

**COLÓQUIO
SOBRE UTILIZAÇÃO
DA ENERGIA SOLAR**
LISBOA, 7 A 9 DE JUNHO DE 1960

**COLECTORES A BAIXO POTENCIAL.
AQUECIMENTO SOLAR**

1. — Introdução. — Princípio de funcionamento

Certas aplicações da energia solar, não necessitam de temperaturas superiores a 100°C. Nestas condições pode captar-se o calor solar, em colectores a baixo potencial, colectores planos, isto é, onde não há concentração da radiação solar.

As vantagens deste processo são consideráveis: baixo custo da construção, custo de manutenção insignificante e maior rendimento, pois além de utilizar não só a radiação directa mas também a difusa, tem menores perdas devido ao facto de trabalhar a temperaturas pouco elevadas.

O colector plano é essencialmente constituído por uma superfície que absorve as radiações, com a qual contacta um fluido que dela recebe o calor. É este fluido que, entrando em circulação natural ou forçada vai fornecer o calor utilizável. A superfície absorvente, superfície negra, está instalada numa caixa isolada termicamente, cuja face superior exposta à radiação, é constituída por uma ou mais vidraças. Podem dividir-se os colectores planos em dois grupos: os que utilizam como fluido transportador de calor um gás (geralmente o ar) e os que utilizam um líquido (geralmente a água).

Para cada um destes grupos, têm aparecido várias soluções construtivas, mas todas elas partem destes dois princípios:

- transmissão do calor principalmente por convecção, para o ar
- transmissão do calor principalmente por condutibilidade para a água.

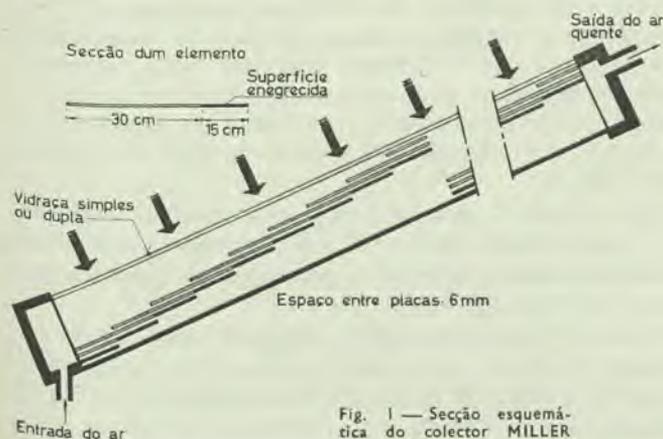


Fig. 1 — Seção esquemática do colector MILLER

Assim, o ar circula numa câmara onde estão instalados os elementos absorventes da radiação, dispostos de maneira que favoreçam as correntes de convecção. Temos um exemplo na fig. 1.

Por sua vez a água circula, ou numa tubagem metálica revestida da matéria que absorve a radiação (fig. 2), ou entre duas placas metálicas também revestidas de molde a consti-



Fig. 2 — Colector de tubagem metálica



Fig. 3 — Colector «lâmina de água» dum aquecedor de água projectado no LNEC

tuir uma lâmina de água (fig. 3). O diâmetro da tubagem ou a espessura da lâmina de água devem ser suficientemente pequenos de molde a permitir uma boa troca de calor, mas suficientemente grandes para evitar que as perdas de carga afectem consideravelmente a circulação natural.

2. — Perdas e maneiras de as reduzir

Veamos agora, tendo em vista o estudo do rendimento do colector plano, qual o trajecto seguido pela radiação incidente e onde se dão as perdas de calor.

Parte da radiação incidente no vidro é perdida, devido a este não ser perfeitamente transparente e dar-se uma reflexão variável com o ângulo de incidência. A radiação que chega à superfície negra é absorvida em parte por esta. Outra parte, função da temperatura atingida e do material absorvente, é reflectida transmitida por convecção e emitida para o vidro. Esta fracção vai aquecer o vidro, que por sua vez irradia aproximadamente em partes iguais para o exterior e de novo para a superfície colectora.

Temos ainda que considerar as perdas de calor através do isolamento e o que é necessário para aquecer todo o aparelho.

Pode então apresentar-se a equação geral:

$$\frac{Q_u}{A} = F_R \left(H \cdot R \cdot \tau \cdot \alpha - \frac{Q_L}{A} \right) \quad (1)$$

A expressão entre parêntesis representa o funcionamento do colector em que a extracção do calor é feita a uma temperatura uniforme.

Q_u — quantidade de calor fornecido ao fluido transportador na unidade de tempo

A — área do colector

H — radiação incidente global por unidade de área horizontal e por unidade de tempo

τ — coeficiente de transmissão no vidro

α — coeficiente de absorção da superfície

R — factor de conversão geométrica da radiação incidente horizontal, em radiação incidente na superfície inclinada do colector.

Q_L — quantidade de calor perdida por irradiação da superfície negra através do vidro para a atmosfera e do isolamento da caixa

F_R — factor de influência do caudal do fluido transportador.

Este factor F_R , chamado factor de eficiência da remoção de calor, é definido pela relação entre o calor útil colectado, e o calor colectado que resultaria, estando toda a superfície absorvente à temperatura da água que entra. F_R é independente da intensidade da radiação e da temperatura a que o colector trabalha. F_R é função do caudal, da natureza do fluido, e de um factor F' que depende apenas do tipo de colector escolhido.

O estudo destes factores foi completamente feito por HOYT HOTTEL do «Massachusetts Institute of Technology».

As perdas por irradiação e convecção, quer da superfície negra quer do vidro ou vidros, foram estudadas por HOTTEL e por WOERTZ a partir da lei de Stefan-Boltzmann:

$$q_r = h_c (T_n - T_1) + \frac{\sigma (T_n^4 - T_1^4)}{\frac{1}{E_o} + \frac{1}{E_g} - 1} \quad (2)$$

em que a primeira parcela do segundo membro representa o calor transferido por convecção; e a segunda representa o calor transferido por irradiação.

q_r — calor perdido por unidade de área do colector.

h_c — coeficiente de perda por convecção $h_c = c(T_n - T_1)$

c — constante que depende da inclinação do aparelho

T_n, T_1 — temperaturas absolutas da superfície absorvente e do vidro, respectivamente

E_o, E_g — emissividade (hemisférica total) da superfície e do vidro, respectivamente

σ — constante de Stefan-Boltzmann.

No caso de duas ou mais vidraças, basta substituir E_o por E_g para se obter a perda por convecção entre os vidros.

Para o vidro exterior em contacto com a atmosfera:

$$q_a = h_w (T_n - T_a) + E_g \sigma (T_n^4 - T_a^4) \quad (3)$$

h_w — coeficiente de perda devido ao vento, e que depende da velocidade deste

T_n — temperatura do vidro exterior

T_a — temperatura do ambiente exterior atmosférico.

O comportamento do coeficiente de convecção h_c foi estudado pelo Dr. H. TABOR, de Israel, que, fazendo variar a inclinação do colector e a diferença de temperatura das superfícies entre as quais se dá a convecção, traçou o diagrama da fig. 4.

Conclui-se, assim, que o factor h_c , e, portanto, as perdas por convecção, diminui quando a inclinação aumenta, sendo mínimo para a posição horizontal invertida do colector. Nesta posição invertida, a radiação solar terá que ser reflectida por um espelho colocado convenientemente sob o colector.

Da expressão (3) conclui-se que para diminuir as perdas convém igualar, tanto quanto possível, T_n e T_a . Ora o vidro é transparente às radiações solares, 98% das quais têm comprimentos de onda compreendidos entre 0,3 μ e 2,5 μ , mas

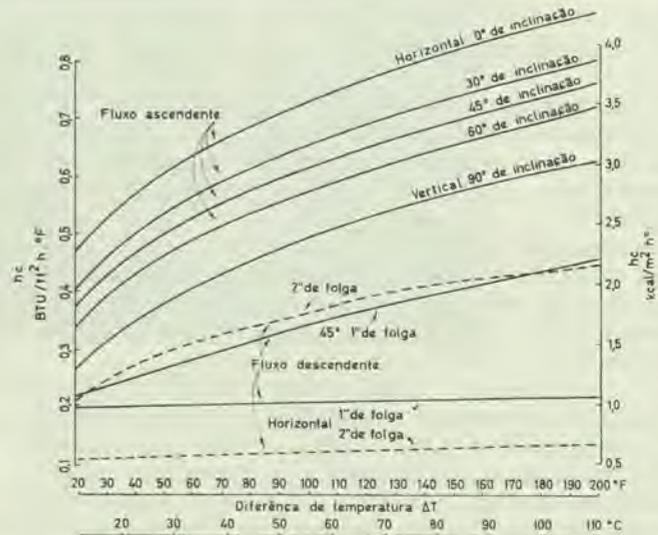


Fig. 4 — Estudo do coeficiente de convecção h_c , de H. TABOR

opaco às radiações emitidas pela superfície negra, comprimento de onda entre 2 μ e 20 μ , quando a sua temperatura se eleva. Portanto esta irradiação é a principal responsável pela diferença de temperaturas entre o vidro e o meio ambiente exterior.

As superfícies negras selectivas satisfazem perfeitamente as condições requeridas: grande poder de absorção, mas baixa emissividade a temperaturas elevadas.

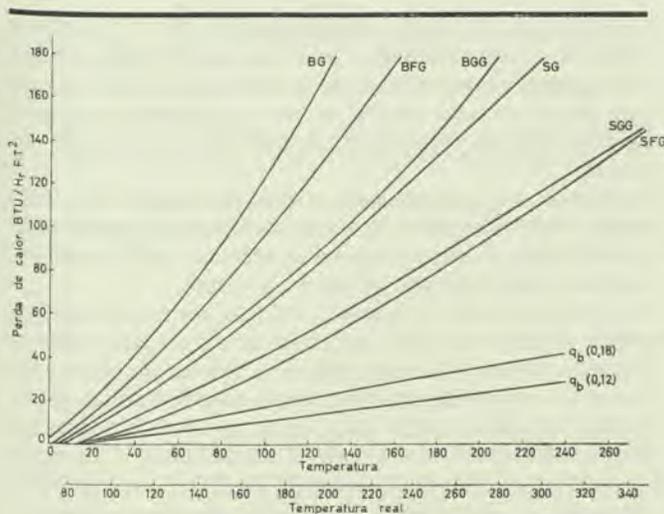
Na fig. 5 faz-se a comparação entre estas superfícies e as superfícies negras clássicas, mostrando a influência do número e da qualidade das coberturas transparentes.

A técnica de preparação destas superfícies foi recentemente desenvolvida por H. TABOR, e tem como base a deposição de uma película de óxido cúprico numa chapa de alumínio.

Outro factor importante no rendimento dos colectores, é, como se vê na expressão (2), a diferença entre os valores de T_n e de T_1 .

Uma vez que T_1 deve ser tanto quanto possível o valor de T_n , convém então diminuir T_n . Isto consegue-se, subtraindo constantemente o calor ganho pela superfície colectora, por meio do fluido que com ela contacta.

Portanto o rendimento dos colectores é ainda função do caudal do fluido transportador de calor. Está assim explicada a presença do factor F_R na expressão (1). A fig. 6 ilustra bem a influência do caudal na quantidade de calor recolhido.



BG — Superfície negra clássica Um vidro	E = 0,95
BGG — Superfície negra clássica Dois vidros	E = 0,95
BFG — Superfície negra clássica Um vidro e um filme plástico	E = 0,95
SG — Superfície negra selectiva Um vidro	E = 0,12
SGG — Superfície negra selectiva Dois vidros	E = 0,12
SFG — Superfície negra selectiva Um vidro e um filme plástico	E = 0,12
q _b (0,18) — Perdas pelo isolamento isolamento de 2"	h = 0,18
q _b (0,12) — Perdas pelo isolamento isolamento de 3"	h = 0,12

Fig. 5 — Perdas de calor num colector plano
Inclinação de 30°. Temperatura ambiente: 22°C
Velocidade do vento: 16 km/h

Por ser extremamente difícil saber qual a distribuição das temperaturas através do isolamento do colector, ainda não pode apresentar-se uma expressão matemática que defina os fenómenos complexos da condução, irradiação e convecção através das paredes isolantes do colector.

O estudo das perdas de calor que daí resultam, ainda está na fase experimental.

Em conclusão, para diminuir os três tipos de perdas de calor nos colectores a baixo potencial é conveniente:

Usar como superfície colectora, uma superfície selectiva — redução das perdas por emissividade.

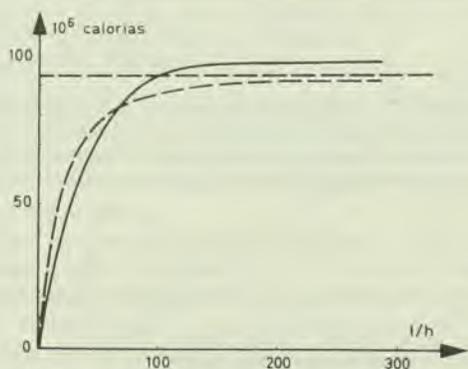


Fig. 6 — Influência do caudal na quantidade de calor recolhida
A tracejado — curva teórica
A traço contínuo — curva experimental

Inverter a posição do colector de molde a receber a radiação de baixo para cima com o auxílio de espelhos — redução das perdas por convecção.

Melhorar tanto quanto possível o isolamento da caixa onde está instalada a superfície absorvente, tendo cuidado com o isolamento marginal da mesma.

Para uma boa extracção de calor: evitar todos os obstáculos a uma boa circulação da água por termo-sifão, tais como reduzir as perdas de carga no circuito e elevar tanto quanto possível (dentro de certos limites) o nível do depósito acumulador em relação ao do colector.

3. — Aquecimento solar no Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Neste Laboratório estão em funcionamento dois aquecedores solares, um de patente francesa «Radiasol» e outro de construção israelita da «Myromit-Olimpia».

A apreciação do funcionamento destes dois aquecedores resumiu-se ao estudo do que pode chamar-se rendimento prático ou comercial, isto é, a relação entre a quantidade de calor útil cedida pelo aparelho diariamente e a energia solar incidente no colector, também diária.

O aquecedor Radiasol usa como fluido transportador de calor, água destilada em circuito fechado. Esta água aquecida num colector de 2 m² de superfície absorvente, cede o calor através de uma serpentina à água do depósito acumulador. O colector é do tipo lâmina de água e o revestimento absorvente é uma superfície negra clássica. A capacidade do depósito é de 150 litros (fig. 7).

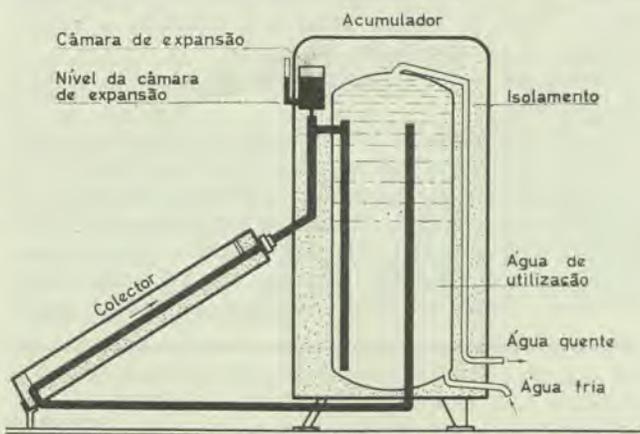


Fig. 7 — Aquecedor de água Radiasol

As medições consistiram na extracção da água do acumulador, medindo a temperatura desta de 10 litros em 10 litros. As leituras fizeram-se às 12.30 h e às 17.30 h.

A expressão utilizada para o cálculo do rendimento prático foi:

$$\eta_p \% = \frac{\sum t_i - nt}{2 c k} \cdot 100 \quad (3)$$

onde

t_i — temperatura da água extraída de 10 litros em 10 litros

t — temperatura da água fria

n — número de extracções de 10 litros

c — radiação global incidente numa superfície horizontal (em calorías por centímetro quadrado por dia)

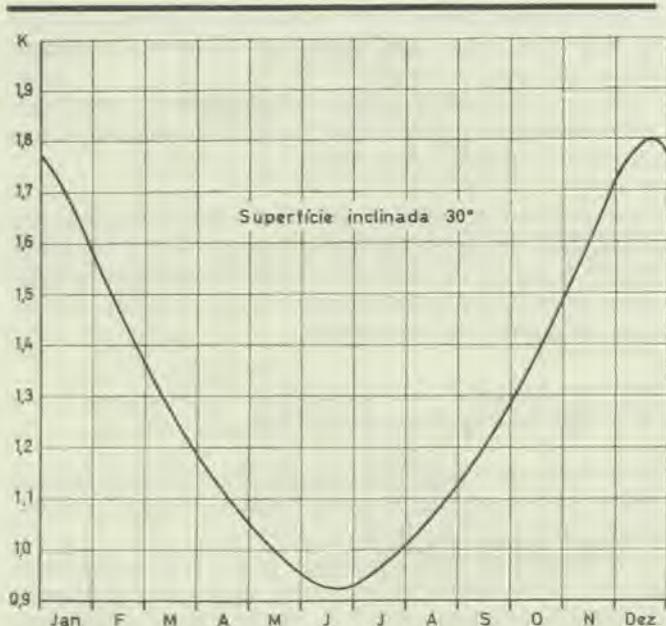


Fig. 8 — Variação do valor de K ao longo do ano

k — coeficiente de conversão da energia incidente numa superfície horizontal em energia incidente na superfície inclinada a 30° do colector.

Considerou-se, como é evidente, o calor específico da água igual à unidade e a massa específica da mesma 1 kg/l.

O valor de k é variável com a inclinação do Sol ao longo do ano. Os seus valores relativos à superfície a 30° do colector estão representadas na fig. 8.

Tomou-se para valor de c a radiação global até às 17.30 h de cada dia.

Os valores dos rendimentos apresentados, dão apenas uma ordem de grandeza, pois nunca é possível extrair todo o calor armazenado no aparelho. Verificou-se que, depois de renovada toda a água do depósito, a temperatura desta não coincide com a da água fria. Continuando a extrair água, mantém-se uma diferença da ordem dos 3°C num tempo apreciável. Nestas condições, fizeram-se os cálculos consi-

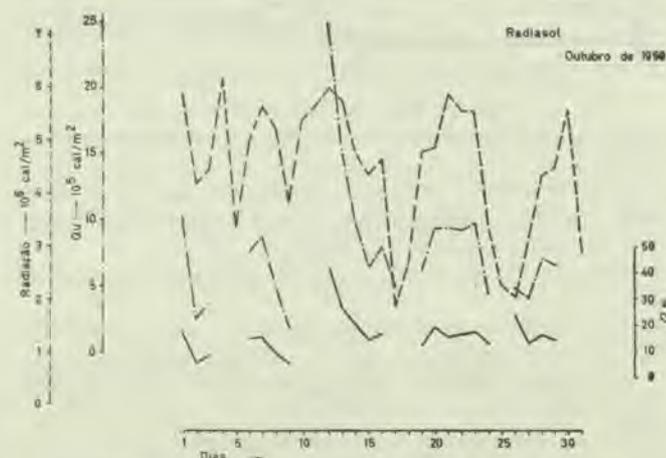


Fig. 9 — Estudo do aquecedor Radiasol, para Outubro de 1959
 Traço contínuo: Rendimento prático
 Traço tracejado: Radiação global em cal/m^2 de superfície a 30° com a horizontal
 Traço ponto: Quantidade de calor útil armazenado na água, em cal/m^2 de colector

derando que a queda de temperatura era de 1°C por cada 10 litros de água extraída a mais que os 150 litros. Alcançada assim a temperatura de estabilização, considerou-se que metade da água contida no depósito estava a essa temperatura. O erro cometido é compatível com a precisão do ensaio.

Aponta-se um exemplo para o mês de Outubro de 1959, na fig. 9. O andamento das curvas de radiação, calor cedido e rendimento é aproximadamente idêntico, salvo raras exceções explicáveis pela influência do vento.

Presentemente está a fazer-se o estudo pormenorizado das perdas de calor no aquecedor Radiasol, com pares termoelectrónicos colocados na face superior e inferior do vidro e do colector e avaliando ao mesmo tempo as temperaturas de entrada e de saída de água quer no circuito primário quer no acumulador. Para estes ensaios é aconselhado o processo de extracção contínua da água do depósito, para se poder desprezar a acumulação de calor anteriormente descrita. No aquecedor da Myromit-Olimpia existe um único circuito de água, isto é, a água que passa pelo colector é a que é utilizada. O colector é constituído por uma chapa metálica que sofreu um tratamento que a torna numa superfície selectiva do tipo das já descritas. Nessa chapa está soldada a tubagem por onde circula a água.

A superfície do colector é $1,5 \text{ m}^2$ e a capacidade do depósito 50 litros. Os ensaios realizados neste aparelho foram idênticos aos do Radiasol mas sendo as extracções de água de 5 l em 5 l, feitas três vezes ao dia, às 9.00 h, 12.30 h e 17.30 h.

Neste caso o rendimento será

$$\eta_p \% = \frac{5(\sum t_i - nt)}{1,5 \cdot 10 \cdot ck} \cdot 100$$

Foi projectado no Laboratório um aquecedor de água cujo colector (tipo lâmina), de 2 m^2 de área, está dividido em duas partes de 1 m^2 cada, que se podem mover segundo dois eixos perpendiculares entre si.

O depósito acumulador está montado num suporte de altura regulável. O objectivo desta construção é o estudo da variação das perdas com as várias inclinações impostas e a variação do fluxo de água com a altura do depósito.

O programa de trabalhos do Laboratório, no campo dos colectores solares incluirá o estudo experimental das bases teóricas apresentadas, dedicando especial atenção ao das superfícies selectiva.

ANTÓNIO SALGADO PRATA
 Engenheiro Mecânico (I.S.T.)

PEDRO VALENTE PEREIRA
 Aluno de Engenharia Mecânica (I.S.T.)

AGRADECIMENTO — Ao Engenheiro Almeida Pereira da Hidro-Eléctrica do Zêzere, pela sua valiosa colaboração neste trabalho, e por gentilmente ter posto à disposição do Laboratório Nacional de Engenharia Civil o aquecedor solar Radiasol, cujos ensaios se mencionaram.

BIBLIOGRAFIA

- H. MASSON — *La conversion de l'énergie solaire* — Acta Electronica — Abril 1959.
- F. DANIELS, J. A. DUFFIE — *Solar Energy Research*.
- H. MASSON — *Les insolateurs à bas potentiel*.
- H. MASSON — *Contribution à l'étude du réchauffement de l'eau sous l'effet de la radiation solaire* — Bull. Inst. Franc. Afr. Noire, tomo 14, n.º 2 — Abril 1952.
- N. ROBISON — *Solar Machines* — Proc. World Symp. Appl. Sol. Energy — Phoenix Arizona 1955.

H. HOTTEL, A. WHILLIER — *Evaluation of flat-plate solar-collector performance* — Trans. of the Conf. on the Use of Solar Energy — Tucson Arizona 1955.
H. HOTTEL, B. WOERTZ — *The performance of flat-plate Solar Heat Collectors*. — A. S. M. E. Trans. V. 64 1942.
H. HOTTEL — *The performance of flat-plate Solar Energy Collectors*. *Proceedings of Symposium* — Space Heating with Solar Energy, M. I. T., 1950.
A. DIETZ — *Diathermanous Materials and Properties of Surfaces*. *Proceedings of Symposium* — Space Heating with Solar Energy, M. I. T., 1950.

G. LÖF, T. NEVENS — *Heating of Air by Solar Energy* — J. Sci. V. 53, 1953.
H. TABOR — *Solar Energy collector design (with special reference to selective radiation)* — Trans. of the Conf. on the Use of Sol. Energy — Tucson, Arizona, 1955.
H. TABOR — *Selective radiation* — Bull. Res. Coun. of Israel, 1955.
J. T. GIER, R. DUNKLE — *Selective Spectral Characteristics as an important factor in the efficiency of Solar Collectors*. — Trans. of the Conf. on the Use of Solar Energy, Tucson, Arizona, 1955.
I. TANISHITA — *Present Status of Solar Water Heaters in Japan* — Trans. of the Conf. on the Use of Solar Energy, Tucson, Arizona, 1955.

DESENVOLVIMENTO DAS APLICAÇÕES DA ENERGIA SOLAR NA ÍNDIA, JAPÃO, ISRAEL E FRANÇA

(*Extraído de «the sun at work» third quarter, 1960*)

Numa entrevista realizada após uma viagem que o Dr. Lof, da American Rocket Society, efectuou pela Índia, Japão e Israel, este cientista americano fez importantes declarações sobre os progressos obtidos no campo de energia solar nos três países citados.

No Japão, a actividade na aplicação da energia solar ao aquecimento de água, à cultura das algas, ao aquecimento e refrigeração das habitações, à produção de electricidade por processos termoeléctricos e fotoeléctricos, à química das altas temperaturas (fornos solares) está a progredir, com um ritmo mais ou menos de acordo com a ordem apontada. O aquecimento solar da água para usos domésticos e industriais está mesmo a tomar enorme incremento.

O aquecedor solar mais usado é o de plástico: dos 250 000 aquecedores em utilização, a maioria é deste material e o mesmo acontecendo com os 25 000 previstos para serem construídos este ano. Este aquecedor de plástico tem cerca de 1 m por 3 m, não tem acumulador isolado para uso nocturno, e vende-se por 9 dólares. Um aquecedor de metal, mais eficiente, do tipo dos fabricados nos E.U.A., foi desenvolvido pelo prof. Tamishifa do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Keio; está equipado com um acumulador isolado termicamente. O preço total incluindo taxas fiscais, é de cerca de 80 dólares.

Na Índia, entre outras aplicações, a energia solar tem sido utilizada para a concentração de sumos naturais, nomeadamente de palma e cana de açúcar. Também foram feitos aquecedores de água com colectores de alto rendimento e cozinhas economicamente realizáveis.

No conjunto o progresso faz-se lentamente. Vários cientistas indianos são de opinião de que a melhor aplicação de energia solar na Índia seria na distribuição de água para regas, utilizando um pequeno engenho capaz de bombear a água e que substituisse a dispendiosa energia animal presentemente usada.

Em Israel, as pesquisas solares atingiram o mais alto nível e o mais franco progresso. No Laboratório Nacional de Física de Israel, um grupo de 25 profissionais, sob a direcção do Dr. Tabor, trabalha no aquecimento de água, produção de energia, refrigeração e ar condicionado, e em numerosos estudos básicos relacionados com estas aplicações, tais como as características e a preparação das superfícies selectivas, sistemas de armazenamento de energia e termodinâmica dos fluidos.

Dentre estes trabalhos distinguem-se por mais adiantados, o estudo das superfícies selectivas e o armazenamento de calor e de outras formas de energia.

No campo da produção de energia está prestes a concluir-se um reflector de trezentos metros quadrados que, por meio dum permutador de calor e dum liquido com elevado ponto de ebulição, será usado para produzir vapor.

Outra interessante aplicação da energia solar que os cientistas de Israel estudam actualmente é uma turbina de baixa pressão de 7 kW, que se calcula poder atingir um rendimento de 15% a 20%, trabalhando com uma temperatura de admissão de 150°C. Deverá usar-se um fluido permutador com elevado peso molecular, sendo por enquanto o clorobenzeno o que parece mais indicado.

A produção de aquecedores de água em Israel, expande-se rapidamente, vendendo-se cerca de 4000 unidades por ano. Até à data estão vendidas cerca de 15 000 unidades. Estes aquecedores podem considerar-se do tipo convencional, com uma diferença importante: a superfície dos colectores mais aperfeiçoados é recoberta electroliticamente com negro de níquel. Os colectores com esta superfície selectiva têm um rendimento surpreendente.

As pesquisas sobre superfícies selectivas em Israel baseiam-se no conhecimento profundo do modo como as mesmas funcionam e como podem ser produzidas. Este programa é financiado pelo Laboratório de Pesquisas de Cambridge, da Força Aérea dos E.U.A. Vários cientistas contribuem para este estudo cuja duração se prevê ser de 3 anos. As investigações abrangem: o estudo das propriedades básicas do negro de níquel, do depósito electrolítico do óxido negro de cobre, de novas películas metálicas, do efeito do metal base (tais como cobre, níquel e alumínio), etc. Alguns dos melhores materiais obtidos agora no Laboratório têm uma absorvidade de 92% a 98% para as radiações solares e uma emissividade de apenas 10% a 15% para a radiação calorífica. O óxido de cobre é muito estável a altas temperaturas, mas a sua absorvidade é apenas de 86%. Serão também estudados problemas relativos a estabilidade a altas temperaturas, resistência à oxidação e a outros ataques atmosféricos, alteração do metal base, etc.

Dentre as aplicações ainda em fase experimental em Israel, talvez a mais promissora seja o chamado «lago solar». O lago solar é um tanque ou lago artificial com um ou dois metros de profundidade e com um fundo negro que absorve