

CONSIDERAÇÕES SOBRE A EFICIÊNCIA DE COLETORES PLANOS DE ENERGIA SOLAR

Benedito Dias Baptista Filho

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

INTRODUÇÃO

É um fato conhecido que a energia solar radiante requer um alto investimento em equipamentos necessários para a sua transformação e armazenamento em qualquer forma de energia utilizável diretamente. A sua conversão direta em energia elétrica ainda não pode concorrer com as outras fontes energéticas sendo somente utilizada em campos remotos onde a ausência ou inviabilidade de outras fontes e a necessidade de uma autonomia completa justificam o alto investimento necessário. Por outro lado, a sua conversão térmica, através de coletores planos ou concentradores, para diversas aplicações, principalmente à baixas temperaturas (até 120°C) é plenamente difundida. A utilização dessa energia térmica para a produção de trabalho mecânico, ainda está longe de ser compensável principalmente por envolver altas temperaturas e a inclusão de dois novos termos: a eficiência de um ciclo termodinâmico e a necessidade de equipamentos altamente onerosos ocupando enormes áreas. Assim, podemos dizer que atualmente, a energia solar é economicamente aproveitada com a utilização de coletores planos, acoplados à sistemas de aquecimento convencionais, permitindo uma substancial economia de óleo combustível, gás ou eletricidade. Isso deve-se ao fato de que a conversão térmica em coletores planos envolve um mecanismo de funcionamento extremamente simples e, as técnicas até hoje aperfeiçoadas, resultam em um econômico aproveitamento da energia solar, em baixas temperaturas, apesar do considerável investimento nesses equipamentos.

Durante o desenvolvimento histórico dos coletores planos, principalmente nas últimas décadas, muitos pesquisadores procuraram correlacionar os parâmetros envolvidos no desempenho desses equipamentos e, desenvolver técnicas que permitissem o máximo aproveitamento da energia incidente. Infelizmente, a saber, nenhum trabalho da Literatura apresenta o efeito da variação simultânea desses parâmetros no desempenho *global* de um coletor. Também, muitos parâmetros de extrema importância ainda não foram correlacionados ou se foram, permanecem como segredos industriais.

O objetivo deste trabalho foi a identificação e coordenação desses fatores, de forma a se poder otimizar coletores planos de acordo com a sua utilização, na tentativa de se oferecer a quem interessar, uma visão real do projeto de coletores para finalidades específicas. Para tanto, foram elaborados alguns programas de computador que permitem, de uma forma bastante precisa e econômica, a simulação de alguns tipos de coletores planos.

Considerações Teóricas:

Especificamente para efeito de comparações, vamos considerar a denominada "eficiência térmica instantânea" de um coletor plano, definida pela razão entre a energia retirada pelo fluido operante (\dot{E}_c) e a energia solar total (direta + difusa) incidente no plano do coletor por unidade de tempo (\dot{E}_i):

$$\eta = \frac{\dot{E}_c}{\dot{E}_i} \quad (1)$$

Para melhor visualização, analisemos o mecanismo de operação de um coletor plano de energia solar (Figura 1).

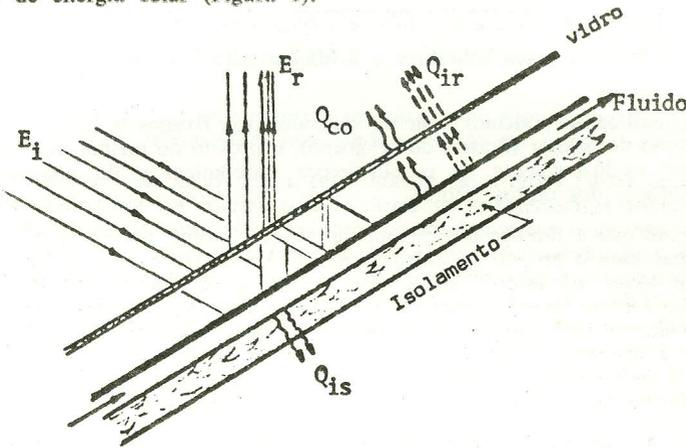


FIG. 1 — Esquema de operação de um coletor plano.

Nesse esquema, podemos observar que a energia coletada é a diferença entre a energia incidente e mais quatro parcelas de perdas:

$$\dot{E}_c = \dot{E}_i - \dot{E}_r - Q_{ir} - Q_{co} - Q_{is} \quad (2)$$

onde os novos termos definidos são:

- \dot{E}_r — energia refletida na cobertura e placa
- Q_{is} — fluxo de calor através do isolamento térmico
- Q_{ir} — fluxo de calor por irradiação
- Q_{co} — fluxo de calor por convecção do ar

Dessa forma podemos distinguir e classificar claramente todos os fatores que determinam a eficiência do coletor:

1.º — Fatores Climáticos e de utilização:

Decorrentes da Latitude, altitude e demais condições ambientes e requisitos de operação:

- 1.1. — Intensidade da radiação solar total.
- 1.2. — Temperatura ambiente.
- 1.3. — Velocidade do ar (ventos).
- 1.4. — Temperatura e regime de escoamento do fluido de trabalho.

2.º — Fatores Físicos (materiais):

Decorrentes das propriedades físicas dos materiais empregados:

- 2.1. — Transmitância, reflectância e emissividade da cobertura de vidro.
- 2.2. — Absortividade e emissividade da superfície de absorção.
- 2.3. — Condutividade térmica dos materiais da placa e dos tubos de ascensão.
- 2.4. — Condutância térmica do isolamento inferior.

3.º — *Fatores Geométricos:*

Decorrentes de considerações de projeto e econômicas:

- 3.1. — Tipo da placa de absorção e do acoplamento placa/tubo.
- 3.2. — Espessuras da placa e tubo e espaçamento entre tubos.
- 3.3. — Distância placa/cobertura e artifícios para reduzir a convecção natural.

Dessa classificação podemos concluir que uma vez fixados o local e finalidade de utilização do coletor (fatores do 1.º grupo), o projeto do melhor equipamento vai depender exclusivamente de considerações econômicas e do conhecimento real da influência dos outros fatores.

É evidente que a simulação experimental desses fatores, na busca de correlações empíricas para o projeto de coletores seria dispendiosa e lenta além do que, praticamente todos os fatores envolvidos já foram correlacionados individualmente. Dessa forma, foram equacionadas rigorosamente algumas geometrias diferentes de coletores, utilizando-se as correlações empíricas disponíveis na literatura e, simulada a operação desses equipamentos em um computador IBM/370 Modelo 155. Os detalhes desse trabalho não serão apresentados no presente artigo, sendo posteriormente editados na forma de uma publicação do IPEN.

Antes de se apresentar alguns resultados obtidos é conveniente definir uma variável auxiliar (T^*) ("Standard" 93/77 da ASHRAE):

$$T^* = (T_f - T_{amb})/I \quad (3)$$

onde os termos definidos são:

T_f : temperatura do fluido — (°C)

T_{amb} : temperatura ambiente — (°C)

I : intensidade da radiação solar no plano do coletor — (W/m²)

Para o teste de um coletor plano, que possua propriedades da cobertura e da superfície de absorção constantes com a temperatura, a plotagem da eficiência instantânea com essa variável (η_i Vs. T^*), resulta aproximadamente em uma reta que permite a obtenção da eficiência dadas as condições ambientes e, cuja intersecção com o eixo horizontal (T^*), determina a temperatura máxima de operação do coletor, denominada "temperatura de estagnação" ($i_1 = 0$).

Vamos a seguir, analisar alguns resultados obtidos.

RESULTADOS:

Inicialmente vamos estudar o efeito da variação de algumas características em um coletor do tipo ilustrado na Figura 2.

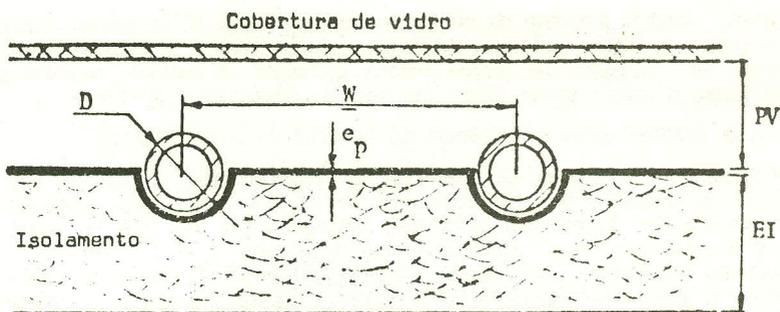


FIG. 2 — Coletor — Geometria 1

Devemos notar que esse exemplo refere-se a um tipo de placa e ajuste placa/tubo de concepção ultrapassada mas ainda utilizado em muitas partes do mundo.

Não só para essa geometria, o espaçamento entre tubos (W) é um dos fatores de maior influência no coletor pois, é diretamente responsável pela temperatura média da placa de absorção para uma dada temperatura do fluido operante. Normalmente é utilizado um espaçamento excessivo, visando uma redução no número de tubos para uma dada largura do coletor o que, acarreta em uma elevação na temperatura média da placa e portanto, nas perdas para o ambiente. A Figura 3 mostra a variação da eficiência global do coletor indicado com a variação da relação W/D .

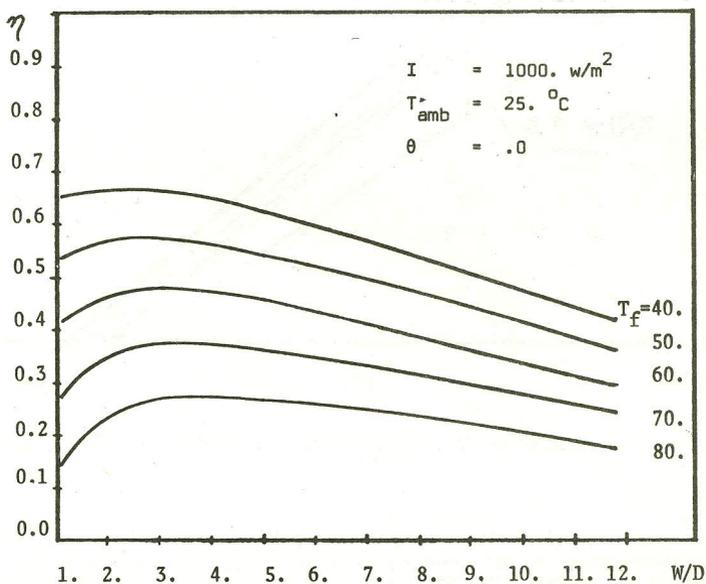


FIGURA 3 — Diagrama η Vs. W/D .

Deve-se notar o aumento da eficiência com a relação W/D até ser compensado o efeito de menor absorção do tubo a partir daonde se inicia o declínio provocado pelo aumento das perdas para o ambiente. É evidente também que o efeito dessa relação é maior com o aumento da temperatura do fluido.

Vamos analisar agora a influência do material da placa coletora.

Normalmente as placas de absorção dos coletores são construídas ou de cobre, ou de alumínio ou "simplesmente" de aço. As implicações inerentes à esses materiais se apresentam evidentes, principalmente no que se refere a custo e durabilidade. Aqui somente vamos considerar o efeito das diferentes propriedades dos metais, mais ainda, totalmente isentos de dados de oxidação. A Figura 4 mostra os diagramas de η Vs. T^* para seis coletores geometricamente idênticos, simulados sob as mesmas condições, diferindo apenas no material e espessura da placa e nas relações W/D .

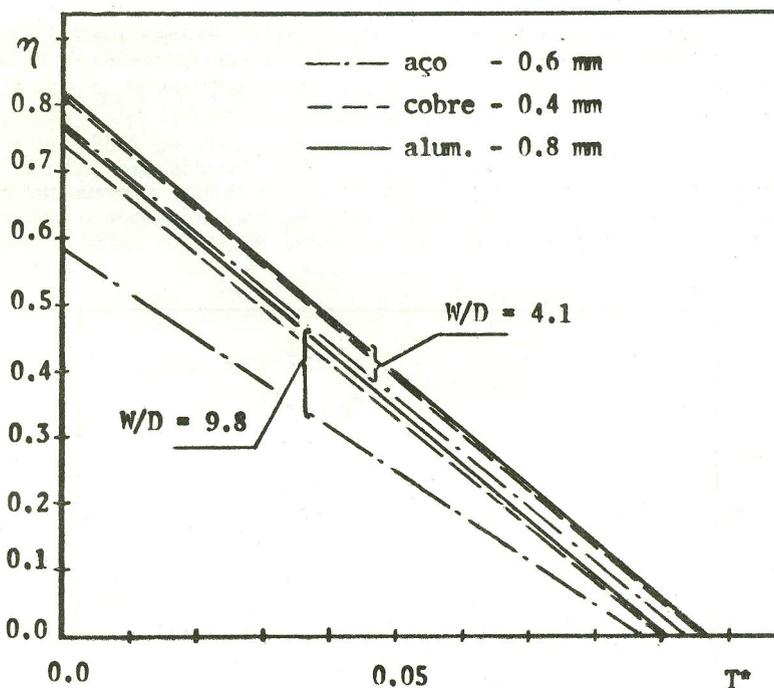


FIGURA 4 — Diagramas de eficiência para placas de aço, cobre e alumínio.

Nota-se que a condutividade térmica (inerente ao material) é extremamente importante, principalmente na comparação entre o aço e os outros metais considerados em altas relações W/D . Isso não significa entretanto a impraticabilidade de coletores com placas de aço, mesmo porque, alguns tipos de aço permitem a fácil obtenção de superfícies seletivas e, existem coletores construídos com pla-

cas de aço inox extrudado ("Roll bond") operando sob condições extremamente adversas, com altas eficiências, atingindo temperaturas de até 170°C.

Em seqüência, vamos analisar um dos fatores responsáveis por uma das maiores perdas em médias e altas temperaturas, a convecção natural do ar aprisionado entre a placa e a cobertura de vidro. Muitos pesquisadores já se preocuparam com esse problema, inclusive determinando correções experimentais para a transferência de calor entre placas paralelas com inclinação variável.

Pode-se observar em todos os trabalhos encontrados na literatura que o mecanismo de transferência de calor nessas condições, é altamente influenciado pela distância da placa à cobertura, pela inclinação do coletor e pela diferença de temperaturas entre a placa e o vidro. Para o presente estudo, vamos apenas considerar um coletor comum, como descrito na Figura 2, sem superfície seletiva e, operando com uma inclinação de 30° em relação à horizontal, sob uma intensidade de radiação solar de 1000 W/m² e temperatura ambiente $T_a = 25^\circ\text{C}$. Ao invés de se analisar somente o fluxo de calor por convecção, vamos analisar o seu efeito na eficiência global desse coletor, através da variação na distância placa/vidro (PV) como mostra a Figura 5.

Como pode-se notar nessa figura, esse espaçamento modifica sensivelmente a curva de eficiência do coletor mas, ao contrário do que se indica em diversos trabalhos da literatura, a utilização de um espaçamento em torno de 4 a 8 cm, não traria tantos benefícios, principalmente pelo aumento da área sombreada e, conseqüente redução na área útil do coletor. Assim, creio podermos considerar bom, um espaçamento da ordem de 4 cm, e não muito superior a esse valor.

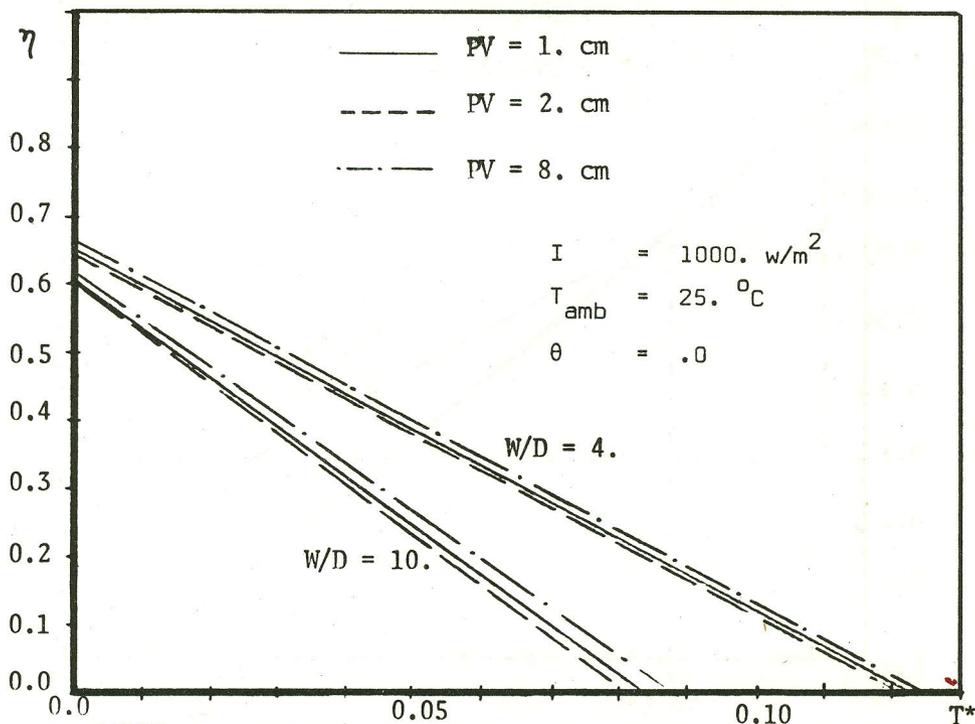


FIGURA 5 — Influência do espaçamento placa/vidro.

Dessa forma, para se reduzir efetivamente a perda de calor por convecção, devemos apelar à outros artifícios. Classicamente, utilizam-se duas coberturas de vidro ou então barreiras para se impedir a convecção ("honeycomb"). A Figura 6 ilustra a variação da curva de eficiência obtida pelo acréscimo de uma placa de vidro ao coletor indicado.

Nota-se evidentemente a vantagem obtida em altas temperaturas. Para as condições indicadas, a temperatura de estagnação aumenta de 135°C (uma cobertura) para aproximadamente 170°C (duas coberturas). Nota-se também aí, que a utilização de duas coberturas só é interessante à partir de um certo valor da temperatura do fluido.

Considerando-se agora a parcela de energia perdida para o ambiente, através do isolamento térmico inferior, vamos concluir que a sua influência prende-se exclusivamente à considerações econômicas: quanto maior a espessura do isolamento, maior o investimento necessário. É evidente porém a sua importância. Cada coletor, dependendo de seu projeto e finalidade, merece um estudo detalhado na determinação do tipo e condutância econômica do isolamento. Uma vez que a influência desse isolamento na eficiência do coletor aumenta com a diferença entre a temperatura da placa e ambiente e, é muito pequena em baixas temperaturas, vamos comparar o efeito da condutância de um isolamento do tipo fibras ($K \cong 0.045 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$) na temperatura de estagnação de um dado co-

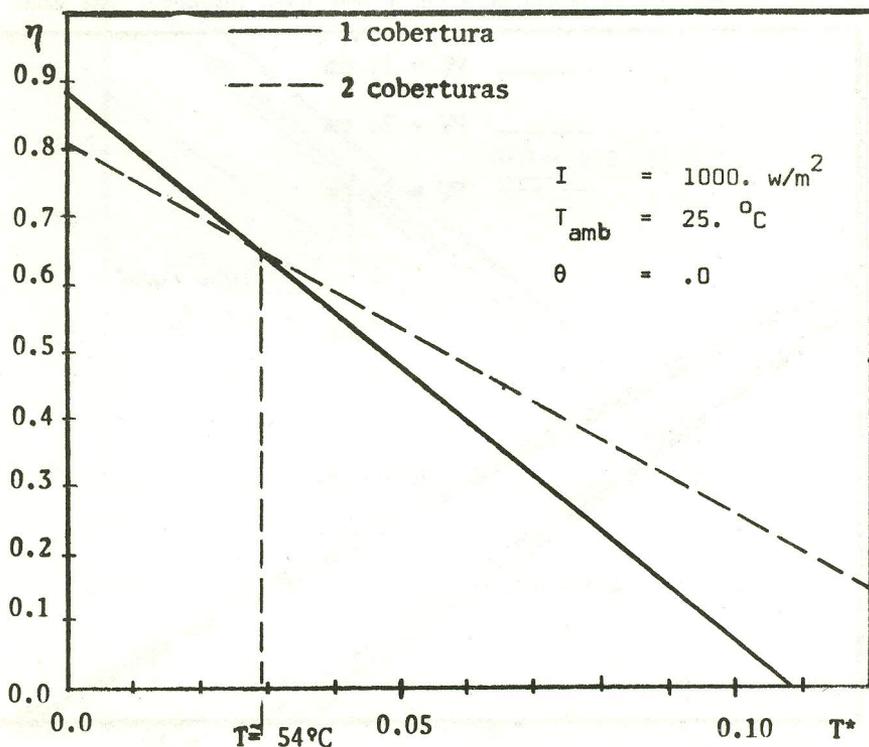


FIGURA 6 — Comparação da eficiência para uma e duas coberturas de vidro.

letor. A Figura 7 mostra a variação da temperatura de estagnação com a variação na espessura do referido isolante, portanto, com a variação de sua condutância (K_i/e_i).

Nota-se na Figura 7 que a existência do isolamento é imprescindível porém, sendo praticamente desnecessária a utilização de isolamentos com espessuras maiores do que 4 ou 5 cm (entre 0.9 e 1.1 $W/m^2 \text{ } ^\circ C$), para as condições mencionadas. Este é apenas um exemplo da importância do estudo detalhado do isolamento térmico como uma função da utilização de um coletor, uma vez que este isolamento representa um grande investimento na construção do equipamento.

Com referência às propriedades da superfície de absorção e da cobertura de vidro, como já foi comentado, são responsáveis por uma boa parte da energia perdida para o ambiente. Uma considerável parcela da energia luminosa incidente é refletida na cobertura de vidro. Da parcela que atravessa o vidro, uma pequena parte é refletida difusamente na placa e, a restante, convertida em calor. A partir daí, já comentamos as perdas por condução através do isolamento e por convecção do ar, restando apenas a parcela reemitida sob a forma de radiação infravermelha (irradiação). Esta última, que aumenta com a diferença das quartas potências das temperaturas absolutas das superfícies de reirradiação (no caso, placa/vidro e vidro/céu) é, juntamente com a convecção do ar, a grande barreira para a obtenção de altas temperaturas de operação. As superfícies "negras" comuns (tintas) possuem uma boa absortividade ($\tau_c \cong 93\%$) porém, carregam também como uma propriedade indesejável, uma alta emissividade infra-vermelha ($\epsilon \cong 92\%$). Dessa forma é evidentemente indiscutível a necessidade de se uti-

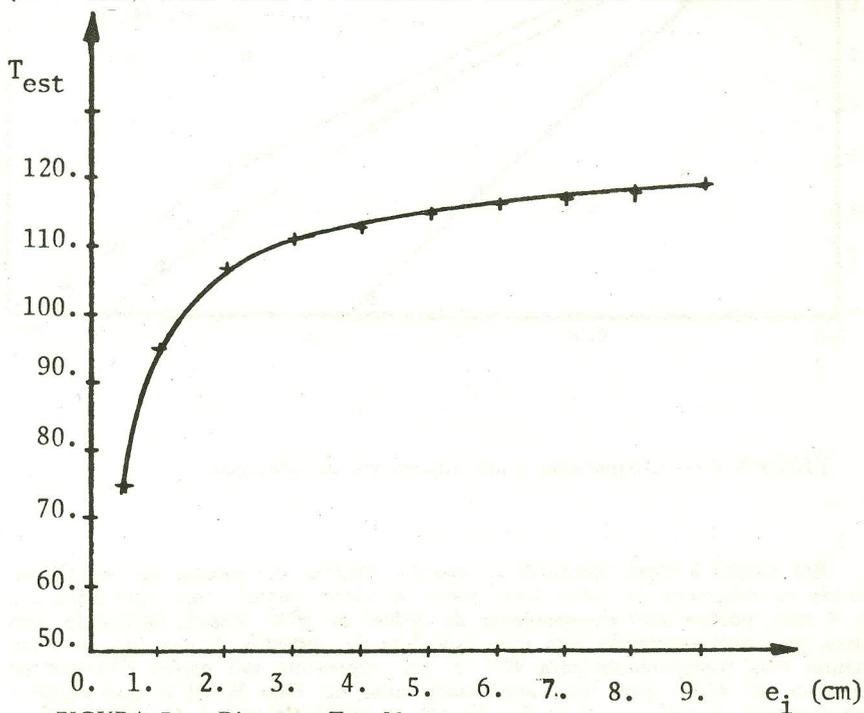


FIGURA 7 — Diagrama Test Vs. e_i .

lizar superfícies seletivas de absorção ou seja, que além de possuírem uma ótima absorvidade ($\alpha \cong 90$ a 95%), emitem muito pouco na faixa infra-vermelha ($\epsilon \cong 8$ a 20%). Essas superfícies, facilmente obtidas principalmente pela electrodeposição de óxidos de alguns metais (cromo, níquel e cobre), não iriam encarecer sensivelmente o custo dos coletores mas, permitiriam a sua utilização com eficiências muito superiores em médias e altas temperaturas, portanto para uma maior gama de aplicações. A Figura 8 mostra a comparação de três coletores geometricamente idênticos porém com superfícies de absorção diferentes.

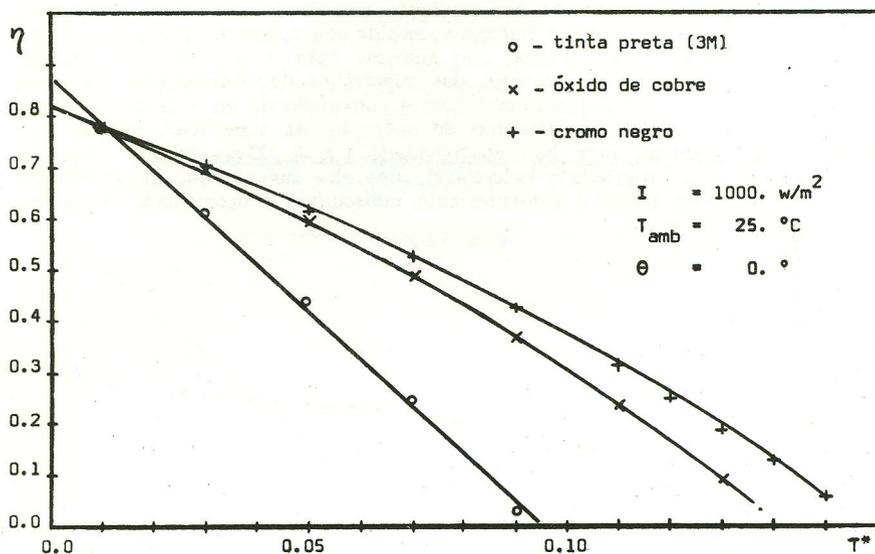


FIGURA 8 — Comparação entre superfícies de absorção.

Em adição à esses comentários, convém lembrar da parcela de energia refletida na cobertura de vidro. Uma placa de vidro comum, com uma espessura de 4 mm, possui uma transparência da ordem de 86%. Assim, utilizando uma placa de vidro temperado com uma espessura de, digamos, 3 mm, podemos aumentar essa transparência para 90% o que, representa um ganho adicional de cerca de 40 W/m² para uma intensidade solar de 1000 W/m² o que significa um aumento numérico de mais do que 4% na eficiência global do coletor.

Finalmente para efeito de melhor visualização destes resultados preliminares, vamos elaborar um quadro evolutivo do projeto de coletores, baseado nas considerações anteriores e incluindo apenas mais um tipo de ajuste placa/tubo (Figura 9). A Tabela 1 relaciona as características desses coletores, cujas curvas de eficiência são apresentadas na Figura 10.

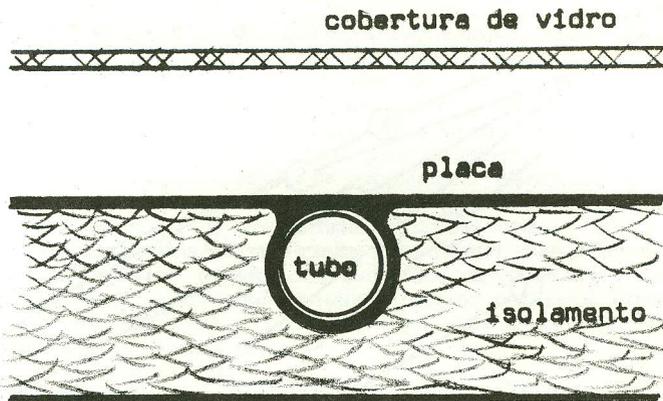


FIGURA 9 — Coletor — Geometria 11.

TABELA 1

DADOS DE ALGUNS COLETORES

COLETOR	GEOMETRIA	MATERIAL DA PLACA	SUPERFÍCIE DE ABSORÇÃO	NÚMERO DE COBERTURAS	RELAÇÃO W/D	e_p mm	EI mm	IV mm
1	I (Figura 2)	aço	tinta 3M	1	10.	0.6	40.	35.
2	"	cobre	" "	1	4.	0.6	60.	60.
3	II (Figura 9)	cobre	" "	1	4.	0.6	60.	60.
4	"	cobre	" "	2	4.	0.6	60.	18./22.
5	"	cobre	chromo negro	2	4.	0.6	60.	18./22.
6	"	cobre	" "	1	4.	0.6	60.	60.

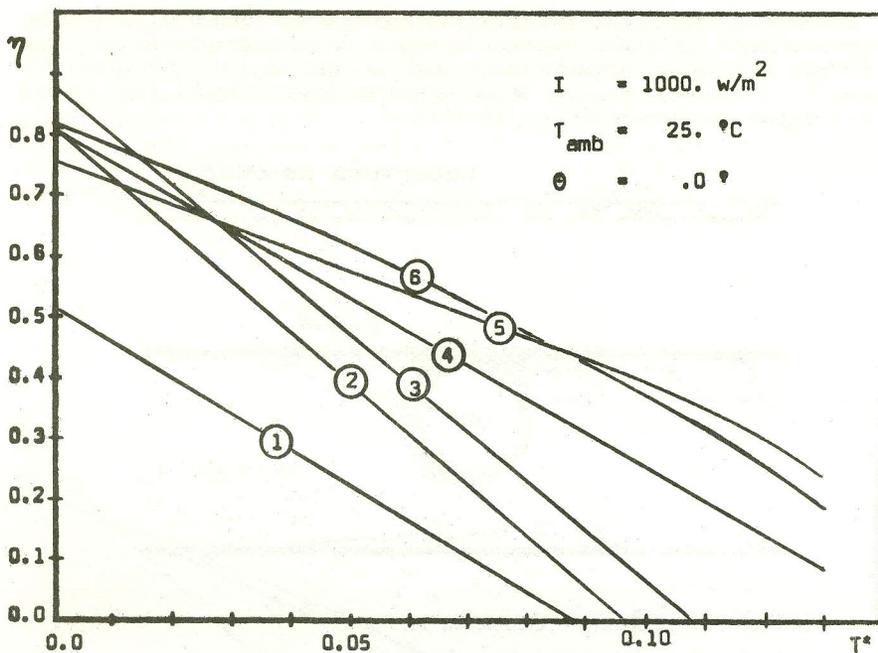


FIGURA 10 — Comparação dos coletores da Tabela 1.

CONCLUSÕES:

Apesar de que durante muitos anos, diversos parâmetros importantes no desempenho de coletores planos de energia solar foram estudados experimentalmente, não se encontra, a saber, nenhum trabalho que correlacione sua influência no comportamento global de um coletor. Também, diversos parâmetros ainda não puderam ser estudados evidentemente por exigirem um investimento muito grande em capital e tempo. Dessa maneira, apesar da incorrência em alguns erros, é plenamente satisfatória a utilização de métodos numéricos como uma forma de acoplamento de correlações empíricas para mecanismos individuais, na simulação de um coletor solar, principalmente para se estabelecer qualitativamente, condições de um bom projeto.

Quanto aos resultados aqui apresentados, já nos permitem algumas conclusões importantes:

1.º — Existem diversas considerações de projeto que apesar de não encarecerem o seu custo, podem aumentar substancialmente o desempenho dos coletores existentes.

2.º — Outras considerações, principalmente referentes à materiais e superfícies levam a concluir que é relativamente fácil o desenvolvimento de equipamentos para utilização em outras aplicações que não o aquecimento de água à baixa temperatura.

3.º — É importante uma classificação dos coletores quanto à sua utilização pois nem sempre um equipamento sofisticado é o mais conveniente para determinadas aplicações ou condições ambientes. Assim, uma indústria pode oferecer um coletor extremamente barato para aquecimento de água até 60°C, sendo inclusive mais eficiente que outros modelos nessas condições e, equipamentos para outras faixas de temperaturas, mais sofisticados e caros.

Finalmente, convém lembrar que no presente artigo, não foram dados detalhes a respeito do desenvolvimento teórico deste trabalho mas, deve-se esclarecer qu as correlações experimentais utilizadas são plenamente conhecidas e confiáveis. Assim, foram utilizados como dados, as propriedades dos metais, dos isolamentos, das superfícies e as correlações para simular a transferência de calor da placa para a cobertura, da cobertura para o ambiente, da placa para o tubo através da folga ("gap") na região de acoplamento placa/tubo e do tubo para o fluido. Todos esses valores, obtidos na Literatura Solar e Nuclear, são suficientes para a simulação global do comportamento de um coletor, mesmo que alguns resultados sejam passíveis de verificação experimental. Até o momento, os programas elaborados foram testados com dados disponíveis de três coletores ensaiados fora do Brasil, apresentando resultados dentro dos erros experimentais de medida, espera-se em breve a verificação com mais dados, principalmente com a utilização de uma bancada de testes.

Deve-se ressaltar que o desenvolvimento deste trabalho partiu da solicitação de uma empresa ao IPEN, no sentido de se estudar a influência de determinados parâmetros no desempenho de coletores planos, ficando porém os resultados e programas disponíveis a quem interessar.