

## DESENVOLVIMENTO DE UM COLETOR HÍBRIDO TÉRMICO/FOTOVOLTAICO

Heston Silveira – hestonfisica@gmail.com

Arno Krenzinger – arno@mecanica.ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

### 2.2 – Equipamentos e sistemas de aquecimento de água

**Resumo.** *A conversão da irradiação solar em energia térmica para a produção de água quente é feita em coletores solares térmicos e a conversão em energia elétrica é feita em módulos fotovoltaicos. A partir desta situação surge a possibilidade de unir um módulo fotovoltaico a um coletor térmico, montando o que é conhecido por coletor híbrido Térmico/Fotovoltaico (PVT). Trabalhos realizados anteriormente antecipam valores de eficiência significativamente maiores que as eficiências dos sistemas separados. Neste tipo de sistema temos uma otimização da área de captação de radiação solar. Outra característica que se evidencia é o aumento relativo na eficiência da célula solar fotovoltaica em função do resfriamento a partir do líquido que é da ordem de 10% a 30%. O objetivo principal deste trabalho é apresentar resultados preliminares da montagem de um equipamento híbrido Térmico/Fotovoltaico e analisar o comportamento das temperaturas no elemento que compõem o coletor. Para a realização do trabalho foi utilizado um módulo fotovoltaico convencional, de 100  $W_p$  nominal, com cerca de 0,8 m<sup>2</sup> de área, sendo montado sobre uma chapa metálica com tubos de cobre separadas de 0,10 m um do outro. Foram realizados ensaios preliminares da variação da temperatura de entrada e saída, obtendo os primeiros valores do seu fator remoção de calor e o coeficiente de perdas global, bem como foi realizada uma análise da temperatura ao longo do comprimento da serpentina. Todos os ensaios foram realizados enquanto os tubos do coletor térmico eram percorridos por um líquido.*

**Palavras-chave:** *Energia Solar, Coletor Solar, Aquecimento de Água, Sistemas Solares.*

## 1. INTRODUÇÃO

Uma dos interesses das pesquisas na área da energia solar é a dimensão dos sistemas que envolvem a captação da radiação solar. Quando se instala em um local um sistema solar, seja ele térmico ou fotovoltaico, uma das preocupações é a área instalada. Nos centros urbanos, com o advento dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede, área dos telhados das residências passa a ser disputada pelos dois conversores (Zondag, et. al., 2002). Este trabalho propõe a montagem de um sistema híbrido térmico/fotovoltaico, unindo ambos os sistemas em um equipamento que estaria de uma certa forma solucionando este problema. Resultados comparativos realizados em trabalhos anteriores mostram que um sistema híbrido térmico/fotovoltaico pode substituir um coletor solar em aplicações domésticas de aquecimento e resfriamento (Sophian, et. al., 2000).

A eficiência da célula fotovoltaica é dependente da temperatura. A célula deve absorver bem a radiação solar, mas não consegue converter toda a energia em eletricidade. Como consequência, é comum encontrar células em módulos fotovoltaicos operando em temperaturas de 55 °C ou 60 °C em dias quentes e ensolarados. Se a temperatura das células for mantida em valores mais baixos sua eficiência será incrementada. Isto pode ser feito esfriando a célula solar durante a iluminação do módulo fotovoltaico e retirando do sistema o calor excedente. Desta situação surge então a possibilidade de unir um módulo fotovoltaico a um coletor térmico, montando o que se chama de sistema híbrido térmico/fotovoltaico, onde trabalhos realizados anteriormente antecipam valores de eficiência da ordem de 60% a 80% maiores que as eficiências dos sistemas separados (Bergene e Lovvik, 1995), (Helden, et. al., 2004).

No Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LES-UFRGS) está sendo montado um equipamento híbrido térmico/fotovoltaico com objetivo de analisar inicialmente o comportamento das temperaturas no elemento térmico que compõe o coletor. Foram realizados ensaios preliminares da temperatura de entrada e a temperatura de saída, bem como a verificação do comportamento da temperatura do líquido ao longo da serpentina, a partir de uma análise termográfica.

## **2. COLETOR SOLAR PLANO**

Um coletor solar é um dos meios de converter a energia da radiação solar em energia térmica. Ele pode ser projetado para aplicações que requerem entrega de energia para moderadas temperaturas de até 100°C em temperatura ambiente. Este equipamento utiliza a radiação solar global e não requer sistema de rastreamento solar, o que diminui o custo de manutenção. Suas maiores aplicações são esquentar água para uso doméstico e industrial e aquecer ar de ambientes construídos.

A radiação solar que chega ao coletor é absorvida em grande parte pela superfície absorvedora. Esta deve ser capaz de coletar efetivamente a radiação solar. Para esta finalidade a superfície deve ter um elevado coeficiente de absorção no espectro solar e em geral, se utilizam superfícies metálicas com alta condutividade térmica recobertas com tinta preta fosca. A eficiência de um coletor solar plano para aquecimento de água depende de vários parâmetros provenientes de sua fabricação, como por exemplo, a sua geometria e seus materiais. Podem-se utilizar diversas combinações e configurações, de acordo com a sua aplicabilidade. Normalmente um coletor convencional é formado por uma caixa retangular de pouca profundidade, com uma superfície transparente à radiação solar que tem a função de cobrir uma chapa metálica absorvedora, sobre o qual é soldada uma grade de tubos, ou aletas, por onde escoar a água.

Na situação investigada foram utilizadas as células de um módulo fotovoltaico como chapa coletora de radiação. Isto é possível, pois a célula solar fotovoltaica absorve bem a radiação solar. O tubo por onde o fluido trocador passa está conectado na parte posterior do módulo fotovoltaico soldado a uma chapa de cobre, que inicialmente não foi coberto por um fundo isolante. Para se avaliar a eficiência de um coletor solar deve-se conhecer a energia solar efetivamente absorvida pela superfície preta, neste caso o módulo fotovoltaico.

Para se determinar a eficiência do trocador colocado na parte posterior do módulo fotovoltaico é necessário determinar um parâmetro muito importante que é chamado de fator de remoção de calor,  $F_R$ , e significa definir uma quantidade que demonstra o ganho de energia utilizado pelo coletor, quando o fluido percorre a superfície da chapa. Para a montagem do coletor híbrido térmico/fotovoltaico, foi utilizado um módulo da empresa espanhola Isofotón que utiliza 72 células fotovoltaicas de silício monocristalino, texturizada com capa antirreflexiva, protegidas com E.V.A., vidro temperado e Tedlar, com área de aproximadamente 0,8 m<sup>2</sup> e de 100 W<sub>p</sub>, mostrado na Fig. 1.

O trocador acoplado na parte posterior do módulo foi montado a partir de uma chapa e uma tubulação de cobre. A chapa possui uma área quase igual à área do módulo. A tubulação possui um diâmetro de 0,0125 m e foi montada no formato de uma serpentina. A Fig. 2(a) mostra a configuração utilizada para a serpentina. A Fig. 2(b) mostra o trocador montado a partir da configuração. Normalmente em um coletor solar se utiliza a tubulação por onde passa o líquido no formato de uma grade, que proporciona uma menor perda de carga, porque a vazão é distribuída entre seus tubos, sendo ideal para operação em termossifão.

Para este trabalho, a construção foi realizada utilizando um único tubo de cobre flexível, dobrado em forma de serpentina e soldado sobre uma chapa de cobre. Esta montagem é mais simples (tratando-se de fabricação artesanal), garante estanqueidade pela ausência de soldas para conectar os tubos e facilita a solução da distribuição dos tubos na região da caixa de conectores. Apesar de apresentar maior perda de carga, os coletores fabricados com serpentina também podem operar com o princípio de termossifão. Mesmo assim, neste trabalho, considera-se que o coletor pode funcionar com uma bomba de circulação de baixa potência.



Figura 1 – Módulo fotovoltaico de 72 células fotovoltaicas de silício monocristalino.

A distância que separa as aletas da serpentina é de 10 cm, conforme Fig. 2(a). Esta distância foi escolhida em função das células fotovoltaicas do módulo serem pseudo-quadradas (quadrados cortados a partir de lâminas circulares de diâmetro igual a 13,5 cm) e possuírem dimensão lateral aproximadamente 10 cm. O coletor foi acoplado de modo que a serpentina fique defasada de 5 cm em relação a borda inferior do módulo, desta forma foi possível passar o tubo exatamente sobre cada conjunto de células.

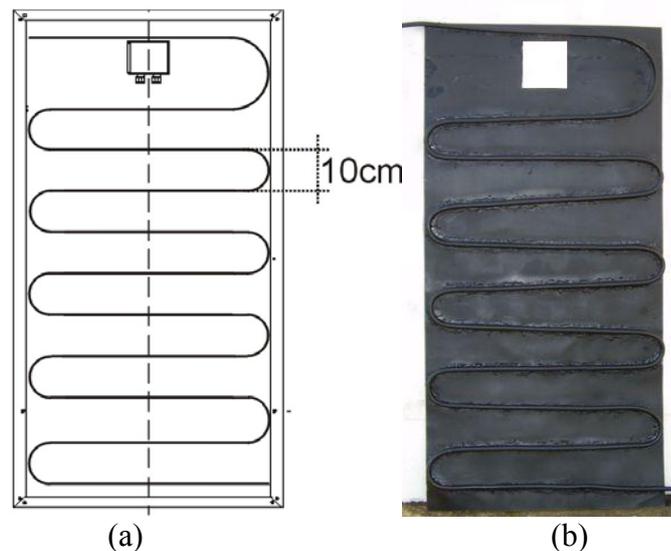


Figura 2- (a) Esquema de montagem do trocador de calor por onde passa o fluido, que foi acoplado na parte posterior do módulo fotovoltaico. (b) Trocador de calor construído.

### 3. ANÁLISE DOS FATORES QUE ENVOLVEM O COLETOR

A eficiência térmica do coletor solar plano é definida como sendo a razão entre a energia útil ganha pelo coletor e a radiação que chega no seu plano, isto é:

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c G_T} = \frac{\dot{m} C_p (T_s - T_e)}{A_c G_T} \quad (1)$$

onde,  $\eta$  é a eficiência,  $Q_u$  é a energia transferida ao fluido de trabalho,  $G_T$  é a radiação solar incidente no plano do coletor,  $A_c$  é a área do coletor,  $\dot{m}$  é a vazão da água por unidade de área de coletor,  $C_p$  é o calor específico da água,  $T_s$  é a temperatura de saída da água e  $T_e$  é a temperatura de entrada da água. O procedimento básico para determinar a eficiência térmica instantânea consiste em fazer circular a água no coletor e medir a energia térmica retirada, bem como a radiação solar incidente. A quantidade de calor útil retirada é determinada multiplicando a vazão medida pelo calor específico da água e pela diferença de temperatura entre a saída e a entrada do coletor,  $(T_s - T_e)$ . Esses valores são obtidos medindo-se a temperatura nas seções de entrada e de saída do coletor. A radiação solar é medida diretamente com um piranômetro. A vazão é determinada pelo tempo necessário para que o escoamento de água preencha um recipiente de volume calibrado em 1 litro.

Na Fig. 3 é possível ver um perfil do coletor solar híbrido proposto, a partir do qual se tem a possibilidade de analisar o circuito térmico do mesmo, apresentado na Fig. 4.

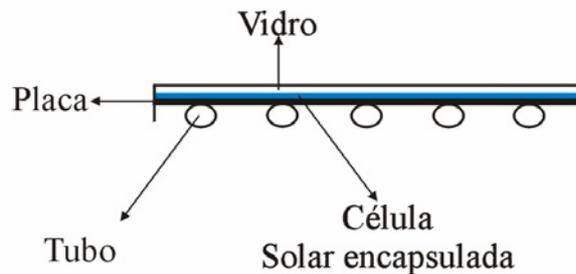


Figura 3 - Corte transversal do coletor híbrido térmico/fotovoltaico.

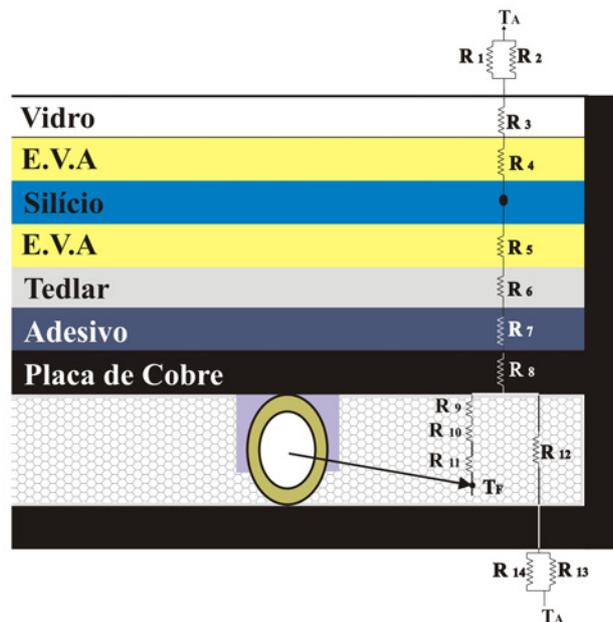


Figura 4 - Circuito equivalente para o coletor solar híbrido térmico/fotovoltaico.

Na Fig. 4  $T_A$  é a temperatura ambiente;  $T_F$  é a temperatura do fluido;  $R_1$  é a resistência térmica por convecção entre o ambiente e o vidro;  $R_2$  é a resistência térmica por radiação entre o ambiente e o vidro;  $R_3$  é a resistência térmica do vidro;  $R_4$  é a resistência térmica do E.V.A.;  $R_5$  é a resistência térmica da segunda camada de E.V.A.;  $R_6$  é a resistência térmica do Tedlar;  $R_7$  é a resistência térmica do adesivo;  $R_8$  é a resistência térmica da chapa de cobre;  $R_9$  é a resistência térmica da solda;  $R_{10}$  é a resistência térmica do tubo de cobre;  $R_{11}$  é a resistência térmica entre o tubo de cobre e o líquido;  $R_{12}$  é a resistência térmica por condução entre a chapa de cobre e o fundo;  $R_{13}$  é a resistência térmica por convecção entre o fundo e o ambiente;  $R_{14}$  é a resistência térmica por radiação entre o fundo e o ambiente.

#### **4. DETERMINAÇÃO DE ALGUNS PARÂMETROS QUE ENVOLVEM O COMPORTAMENTO TÉRMICO DO COLETOR**

Os resultados experimentais apresentados neste trabalho ajudaram a determinar alguns parâmetros térmicos importantes. Tratando-se apenas de ensaios preliminares, as medidas foram realizadas aquecendo o módulo fotovoltaico com uma fonte de tensão controlada (corrente direta nos diodos das células) e medindo o efeito térmico transferido à água. Os instrumentos de medida de temperatura e corrente, foram conectados a uma unidade de aquisição de dados HP 34970A, equipado com um multímetro interno que permite leituras de até 6 e 1/2 dígitos, controlados remotamente por um microcomputador via porta serial RS232, Fig. 5. A unidade tem capacidade para três multiplexadores com vinte canais cada.



Figura 5- Sistema de aquisição de dados utilizado para obtenção das medidas.

Para obtenção dos dados deste trabalho foram utilizados cinco canais de aquisição. As medidas de temperatura foram realizadas utilizando sensores do tipo PT100 que tem um resistor com uma resistência de platina de 100  $\Omega$  a 0 °C e varia a sua resistência linearmente com o aumento da temperatura. Os sensores foram distribuídos da seguinte forma, um foi conectado na entrada de água, outro na saída e o terceiro foi colocado no ambiente para medir a temperatura do local. Os demais canais foram utilizados para a corrente elétrica e a vazão do fluido.

Foi estimada a constante de tempo (T) do coletor, desligando a fonte de tensão depois de estabilizar em uma temperatura de saída 5,2 °C acima da temperatura de entrada. Esta constante de tempo é definida como sendo o intervalo de tempo necessário para que a temperatura do líquido de trabalho na seção de saída do coletor solar atinja 63,2% da temperatura do seu regime quase permanente após uma variação tipo degrau ocorrido no fluxo de radiação solar total, representado pelo funcionamento da fonte de tensão conectada no módulo fotovoltaico.

A partir destes resultados pode-se realizar o procedimento experimental da aquisição dos dados, necessários para a determinação dos parâmetros essenciais em relação ao comportamento térmico do coletor. O comportamento da temperatura no método utilizado para a determinação da constante de tempo pode ser visto na Fig. 6.

O valor encontrado para a constante de tempo foi de aproximadamente 570 s, significando que as medidas em regime quase permanente devem ser superior a este tempo. O método utilizado inicialmente para testar o seu comportamento térmico foi de colocar o coletor em situações controladas de vento e temperatura, portanto para isto os ensaios foram feitos em ambiente fechado, de forma a não sofrer trocas de calor por convecção em escala significativa e a temperatura do ambiente não experimentar grandes variações.

Nos terminais de contato do módulo conectou-se uma fonte de tensão (Fig. 7) com o objetivo de fazer passar corrente pelas células fotovoltaicas, desta forma pode-se aquecer o equipamento de forma semelhante ao que acontece quando exposto ao sol.

Antes de ligar a fonte de tensão, deixou-se o líquido circular pela serpentina de forma a eliminar toda e qualquer possibilidade de bolhas de ar e ao mesmo tempo atingir uma vazão constante do mesmo.

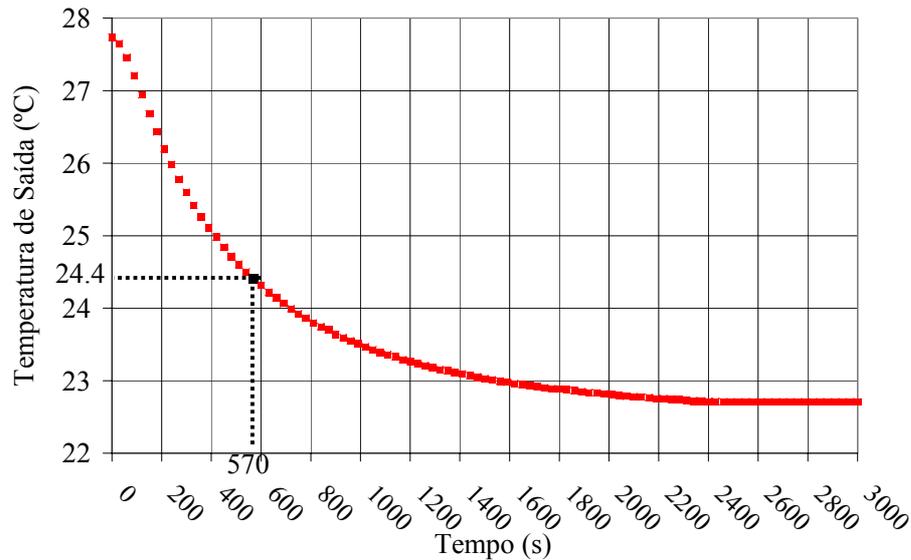


Figura 6 – Decaimento da diferença de temperatura entre a saída e entrada do coletor, após a fonte de tensão ser desligada.

A vazão é garantida pelo escoamento da água de um reservatório com nível constante e regulada pela abertura de um registro de gaveta. Como mencionada antes, a medida da vazão foi realizada medindo o tempo de preenchimento de um vasilhame. Foram feitas várias medidas de vazão durante cada ensaio, comprovando-se que a mesma permaneceu constante. O ensaio foi repetido para diferentes vazões.



Figura 7 – Aspectos da bancada de ensaios.

Sabendo a temperatura de entrada, a temperatura de saída, juntamente com a temperatura do ambiente e a potência que é fornecida ao coletor, pode-se então determinar a partir de potências diferentes o fator de remoção de calor,  $F_R$ , e o coeficiente global de perdas,  $U_L$ . Tais parâmetros ajudam a realizar uma análise do comportamento térmico de um coletor.

Na definição do coeficiente global de perdas,  $U_L$ , estão englobadas todas as perdas térmicas do coletor. Embora se saiba que os valores de  $U_L$  são diminuídos quando se coloca uma cobertura no coletor, no caso estudado consideram-se somente as perdas através do módulo fotovoltaico, ou seja um sistema sem cobertura, desconsiderando as perdas existentes pelas laterais e posterior do módulo.

O balanço energético do sistema em regime estacionário resulta na seguinte relação:

$$P_E = U_L A(T_{MF} - T_A) + A \dot{m} c_p (T_S - T_E) \quad (2)$$

onde  $P_E$  é a potência elétrica fornecida pela fonte de tensão,  $U_L$  é coeficiente global de perdas,  $T_{MF}$  é a temperatura média do módulo fotovoltaico,  $T_A$  é a temperatura ambiente,  $A_C$  é a área do coletor,  $\dot{m}$  é a vazão do líquido por unidade de área do coletor,  $C_p$  é calor específico do fluido à pressão constante,  $T_E$  é a temperatura do líquido na entrada do coletor,  $T_S$  é a temperatura do líquido na saída do coletor. Isolando o  $U_L$  na Eq. 2, obtém-se:

$$U_L = \frac{P_E - A_C \dot{m} c_p (T_S - T_E)}{A_C (T_{MF} - T_A)} \quad (3)$$

Para determinar o valor de  $U_L$  foi escolhido o ensaio onde a diferença entre a temperatura média da chapa de cobre e o ambiente foi menor, desta forma minimizando as perdas de calor através do fundo do coletor, isolado com poliestireno expandido. A temperatura média da chapa de cobre foi estimada pela média aritmética entre as temperaturas de entrada e saída do fluido. O valor do coeficiente global de perdas encontrado foi de 14,3 W/m<sup>2</sup>°C. Valores determinados para outros ensaios não são muito diferentes deste.

Na Fig. 8 pode-se verificar que a variação de temperatura depende da vazão de água que passa pelo coletor. Os maiores valores de variação de temperatura podem ser vistos quando no coletor circula uma menor quantidade de água por segundo.

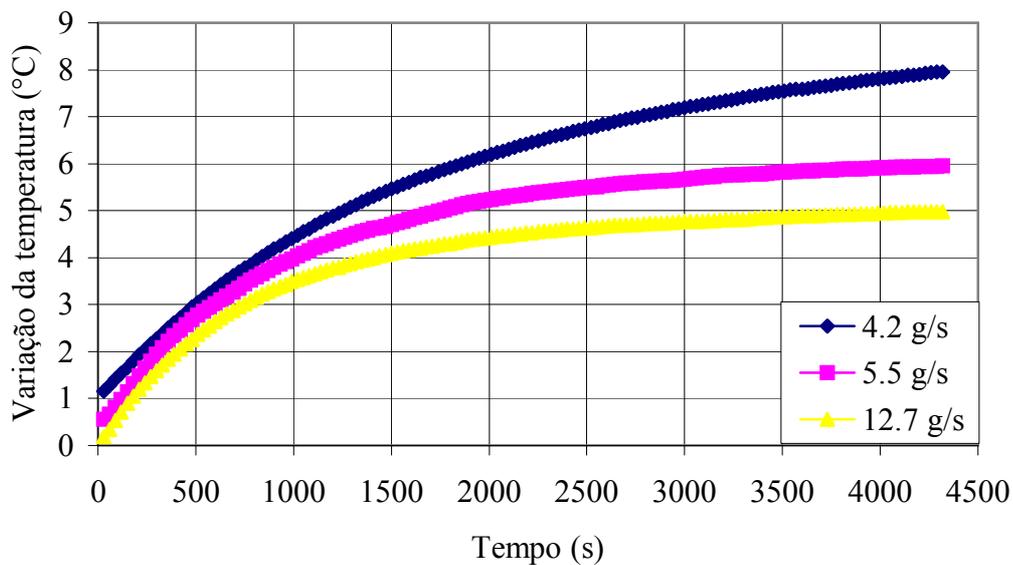


Figura 8 – Comportamento da diferença da temperatura obtida na serpentina do coletor.

O fator de remoção de calor representa a capacidade do coletor em transferir calor da chapa para a água. Este fator está ligado à vazão de líquido, onde quanto maior este parâmetro, maior será o valor do fator de remoção, o que pode ser comprovado na Fig. 9. A partir da definição do fator de remoção de calor, que é a relação entre a energia útil retirada e a energia útil que seria retirada se a chapa estivesse toda na temperatura de entrada, obtém-se:

$$F_R = \frac{A \dot{m} c_p (T_S - T_E)}{P_E - U_L A (T_E - T_A)} \quad (4)$$

A Fig. 9 mostra o comportamento do  $F_R$  experimental em função da vazão. Infelizmente um comportamento mais preciso somente poderá ser apresentado futuramente com mais ensaios (diferentes vazões) realizados.

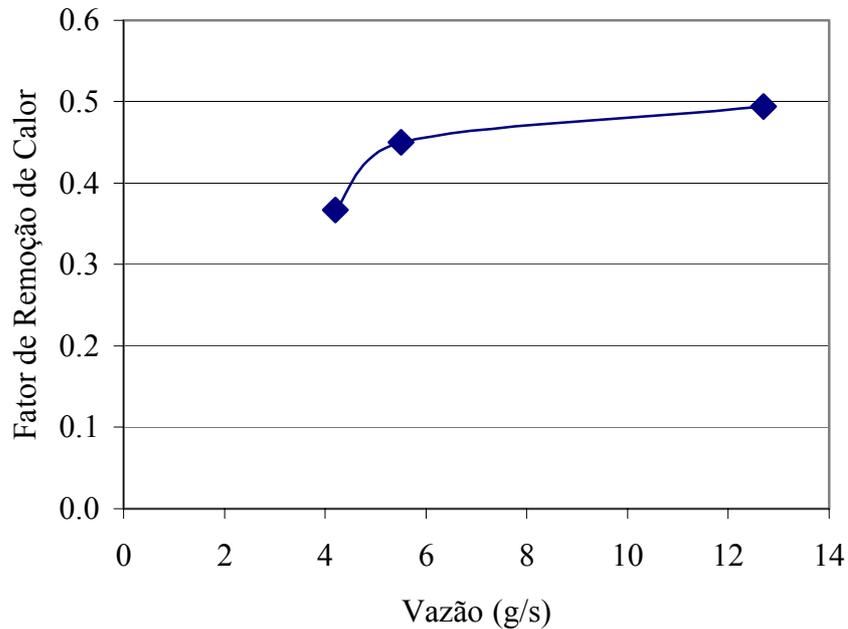


Figura 9 – Comportamento do fator de remoção em relação à vazão do líquido.

A análise feita no coletor não levou em consideração o comportamento da temperatura do líquido no comprimento da serpentina. De forma a contribuir para análise dos parâmetros térmicos do trocador, utilizou-se uma câmera termográfica que determina a temperatura dos elementos pela emissão no infravermelho. A partir das termografias obtidas por esta câmera pode-se verificar que o comportamento da temperatura deste trocador corresponde às relações apresentadas por Duffie e Beckman (1991). A Fig. 10 apresenta a termografia, onde cada cor representa uma temperatura ao longo da serpentina do trocador.

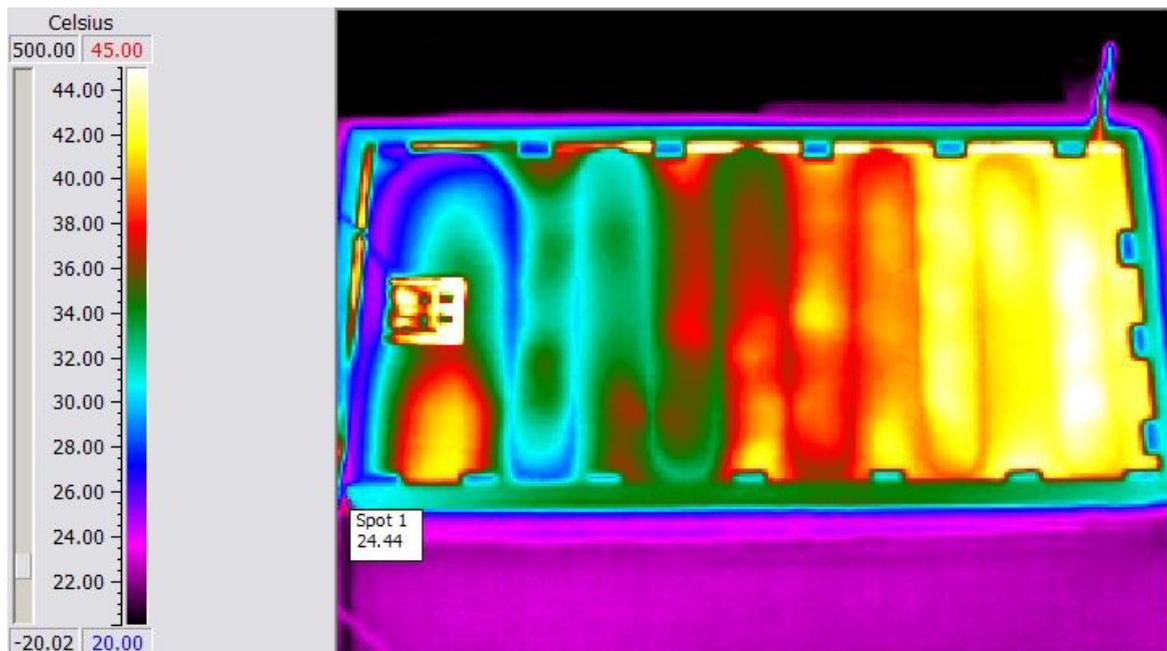


Figura 10 – Imagem termográfica do coletor.

A imagem termográfica do coletor foi obtida em situação de regime permanente com potência de aproximadamente 500 W e vazão de 2 g/s. A partir da termografia foram extraídos dados de temperatura ao longo do tubo, os quais são apresentados na Fig. 11.

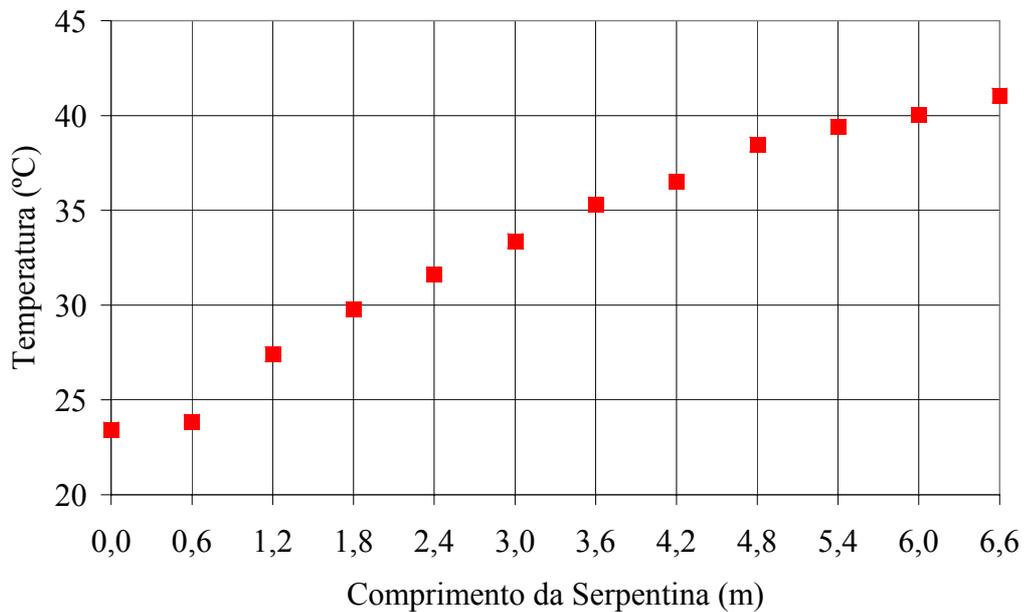


Figura 11 – Comportamento da temperatura ao longo da serpentina para uma condição de ensaio específica.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho mostrou parte da análise térmica do coletor híbrido em estudo, tendo em vista que o mesmo foi montado recentemente. Demonstrou-se que o fator de remoção de calor e do coeficiente de perdas variam com a vazão do líquido pela serpentina. Os resultados apresentados neste trabalho irão futuramente ser utilizados para uma avaliação do seu desempenho, como por exemplo, a sua eficiência térmica e o seu comportamento elétrico. Observou-se também que deve ser melhorado o contato térmico entre a chapa de cobre o Tedlar, pois em função das análises termográficas foi possível notar que existem algumas regiões onde a distribuição de temperaturas não é adequada.

### *Agradecimentos*

Os autores agradecem ao suporte financeiro concedido por CNPq para a realização do presente trabalho.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Duffie, J. A. and Beckman, W. A., 1991, Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons.
- Bergene, T., Lovvik, O. M., 1995, Model Calculations on a Flat-Plate Solar Heat Collector with Integrated Solar Cells, Solar Energy, vol. 55, N° 6, pp. 453-462.
- Sopian, K., Liu, H.T., Kakac, S., Veziroglu, T.N., 2000, Performance of a Double Pass Photovoltaic Thermal Solar Collector Suitable for Solar Drying Systems, Energy Conversion & Management, N° 41, pp. 353-365.

- Van Helden, W. G. J., Van Zolingen, R. J. C., Zondag, H. A., 2004, PV Thermal Systems: PV Panels Supplying Renewable Electricity and Heat, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, N° 12, pp. 415-426.
- Zondag, H. A., Vries, D. W. D., Van Helden, W. G. J., Van Zolingen, R. J. C., Van Steenhoven, A. A., 2002, The Thermal and Electrical Yield of a PV-Thermal Collector, Solar Energy, vol. 72, N° 2, pp. 113-128.

### ***DEVELOPMENT OF THERMAL/PHOTOVOLTAIC HYBRID COLLECTOR***

***Abstract.*** Solar irradiation conversion is usually performed by thermal solar collectors to produce hot water and by photovoltaic modules to obtain electric energy. Then is useful assemble both thermal solar collectors and photovoltaic modules into a single thermal-photovoltaic hybrid collector. Previous works anticipate efficiency values much higher than separated systems. In this kind of system we have an optimization of the solar irradiation collection area. Another evident feature of this system is the relative increase of the efficiency of the photovoltaic conversion due to the cell chilling, which is about 10% to 30%. The main goal of this work is present the construction of a hybrid equipment (thermal and photovoltaic) and measure the temperatures in the collector. To achieve this, it was used a conventional photovoltaic module of 100  $W_P$  nominal, with 0.8 m<sup>2</sup> area. This hybrid collector was build on a metallic plate with copper serpentine tube arrangement. We performed preliminary measurements of the inlet and outlet temperatures, obtaining values for heat removal factor and overall loss coefficient, as well the temperature values along the length of the serpentine.

***Key words:*** Solar Energy, Solar Collectors, Water Heating Systems, Solar Systems