam o calor latente de vaporização do fluido como mecanismo de troca transferência de calor para um pequeno gradiente de temperatura, o coletor solar assistido por termossifões é altamente eficiente, podendo diminuir consideravelmente o uso de energia elétrica para esta finalidade.

O funcionamento destes um termossifões se dá quando os raios da irradiação solar aquecem o fluido de trabalho dentro da seção chamada de evaporador, que se localiza na parte inferior do dispositivo passivo de transferência de calor, fazendo com que este fluido vaporize e suba até a região superior conhecida como condensador e isso ocorre devido a uma diferença de pressão. Uma vez no condensador o fluido troca calor com o líquido em escoamento cruzado a ser aquecido e condensa, descendo até a o evaporador pelo efeito da gravidade (Reay *et al.*, 2014). Uma ilustração da operação de um termossifão pode ser observada na Fig. 1.

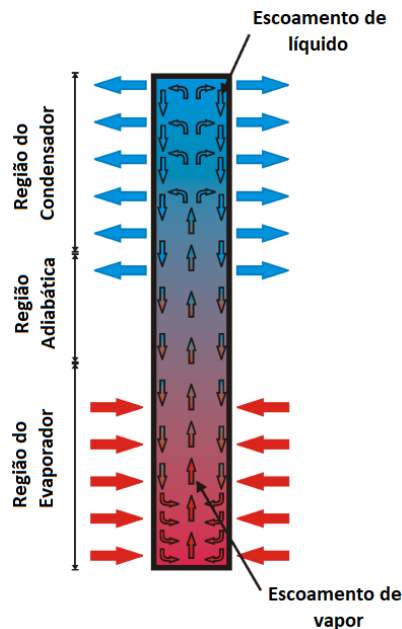


Figura 1. Princípio de funcionamento de um termossifão (Aguiar *et al.*, 2018)

Nesse contexto, no presente trabalho é apresentada uma investigação experimental de um protótipo de um coletor solar compacto assistido por termossifões utilizado em aquecimento de água doméstica, contribuindo significativamente ao desenvolvimento sustentável.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O aparato experimental pode ser observado na Figura 2. Esse é composto por um sistema de aquisição de dados *AgilentTM 34970A* com um multiplexador de 20 canais, um banho ultratermostatzado *SolabTM SL-130*, um *notebook DellTM*, um medidor de vazão de área variável (rotâmetro) *Omega EngineeringTM FL-2051* com válvula reguladora, um piranômetro *Kipp & ZonenTM CMP3* e um coletor solar compacto assistido por termossifões.



Figura 2. Aparato Experimental.

O coletor solar compacto assistido por termossifões foi desenvolvido por Espírito Santo (2017). Os termossifões que compõe o coletor foram fabricados em cobre e preenchidos com água como fluido de trabalho. A Tabela 1 apresenta as principais características dos termossifões.

Tabela 1. Características dos termossifões.

Parâmetro	Valor
Diâmetro interno do evaporador [mm]	7,75
Diâmetro externo do evaporador [mm]	9,45
Diâmetro interno do condensador [mm]	11,91
Diâmetro externo do condensador [mm]	12,70
Comprimento do evaporador [mm]	800
Comprimento da seção adiabática [mm]	40
Comprimento do condensador [mm]	110
Razão de preenchimento [%]	50
Volume do fluido [mL]	18,86

O *manifold* utilizado para circulação de água é composto por três de PVC (policloreto de vinila) com duas polegadas de diâmetro (50,8mm) conectados entre si a partir de tubulações, apresentando comprimento total de aproximadamente 820mm. O espaçamento entre os termossifões é de 100mm, como pode ser observado na Fig. 3. Ao longo dos termossifões e em posições específicas do sistema de circulação de água foram posicionados termopares do tipo K *Omega Engineering*TM para aquisição de dados de temperatura. A posição dos termopares pode ser observada na Fig. 4. Em relação à sua nomenclatura, os termopares seguidos da letra *A* estão posicionados na seção adiabática, os termopares seguidos da letra *C* no condensador e, os seguidos da letra *E*, no evaporador. As denominações $T_{entrada}$, $T_{saída}$ e T_p são as temperaturas de entrada e saída da água e também a temperatura da placa do coletor, respectivamente.

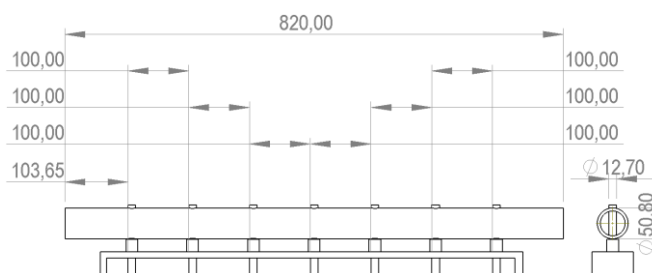


Figura 3. Espaçamento entre Termossifões.

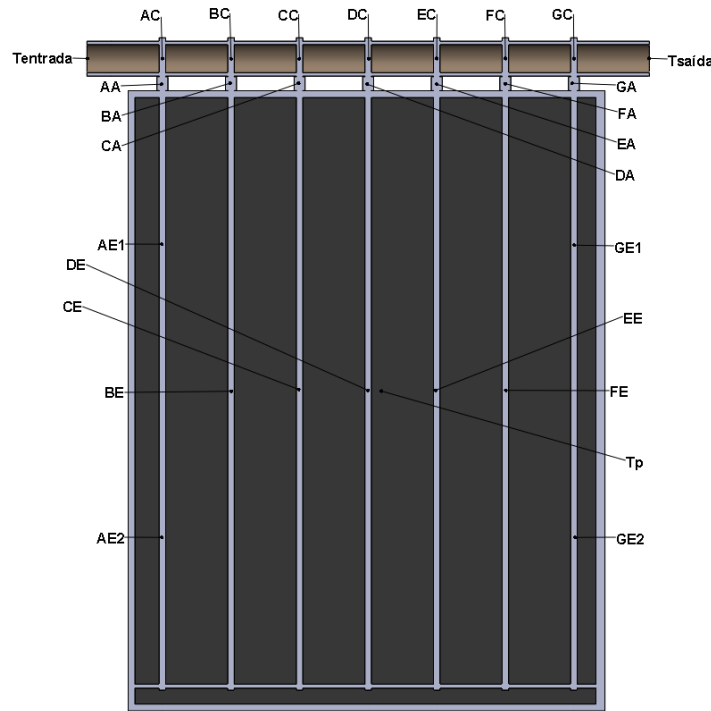


Figura 4. Posicionamento dos Termopares

Para os testes experimentais o coletor solar foi posicionado no pátio solar em anexo ao Laboratório de Energia Solar (LabSOLAR) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Câmpus* Ponta Grossa. A região dos evaporadores dos termossifões foi exposta ao sol, ao passo que os condensadores foram submetidos a um escoamento de água cruzado vindo do banho ultratermostatizado.

A temperatura da água de entrada foi controlada utilizando um banho ultratermostatizado, ao passo que a vazão volumétrica foi controlada por meio de um rotâmetro com válvula reguladora e área variável. A temperatura selecionada no banho foi de 21°C, sendo realizados testes com uma vazão volumétrica de água de 0,5 L/min. O protótipo do coletor solar assistido por termossifões teve seu comportamento térmico avaliado por intermédio da utilização de termopares do tipo K, da marca *Omega Engineering*TM, que foram fixados com fita adesiva *Kapton*TM na superfície externa de cada termossifão, além da entrada e saída da água que foi aquecida. Com um piranômetro foram realizadas as medidas da irradiação solar durante os testes experimentais.

Os dados foram coletados e registrados a cada 15 minutos através de um sistema de aquisição de dados *Agilent*TM34970, que possui dois multiplexadores *Agilent*TM 34901A de 20 canais cada. Após arquivados no computador portátil *Dell*TM e, utilizando-se do *software Agilent*TM *Benchlink Data Logger 3*, os dados foram posteriormente tratados e a avaliação do desempenho do protótipo foi determinada.

A partir dos dados de temperatura e irradiação, foram determinados os valores de eficiência térmica do coletor solar para diferentes irradiações, verificando a influência desse parâmetro no desempenho do coletor. A eficiência é determinada pela razão entre a energia fornecida para a água que escoou pelo coletor, e a energia fornecida pela radiação solar. A eficiência (η_{th}) é calculada a partir da Eq. (1), em que m é a vazão mássica de água e C_p seu calor específico, I corresponde à irradiação solar e A representa a área dos evaporadores que compõe o coletor solar.

$$\eta_{th} = \frac{mC_p(T_{evap} - T_{cond})}{IA}, \quad (1)$$

3. RESULTADOS

A Tabela 2 apresenta os dados de temperatura obtidos durante a realização dos testes experimentais, enquanto a Figura 5 apresenta os valores de entrada e saída da água no coletor solar compacto em função da irradiação solar que o incide. O piranômetro apresenta sensibilidade de leitura de $13,58 \cdot 10^{-6}$ V.m²/W. Os valores de irradiação solar são obtidos a partir da divisão do valor fornecido pelo piranômetro pelo valor de sua sensibilidade.

Tabela 2. Resultados de Temperatura

Tempo [minutos]	T _{entrada} [°C]	T _{saída} [°C]	ΔT [°C]	Piranômetro [μV]	Irradiação Solar [W/m ²]
15	21,5	25,5	4,0	0,0133881	933,67
30	21,6	25,3	3,7	0,0130736	956,12
45	21,3	25,6	4,3	0,0123990	1.008,15
60	21,2	25,5	4,3	0,0120883	1.034,06
75	21,5	25,1	3,6	0,0112007	1.115,99

Como pode ser notado pela Tabela 2 e Figura 5, os gradientes de temperatura obtidos ficaram, em média, próximos a 4°C para todos os valores de irradiação solar.

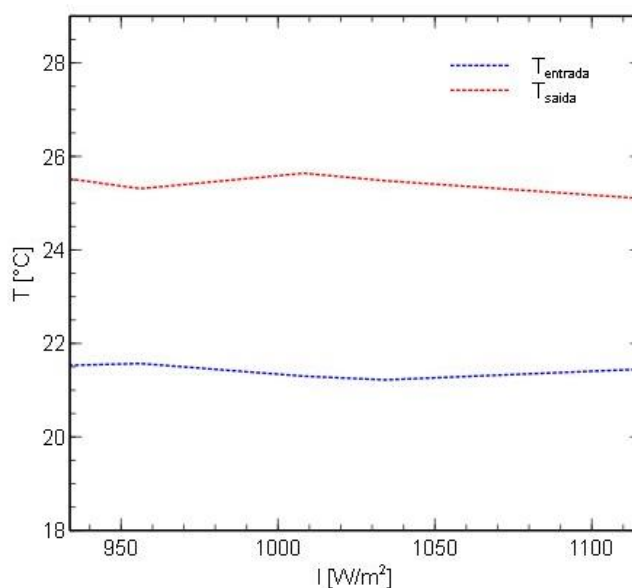


Figura 5. Temperatura de entrada e saída da água em função da irradiação solar.

A Tabela 3 apresenta os valores de eficiência obtidos para o protótipo de coletor solar assistido por termossifões durante a execução dos testes experimentais. A potência dissipada consiste na energia fornecida para cada termossifão, consistindo na multiplicação entre a irradiação solar e a área do evaporador de um termossifão enquanto que a potência total consiste na energia fornecida para um total de sete termossifões, logo, consiste na potência dissipada multiplicada por 7. Finalmente, a taxa de transferência de calor consiste no total de energia transferida para a água corrente sobre os condensadores dos termossifões.

Tabela 3. Eficiência do protótipo de coletor solar compacto assistido por termossifões.

Vazão [L/min]	Irradiação [W/m ²]	Potência Dissipada [W]	Potência Total [W]	Taxa de Transferência de Calor [W]	ΔT [°C]	η [%]
0,5	933,67	22,2	155,2	138,7	4,0	89,4
	956,12	22,7	159,0	129,9	3,7	81,7
	1.008,15	23,9	167,6	150,7	4,3	89,9
	1.034,06	24,6	171,9	148,3	4,3	86,3
	1.115,99	26,5	185,5	127,0	3,7	68,4

A partir da Tabela 3 pode ser notado que o protótipo de coletor solar compacto operou de forma satisfatória, uma vez que, em geral, apresentou níveis de eficiência energética acima de 80%. A maior eficiência obtida foi de 89,9% para uma irradiação de 1.008,15 W/m² e gradiente de temperatura de 4,3°C, ao passo que a menor eficiência obtida foi de 68,4% para uma irradiação de 1.115,99 W/m² e gradiente de temperaturas de 3,7°C. Com os resultados obtidos não se tornou possível perceber um padrão nos valores de eficiência em função dos valores de irradiação solar e gradiente de temperatura, uma vez que o aumento nesses dois parâmetros não resultou necessariamente no aumento da eficiência energética, obtendo, inclusive, a maior perda de energia para o caso com maior nível de irradiação.

4. CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi descrita a metodologia utilizada para realização de testes experimentais de desempenho térmico em um protótipo de um coletor solar assistido por termossifões. O coletor solar é composto por uma caixa com tampo de vidro, onde estão posicionados os evaporadores de sete termossifões de cobre. Os condensadores dos termossifões foram posicionados em um *manifold* feito a partir de tês de PVC de duas polegadas de diâmetro. A região do evaporador possui 800mm de comprimento, ao passo que o condensador apresenta 110mm de comprimento. Os testes experimentais foram realizados com uma vazão volumétrica de água de 0,5L/min no interior do *manifold*, sendo adquiridos dados de temperatura da água na entrada e saída do coletor, assim como irradiação solar a cada 15min, permitindo-se o cálculo da eficiência energética de primeira lei. Como resultados, o coletor solar apresentou gradientes de temperatura de em média 4°C, apresentando eficiência energética mínima de 68,4% e máxima de 89,9%. Dessa forma, pode ser considerado que o protótipo de coletor solar assistido por termossifões operou de forma satisfatória, uma vez que apresentou em geral eficiências de primeira lei acima de 80%. Algumas alterações no protótipo de coletor solar assistido por termossifões podem ser realizadas de forma a se elevar seus níveis de eficiência, como por exemplo realizar o uso de isolamento na região do *manifold*, evitando assim perdas térmicas para o ambiente externo.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são prestados à CAPES, à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da UTFPR, à Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e ao Departamento Acadêmico de Mecânica da UTFPR/Câmpus Ponta Grossa.

6. REFERÊNCIAS

- Aguiar, V. M. *et al.*, 2018. “Thermal analysis of a finned thermosyphon for heat exchanger applications”. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, Vol. 5, p. 1-14.
- Espirito Santo, M., 2017. Análise Experimental de Diferentes Configurações de Termossifões para Aplicação em Coletor Solar. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa/PR.
- Kabir, E. *et al.*, 2018. “Solar energy: Potential and future prospects”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, p. 894-900.
- Reay, D.A., Kew, P.A., McGlen, R.J., 2014. *Heat Pipes: Theory, Design and Applications*. Elsevier: Waltham/MA, USA.
- Silva, L.P., 2015. Desenvolvimento de um Coletor Solar Cilíndrico Parabólico para Baixas e Médias Temperaturas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.