



**COBEM 81**  
VI CONGRESSO BRASILEIRO DE  
ENGENHARIA MECANICA

RIO DE JANEIRO, 15 - 18 de dezembro de 1981



TRABALHO  
PAPER

N.º A-2

p.p. 15 - 25

PUC/RJ

A EFICIÊNCIA TÉRMICA DE COLETORES PLANOS DE  
ENERGIA SOLAR

Benedito Dias Baptista Filho  
Engenheiro, Pesquisador  
Centro de Engenharia Nuclear  
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares  
São Paulo - SP - Brasil

SUMÁRIO

Foram desenvolvidos alguns modelos numéricos para simular a operação dos principais tipos de coletores planos de energia solar. É discutido brevemente um dos modelos elaborados. É analisada a variação da eficiência térmica instantânea de alguns coletores em função de alguns parâmetros de projeto cuja análise experimental é inviável. Dados experimentais disponíveis de um coletor foram previstos com alta precisão por um dos modelos. São apresentados alguns resultados que permitem algum conhecimento necessário para a avaliação da qualidade de diferentes projetos de coletores planos.

SUMMARY

Several models have been developed to simulate the thermal performance of the main types of flat-plate solar collectors. An elaborate model is briefly discussed. The variation of the instantaneous thermal efficiency is investigated as a function of several design parameters which experimental study is economically not feasible. Calculated results present a good agreement with available experimental data. The results also provide a guidance to evaluate the quality of the different types of design of plate collectors.

## 1. Introdução

A utilização de coletores planos de energia solar, para qualquer que seja sua aplicação, pode propiciar uma substancial economia de óleo combustível, gás ou eletricidade, dependendo porém da qualidade e desempenho do projeto considerado. Por isso, uma série de cuidados devem ser tomados na escolha de um coletor solar, principalmente no que se refere à "qualidade do projeto", o que vai além da qualidade dos materiais utilizados na sua confecção .

Os coletores solares, já sujeitos à concorrência de mercado no Brasil, requerem de imediato uma orientação técnica à comunidade através de dados que caracterizem o seu desempenho. Os principais grupos de pesquisa em energia no Brasil têm se preocupado com o estabelecimento de normas e padrões de testes de bancada dos coletores planos, tendo sido realizados diversos encontros com a finalidade de se sugerir uma política normativa desses equipamentos. Os testes de coletores porém, envolvem um considerável dispêndio de tempo, inviabilizando qualquer tentativa de se correlacionar o desempenho com todos os parâmetros de um dado projeto. Resta assim uma lacuna que somente pode ser preenchida com a utilização de modelos numéricos como forma de acoplamento de correlações gerais que representem todos os mecanismos de conversão e transferência de energia existentes em um coletor solar .

O objetivo deste trabalho é a exposição resumida de um modelo teórico para a simulação de um coletor plano e, a apresentação de alguns resultados que correlacionam o desempenho do coletor com alguns parâmetros de projeto cuja análise experimental é inviável [1,2] .

## 2. Considerações Teóricas

Como consideração inicial vamos introduzir a denominada eficiência térmica instantânea de um coletor ( $\eta$ ), definida pela razão entre o calor útil retirado pelo fluido de trabalho ( $Q_u$ ) e a potência luminosa incidente ( $W_i$ ) .

$$\eta = Q_u / W_i \quad (1)$$

Pode-se provar que essa eficiência é uma função do projeto do coletor, da diferença de temperaturas entre o fluido ( $T_f$ ) e ambiente ( $T_{amb}$ ) e da intensidade da radiação solar total no plano do cole-

tor (I) |3|. Assim, foi padronizado um diagrama de desempenho que correlaciona a eficiência com uma diferença de temperaturas normalizada em relação à radiação solar, definida na forma da Equação (2).

$$T^* = \frac{(T_f - T_{amb})}{I} \quad (2)$$

Esse diagrama de desempenho é construído através da avaliação experimental de uma considerável amostragem de pares  $(\eta, T^*)$ , obtidos sob condições de estado estacionário |4|, o que requer um grande dispêndio de tempo e trabalho .

Nesta seção do trabalho, vamos exemplificar a elaboração de um modelo teórico para a avaliação numérica do diagrama de desempenho de um coletor, mostrando as equações representativas de seu funcionamento. Para tanto, vamos analisar o mecanismo de operação de um coletor, como mostra a Figura 1 .

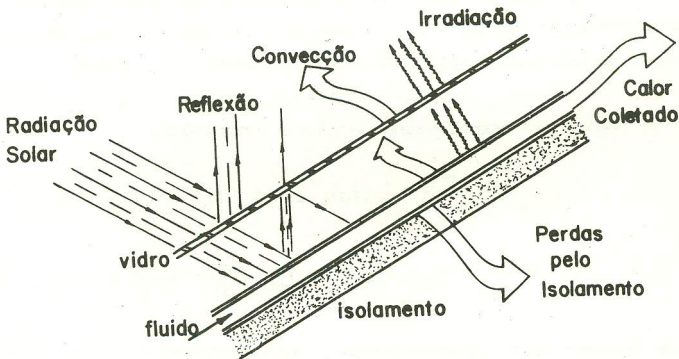


Figura 1 - Coletor Solar - Mecanismo de funcionamento .

Podemos notar nessa Figura que a energia útil coletada é a diferença entre a energia solar incidente e as parcelas de reflexão, perdas por irradiação, por convecção do ar aprisionado e ar atmosférico e por condução através do isolamento inferior. Com essas considerações podemos elaborar um modelo geral, baseado em balanços térmicos de estado estacionário em cada região de um trecho representativo de um coletor como por exemplo o ilustrado na Figura 2 .

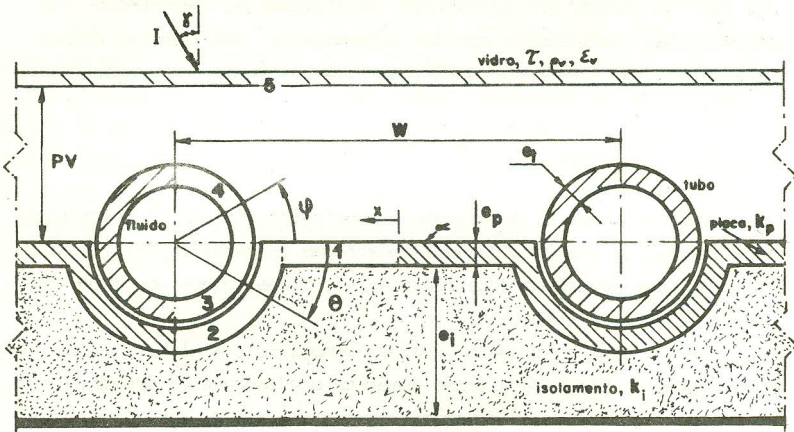


Figura 2 - Coletor Solar - Modelo Geometria I

As equações que representam os mecanismos de transferência de calor em cada uma das regiões indicadas na Figura 2 (cuja demonstração não é objeto deste trabalho), são apresentadas a seguir :

a) Região 1 - Parte plana da placa absorvedora

$$\begin{aligned}
 & k_p e_p \frac{d^2 T_p}{dx^2} + (\tau\alpha)_\gamma I - h_a (T_p - T_v) - \\
 & - \frac{k_i}{e_i} (T_p - T_{amb}) - \sigma F_{pv} (T_p^4 - T_v^4) = 0 \quad (3)
 \end{aligned}$$

onde os índices p, v e i referem-se respectivamente à placa, vidro e isolamento; T é a temperatura absoluta,  $\gamma$  é o ângulo de incidência solar; k a condutividade térmica; e a espessura;  $(\tau\alpha)$  o produto da absorptividade da placa pela transparência do vidro efetivos [3],  $h_a$  o coeficiente de transferência de calor por convecção natural do ar aprisionado [5];  $\sigma$  a constante de Stefan-Boltzman e  $F_{pv}$  um fator de forma para irradiação da placa para o vidro. Os termos definidos da esquerda para a direita representam respectivamente a condução de calor na placa; a conversão e absorção da luz; a transferência de calor por convecção, por condução no isolamento e por irradiação .

b) Região 2 - Parte curva da placa (acoplamento)

$$\frac{2}{(2r_e + e_p)} k_p e_p \frac{d^2 T_p}{d\theta^2} - \frac{k_i}{e_i} (r_e + e_p) (T_p - T_{amb}) - h_g r_e (T_p - T_t) = 0 \quad (4)$$

onde  $r_e$  é o raio externo do tubo;  $h_g$  a condutância de contato entre o tubo e a placa  $|\theta|$  e  $T_t$  a temperatura absoluta na parede do tubo .

c) Região 3 - Parte inferior do tubo (contato com a placa)

$$\frac{2 k_t e_t}{(2r_e - e_t)} \frac{d^2 T_t}{d\theta^2} + h_g r_e (T_p - T_t) - h_f r_i (T_t - T_f) = 0 \quad (5)$$

onde os índices t e f referem-se respectivamente ao tubo e fluido,  $h_f$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção do tubo para o fluido e  $r_i$  é o raio referente à superfície interna do tubo .

d) Região 4 - Parte superior do tubo

$$\frac{2 k_t e_t}{(2r_e - e_t)} \frac{d^2 T_t}{d\phi^2} + (\tau\alpha)_Y I r_e \cos \phi - r_e \sigma F_{tv} (T_t^4 - T_v^4) - r_e h_a (T_t - T_v) - r_i h_f (T_t - T_f) = 0 \quad (6)$$

onde  $F_{tv}$  é um fator de forma para irradiação do tubo para o vidro .

e) Região 5 - Cobertura de vidro (caso de uma cobertura)

$$\alpha_v I + \sigma F_{pv} (T_p^4 - T_v^4) + h_a (T_{p,t} - T_v) - R \epsilon_v \frac{(1 - \cos\beta)}{2} - h_v (T_v - T_{amb}) = 0 \quad (7)$$

onde R é o valor líquido da energia irradiada para o céu por uma superfície horizontal;  $\epsilon_v$  é a emissividade do vidro;  $\beta$  o ângulo de inclinação do coletor em relação ao plano horizontal e  $h_v$  o coeficiente

de transferência de calor por convecção do ar atmosférico [3].

Essas equações foram transformadas em um sistema de equações algébricas não-lineares pelo método das diferenças finitas. O modelo foi discretizado e as equações de diferenças escritas para todas as células do modelo em uma forma linearizada. A solução do sistema resultante, segundo um procedimento iterativo, fornece a distribuição das temperaturas e portanto do fluxo de calor para o fluido de trabalho para dadas condições de temperatura do fluido e ambiente e intensidade da radiação solar, determinando assim a eficiência térmica instantânea do coletor. Analogamente a este exemplo, foram elaborados outros modelos para outros tipos de coletores planos, a serem apresentados na íntegra em uma publicação futura.

No capítulo seguinte vamos comentar alguns resultados obtidos que podem fornecer importantes informações sobre a influência de alguns parâmetros de projeto no desempenho dos coletores planos.

### 3. Resultados

Inicialmente vamos comparar os diagramas de eficiência de um coletor da IEA ("International Energy Agency") obtidos experimentalmente na KFA ("Kernforschungsanlage Jülich GmbH", Alemanha) [7] com os resultados obtidos numericamente através de um dos modelos desenvolvidos (Figura 3).

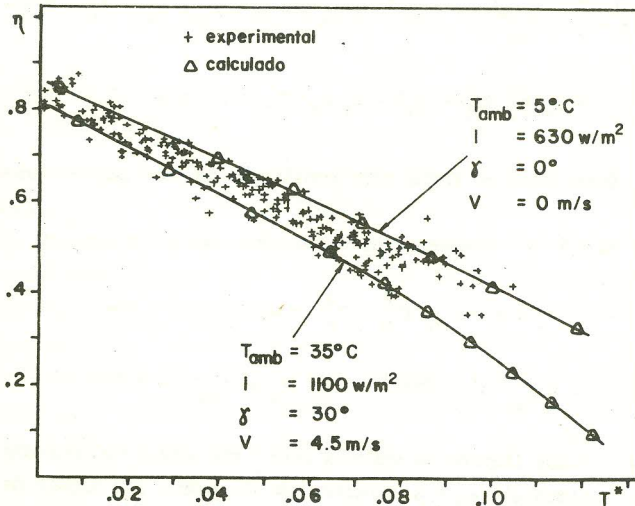


Figura 3 - Comparação com resultados experimentais.

Nota-se o perfeito ajuste dos resultados teóricos com os dados experimentais. Os desvios estão dentro dos erros experimentais de medida. A seguir vamos resumir alguns resultados obtidos com a variação dos principais parâmetros de projeto de alguns coletores de geometria análoga à apresentada na Figura 2 .

Na Figura 4 observamos a variação da eficiência térmica de um coletor do tipo I com a relação espaçamento / diâmetro dos tubos .

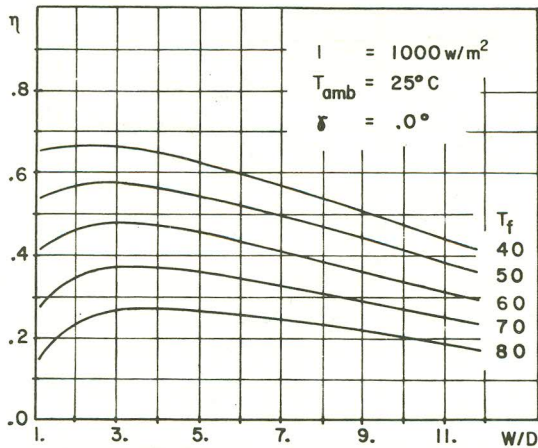


Figura 4 - Diagrama  $\eta$  vs ( $W/D$ ) .

Deve-se notar o aumento da eficiência com a relação  $W/D$  até ser compensado o efeito de menor absorção na curvatura do tubo a partir daonde se inicia o declínio provocado pelo aumento da temperatura da placa e consequente aumento das perdas para o ambiente. Nota-se também a acentuação desse efeito com o aumento da temperatura do fluido, principalmente por ter sido considerado um material de relativamente baixa condutividade térmica (aço) como exemplo ilustrativo. É evidente que a utilização de cobre ou alumínio na confecção das placas e tubos é mais vantajosa, principalmente no que refere à durabilidade, mas também, uma simples comparação das propriedades desses metais conduz à mesma escolha ( $k_{\text{aço}} \approx 40-50 \text{ w/m.k}$ ;  $k_{\text{al}} \approx 200 \text{ w/m.k}$  e  $k_{\text{cu}} \approx 220-300 \text{ w/m.k}$ ). Fora o espaçamento entre tubos e a condutividade térmica dos metais, um outro fator responsável pelo nível de temperatura da placa é a resistência no acoplamento da placa com o tubo.

Este fator dependente de considerações de materiais, pressão de contato e grau de oxidação [6], pode ser analisado na comparação entre um coletor de concepção idêntica à da Figura 2 com um coletor de mesmos materiais e espaçamento entre tubos mas considerando-se um contato perfeito (tubo perfeitamente soldado à placa). A Figura 5 mostra as curvas de eficiência para um coletor aonde foi considerada uma resistência de contato (curva 1) e para um coletor com tubo soldado à placa (curva 2) .

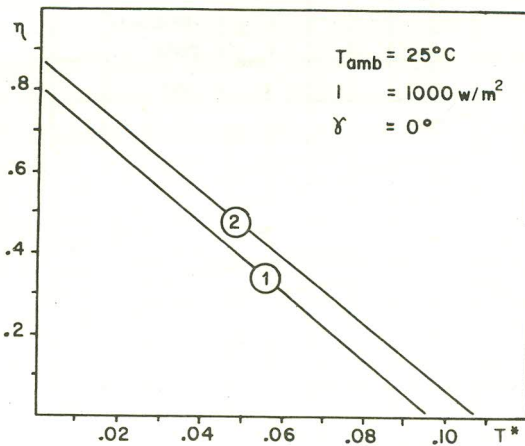


Figura 5 - Influência do acoplamento placa/tubo .

Nota-se pelos diagramas da Figura 5 a nítida vantagem da utilização de um bom acoplamento da placa ao tubo. Convém destacar que o modelo aqui representado pela Geometria I refere-se a um tipo de ajuste placa/tubo de concepção ultrapassada mas ainda muito utilizada em todo o mundo. Melhores eficiências são atingidas com o uso de placas extrudadas ("roll-bond") aonde placa e tubo formam um único conjunto. Em seguida vamos analisar alguns dos fatores ligados à convecção natural do ar aprisionado entre a placa e o vidro. Sabe-se que o coeficiente de convecção ( $h_a$  das equações 3, 6 e 7) é uma função da inclinação do coletor, da diferença de temperaturas entre a placa e a cobertura de vidro e da distância placa/vidro (PV) [5] . Uma vez que a inclinação do coletor é determinada por considerações geográficas, vamos analisar os resultados obtidos com a variação



da distância PV e com a utilização de duas placas de vidro (Figura 6) .

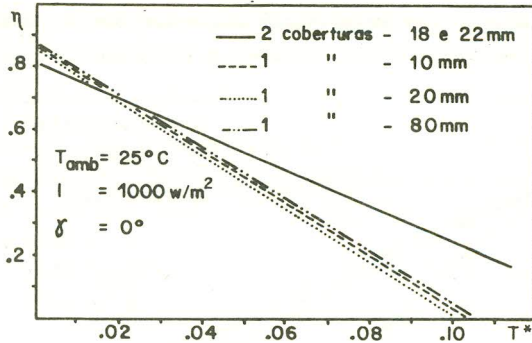


Figura 6 - Influência da distância placa/vidro e do número de coberturas de vidro .

Como pode ser notado, o espaçamento PV modifica ligeiramente a curva de eficiência mas, ao contrário do que se indica em alguns trabalhos da literatura, a utilização de uma distância da ordem de 7 a 8 cm não se apresenta compensadora, principalmente por considerações construtivas. Por outro lado, a utilização de duas coberturas resulta em ampla vantagem nas condições de maiores temperaturas .

Considerando-se agora as perdas por condução no isolamento inferior, convém relatar que em todos os exemplos estudados notamos uma alta influência na declividade dos diagramas  $\eta$  vs  $T^*$ . Notamos também que essa influência se torna quase desprezível à partir de condutâncias superiores à  $1. w/m^2.k$  (4-5 cm de isolamento de fibras), quando as outras perdas são muito maiores. Conclui-se ser muito importante o estudo detalhado do tipo e condutância econômica do isolamento uma vez que ele pode representar uma considerável parcela no custo e desempenho dos coletores .

Finalmente, vamos considerar as perdas por irradiação que, representam uma das maiores limitações na obtenção de altas temperaturas em coletores planos. As tintas pretas normalmente utilizadas possuem uma alta absorptividade ( $\alpha \approx 93-95\%$ ) porém, possuem também uma alta emissividade ( $\epsilon \approx 92\%$ ). Por outro lado, as denominadas superfícies seletivas apesar de possuírem uma boa absorptividade ( $\alpha \approx 90\%$ ) emitem muito pouco na faixa de luz infravermelha ( $\epsilon \approx 8-20\%$ ) . Essas

superfícies têm sido muito investigadas [8] e muitas considerações foram feitas principalmente em relação às superfícies obtidas pela eletrodeposição de cromo (cromo-negro), níquel e óxido de cobre. A Figura 7 mostra as curvas de eficiência de um coletor considerando se superfícies de cromo, óxido e cobre e tinta preta.

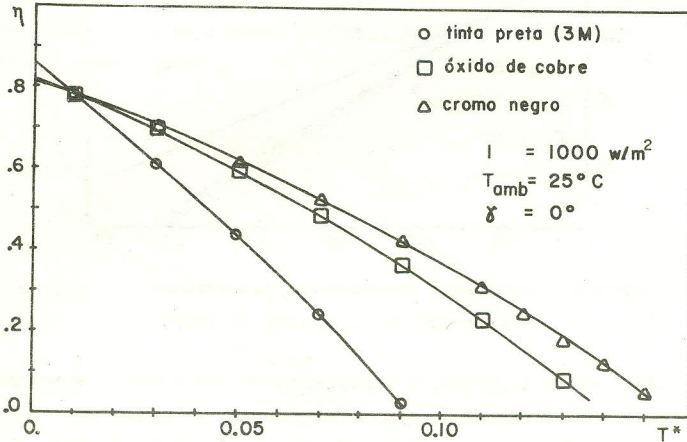


Figura 7 - Comparação entre superfícies absorvedoras.

Nota-se a nítida vantagem das superfícies seletivas, principalmente o cromo-negro que além disso tem mostrado uma maior resistência às condições de alta umidade que as demais superfícies.

#### 4. Conclusões

Os modelos numéricos desenvolvidos permitem a avaliação da influência de diversos parâmetros de projeto na eficiência térmica instantânea dos coletores planos de energia solar o que em muitos casos é inviável de se obter experimentalmente.

Um dos modelos reproduziu com alta precisão as curvas de desempenho de um coletor testado experimentalmente. Como os modelos desenvolvidos são baseados em correlações empíricas gerais e os métodos numéricos empregados permitem uma alta precisão na solução das equações de condução, pode-se esperar a mesma ordem de precisão dos outros modelos.

Os resultados aqui representados já permitem um certo grau de conhecimento para a avaliação do projeto de um coletor solar.

REFERÊNCIAS

- [1] Baptista F9, B.D., Considerações sobre a eficiência Térmica de Coletores Planos de Energia Solar, Anais do II Simpósio sobre Energia Solar, Academia de Ciências do Estado de São Paulo, out. 1980 .
- [2] Baptista F9, B.D., Programa de Energia Solar no IPEN, Anais do II Simpósio sobre Energia Solar, Academia de Ciências do Estado de São Paulo, out. 1980 .
- [3] Tabor, H., "Testing of Solar Collectors", Solar Energy, vol. 20 pp 293-303; 1978 .
- [4] ASHRAE Standard 93-77, "Methods of Testing to determine the Thermal Performance of Solar Collectors", ASHRAE, 345 East 47 th Street, New York, N.Y. 10017, 1977 .
- [5] Hollands, K.G.T.; Unny, T.E.; Raithby, G.D. and Konicek, L. "Free Convective Heat Transfer Across Inclined Air Layers", Journal of Heat Transfer, Trans. ASME, pp 189-193, May 1976 .
- [6] Boeschoten, F. and Van Der Held, E.F.M., "The Thermal Conductance of Contacts between Aluminium and other Metals", Physica, vol. XXIII, pp 37-44; 1957 .
- [7] Talarek, H.D., "Testing of Liquid-Heating Flat-Plate Collectors Based on Standard Procedures", KFA - Interner Bericht, KFA-IKP-IB - 4/79, Jülich, Dez. 1979 .
- [8] Willrath, H. and Gammon, R.B. "The Measurement of Optical Properties of Selective Surfaces using a Solar Calorimeter" Solar Energy, Vol. 21, pp 193-199; 1978 .