ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 20, pp 04.81-04.92, 2016. Impreso en la Argentina
ISSN 2314-1433 - Trabajo selecionado de Actas ASADES2016

COMPARAÇÃO ENTRE O DESEMPENHO DE UM COLETOR HÍBRIDO TÉRMICO FOTOVOLTAICO COM UM COLETOR PLANO E UM MÓDULO FOTOVOLTAICO CONVENCIONAL

C. Ancines[1], A. Krenzinger[2], L. D. M. Soares[3]
Laboratório de Energia Solar – Escola de Engenharia da Universidade do Rio Grande do (LABSOL-UFRGS) C.P. 15049 – Porto Alegre – RS - Brasil
Tel. +55 51-33086841 e-mail: ancines@mecanica.ufrgs.br

Recibido 10/08/16, aceptado 09/10/16

RESUMO: Coletores híbrido térmico fotovoltaicos (PV/T) convertem a energia solar em energia térmica e elétrica, simultaneamente, com a superposição de um módulo fotovoltaico a um coletor solar de placa plana. Geralmente, coletores PV/T têm seu rendimento térmico menor que um coletor convencional decorrente da perda de calor e, sua eficiência elétrica maior quando comparada a um sistema fotovoltaico. Atribuindo as mesmas condições meteorológicas em um módulo fotovoltaico, um coletor PV/T e um coletor solar de placa plana, os resultados obtidos de suas eficiências foram comparados, separadamente. Esses resultados mostraram que, para a eficiência térmica, o coletor PV/T teve seu valor 34% menor que o do coletor de placa plana e sua eficiência elétrica 5,5% maior. Concluindo que melhorias na parte térmica do coletor PV/T poderiam ser feitas, de forma a aumentar seu desempenho térmico sem comprometer a eficiência elétrica das suas células fotovoltaicas.

Palavras chaves: energia solar; coletor híbrido térmico fotovoltaico; eficiência térmica; eficiência elétrica.

INTRODUÇÃO

O sistema de operação de um coletor solar híbrido térmico fotovoltaico, PV/T (*Photovoltaic Thermal Hybrid Solar Collector*) consiste na conversão simultânea de radiação solar em eletricidade e calor. A tecnologia desses coletores se baseia em um sistema térmico vinculado a um módulo fotovoltaico, composto também por uma placa absorvente com os tubos, uma cobertura de vidro e um isolamento, como demonstrado na Figura 1.

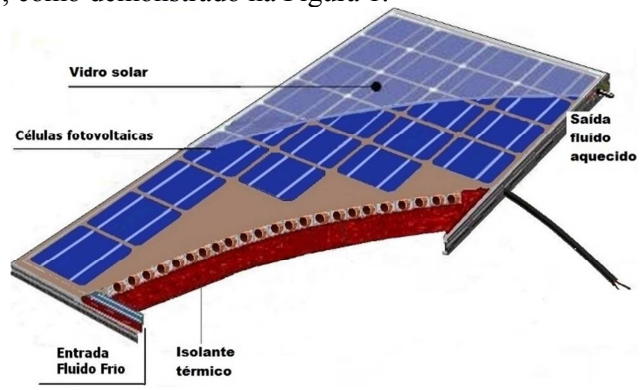


Figura 1: Desenho esquemático de um módulo híbrido térmico fotovoltaico. Adaptado de (http://panelsolarhibrido.es/, 2016).

[1] Aluna doutoranda LABSOL
[2] Professor orientador LABSOL
[3] Aluno iniciação científica LABSOL

Este tipo de coletor gera uma maior quantidade de energia elétrica e térmica por m² do que uma instalação separada (térmico e fotovoltaico). Sua instalação é particularmente útil em situações em que a área de telhado é reduzida e, do ponto de vista estético, o coletor híbrido proporciona uma solução mais harmoniosa, em contraste com a combinação de um coletor térmico e um módulo fotovoltaico. Estudos sobre coletores PV/T abrangeram modelos analíticos e numéricos, simulação e trabalho experimental, e avaliação qualitativa da produção térmica e elétrica às aplicações de coletores solares híbridos térmico fotovoltaicos. Esse tipo de coletor pode ser de placa plana ou concentrador e classificado de acordo com o tipo de fluido de trabalho utilizado, água ou ar. (Zondag et al, 2008).

A variação da incidência de radiação solar e da temperatura ambiente acarreta na variação da temperatura das células que constituem os módulos fotovoltaicos. Essa variação da temperatura de operação desempenha um papel significativo no processo de conversão fotovoltaica. Tanto a eficiência elétrica quanto a potência de saída de um módulo fotovoltaico dependem linearmente da temperatura de funcionamento. Um módulo fotovoltaico comercial pode converter de 6 a 20% da radiação solar incidente em energia elétrica. Parte da radiação é refletida, mas o resto da radiação solar que é absorvida é convertida em calor, o que aumenta significativamente a temperatura do módulo fotovoltaico e reduz sua eficiência elétrica. Este calor pode ser extraído por água corrente ou ar situando na parte posterior do módulo usando coletores térmicos. (Dubey *et al*., 2013).

Apesar dos valores satisfatórios para a eficiência elétrica desses coletores híbridos térmico fotovoltaicos, o rendimento térmico é relativamente menor comparado a um coletor térmico convencional. Segundo Sandnes e *et al.* (2002), essa menor eficiência térmica pode ser atribuída a energia solar disponível para o sistema térmico reduzida pela fração de energia incidente convertida em eletricidade pelas células fotovoltaicas; a absortância das células fotovoltaicas ser inferior comparado à absortância da superfície absorvedora de uma placa plana convencional; o aumento da resistência à transferência de calor introduzido na interface das células fotovoltaicas.

Com isso, o principal objetivo do trabalho é avaliar resultados referentes ao experimento que avalia o desempenho de um coletor híbrido térmico fotovoltaico em comparação com outros dois equipamentos distintos, um módulo fotovoltaico convencional e um coletor solar de aquecimento de água. Esta comparação será feita simultaneamente e em condições controladas para demonstrar com segurança as vantagens e desvantagens de cada equipamento. Assim, para atingir estes objetivos, montou-se uma bancada comparativa com três tecnologias distintas que utiliza energia solar - um coletor solar de placa plana convencional, um módulo fotovoltaico convencional e um módulo fotovoltaico híbrido; montou-se um sistema de aquisição de dados para medir as grandezas importantes em cada equipamento; realizou-se ensaios dessas tecnologias simultaneamente em diferentes condições para avaliar o desempenho dos equipamentos.

MÉTODOS DE ENSAIOS DE COLETORES E MÓDULOS

Eficiência para Coletores Solares de Placa Plana

O desempenho de coletores solares de placa plana, no estado estacionário, é descrito por um equilíbrio de energia que indica a conversão de energia solar incidente em um ganho de energia térmica útil, as perdas térmicas, e as perdas ópticas, indicado na Equação 1.

$$Q_u = A_C[S - U_L(T_{pm} - T_a)] \quad (1)$$

na qual Q_u é a energia útil, J/s, A_C é a área do coletor, m², S é irradiância solar total no plano do coletor, W/m², U_L é o coeficiente global de transferência de calor do coletor, W/m²°C, T_{pm} é a temperatura média do absorvedor, °C e T_a é a temperatura ambiente, °C.

O problema com esta equação é que a temperatura média da placa absorvedora é difícil de medir ou calcular, pois é função do projeto do coletor, da radiação solar incidente, e das condições de entrada. Portanto, um fator é denominado como fator de remoção de calor (F_R) e é definido matematicamente como a razão entre a energia útil real extraída pelo coletor e a energia útil que poderia ser retirada se toda superfície absorvedora estivesse à temperatura de entrada do fluido, representado na Equação 2.

$$F_R = \frac{\dot{m}C_P(T_S - T_e)}{A_C[S(\tau\alpha_a)_e - U_L(T_e - T_a)]} \quad (2)$$

na qual $\dot{m}$ é a taxa mássica do fluido, kg/s, C_p é o calor específico, J/kgK, T_S é a temperatura do fluido na seção de saída do coletor, °C e T_e é a temperatura na seção de entrada, °C.

Como há uma variação na temperatura da água que flui nos coletores, o calor específico da água (C_P) em função dessa temperatura é dado a partir da relação descrita na Equação 3, conforme a norma brasileira ABNT NBR 15747-2, válida para pressões de 100 kPa e temperaturas entre 0 °C e 99,5 °C, onde esta é uma média entre as temperaturas de entrada e saída do coletor solar.

$$C_P(T) = Y_0 + Y_1T + Y_2T^2 + Y_3T^3 + Y_4T^4 + Y_5T^5 \quad (3)$$

no qual Y_0 = 4,217; Y_1= -3,358 x 10^{-3}; Y_2 = 1,089 x 10^{-4}; Y_3 = -1,675 x 10^{-6}; Y_4 = 1,309 x 10^{-8} e Y_5 = -3,884 x 10^{-11}, em kJ/kg °C e T é a temperatura a cada ponto medido, em °C.

O fator de remoção de F_R é a quantidade equivalente à eficácia de um trocador de calor convencional, que é definido como a razão entre a transferência de calor efetiva e a transferência de calor máxima possível. O fator de remoção de calor multiplicado pelo ganho de energia na condição descrita é igual ao ganho útil de energia. Desta forma, para uma radiação solar com incidência normal ao plano do coletor, a energia absorvida por este é dada pela Equação 4.

$$Q_u = A_C F_R[S - U_L(T_e - T_a)] \quad (4)$$

A radiação solar absorvida pelo coletor (S) é definida como o produto da irradiância solar total no plano do coletor e o produto da transmitância-absortância efetiva, definida pela Equação 5.

$$S = G_T(\tau\alpha_a)_e \quad (5)$$

na qual G_T é a irradiância solar total no plano do coletor em W/m², τ é a transmitância da cobertura, α_a é a absortância do absorvedor. O produto eficaz transmitância-absortância pode ser aproximado para coletores com vidro comum por $(\tau\alpha)_e \cong 1{,}02(\tau\alpha_a)$.

Portanto, conhecendo a definição da eficiência térmica do coletor como a razão entre a energia utilizada pela energia disponível, ou seja, dividindo a energia útil dada pela Equação 4 pela energia solar incidente no plano do coletor, tem-se na Equação 6 a eficiência térmica em função da temperatura de entrada.

$$\eta_e = \frac{Q_u}{G_T A_C} = \frac{\dot{m}C_P\Delta T}{G_T A_C} = F_R(\tau\alpha)_e - F_R U_L \frac{(T_e - T_a)}{G_T} \quad (6)$$

na qual η_e é a eficiência térmica do coletor solar em função da temperatura de entrada do coletor.

Analogamente, a Equação 5 pode ser descrita considerando a temperatura do absorvedor igual a média aritmética entre as temperaturas nas seções de entrada e saída do fluido no coletor, mostrado na Equação 7.

$$\eta_m = F'(\tau\alpha)_e - F'U_L \frac{(T_m - T_a)}{G_T} \quad (7)$$

na qual η_m é a eficiência térmica do coletor solar em função de T_m, F' é o fator de eficiência, T_m é a média aritmética das temperaturas do fluido nas seções de entrada e saída do coletor, sendo $T_m = (T_e + T_s)/2$.

Se os valores de eficiência térmica η_m e η_e forem representados graficamente em um plano cartesiano versus $\left(\frac{(T_m - T_a)}{G_T}\right)$ e $\left(\frac{(T_e - T_a)}{G_T}\right)$, respectivamente, resultará, para cada taxa mássica, em uma reta onde o coeficiente linear é dado por $F'(\tau\alpha)_e$ e $F_R(\tau\alpha)_e$ de acordo com a temperatura utilizada de referência, onde os coeficientes angulares serão, analogamente, $F'U_L$ e $F_R U_L$ (Manea, 2012). Para obter os valores das constantes utilizadas para determinar a eficiência térmica em regime permanente para ensaio externo de cada um dos coletores utilizados foi empregada a norma brasileira NBR 15747-2 [ABNT, 2009].

Eficiência de módulos fotovoltaicos

A norma internacional IEC 60904-3 (2008) determina como medir a eficiência elétrica do módulo fotovoltaico nas condições padrão de testes, com valores de irradiância e temperatura das células igual a 1.000 W/m² e 25 °C, respectivamente. Com essas condições encontra-se a curva característica *I-V*. Com os resultados obtidos desta curva é possível obter os principais parâmetros que determinam a qualidade e a eficiência dos módulos fotovoltaicos. A curva característica de um módulo fotovoltaico assemelha-se à que está apresentada na Figura 2.

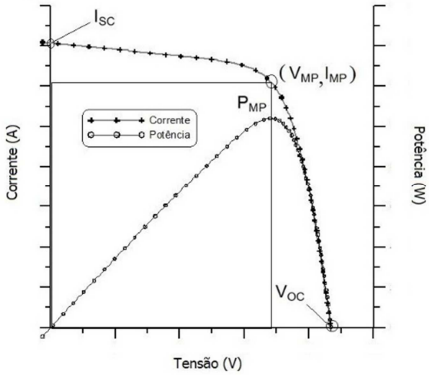


Figura 2: Modelo de curva I-V e de curva de potência P-V. Adaptado de Manual de Engenharia Fotovoltaica (2014).

Os parâmetros elétricos obtidos pela curva característica são:

- Tensão de circuito aberto (V_{OC}): é a máxima tensão que o módulo fotovoltaico pode produzir, sendo a tensão medida entre os terminais da célula sem circulação de corrente elétrica.
- Corrente de curto-circuito (I_{SC}): é a máxima corrente obtida e é medida no módulo fotovoltaico quando a tensão elétrica em seus terminais é igual à zero. Essa corrente depende da área da célula, da irradiância solar e de sua distribuição espectral, das propriedades ópticas e da probabilidade de coleta dos pares elétrons-lacuna formados;
- Fator de Forma *(FF*): é a razão entre a máxima potência do módulo e o produto da corrente de curto-circuito pela tensão de circuito aberto, definido pela Equação 8 e é representada na Figura 3.

$$FF = \frac{V_{MP} I_{MP}}{V_{OC} I_{SC}} \tag{8}$$

no qual V_{MP} e I_{MP} é a tensão e a corrente na máxima potência, respectivamente.

Com esses parâmetros definidos pela curva característica pode-se encontrar a eficiência elétrica, ou seja, o quão efetivo é o processo de conversão de energia solar em energia elétrica (η_{el}). Essa eficiência é definida pela Equação 9.

$$\eta_{el} = \frac{I_{SC} V_{OC} FF}{A.G_T} x100\% = \frac{P_{MP}}{A.G_T} x100\% \tag{9}$$

na qual A é a área do módulo, m², P_{MP} é a potência máxima, W, e G_T é a irradiância solar incidente, W/m².

Temperatura nominal de operação de um módulo fotovoltaico

A temperatura nominal de cada módulo fotovoltaico é obtida quando o mesmo é exposto, em circuito aberto, a uma irradiância de 800 W/m², temperatura ambiente de 20 °C e uma velocidade do vento incidindo sobre ele de 1 m/s. Essa temperatura é conhecida geralmente pela sigla NOCT (*Nominal Operating Cell Temperature*). A NOCT tem normalmente valores que variam de 40 a 50°C e está relacionada às propriedades ópticas e térmicas dos materiais que compõem os módulos. Quanto menor o valor do NOCT, considerando os coeficientes de temperatura iguais, melhor a eficiência elétrica do módulo fotovoltaico, pois as perdas referentes a diferença de temperatura serão menores. O valor da temperatura nominal normalmente é indicado pelo fabricante e, com seu valor conhecido, pode-se encontrar o valor do coeficiente K_t pela Equação 10.

$$K_t = \frac{NOCT - 20}{800} \tag{10}$$

no qual K_t é o coeficiente térmico para o módulo, em °C/Wm^{-2}, que representa o aumento de temperatura causado pela incidência da radiação solar.

Desta forma é possível estimar a temperatura das células de um módulo fotovoltaico em uma determinada condição de temperatura ambiente e irradiância usando a Equação 11.

$$T_{mod} = T_a + K_t G_T \tag{11}$$

na qual T_{mod} é a temperatura das células do módulo fotovoltaico, °C, T_a é a temperatura ambiente, °C, G_T é a irradiância incidente sobre o módulo, W/m².

METODOLOGIA

Os coletores e módulos foram situados acima de uma bancada desenvolvida por Manea (2012) e Rosa (2012), podendo assim, realizar comparações precisas sobre o comportamento sob as mesmas condições meteorológicas, com ângulo de inclinação de 45°, e possibilitando que os testes sejam realizados para vários horários ao longo do dia. como mostrado na Figura 3.

Figura 3: Imagem da montagem da bancada experimental.

Componentes parte térmica

O coletor PV/T e o coletor de placa plana estão instalados em série garantindo a mesma vazão e economia de um medidor de vazão e o circuito é fechado. A água que sai do tanque (6) entra no coletor PV/T, logo que sai deste, a água passa por um trocador de calor (10) e, após, entra no coletor de placa plana e volta para o tanque. O sistema de aquecimento é ativo, onde há circulação forçada entre o reservatório e o coletor através de uma bomba hidráulica (7). Os componentes utilizados estão esquematicamente ilustrados na Figura 4.

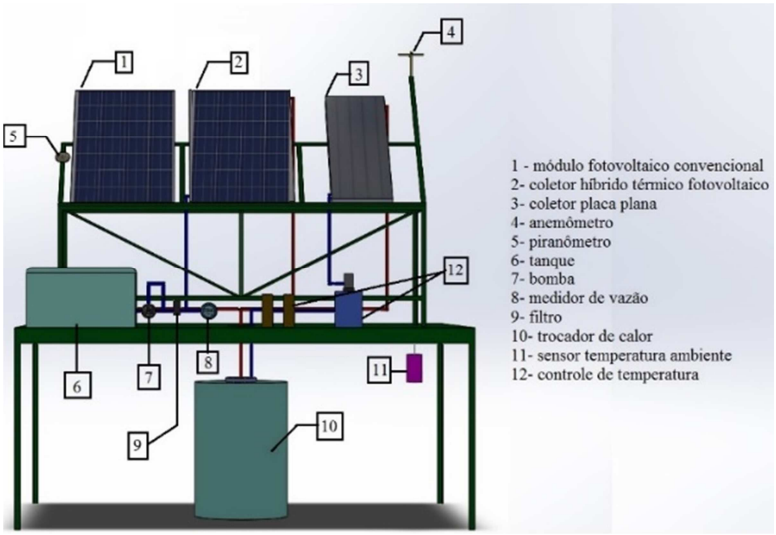


Figura 4: Ilustração do sistema montado e seus componentes.

Para a medição de irradiância global incidente foi usado um piranômetro instalado no mesmo plano dos coletores solares. O anemômetro foi utilizado para medir a velocidade do vento. Sensores de platina tipo Pt100 classe A foram utilizados para medir a temperatura ambiente (11) e as temperaturas da água nas seções de entrada e saída dos coletores. Todos os equipamentos citados foram conectados ao equipamento de aquisição de dados ligados a um computador para armazenamento dos dados ao longo de todos os períodos de testes.

A instalação do circuito hidráulico foi baseada nas recomendações da norma NBR 15747-2 [ABNT, 2009] composta por uma tubulação de Polipropileno (PPR) isolada termicamente com espuma elastomérica para evitar as perdas de calor para o meio externo. A bomba (7) para a circulação está localizada no ponto mais baixo da tubulação em relação ao reservatório de água para que a própria pressão provocada pela coluna de água empurre o ar da tubulação de sucção para dentro da bomba, facilitando o trabalho da mesma em eliminar o ar através da linha de recalque. Para melhor desempenho da tubulação construída para o fluxo de água, foram instalados alguns purgadores, já que a água aquecida forma vapor dificultando a passagem do fluido no decorrer da tubulação, sendo necessária sua remoção. Também foi instalado um *by-pass* com válvula de gaveta, permitindo que o fluído percorra apenas um sentido. Esses equipamentos instalados na tubulação estão ilustrados na Figura 5.

Figura 5: Imagem dos equipamentos utilizados na tubulação do fluxo de água.

O filtro (9) foi instalado com o objetivo de diminuir as impurezas da água que passa em toda tubulação de água, pois a tubulação interna do coletor híbrido térmico-fotovoltaico é muito estreita, podendo haver problemas de obstrução no fluxo de água. Essa tubulação interna é composta por um polímero com alta resistência à temperatura e pode ser visualizada na Figura 6.

Por se tratar de um ensaio de comparação de dois coletores solares térmicos distintos, é recomendável que o valor da temperatura de entrada de ambos seja o mesmo. Isso foi possível com a instalação de um trocador de calor entre a saída do coletor híbrido e a entrada do coletor térmico de placa plana com a função de diminuir a temperatura da água seguido de uma resistência elétrica e um controlador de temperatura (12) desenvolvido por Santos *et al*, 2016, e apresentado em mais detalhes em Santos, 2016.

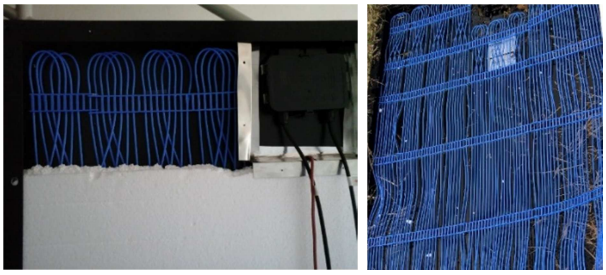


Figura 6: Serpentina que compõe o coletor PV/T.

Componentes parte fotovoltaica

Para obtenção dos resultados experimentais do sistema fotovoltaico, um módulo fotovoltaico convencional foi instalado junto ao PV/T. Nos módulos fotovoltaicos em operação, a polarização correspondente ao ponto de máxima potência está variando continuamente com as condições meteorológicas, portanto decidiu-se utilizar um microinversor conectado a cada módulo como forma de fazer com que ambos estejam operando em seu ponto de potência. Para medir a corrente elétrica que circula nos módulos, foram utilizados resistores *shunt* com 5 mΩ. A tensão foi medida conectando diretamente cabos entre os terminais dos módulos e o sistema de aquisição de dados. A temperatura dos módulos foi medida com um sensor de platina tipo Pt100 classe A acoplado no módulo fotovoltaico convencional, enquanto que um sensor Pt1000 já estava vinculado ao coletor híbrido fotovoltaico térmico.

RESULTADOS

Ensaio externo de eficiência térmica em regime permanente

Para obter a curva de eficiência térmica, foram medidos 18 pontos, em intervalos de 15 minutos por ponto, para os dois coletores utilizados em regime permanente. Esses pontos medidos estão indicados nas Tabelas 1 e 2 e foram medidos entre março e maio de 2016. Para cada intervalo medido foi calculada a média dos valores obtidos experimentalmente de 30 em 30 segundos.

Data	$[(Tm-Ta)/G_T]_{PV/T}$	$\eta_{PV/T}$
01/03/2016	0,00076	0,233
08/03/2016	0,00701	0,215
14/03/2016	-0,00250	0,221
14/03/2016	0,00188	0,244
15/03/2016	0,01769	0,164
15/03/2016	0,01682	0,171
15/03/2016	0,02145	0,121
16/03/2016	0,02087	0,137
17/03/2016	0,01596	0,145

Data	$[(Tm-Ta)/G_T]_{PV/T}$	$\eta_{PV/T}$
17/03/2016	0,02222	0,143
18/03/2016	0,02245	0,102
18/03/2016	0,02538	0,124
15/04/2016	-0,00257	0,207
15/04/2016	-0,00089	0,203
19/04/2016	0,00994	0,181
03/05/2016	0,02487	0,093
09/05/2016	0,00342	0,219
22/05/2016	0,00911	0,142

Tabela 1: Pontos de eficiência medidos do coletor PV/T.

A eficiência térmica de cada intervalo para cada coletor foi calculada pela Equação 5. Esse cálculo foi feito com a vazão mássica ($\dot{m}$) constante e com valor de 0,0317 kg/s (considerando a massa específica da água de 1000 kg/m³), o calor específico da água calculado pela Equação 3 em função da temperatura média (T_m) de entrada e saída do fluido para cada ponto.

Data	$[(Tm-Ta)/G_T]_{pp}$	η_{pp}	Data	$[(Tm-Ta)/G_T]_{pp}$	η_{pp}
01/03/2016	0,00126	0,587	17/03/2016	0,02299	0,452
08/03/2016	0,0077	0,557	18/03/2016	0,02331	0,417
14/03/2016	-0,00193	0,567	18/03/2016	0,02615	0,416
14/03/2016	0,00243	0,616	15/04/2016	-0,00172	0,666
15/03/2016	0,01840	0,479	15/04/2016	-0,00004	0,626
15/03/2016	0,01749	0,485	19/04/2016	0,01091	0,532
15/03/2016	0,02222	0,446	03/05/2016	0,02574	0,415
16/03/2016	0,02162	0,449	09/05/2016	0,00406	0,596
17/03/2016	0,02196	0,449	22/05/2016	0,00998	0,511

Tabela 2: Pontos de eficiência medidos do coletor de placa plana.

A partir dessa reta pode-se obter o comportamento da eficiência de cada coletor pela Equação 7, e os parâmetros encontrados foram de $F'(\tau\alpha)_e = 0{,}220$ e $F'U_L = 3{,}968$ para o coletor PV/T e $F'(\tau\alpha)_e = 0{,}612$ e, $F'U_L = 7{,}531$ para o coletor de placa plana convencional.

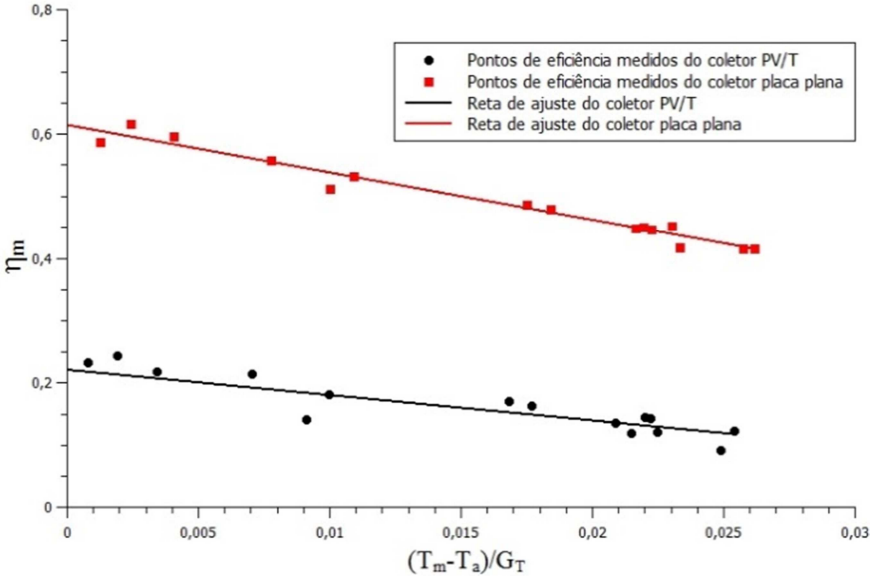
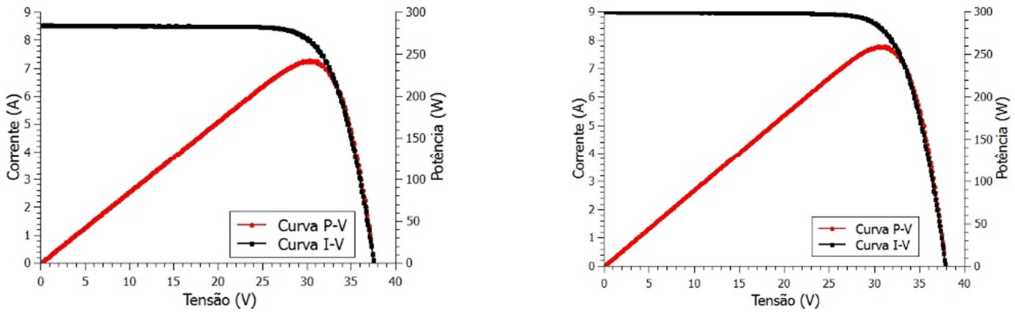


Figura 7: Temperatura média da água do coletor PV/T e o de placa plana durante o ensaio para determinar a constante de tempo.

Com as retas traçadas pode-se observar que os parâmetros encontrados do coletor de placa plana, tem suas propriedades ópticas e térmicas melhores comparado ao coletor PV/T. O valor da eficiência térmica máxima do coletor de placa plana é superior ao coletor híbrido térmico fotovoltaico e suas perdas térmicas são bem menores que o segundo.

Ensaio fotovoltaico

Para a obtenção das curvas características de cada módulo utilizado foram feitos ensaios no simulador solar existente no LABSOL conforme as normas estabelecidas. Essas curvas I-V e P-V estão indicadas nas Figuras 8(a) e 8(b).



(a) *(b)*

Figura 8: Curvas I-V e P-V do: (a) coletor híbrido térmico fotovoltaico e (b) módulo fotovoltaico convencional.

Com essas características foram encontrados valores das especificações de cada módulo conforme a Tabela 3.

Especificações do teste	Módulo FV	Módulo PV/T
Potência Máxima [W]	259,23	242,20
Tensão Circuito Aberto [V]	37,89	37,56
Tensão Potência Máxima [V]	30,70	30,27
Corrente Curto Circuito [A]	8,999	8,533
Corrente Potência Máxima [A]	8,444	8,001
Fator de Forma	0,760	0,756

Tabela 3: Valores das especificações dos módulos utilizados no teste.

Eficiência elétrica

Os valores da potência máxima de cada módulo nas condições de testes são distintos ($P_{FVm} = 259{,}3\ W\ e\ P_{PV/Tm} = 242{,}2$). Para uma comparação plausível da eficiência elétrica, uma correção da potência gerada a cada ponto do coletor PV/T medido foi feita. Essa correção é apresentada na Equação 12.

$$P_{PV/T\ corrig} = P_{PV/T} \cdot \left(\frac{P_{FVm}}{P_{PV/Tm}} \right) \tag{12}$$

na qual $P_{PV/T\ corrig}$ é a potência do coletor PV/T corrigido, $P_{PV/T}$ é a potência do coletor PV/T medida em um ponto, P_{FVm} é a potência do módulo fotovoltaico máxima obtida em teste, $P_{PV/Tm}$ é a potência do módulo PV/T máxima obtida em teste.

Essa correção pode ser validada analisando o comportamento das potências elétricas de cada módulo ao longo de um dia em que a temperatura ambiente foi menor que 25°C. Durante esse dia as temperaturas dos módulos foram aproximadamente as mesmas, com isso, não há uma diferença significativa nas suas eficiências elétricas medidas. A comparação pode ser apreciada na Figura 9.

Para resultados de forma mais quantitativa, uma análise foi feita baseando-se na temperatura nominal de operação. Para isso, foram utilizados os dados da irradiância sobre a superfície inclinada de 45° e temperatura ambiente, todos correlacionados aos dados de irradiação horária durante um ano na cidade de Porto Alegre. Esses dados foram obtidos com o uso do software RADIASOL2 (Krenzinger e Bugs, 2010).

Para o módulo fotovoltaico foi empregado a Equação 11, para um NOCT de 45°C especificado pelo fabricante. Isso resultou em um $K_t = 0{,}03125$ °C/Wm^{-2}. Com esses dados, foi simulado no software CREARRAY (Krenzinger e Adams, 2000). Introduzindo os dados em questão (irradiância e temperatura do módulo) no programa CREARRAY, foram gerados resultados da potência elétrica máxima em intervalos de uma hora ao longo de um ano. Somando esses valores obtidos encontrou um valor de 384 kWh de energia anual.

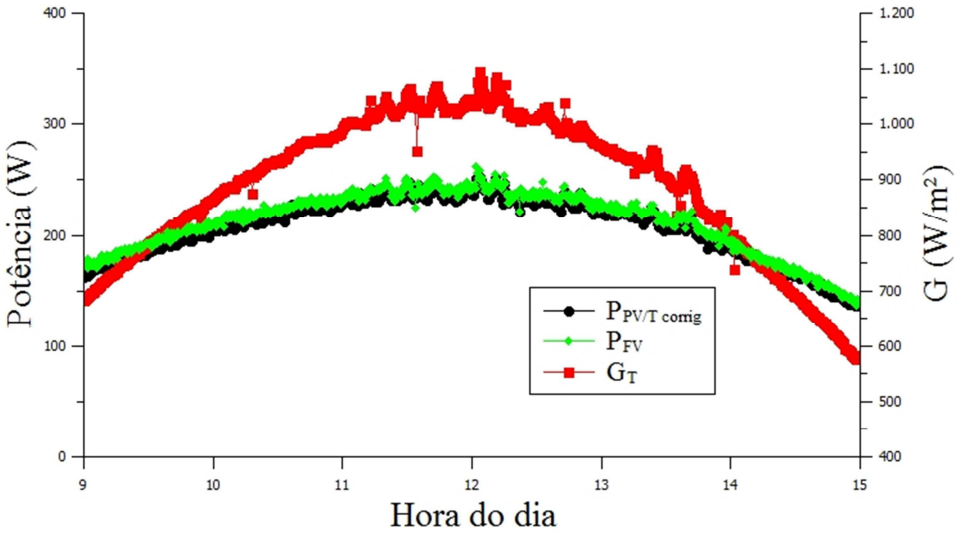


Figura 9: Potência elétrica do PV/T ($P_{PV/T}$), potência elétrica do FV (P_{FV}) e irradiação (G_T) medidas em cada ponto em função ao tempo.

No caso do coletor híbrido térmico fotovoltaico, a temperatura do módulo não depende somente da temperatura ambiente e da irradiância, mas também da temperatura de entrada da água (T_e). Por esse motivo, foi feito uma aproximação com os dados medidos ao longo dos testes desse coletor PV/T. Estes dados foram escolhidos baseando-se na temperatura de entrada da água aproximadamente igual a temperatura ambiente. O valor obtido nessa aproximação para K_t foi de 0,0075 °C/Wm^{-2}. Sua temperatura nominal também é de 45°C. Realizando o mesmo procedimento usando o CREARRAY, encontrou uma energia elétrica, ao longo de todo ano, no valor de 406 kWh.

Esses resultados mostram que o coletor PV/T produz 5,5% a mais de energia elétrica, durante um ano, diante do módulo fotovoltaico convencional nas mesmas condições a eles impostas. Essa diferença de geração de energia pode ser vista nas Figuras 11(a) e 11(b), que representa a variação de energia elétrica em um dia de verão (03/12) e um dia de inverno (12/07).

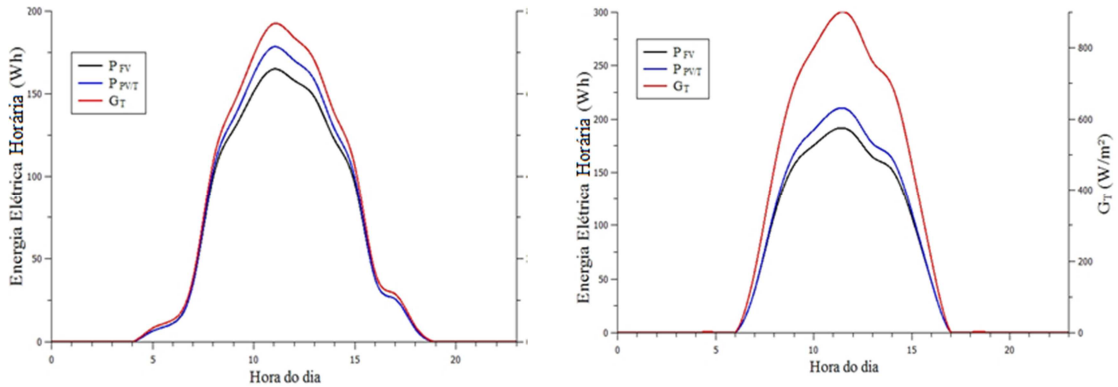


Figura 11: Valores da energia produzida por hora do coletor PV/T e do módulo fotovoltaico para o: (a) 3° dia do mês de janeiro e (b) 12° dia do mês de julho.

A partir dos mesmos dados meteorológicos obtidos do programa RADIASOL2 também foi possível calcular a quantidade de energia térmica gerada pelo coletor PV/T no valor de 378 kWh/m² e para o coletor de placa plana de 1053 kWh/m². Esse cálculo foi baseado em suas eficiências térmica máxima, mostrando que o coletor de placa plana produz 36% a mais de energia térmica que o coletor PV/T.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostraram que o coletor PV/T tem baixo desempenho, com eficiência térmica três vezes menor do que o coletor de placa plana convencional, mesmo com o segundo em condições abaixo do ideal, que é em torno de 80 a 90% de eficiência. Essa diferença significativa da eficiência térmica ocorreu pelo fato de que o coletor de placa plana tem menor perda térmica devido à sua cobertura de vidro. O coletor híbrido térmico fotovoltaico, por não ter essa cobertura de vidro, se comporta de forma semelhante a um coletor de placa plana sem cobertura, que também tem sua eficiência térmica baixa.

Para a comparação da eficiência elétrica, antes dos dois módulos serem expostos em condições meteorológicas reais, eles passaram por um ensaio em um simulador solar sob condições determinadas por normas internacionais regulamentadas com os valores de irradiância solar e temperatura das células iguais a 1.000 W/m² e 25 °C, respectivamente. Isso resultou em potências máximas distintas de 242,3 W para o coletor PV/T e 259,3 W para o módulo fotovoltaico. Com essa diferença foi necessária uma correção da potência obtida experimentalmente pelo coletor híbrido térmico fotovoltaico para a comparação mais precisa com os resultados adquiridos pelo módulo fotovoltaico. Sendo testado com as mesmas condições ambientes do módulo fotovoltaico, o resfriamento causado pela água que flui na parte posterior do coletor PV/T ocasionou em um maior ganho de eficiência elétrica do primeiro módulo.

Para os resultados quantitativos dessas eficiências foram utilizados dados do software RADIASOL 2, disponível pelo LABSOL, da média de irradiância e temperatura ambiente durante um ano na cidade de Porto Alegre, com o ângulo de inclinação de 45°. A partir desses dados, a energia elétrica anual de cada módulo foi obtido simulando esses dados no software CREARRAY, também acessível no laboratório. A diferença anual entre os módulos de energia elétrica foi de 5,5 %, indicando que o coletor híbrido térmico fotovoltaico tem maior rendimento, ao longo do tempo, em relação ao módulo fotovoltaico. Para o rendimento térmico, o coletor de placa plana, mesmo com menor área de abertura, gera 38% a mais de energia térmica, ao longo de um ano, que o coletor PV/T.

Com esses resultados pode-se concluir que o coletor híbrido térmico fotovoltaico testado nesse trabalho pode ser melhorado na sua parte térmica. A sua inferioridade no seu rendimento térmico faz com que o coletor PV/T talvez não seja útil para o uso doméstico em regiões com climas mais frios, por exemplo. Essa melhoria pode ser feita fixando os tubos das serpentinas usadas para circulação de água na parte posterior do módulo fotovoltaico para melhorar o contato eliminando o ar entre a tubulação e a placa fotovoltaica.
Uma camada de vidro pode ajudar no aumento da eficiência térmica de um coletor PV/T, mas isso pode acarretar em um aumento bastante significativo na temperatura das suas células fotovoltaicas além das perdas ópticas devido a reflexão desta cobertura. Com certeza o coletor PV/T que foi testado é mais útil em regiões onde o clima é mais quente e onde não há necessidade do fluido estar a temperaturas acima de 50°C.

REFERÊNCIAS

ABNT (2009). Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15747-2 - Sistemas Solares Térmicos e Seus Componentes - Coletores Solares Parte 2: Métodos de Ensaio, Rio de Janeiro, 2009.

Dubey, S., Sarvaiya, J. N., Seshadri, B. (2013). Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World - A Review. Energy Procedia, v. 33, p. 311-321.

IEC 60904-3 (2008). International Eletrotechnical Comission – Photovoltaic Devices – Part 3: Measurement Principles for Terrestrial Photovoltaic (PV) Solar Devices with Reference Spectral Irradiance Data.

Krenzinger, A.; Adams, T. R. (2000). CREARRAY – Programa de Análise de Sistemas Fotovoltaicos. Laboratório de Energia Solar – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Krenzinger, A. e Bugs, R. C. (2010). Radiasol2: Software para sintetizar dados de radiação solar. IV Conferência Latino Americana de Energia Solar (IV ISES CLA) e XVII Simpósio Peruano de Energia Solar (XVII –SPES), Cuzco.

Manea, T. F. (2002). Desenvolvimento de uma Bancada para Ensaios de Coletores Solares de Tubos de Vidro a Vácuo. Dissertação de Mestrado. PROMEC, UFRGS, Porto Alegre.
Pinho, J. T., Galdino, M. A. (2014). Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, CEPEL – CRESESB, Rio de Janeiro.
Rosa, F. N. (2012). Aplicabilidade de coletores solares com tubo evacuado no Brasil. Dissertação de Mestrado. PROMEC, UFRGS, Porto Alegre.
Sandnes, B., Rekstad, J. (2002). A photovoltaic/thermal (pv/t) collector with a polymer absorber plate. Experimental study and analytical model. Solar Energy, v. 72, n° 1, pp. 63–73.
Santos, C. F., Ancines, C. A. Krenzinger, A. (2016). Utilização de um controlador de temperatura para teste em coletores híbridos térmico-fotovoltaicos. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belo Horizonte.
Santos, C. F. (2016.). Desenvolvimento e aplicação de estabilizador de temperatura para aperfeiçoamento de bancada de ensaio de coletores solares. Dissertação de Mestrado. PROMEC, UFRGS, Porto Alegre.
Zondag, H. A. (2008). Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 12, p. 891-959.

ABSTRACT

Thermal photovoltaic hybrid solar collectors (PV/T) convert solar energy into heat and electrical energy, simultaneously, with the superposition of a photovoltaic module to a flat plate solar collector. Usually, PV/T collectors have their lower thermal efficiency than a conventional collector due to heat loss and, a higher electrical efficiency compared to a photovoltaic system. Assigning the same weather conditions in a photovoltaic module, a PV/T collector and a flat plate solar collector, the results of their incomes were compared separately. These results showed that, for the thermal efficiency, the PV/T collector had its value 34% lower than the flat plate collector and its electrical efficiency 5,5% higher. Concluding that improvements in the thermal parts of the PV/T collector could be made, in order to increase its thermal performance without compromising the efficiency of its photovoltaic cells.
Keywords: solar energy; photovoltaic thermal hybrid solar collector; thermal efficiency; electrical efficiency