

**ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UM COLETOR HÍBRIDO
TÉRMICO-FOTOVOLTAICO****Paulo Henrique Mello de Oliveira**

Escola de Engenharia – DEM/PEM – COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro
Caixa Postal 68503 – CEP 21945-970 – Rio de Janeiro - RJ
paulo@lffc.coppe.ufrj.br

Ênio Souza de Aguiar

Escola de Engenharia – DEM/PEM – COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro
Caixa Postal 68503 – CEP 21945-970 – Rio de Janeiro - RJ
enio@lffc.coppe.ufrj.br

Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos

Escola de Engenharia – COPPE/FAU – Universidade Federal do Rio de Janeiro
Caixa Postal 68503 – CEP 21945-970 – Rio de Janeiro – RJ
leeurico@terra.com.br

Resumo. *O propósito deste texto é apresentar uma análise teórico-experimental de um coletor solar híbrido composto de um painel fotovoltaico acoplado a um sistema de arrefecimento (placa absorvedora e serpentina de resfriamento). O painel fotovoltaico é composto de três camadas paralelas: cobertura de vidro exposta aos raios solares, fina camada de células fotovoltaicas, e na parte inferior, uma outra camada de vidro. O sistema de arrefecimento logo abaixo pode ser colocado ou não em contato com o painel fotovoltaico. Esse sistema térmico é uma placa absorvedora de cobre pintada de preto em conjunto com uma serpentina soldada na mesma. No interior da tubulação é induzido um fluxo de água sob vazão constante e em regime de escoamento laminar. O modelo teórico considera intervalos de 30 minutos (quando a irradiação solar é quase constante) e um balanço térmico de condução em regime permanente para esse conjunto de camadas paralelas. A equação de Poisson é considerada para a camada de células fotovoltaicas, na qual calor e eletricidades são gerados. A equação de Laplace é considerada para as demais camadas. As condições de contorno assumidas em cada interface das camadas são identidades entre temperaturas e fluxos de calor. A solução desse modelo teórico é obtida pelo software MATHEMATICA. Para o coletor solar híbrido são determinados: as temperaturas das diversas camadas, temperaturas de entrada e saída de água, fluxos de calor e as eficiências térmica e fotovoltaica. Também é analisado um sistema de 10 coletores no arranjo série/paralelo para uma aplicação doméstica no Rio de Janeiro. Adicionalmente, um modelo experimental (um coletor de 0,5 m²) foi testado sob condições locais, sendo apresentadas as temperaturas e eficiências obtidas. Uma comparação desses resultados experimentais com aqueles do modelo teórico são apresentadas.*

Palavras-chave: Energia solar, Coletor PV/T, Coletor solar híbrido térmico-fotovoltaico.

1. Introdução

O coletor solar híbrido térmico-fotovoltaico converte a energia solar em calor e eletricidade. Combinar um coletor térmico com um painel fotovoltaico tem como vantagens o aumento da eficiência de conversão de energia total, a uniformidade de posicionamento trazida por um único painel e a redução nos custos provocada pelo compartilhamento de componentes e local de instalação.

O painel fotovoltaico acoplado a um trocador de calor (placa absorvedora e serpentina de resfriamento) é então protegido contra os chamados pontos quentes (“*hot spots*”), gerados por sombreamentos irregulares, os quais levam à diminuição do seu rendimento elétrico e até a destruição da célula fotovoltaica. Com o arrefecimento e a conseqüente diminuição das temperaturas das células fotovoltaicas, é observado que há aumento na eficiência elétrica. Cabe avaliar quais tipos de disposições relativas entre painel fotovoltaico e sistema de arrefecimento são mais eficazes. Para o trabalho em questão foi avaliado um coletor híbrido em que há uma cavidade entre o painel fotovoltaico e o sistema de arrefecimento placa absorvedora/tubulação.

Nas últimas duas décadas, esses coletores têm sido avaliados e estudados por institutos de pesquisa e empresas interessadas no conceito. Com esse propósito, o **Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Rio de Janeiro** vem desenvolvendo trabalhos a respeito, entre eles Falkenberg e Bastos (2000), a partir do qual, no presente trabalho, são feitas abordagens adicionais e mais detalhadas, inclusive com avaliações experimentais.

2. Modelo Teórico

O coletor híbrido é composto de um painel fotovoltaico constituído de três camadas: cobertura de vidro exposta à radiação solar, uma fina camada de células fotovoltaicas de silício e outra inferior, de vidro em contato ou não com um sistema de arrefecimento formado por água circulando em uma serpentina soldada à uma placa absorvedora metálica. As variações de temperatura ambiente e insolação ocorrem lentamente a cada 30 minutos, sendo considerado para tal modelo, o regime permanente de condução unidimensional para o conjunto de camadas paralelas.

A equação de Poisson foi considerada para a região de células fotovoltaicas, onde a geração de calor – energia não convertida em eletricidade – tem comportamento uniforme. Para as demais foi utilizada a equação de Laplace. Em cada interface, as condições de contorno são estabelecidas pela igualdade de temperaturas e fluxos de calor. Não ocorrem perdas para o ambiente, exceto a partir do vidro superior. A temperatura do céu é aproximadamente igual à temperatura ambiente. Parte da energia térmica produzida pela células e que é conduzida pelo vidro superior é perdida por radiação e convecção forçada devida a ação dos ventos e a outra parcela é conduzida pelo vidro inferior, ocorrendo troca de calor entre este e o sistema de arrefecimento situado logo abaixo. Para o tipo de disposição estudado, há uma cavidade situada entre o vidro inferior e o sistema placa absorvedora/serpentina, fazendo com que seja necessária modelagem específica da combinação de troca de calor combinado de condução, convecção e radiação. O mecanismo de transmissão de calor para cada caso é determinado a partir do número de Rayleigh calculado.

A radiação solar que alcança as células corresponde a 80% da radiação solar disponível, o que significa que a perda por reflexão é de 20%.

Com relação à conversão de energia solar em elétrica, baseamo-nos no fato de que a corrente elétrica no painel é pouco influenciada pela temperatura em comparação com a tensão elétrica e com isso, o rendimento elétrico varia linearmente com a temperatura das células.

O regime de escoamento de água na serpentina de resfriamento é laminar completamente desenvolvido hidrodinâmica e termicamente, sendo aplicadas as correlações e demais procedimentos de avaliação para um tubo reto de mesmo comprimento, visto que este é muito maior que o diâmetro da tubulação.

Para efeito de comparação entre os resultados teórico-experimentais, serão aplicados os mesmos valores de radiação solar incidente, vazão, temperatura de entrada da água na tubulação, temperatura ambiente, velocidade do vento, diâmetro da tubulação e dimensões do coletor. A área de captação solar possui 0,5 m².

2.1. Trocas de Calor por Condução no Painel Fotovoltaico

No estudo das trocas de calor ao longo do painel fotovoltaico utilizamos a equação de difusividade térmica unidimensional:

$$\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \frac{g(x,t)}{k} \tag{1}$$

Onde α é a difusividade térmica (m²/s), T é a temperatura (C), t é o tempo (s), x é uma coordenada (m) e g(x,t) é a geração de calor.

A coordenada x está indicada na Fig. (1). Será considerado o regime permanente ($\partial / \partial t = 0$).

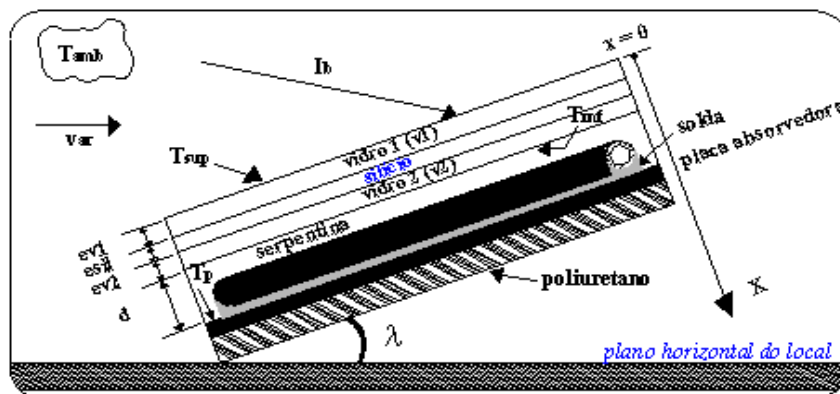


Figura 1. Vista lateral do coletor híbrido e sistema de coordenadas

A condutividade térmica do material (vidro ou silício) é k e g(x) é a geração de calor nas células, decorrente da conversão em eletricidade. A geração de calor dependerá exclusivamente da radiação disponível às células e da espessura das mesmas, conforme a Eq. (2), onde simplesmente consideramos g(x) = g:

$$g = \frac{80 \% \text{ da radiação solar disponível}}{\text{espessura da camada de células fotovoltaicas}} \quad (2)$$

Para o regime permanente, a equação de condução de calor para a camada de silício é :

$$k \cdot \frac{d^2 T(x)}{dx^2} + g = 0 \quad (3)$$

Nas camadas superior e inferior de vidro temos:

$$k \cdot \frac{d^2 T(x)}{dx^2} = 0 \quad (4)$$

2.2. Condições de Contorno e Coeficientes de Troca de Calor

De acordo com a Fig. (2), podemos estabelecer as condições de contorno para o problema.

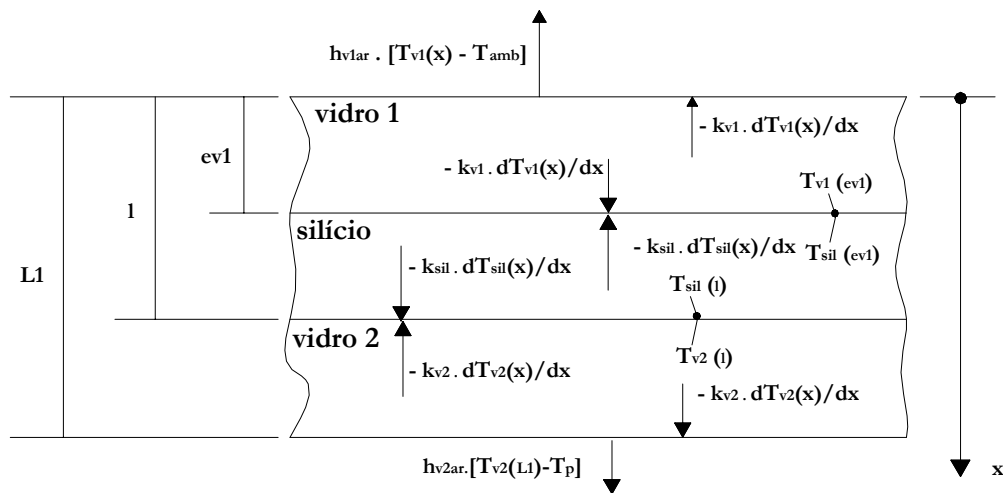


Figura 2. Trocas de calor nas camadas do painel fotovoltaico

Para o vidro 1, o fluxo de calor por condução deve ser igual ao fluxo de calor trocado entre o vidro e o ambiente:

$$k_{v1} \cdot \frac{dT_{v1}(x)}{dx} = h_{v1ar} \cdot [T_{v1}(x) - T_{amb}] ; x = 0 \quad (5)$$

onde: h_{v1ar} : coeficiente de troca de calor por convecção forçada e radiação combinados ($W/m^2 \cdot C$); k_{v1} : condutividade térmica do vidro superior ($W/m \cdot C$); T_{amb} : temperatura ambiente (C) e $x = 0$: ponto de contato entre o ar ambiente e o vidro superior.

Entre o vidro 1 e o silício:

$$k_{v1} \cdot \frac{dT_{v1}(x)}{dx} = k_{sil} \cdot \frac{dT_{sil}(x)}{dx} ; x = ev1 \quad (6)$$

onde: k_{sil} : condutividade térmica do silício ($W/m \cdot C$); $ev1$: espessura do vidro 1 (m) e $x=ev1$: ponto de contato entre o vidro 1 e a camada de células fotovoltaicas de silício (m).

Analogamente, o fluxo de calor por condução no silício deverá ser igual ao fluxo no vidro 2:

$$k_{sil} \cdot \frac{dT_{sil}(x)}{dx} = k_{v2} \cdot \frac{dT_{v2}(x)}{dx} ; x = ev1 + esil = l \quad (7)$$

onde: k_{v2} : condutividade térmica do vidro 2 (W/m. C); $esil$: espessura da camada de silício (m) e $x = ev1 + esil = l$: ponto de contato entre o silício e o vidro 2 (m).

A condição de contorno entre o vidro 2 e o sistema de arrefecimento logo abaixo poderá envolver trocas de calor combinados de condução, convecção e radiação:

$$-k_{v2} \cdot \frac{dT_{v2}(x)}{dx} = h_{v2ar} \cdot [T_{v2}(x) - T_p] \quad ; \quad x = ev1 + esil + ev2 = L1 \quad (8)$$

onde: h_{v2ar} : coeficiente de transmissão de calor entre o vidro 2 e o sistema de arrefecimento (W/m². C); T_p : temperatura da placa absorvedora (C); $ev2$: espessura do vidro 2 (m) e $x = ev1 + esil + ev2 = L1$: ponto de contato entre o vidro 2 e o ar no interior da cavidade entre o vidro 2 e o sistema de arrefecimento (placa absorvedora + serpentina) (m).

O coeficiente h_{v2ar} deverá ser determinado por cálculo iterativo, já que ele é função da temperatura da superfície inferior do vidro 2 e da temperatura da placa absorvedora. A natureza da troca de calor interna é fortemente dependente da inclinação do coletor, sendo que para valores inferiores a um determinado valor do número de Rayleigh o efeito predominante será a condução. Acima desse Rayleigh crítico, coexistirão condução, convecção e radiação. Para a inclinação do coletor utilizado aproximadamente igual à latitude local (23), foi utilizada a seguinte correlação devida a Hollands et al. (1976):

$$\overline{Nu}_d = 1 + 1,44 \cdot \left[1 - \frac{1708}{Ra_d \cdot \cos(\lambda)} \right]^* \cdot \left\{ 1 - \frac{1708 \cdot [\text{sen}(1,8 \cdot \lambda)]^{1,6}}{Ra_d \cdot \cos(\lambda)} \right\} + \left[\left(\frac{Ra_d \cdot \cos(\lambda)}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^* \quad (9)$$

onde: \overline{Nu}_d : número de Nusselt médio na cavidade; Ra_d : número de Rayleigh na cavidade e λ : inclinação do coletor solar

Se um dos valores entre colchetes sinalizados com “*” for negativo, ele deverá ser igualado a zero de modo a assegurar o fluxo de calor entre as superfícies vidro 2/placa absorvedora.

Para a inclinação do coletor solar utilizado, o número de Rayleigh crítico é igual a 1854. Foi verificado para todos os casos em estudo que o Rayleigh sempre será maior que 1854, coexistindo então as três formas de transmissão de calor.

Temos também que assegurar a identidade entre as temperaturas na interface entre as camadas:

Vidro 1 e Silício:

$$T_{v1}(x) = T_{sil}(x); \quad x = ev1 \quad (10)$$

Silício e Vidro 2:

$$T_{sil}(x) = T_{v2}(x); \quad x = ev1 + esil \quad (11)$$

Para a água que circula através da serpentina, consideramos que:

$$h_{eq} \cdot [T_{v2}(x = L1) - T_m] = m_a \cdot c_{pa} \cdot (T_s - T_e) \quad (12)$$

onde: h_{eq} : coeficiente de transmissão de calor equivalente entre o vidro 2 e a água no interior da serpentina (W/m². C); $L1$: espessura do painel fotovoltaico (vidro 1 + células fotovoltaicas + vidro 2) (m); T_m : temperatura média da água (diferença logarítmica de temperaturas) (C); m_a : vazão mássica de água (kg/s); c_{pa} : calor específico da água à pressão constante (J/kg. C); T_s : temperatura de saída da água (C) e T_e : temperatura de entrada da água (C)

O coeficiente h_{eq} é estimado também por cálculo iterativo. A Fig. (3) e a Fig. (4) ilustram a modelagem para a avaliação do mesmo:

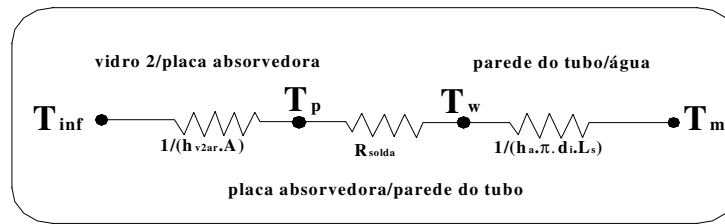


Figura 3. Analogia Elétrica – Resistências Térmicas vidro 2/água

No trecho vidro2/placa absorvedora a resistência térmica é devida ao coeficiente h_{v2ar} . Para o trecho entre a placa e a parede da tubulação há a resistência térmica da solda (R_{solda}) no trecho da parede da serpentina até a água temos a resistência térmica dependente do coeficiente de transmissão de calor por convecção entre a parede e a água. Esse coeficiente h_a também entra no cálculo iterativo. “A” é a área de captação solar do coletor (m^2), T_w é a temperatura da parede do tubo (C), d_i é o diâmetro interno do tubo (m) e L_s é o comprimento total da serpentina (m). Para fins de cálculo da resistência da solda, assumimos que a solda é perfeita e projeta-se na placa absorvedora de acordo com a Fig. (4):

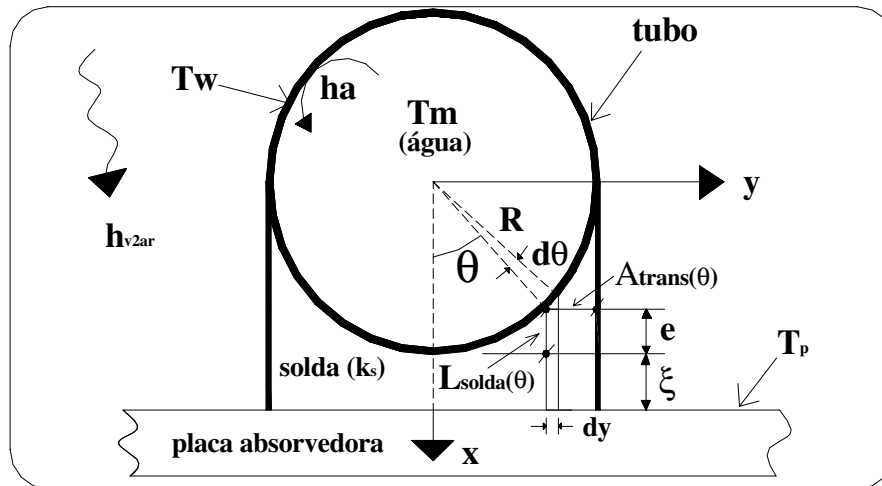


Figura 4. Corte transversal placa absorvedora/solda/tubulação

A resistência da solda é calculada segundo a expressão (13):

$$R_{solda} = \frac{d_i + \xi}{d_i \cdot k_s \cdot L_s} \tag{13}$$

Chega-se à Eq. (13) integrando-se a região ocupada pela solda, composta de uma parcela de espessura constante (ξ) e uma de espessura variável, acima de ξ , $L_{solda}(\theta)$. A condutividade térmica da solda é k_s (W/m. C).

Após algumas manipulações algébricas a partir dos fluxos da Fig. (3) e da Eq. (13), podemos encontrar o valor do coeficiente h_{eq} :

$$h_{eq} = \frac{d_i \cdot h_a \cdot h_{v2ar} \cdot k_s \cdot L_s \cdot \pi}{d_i \cdot h_a \cdot k_s \cdot \pi \cdot L_s + A \cdot h_{v2ar} \cdot [k_s + h_a \cdot \pi \cdot (d_i + \xi)]} \tag{14}$$

2.3. Propriedades e Dimensões:

Área de captação solar (já descontada a área das fitas de alumínio responsável pelos contatos elétricos entre as células fotovoltaicas): $0,4098 \text{ m}^2$

Cavidade entre o vidro 2 (inferior) e a placa absorvedora: $0,02 \text{ m}$

Tubulação: diâmetro ($d_i = 1/4''$) e comprimento total ($L_s = 295$ cm)

Emissividades das superfícies: vidro 1 (superior): 0,7; vidro 2 (inferior): 0,7; placa absorvedora: 0,8

Tabela 1. Espessuras e Condutividades Térmicas das Camadas do Pannel Fotovoltaico

Camada do Pannel Fotovoltaico	Espessura (m)	Condutividade Térmica (W/m. C)
Vidro 1 (superior)	0,003	1,3
Célula Fotovoltaica (silício)	0,0003	130
Vidro 2 (inferior)	0,003	1,3

O material da tubulação e a placa absorvedora é cobre. O arranjo da serpentina na placa absorvedora é mostrado na Fig. (5):

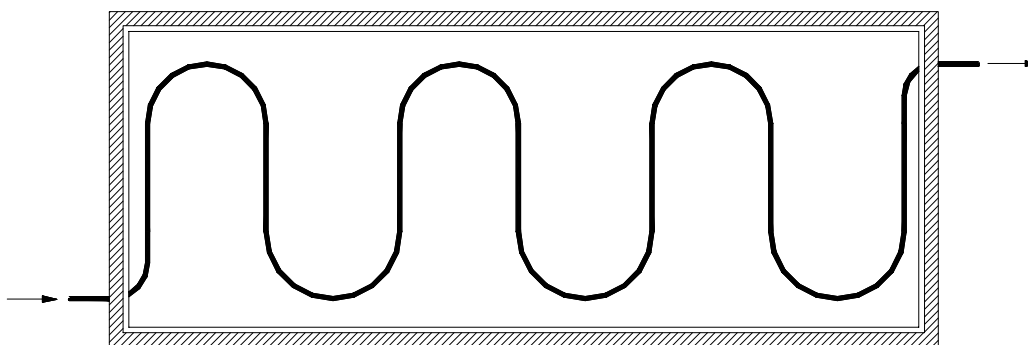


Figura 5. Arranjo da tubulação na placa absorvedora

3. Modelo Experimental

Para a avaliação experimental do coletor solar híbrido foi construído um trocador de calor, constituído de uma serpentina de cobre de diâmetro $1/4''$, soldada a uma chapa de mesmo material, o qual foi acoplado ao pannel fotovoltaico. A fim de aumentar a absorção de calor, chapa e tubulação foram pintados com tinta preta fosca. A parte inferior do conjunto pannel fotovoltaico + trocador de calor (placa absorvedora e tubulação) foi preenchida com poliuretano para isolamento térmico. Circuitos de amplificação e condicionamento de sinais foram fixados logo abaixo do material isolante. O conjunto todo ficou apoiado em um suporte com uma inclinação fixa em relação ao plano horizontal do local, equivalente à latitude do Rio de Janeiro, aproximadamente 23° , com a área de captação de radiação solar voltada para o norte geográfico, acima do Laboratório de Energia Solar da UFRJ.

As emissividades das superfícies (vidros e placa absorvedora) foram retiradas de Howell et al. (1982).

O fluxo de água foi mantido constante por meio de um reservatório de $0,02$ m³, cujo nível de água permaneceu fixo durante as medições. A saída da água do mesmo foi controlada por uma válvula na parte inferior. Ao medir-se a vazão foram utilizados um bécquer graduado e um cronômetro. As medidas foram tomadas a uma distância de aproximadamente 40 diâmetros de tubulação, de modo a assegurar valores satisfatórios e confiáveis desse parâmetro.

Durante a experiência foram avaliados: 1) Coletor Solar Híbrido; 2) Pannel Fotovoltaico e 3) Coletor Solar Plano Convencional.

O pannel fotovoltaico utilizado possui as seguintes características:

Fabricante: AEG

Modelo: PQ10/44/01;

Origem: Alemanha;

Número de células fotovoltaicas: 44 ligadas em série;

Material: silício policristalino;

Área Total: $0,4098$ m² (já descontada a área das fitas de alumínio dos contatos elétricos);

Diodos de by-pass: 2;

Faixa de Temperaturas: -50 C + 90 C;

Em Standard Test Conditions (temperatura ambiente de 25 C, distribuição espectral de $1,5$ e irradiação solar igual a 1000 W/m² para incidência normal):

Eficiência Elétrica: 10,8 %

V_{MPP} (tensão do ponto de máxima potência elétrica): 19,8 %

MPP (ponto de máxima potência elétrica): 44,2 W;

Coefficiente de Temperatura para Tensão (dependência linear): -0,40 %/ C.

Todos os circuitos ficaram protegidos do ambiente externo por caixas de dimensões 6 cm x 6 cm. Foi utilizada para alimentação uma fonte simétrica de 12 V.

A radiação solar global foi medida com um piranômetro nivelado com a horizontal do local logo acima do coletor.

Os cabos que conduziram todos os sinais são cabos de rede, blindados e aterrados a fim de eliminar qualquer tipo de interferência eletromagnética. Adicionalmente um circuito adicional com a finalidade de filtragem, permitindo apenas a passagem dos sinais de baixa frequência (filtro passa-baixa) foi colocado antes do instrumento de medição, um multímetro digital. O aterramento dos circuitos foi feito através de um cabo ligado ao terra verdadeiro existente no laboratório de Energia Solar da UFRJ. Desse modo, o aterramento, a filtragem e a blindagem dos cabos elimina quase que por completo perturbações dos sinais medidos. A leitura do sinal pelo multímetro é escolhida através de uma caixa seletora. Os cabos foram ligados à caixa por meio de conexões DB-25.

A velocidade do vento foi medida próxima ao painel com um anemômetro digital.

Os circuitos de condicionamento de sinal foram utilizados de modo a amplificar os sinais provenientes dos sensores fixados ao coletor. Esse procedimento é indispensável pelo fato dos sinais gerados serem muito tênues e estarem relativamente distantes do instrumento de medida.

Os diodos são do tipo 1N4148 para medição das temperaturas das superfícies e do ambiente externo. Eles foram fixados às superfícies e envolvidos com pasta térmica. O diodo para medir a temperatura ambiente ficou exposto ao ar externo protegido da radiação direta do sol pela sombra do próprio coletor. Aproveitou-se a propriedade desse componente eletrônico chamada “barreira de potencial”, que possui uma relação com a temperatura linear na faixa de operação do coletor.

Para medição das temperaturas da água na entrada e na saída da serpentina foram utilizados termopares do tipo K (chromel-alumel), fixados a 1,2 cm da entrada e da saída do fluxo de água. O condicionamento dos sinais dos termopares foi realizado por circuitos integrados AD595CD, da Analog Devices, que tem a função de amplificar os sinais e simular a junção de referência a 0 °C, já que seria inviável a utilização de garrafas térmicas para esse tipo de experimento. Sua tensão de alimentação foi de + 5 volts.

O sensor para verificação da radiação solar global é um piranômetro fabricado pela Theodor Friedrichs & Co., modelo 6010, com uma sensibilidade de 0,01313 mV/W.m⁻², conforme certificado de calibração emitido pelo fabricante.

Os circuitos foram calibrados com um calibrador fabricado pela Techne Inc., modelo TECAL 650. Para assegurar ajustes confiáveis às curvas de calibração foram fixados cinco pontos no intervalo 30 °C - 90 °C (intervalos de 15 °C). Foi considerado que as incertezas associadas às temperaturas fixadas no calibrador são desprezíveis comparadas com as das tensões correspondentes lidas no multímetro e por isso não serão levadas em consideração. As curvas de calibração foram ajustadas pelo método dos mínimos quadrados.

4. Resultados

Para a simulação computacional foram aplicados os valores de temperaturas de entrada da água, ambiente, radiação solar e vazão encontrados no ensaio experimental com a finalidade de se fazer uma comparação entre o modelo teórico e o modelo experimental, observando sua validade. As medições foram tomadas de 30 em 30 minutos por volta do pico de radiação solar, situação em que é razoável considerar o regime permanente, eliminando-se qualquer parcela transiente, conforme a Tab. (2):

Tabela 2. Medições Feitas no Coletor Solar Híbrido

	11:45	12:15	12:45	13:15	13:45
q_s (W/m²)	1030	1030	1010	958	904
m_a (kg/s)	0,00579	0,00579	0,00579	0,00579	0,00579
T_{amb} (°C)	35,2	36,8	36,3	36,8	35,8
T_e (°C)	29,3	29,7	29,9	30,2	30,4
T_s (°C)	42,7	42,6	42,6	43,6	44,0
T_p (°C)	58,4	57,8	57,9	58,7	57,9
T_m (°C)	37,8	38,2	38,3	39,4	40,1
T_{sup} (°C)	74,1	74,1	73,1	73,6	71,5
T_{inf} (°C)	74,6	74,6	73,5	74,0	72,5
v_{ar} (m/s)	0,5	0,4	0,3	0,2	0,3
E_{disp} (kJ)	1960	1960	1910	1820	1720

E_{abs} (kJ)	1170	1120	1110	1170	1190
P_{max} (W)	36,7	36,7	35,9	34,1	32,4
τ (%)	59,5	57,2	58,0	64,3	69,3
ϵ (%)	8,66	8,66	8,70	8,68	8,75

onde: q_s : radiação solar disponível para o coletor inclinado – Orgill e Hollands (1977); m_a : vazão mássica de água; T_{amb} : temperatura ambiente; T_e : temperatura da água na entrada da tubulação; T_s : temperatura da água na saída da tubulação; T_p : temperatura da placa absorvedora; T_m : temperatura média da água; T_{sup} : temperatura da superfície superior do vidro 1; T_{inf} : temperatura da superfície inferior do vidro 2; v_{ar} : velocidade do vento; E_{disp} : energia disponível para o coletor; E_{abs} : energia absorvida pela água; P_{max} : potência elétrica máxima; τ : rendimento térmico (sistema em malha aberta) e ϵ : rendimento elétrico

A temperatura média do vidro inferior do painel fotovoltaico foi de 73,8 C e o rendimentos elétrico e térmico médios foram respectivamente iguais a 8,7 % e 61,7 %. Os resultados foram obtidos para o dia 27 de abril de 2001. A seguir são exibidos alguns gráficos comparativos entre essas medições com a solução do modelo teórico obtida pelo software MATHEMATICA, a partir de dados de entrada experimentais, como a temperatura de entrada da água no coletor, radiação solar global, temperatura ambiente, velocidade do vento e vazão mássica:

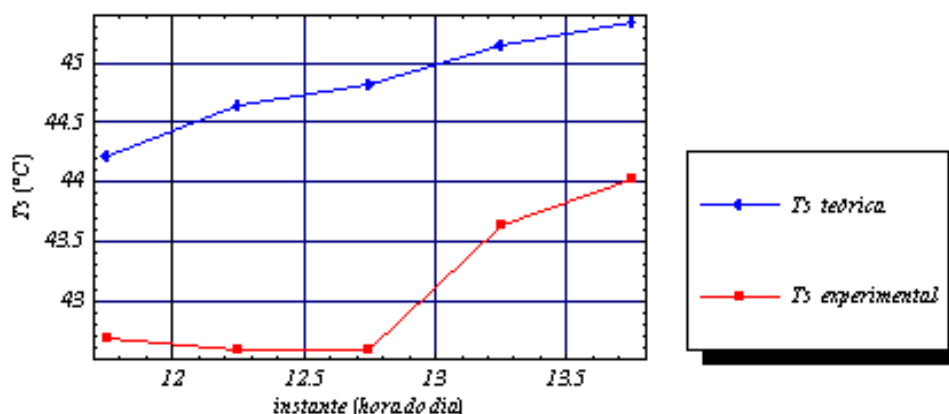


Figura 6. Temperatura da Saída da Água do Coletor Híbrido

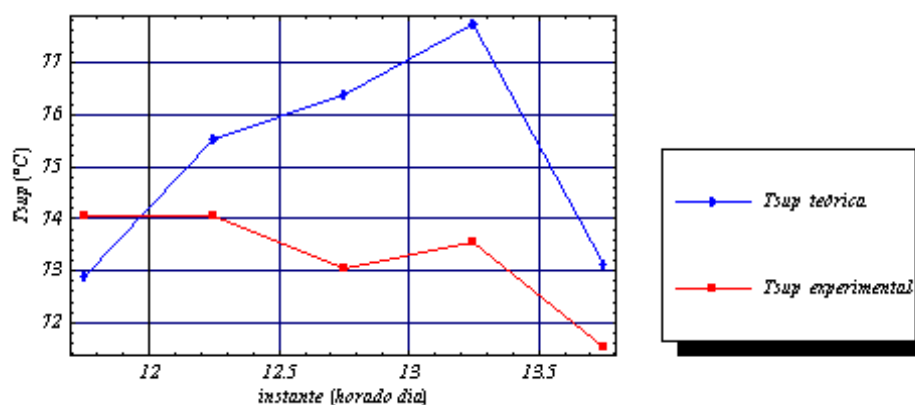


Figura 7. Temperatura do Vidro Superior do Painel Fotovoltaico do Coletor Híbrido

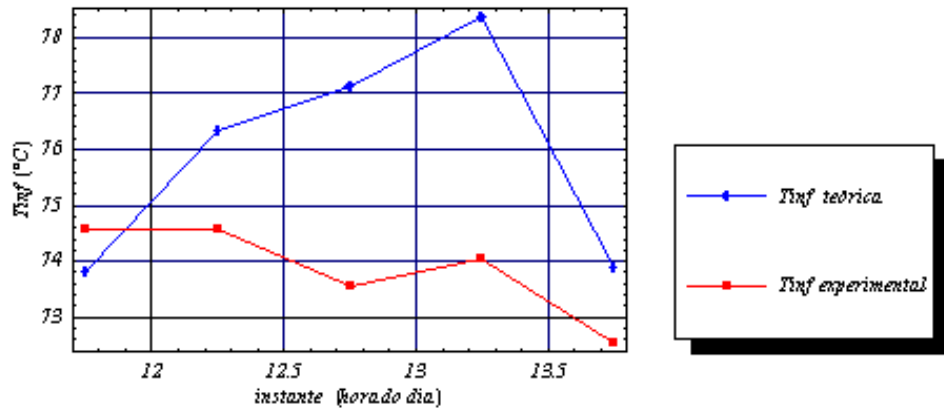


Figura 8. Temperatura do Vidro Inferior do Painel Fotovoltaico do Coletor Híbrido

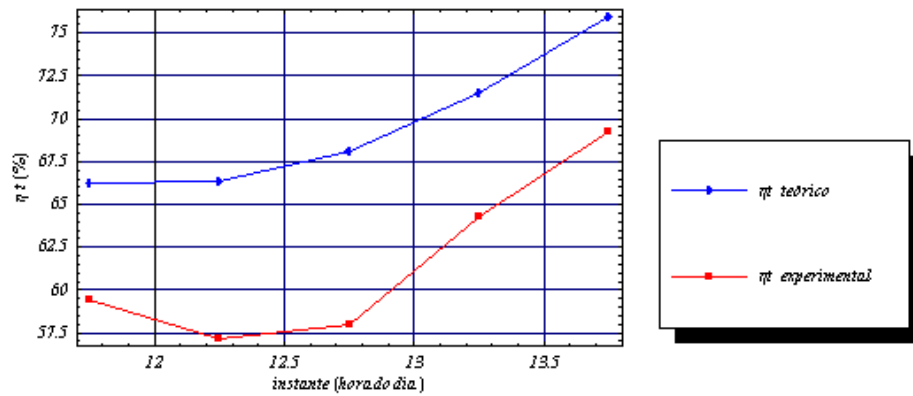


Figura 9. Rendimento Térmico do Coletor Híbrido

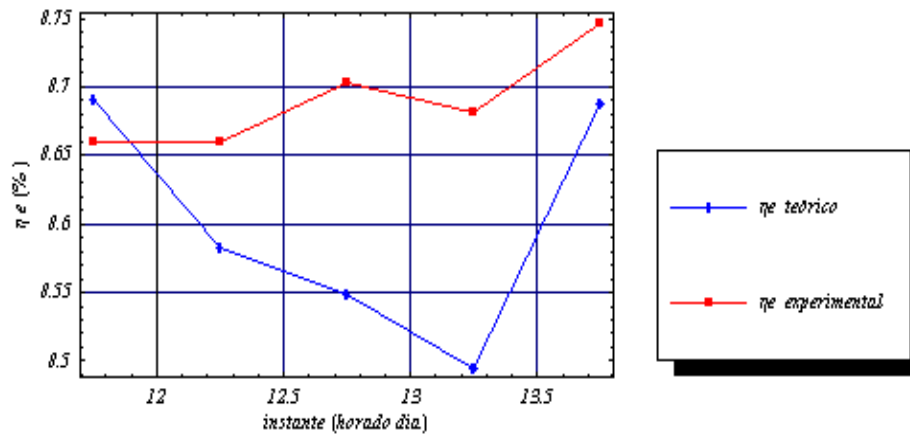


Figura 10. Rendimento Eléctrico do Coletor Híbrido

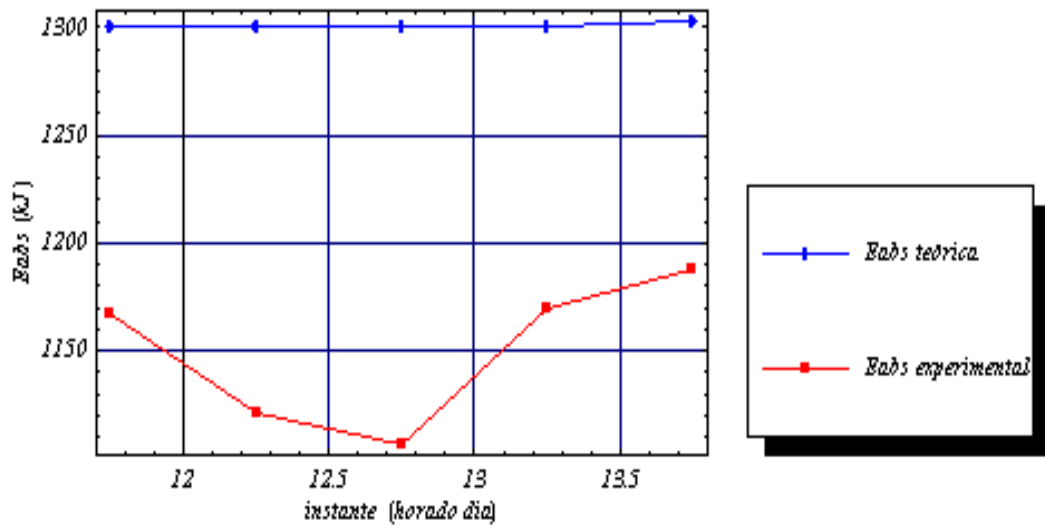


Figura 11. Energia Térmica Absorvida pela Água no Coletor Híbrido

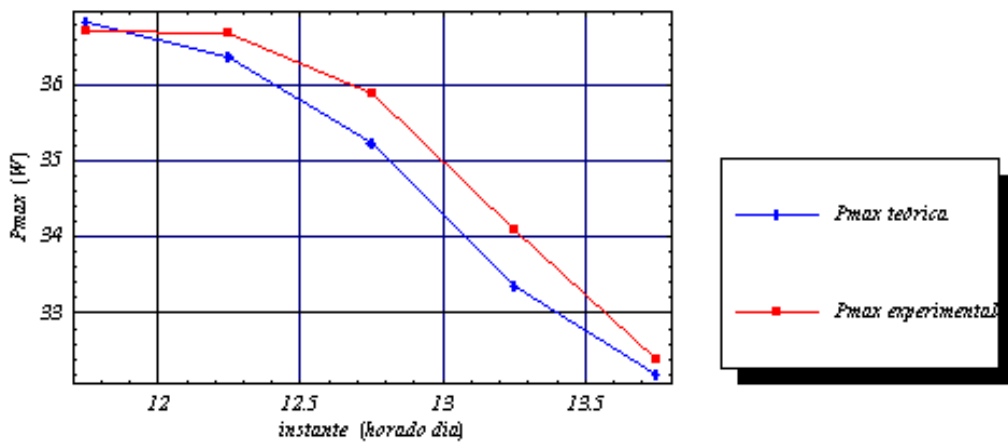


Figura 12. Potência Elétrica Máxima do Coletor Híbrido

Para o painel fotovoltaico foram apresentados os resultados da Tab. (3):

Tabela 3. Painel Fotovoltaico

	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00
q_s (W/m ²)	1040	1000	975	915	801
T_{amb} (C)	43,6	41,0	40,5	41,5	41,5
T_{sup} (C)	78,1	77,6	77,1	75,6	74,1
T_{inf} (C)	78,6	78,1	77,6	76,1	75,1
v_{ar} (m/s)	0,2	0,2	0,1	0,2	0,8
P_{max} (W)	36,0	34,9	34,1	32,2	28,3
e (%)	8,48	8,51	8,53	8,59	8,64

A eficiência elétrica média desse painel foi de 8,55 %. A potência elétrica máxima média, que é estimada pelo produto entre o rendimento elétrico e a energia disponível x área de captação solar é igual a 166 W.

Também foram feitas medições em um coletor plano, conforme a Tab.(4):

Tabela 4. Resultados para o Coletor Plano Convencional

	11:45	12:15	12:45	13:15	13:45
q_s (W/m ²)	961	948	933	906	816
m_a (kg/s)	0,00254	0,00255	0,00255	0,00250	0,00250
T_{amb} (C)	31,6	34,2	34,7	35,2	35,2
T_e (C)	26,9	27,6	27,9	27,4	27,4
T_s (C)	56,1	64,1	69,5	53,3	44,7
T_p (C)	77,0	78,6	80,7	75,3	68,4
v_{ar} (m/s)	1,1	1,1	0,9	1,1	0,2
E_{disp} (kJ)	1820	1800	1770	1720	1550
E_{abs} (kJ)	1110	1390	1580	970	648
η (%)	60,8	77,1	89,3	56,4	41,9

Para esse caso, o rendimento térmico médio foi de 65,1 % e a energia total absorvida foi 5690 kJ.

Para fins de aplicação doméstica no Rio de Janeiro, foi analisado um sistema série/paralelo composto de 10 coletores - Tab. (5), com cinco fluxos paralelos constituídos de dois coletores em série cada. Considerou-se que os primeiros coletores híbridos de cada ramo possuem rendimentos elétrico/térmico iguais, bem como os seguintes. As temperaturas de saída de cada um dos primeiros coletores em cada fluxo são iguais às temperaturas de entrada dos respectivos coletores seguintes, não havendo perdas ao longo do sistema. A vazão foi fixada em 105 litros/hora, de modo que em cada ramo ela corresponde à 21 litros/hora. As condições de radiação solar, temperaturas de entrada de água, ambiente e velocidades do vento foram as mesmas do coletor solar da Tab. (2).

Tabela 5. Resultados Sistema Série/Paralelo

η (%)	E_{abs} (kJ)	η_e (%)	P_{max} (W)	T_{inf} (C)	T_s (C)
69,9	117905	8,50	3108	85,2	60,6

onde : E_{abs} é a energia total absorvida pela água no intervalo considerado (11:45/13:45); P_{max} é a potência máxima acumulada no intervalo considerado; η e η_e são respectivamente os rendimentos térmico e elétrico médios no período; T_{inf} é a temperatura máxima alcançada no vidro inferior do painel fotovoltaico e T_s é a temperatura de saída da água do sistema série/paralelo.

5. Conclusões

Pelos gráficos comparativos, Figs. (10) a (16), observa-se a validade do modelo teórico. A partir dos resultados apresentados pelas Tabs. (2), (3) e (4), foi verificado que o maior benefício trazido com a opção híbrida diz respeito ao aumento do rendimento elétrico. Pode-se chegar a melhores resultados com um contato direto entre o sistema de arrefecimento com o painel fotovoltaico, porque foram observadas temperaturas no vidro inferior ainda altas. Com a presença apenas da transmissão de calor por condução, o arrefecimento é feito de uma maneira eficiente, evitando-se mais ainda pontos quentes, impedindo a destruição das células. Em contrapartida, o arranjo apresentado nesse texto tem melhor desempenho térmico. Deve-se então avaliar com cuidado para qual fim será utilizado o coletor.

6. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à CAPES – Projeto CAPES - COFECUB n 284/99 – 01- II.

7. Referências

- BEJAN, A., "Heat Transfer", John Wiley & Sons, Inc., 1993.
 FALKENBERG, Cibele V. e BASTOS, Leopoldo E. G., "Thermal Analysis of a Hybrid Solar Collector", World Renewable Energy Congress VI, 2000.
 HOLLANDS, K. G. T., UNNY, S. E., RAITHBY, G. D. e KONICEK, L., "Free Convective Heat Transfer Across Inclined Air Layers", J. Heat Transfer, 98, pp. 189, 1976.
 HOLMAN, Jack P. e GADJA JR., Walter J., "Experimental Methods For Engineers", McGraw-Hill, Inc., 1989.

- HOWELL, John R. , BANNEROT, Richard B. e VLIET, Gary C., “Solar Energy Systems – Analysis and Design”, McGraw-Hill, Inc., 1982.
- INCROPERA, Frank P. e DE WITT, David P., “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, John Wiley & Sons Inc., 1996.
- KRAUTER, S. E HANITSCH, R., “Actual Optical and Thermal Performance of PV Modules”, Solar Energy Materials and Solar Cells 41/42 –1996.
- ORGILL, J. F. e HOLLANDS, K. G. T., “Correlation Equation for Hourly Diffuse Radiation on a Horizontal Surface”, Solar Energy, vol. 19, n 4, pp. 357-359, 1977.
- WOLFRAM, Stephen, “Mathematica: a system for doing mathematics by computer”, 2nd Edition, Addison Wesley Publishing Company, Inc., 1991.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS FOR A HYBRID THERMAL-PHOTOVOLTAIC COLLECTOR

Paulo Henrique Mello de Oliveira

Escola de Engenharia – DEM/PEM – COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro
 Caixa Postal 68503 – CEP 21945-970 – Rio de Janeiro – RJ
paulo@ltdc.coppe.ufrj.br

Ênio Souza de Aguiar

Escola de Engenharia – DEM/PEM – COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro
 Caixa Postal 68503 – CEP 21945-970 – Rio de Janeiro – RJ
enio@ltdc.coppe.ufrj.br

Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos

Escola de Engenharia – COPPE/FAU – Universidade Federal do Rio de Janeiro
 Caixa Postal 68503 – CEP 21945-970 – Rio de Janeiro – RJ
leeurico@terra.com.br

Abstract. *The aim of this paper is to present a theoretical and experimental analysis performed for a solar hybrid collector composed by a photovoltaic collector assembled with an active cooling device (solar absorber and a serpentine cooling coil). The photovoltaic part is composed by a sandwich of three parallel layers: glass cover exposed to the solar rays, thin layer of photovoltaic cells, and on underside, a supporting glass sheet. The active cooling device follows this last glass layer, and can be placed in contact or not with it. This thermal system is a black painted copper flat plate absorber having coupled with an welded serpentin tube. Inside this copper tube, water is made to flow under a constant rate and in the laminar regime. The theoretical model considers at each time intervals of 30 minutes (when solar irradiation is almost constant), a steady state thermal balance by conduction for this set of parallel layers. The Poisson equation is considered for the photovoltaic layer cells where heat and electricity are generated. The Laplace equation are considered for the other layers. The boundary conditions assume at each layer interface an identity of temperature and heat flux. The solution for this theoretical model was obtained by means of the software MATHEMATICA. For the hybrid solar collector are determined: the temperature of the several layers, inlet and outlet temperatures, heat fluxes and thermal and photovoltaic efficiencies. Also, is analysed a system of 10 collectors in series-parallel, if it is required a home application in Rio de Janeiro. Also, an experimental model (a collector of 0,5 m² was tested under the local conditions, being presented the obtained temperatures and efficiencies. A comparison of these experimental results with those from the theoretical model are presented.*

Keywords: Solar Energy, PVT Collector, Hybrid Thermal-Photovoltaic Collector