

A vantagem desta expressão está em mostrar que o produto $T_{\omega} T_{\Omega} m'$ é afinal uma constante do aparelho, do que se pode tirar partido por, no decurso de um conjunto de medidas envolvendo a determinação simultânea dos dois períodos — tarefa algo delicada e em que facilmente se cometem erros — permitir um controlo fácil dos valores que vão sendo registados.

Nota final

Foucault (1819-1868) ter-se-á preocupado com a criação de um sistema que lhe permiti-

tisse *ver* (grego «skopein») e estudar o movimento de *rotação* («gyros»).

De então até aos nossos dias foram notáveis os aperfeiçoamentos técnicos que conduziram aos sofisticados sistemas giroscópicos destinados à navegação aérea e marítima e à estabilização de navios.

— Então será ainda hoje um tema actual?

Num número recente da revista *Physics Today* (Maio 1984) dá-se conta de um projecto da NASA, em fase avançada, cujo objectivo é realizar um teste da Teoria da Relatividade Geral com base no estudo da precessão de um sistema giroscópico da mais elevada precisão a ser colocado em órbita à volta da Terra.

Contribuição didáctica para o Ensino de Energia Solar

A. JOSÉ ALVES e A. TRAÇA DE ALMEIDA

Centro de Física da Radiação e da Matéria da Universidade de Coimbra

Faz-se uma breve introdução ao funcionamento das células fotovoltaicas e dos colectores solares planos. Estes conhecimentos são utilizados para explicar algumas experiências de realização acessível que permitem ilustrar o funcionamento dos dois dispositivos.

Nestas experiências verifica-se a independência da tensão à saída duma célula fotovoltaica relativamente à intensidade da radiação incidente, verifica-se a proporcionalidade entre a intensidade de corrente gerada numa célula e a intensidade da radiação incidente, e determinam-se pontos que permitem traçar a curva característica (V-I) duma célula fotovoltaica. No domínio da termodinâmica, determinam-se as razões entre os coeficientes de absorção e entre os coeficientes de perda calorífica de dois colectores.

1. Introdução

As crises do petróleo de 1973 e 1979 vieram acelerar a consciencialização da natureza finita das reservas de combustíveis fósseis. A manutenção do bem-estar dos países mais ricos e o desenvolvimento dos países pobres passa pelo aproveitamento de fontes alternativas de energia, inesgotáveis à escala humana. A energia solar, dado o seu enorme potencial, apresenta-se como uma das vias possíveis

para o abastecimento de energia à humanidade. Numa perspectiva de longo prazo a participação da energia solar poderá vir a ser decisiva, embora condicionada ao desenvolvimento de tecnologias que reduzam substancialmente os investimentos necessários ao seu aproveitamento. A energia solar, embora abundante e renovável, apresenta uma baixa densidade e um carácter intermitente, factores que encarecem a sua utilização.

O interesse actual e futuro da energia solar torna essencial o seu ensino nos diversos níveis, convenientemente apoiado em equipamento de demonstração experimental. Neste artigo descrevem-se dispositivos simples e de custo reduzido para ilustrar alguns dos aspectos mais significativos do aproveitamento da energia solar para a produção de energia térmica e eléctrica.

2. Conversão Directa de Energia Solar em Electricidade

2.1. Estrutura do Diodo

Materiais como o silício e o germânio (elementos do grupo IV da tabela periódica) possuem quatro electrões na camada periférica que são utilizados para estabelecer ligações

covalentes com os átomos vizinhos na estrutura cristalina.

Juntando impurezas de fósforo, antimónio ou arsénio (elementos do grupo V), há um electrão da camada periférica de cada um destes átomos que, não sendo aproveitado nas ligações, passa facilmente para a banda de condução, como acontece à temperatura ambiente, por excitação térmica. O cristal assim formado permite o transporte de cargas negativas, e por isso se designa material tipo-n.

Juntando impurezas de boro, alumínio ou índio (elementos do grupo III) fica por ocupar um nível energético na banda de valência por cada um destes átomos. Esta falta do electrão na ligação pode-se transmitir ao longo do cristal por passagem dos electrões de ligações não deficientes para ligações deficientes, como se houvesse o movimento em sentido contrário duma partícula imaginária carregada positiva-

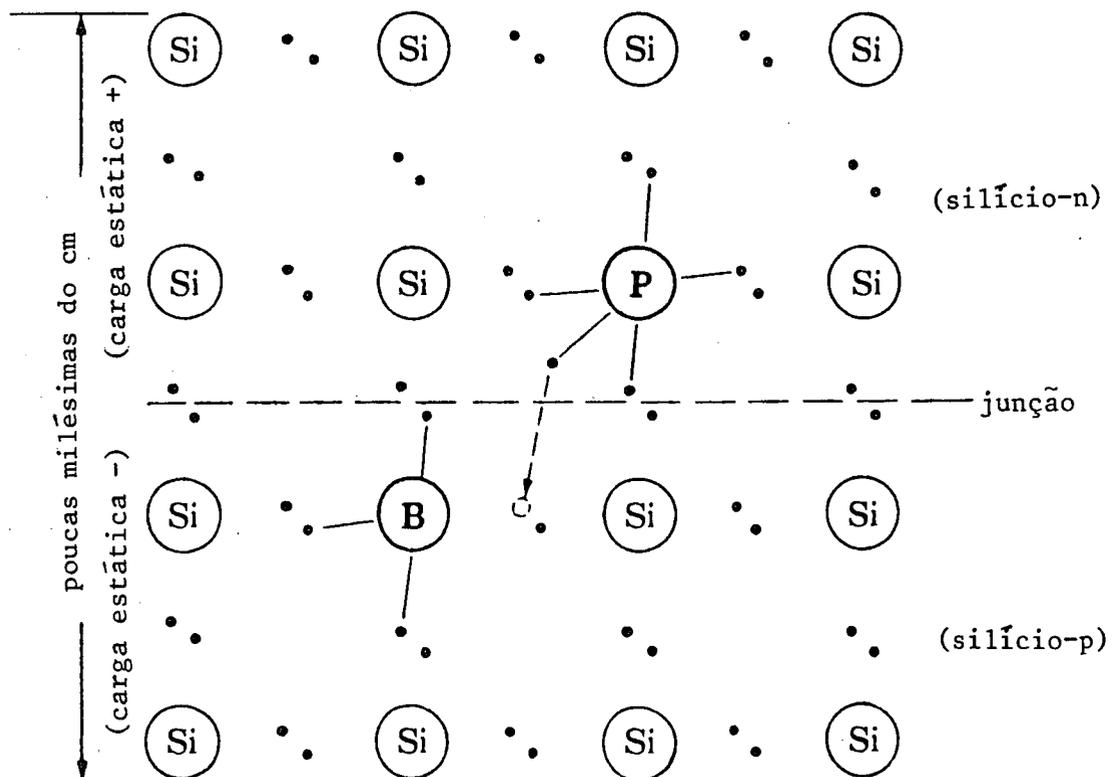


Fig. 1 — Estrutura duma junção p-n de silício. Os pontos negros representam electrões e a seta a tracejado indica a transferência dum electrão do átomo de fósforo para uma ligação deficiente Si-B, na zona de junção.

mente. A esta partícula imaginária costuma chamar-se lacuna e a estes materiais que se consideram transportadores de cargas positivas, materiais tipo-p.

Formando uma placa com duas camadas, uma tipo-p e outra tipo-n, tem-se um díodo. Na zona de junção os electrões que não são necessários para as ligações no material tipo-n vão ocupar níveis energéticos vagos no material tipo-p. Por este processo forma-se uma polarização na zona de contacto (junção), com espessura da ordem dos milésimos de centímetro, criando um campo electrostático que facilita o movimento dos electrões existentes na banda de condução no sentido $p \rightarrow n$ através da junção, e no sentido contrário através dum condutor que permita o seu movimento no circuito externo ao díodo.

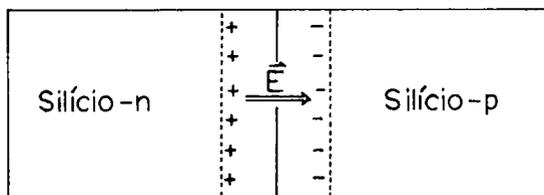


Fig. 2 — Com a polarização das cargas eléctricas na zona da junção surge um campo eléctrico E .

2.2. O Díodo como Célula Fotovoltaica

Os materiais base dos díodos são semicondutores, isto porque a largura da banda proibida (E_g), da ordem do eV, é muito inferior à dos dieléctricos.

A maior parte dos fotões, de que é composta a radiação solar, possui energia superior a 1,1 eV (E_g do silício; ver Fig. 3) que, transferida para um electrão na banda de valência do silício, é suficiente para o fazer passar para a banda de condução. Quando isto acontece o electrão deixa no seu lugar a falha duma carga negativa (lacuna).

Este electrão tem tendência para perder rapidamente a energia recebida, voltando ao estado inicial por «recombinação» com uma lacuna.

Se a criação deste par *electrão-lacuna* se der na zona de junção dum díodo, o campo eléctrico aí existente não só evita a recombi-

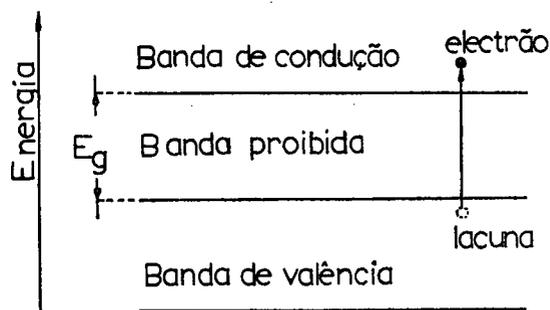


Fig. 3 — A criação de um par electrão (•)/lacuna (o) pode ser produzida por um fotão de energia $h\nu \geq E_g$. Para o Si e Ge tem-se $E_g = 1,1$ e $0,7$ eV, respectivamente.

nação rápida como solicita os electrões a deslocarem-se ao longo dum condutor que ligue os materiais tipo-p e tipo-n. Para que seja possível este fenómeno dar-se na zona de junção é preciso que a camada tipo-n ou tipo-p seja suficientemente fina para ser permeável à radiação. Um díodo com esta característica e com uma superfície apreciável designa-se por célula fotovoltaica.

Estas células transformam a energia luminosa em energia eléctrica pelo processo explicado. O campo eléctrico existente na célula, criado pela polarização na zona de junção, tem um efeito análogo ao do campo criado no enrolamento dum dínamo.

No entanto, enquanto no dínamo a f.e.m. responsável pela criação da corrente eléctrica depende da velocidade imprimida ao veio, na célula fotovoltaica depende essencialmente da junção. Por outro lado, no dínamo, a tensão actua nos electrões que já existem na banda de condução, enquanto na célula actua apenas nos electrões que a luz incidente faz passar para esta banda.

Daqui resulta que a tensão à saída da célula é independente da intensidade da radiação, e a intensidade de corrente vem directamente proporcional ao número de fotões

incidentes na zona de junção (intensidade da radiação e área exposta). Note-se que se a célula se apresentar inclinada em relação à direcção da radiação, diminui a área efectiva e reduz-se a facilidade de penetração dos fotões.

A célula fotovoltaica funciona pois como um gerador de corrente eléctrica em que o material tipo-n é o polo negativo e o material tipo-p o polo positivo.

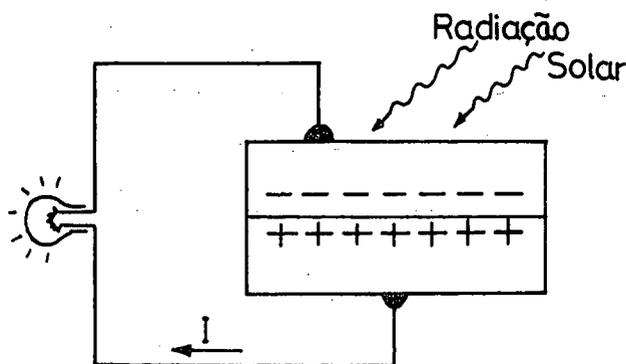


Fig. 4 — Célula solar debitando corrente eléctrica.

Quando se ligam duas células em série os electrões que surgem na banda de condução são obrigados a percorrer o circuito eléctrico ligado a elas, por acção do campo eléctrico das duas células. A tensão do conjunto de células é pois a soma das tensões de cada uma. A intensidade de corrente depende dos electrões que surgem localmente na banda de condução e será portanto igual à que se teria apenas com uma célula.

Seguindo idêntico raciocínio vê-se que quando as células são ligadas em paralelo a tensão é a tensão em cada uma delas e a intensidade de corrente é a soma das intensidades. Funciona como uma célula de área igual à soma das áreas das duas.

Na realidade todo este processo de funcionamento das células não é tão simples. Parte da luz incidente é reflectida na superfície, parte da superfície é tapada pelos contactos eléctricos, parte dos fotões incidentes tem energia inferior a E_g e nem todas as recombinações

imediatas são evitadas. Por isso o rendimento das células é relativamente baixo.

Apesar disso, se se cobrisse uma área quadrada de 10 Km de lado com uma radiação incidente de ponta de 100 000 Mw e média de 20 000 Mw (valores normais para Portugal), com um rendimento de 10 %, obter-se-ia uma potência utilizável de ponta igual a 10 000 Mw e média de 2 000 Mw, suficiente para o consumo do país.

2.3. Algumas Experiências

Com duas células fotovoltaicas, um multímetro e uma caixa de resistências podem-se fazer várias medições que ilustram o funcionamento das células.

1 — Mede-se a d.d.p. entre os terminais duma célula (Fig. 5a) em duas situações:

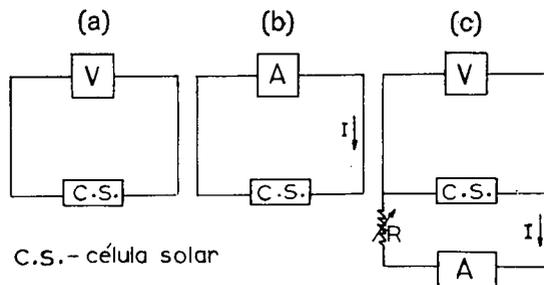


Fig. 5 — Diferentes esquemas experimentais (a, b, c) para estudo da célula solar. C.S. — célula solar.

coabrindo metade com um cartão opaco ou a totalidade da célula com uma folha de papel vegetal. O resultado da medição deverá ser cerca de 0,45 V (valor característico da célula de silício), aproximadamente, o que também se obtém com a célula a descoberto.

Conclui-se que a d.d.p. é praticamente independente da área da célula e da intensidade da radiação, notando-se porém uma quebra brusca do valor da d.d.p. quando a cobertura da célula com cartão opaco é quase total.

2 — Outra experiência simples (Fig. 5b) consiste na medição da intensidade de corrente

que passa no amperímetro nas mesmas situações de iluminação anteriores, acrescentando uma outra em que se faz uso de dois papéis vegetais sobrepostos.

Relativamente a este caso faz-se notar que o papel vegetal serve de filtro para a radiação solar, deixando passar apenas uma percentagem α desta, ou seja uma intensidade de radiação $\alpha \mathcal{I}$ (em que \mathcal{I} é a intensidade da radiação incidente). Deste modo a segunda folha de papel vegetal deixará passar uma radiação $\alpha^2 \mathcal{I}$.

Admitindo uma relação linear entre a intensidade da radiação que chega à célula e a intensidade de corrente, será interessante ver que, com as medições elementares apresentadas

QUADRO I — Medições feitas com 6 células ligadas em série, de acordo com os esquemas das figs. 5a e 5b

	células a descoberto	cobertas c/ cartão (1/2)	cobertas c/ 1 vegetal	cobertas c/ 2 vegetais
d.d.p. (V)	2,7	2,6	2,68	2,60
I (A)	0,57	0,245	0,44	0,335

no quadro I, o valor de α seria 0,77 e para a medição com os dois vegetais seria de esperar uma intensidade de corrente de 0,338 A, valor

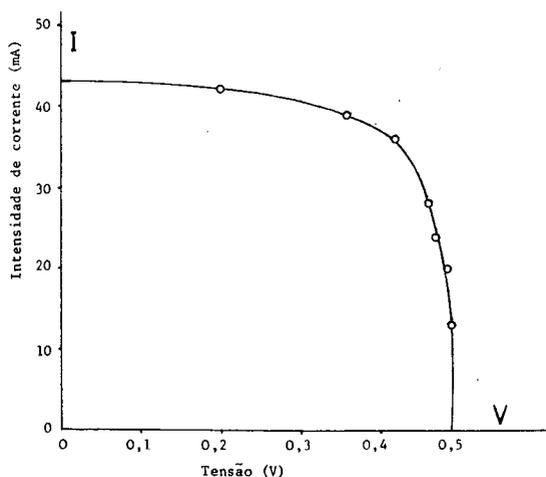


Fig. 6 — Curva característica duma célula fotovoltaica.

bastante semelhante ao valor de 0,335 A que se obteve experimentalmente.

3 — Uma outra série de medições com interesse pode ser feita: utilizando a caixa de resistências R conforme o circuito apresentado na fig. 5c, determinar vários pontos que permitam traçar a curva V-I, como se mostra na fig. 6.

3. Conversão de Energia Solar em Energia Térmica

3.1. Funcionamento dum Colector Solar

A função dum colector de energia solar é absorver a energia da radiação e retê-la sob a forma de calor, com a finalidade do seu aproveitamento.

Sendo P a potência da radiação incidente no colector por unidade de área, só uma percentagem f, característica do colector, é efectivamente absorvida ($P \times f \times A$), designando por A a área do colector.

Parte desta potência é aproveitada para aumentar a temperatura do colector, numa quantidade igual a $(cM\Delta T/\Delta t)$, sendo c o calor mássico do colector, M a sua massa e ΔT a variação de temperatura no intervalo de tempo Δt .

A outra parte perde-se por três vias: condução, convecção e radiação.

Embora sejam três processos diferentes e em particular a perda por radiação dependa da quarta potência das temperaturas do colector e ambiente, é costume apresentar esta potência perdida proporcional à diferença entre a temperatura do colector e a temperatura ambiente ($T_c - T_a$). Será igual a $AU(T_c - T_a)$, em que U é um coeficiente que depende, entre outras características, das temperaturas referidas.

Finalmente podemos escrever, segundo o princípio da conservação da energia:

$$PfA = cM(\Delta T/\Delta t) + AU(T_c - T_a)$$

Na realidade deveríamos juntar ao segundo membro um termo correspondente à quantidade de calor retirada do colector para utilização, mas como o presente trabalho não trata deste assunto apenas nos interessa a fórmula encontrada.

Como não é difícil de obter um coeficiente de absorção superior a 90 %, normalmente a arte na construção dos colectores está em minimizar as perdas de calor. Para diminuir as perdas por condução basta utilizar nas partes laterais e posterior materiais maus condutores.

Podem-se fazer várias experiências que dão uma ideia do funcionamento dos colectores. Para isso convém distinguir duas situações em que a fórmula anteriormente deduzida se apresenta simplificada e de grande utilidade experimental:

1.º — Quando $T_c \approx T_a$, o que implica

$$PfA \approx cM \Delta T / \Delta t$$

2.º — Quando $\Delta T / \Delta t \approx 0$, o que implica

$$Pf \approx U (T_c - T_a)$$

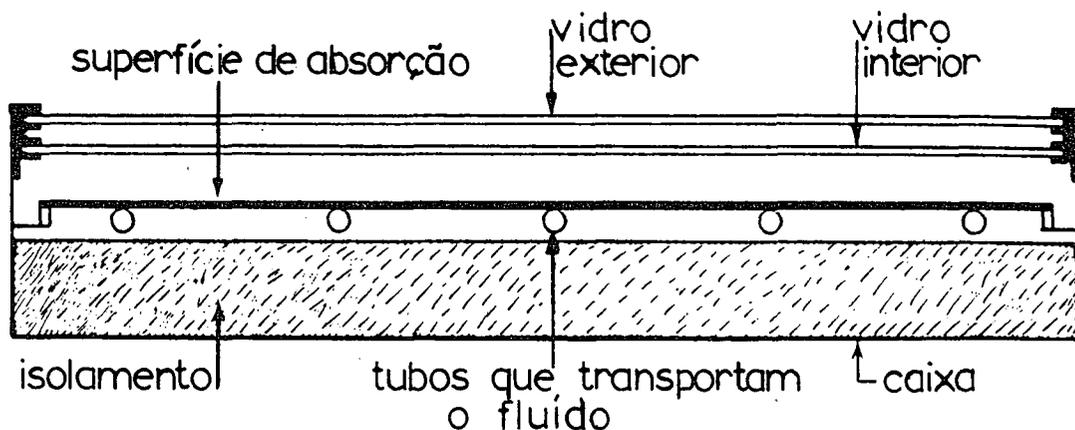


Fig. 7 — Esquema dum colector de vidro duplo.

As perdas por radiação aumentam de importância com a temperatura do colector. Essencialmente procura-se reduzi-las utilizando uma superfície absorvente com fraca emissividade, mesmo que seja à custa do factor de absorção (superfícies selectivas). Não interessa isoladamente a absorção ou a emissão mas sim a energia que se consegue reter. Outro processo consiste em utilizar um ou mais vidros que deixam penetrar grande parte da radiação solar e não são transparentes à radiação infravermelha de grande comprimento de onda (efeito de estufa), emitida pelo colector.

Os vidros também reduzem as perdas por convecção, tendo um papel importante a espessura das camadas de ar.

3.2. Algumas Experiências

Expõem-se seguidamente algumas experiências utilizando uma caixa de madeira, preparada para levar um ou dois vidros, uma chapa de alumínio pintada de preto num dos lados, e dois termómetros. Podem-se ainda usar as células e o multímetro das experiências anteriores para obter valores relativos da radiação incidente (usando a proporcionalidade entre esta e a intensidade de corrente).

1 — Analisando a evolução inicial da temperatura da superfície de absorção (temperatura vizinha da temperatura ambiente) podemos ter uma ideia da sua capacidade de absorção.

Sendo P_1 e P_2 as potências por unidade de área da radiação incidente em duas placas

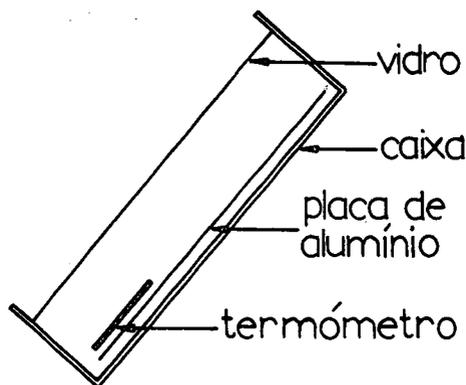


Fig. 8 — Caixa utilizada para as medições.

idênticas de pinturas diferentes (factores f_1 e f_2), os respectivos coeficientes de absorção vêm:

$$f_1/f_2 = (S_1/S_2) (P_2/P_1)$$

em que $S = \Delta T/\Delta t$, razão entre o aumento de temperatura e o intervalo de tempo correspondente.

Fazendo medições com a placa de alumínio exposta do lado pintado e do outro lado sem pintura obteve-se:

$$f(c/pintura)/(f_s/pintura) = 2$$

Note-se que como se mantiveram os materiais não houve alteração do produto cM .

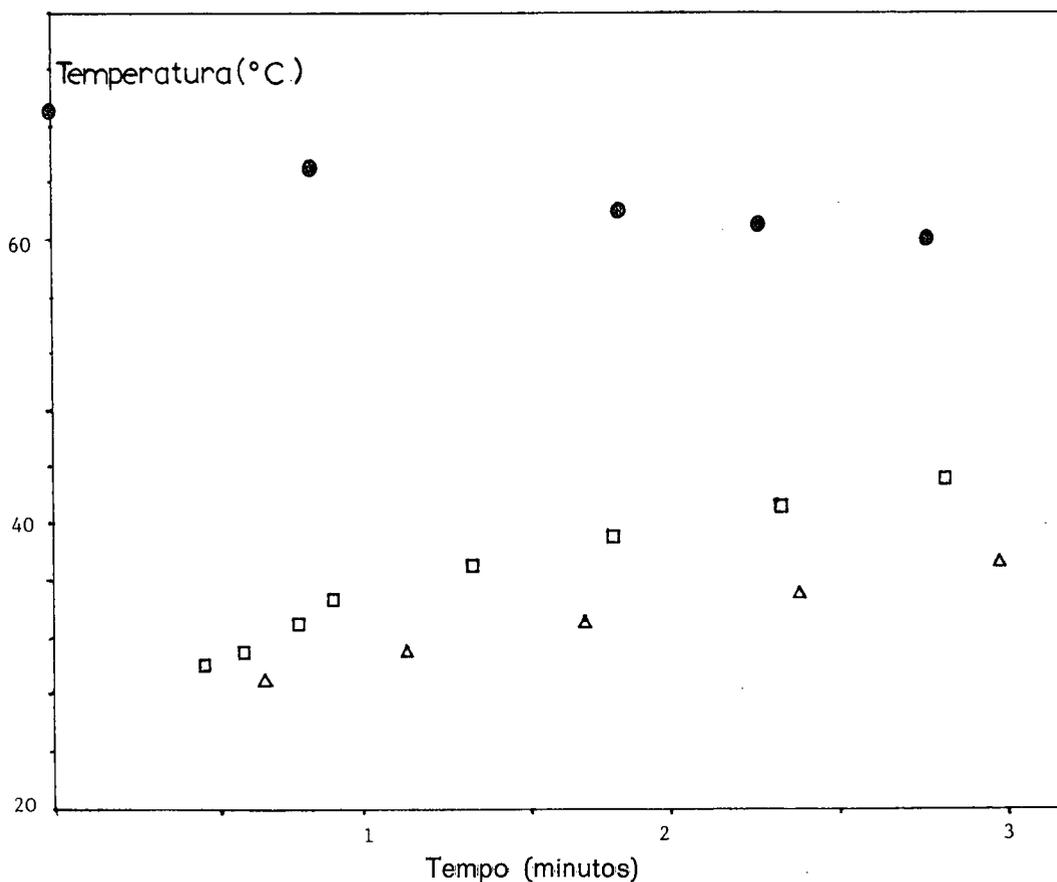


Fig. 9 — □ — Valores de medições feitas com a chapa de alumínio pintada (aquecimento ao Sol).
 △ — Valores de medições feitas com a chapa de alumínio não pintada (aquecimento).
 ● — Valores de medições feitas durante o arrefecimento em quarto escuro, com a chapa pintada.

É visível também o facto de o resultado ser independente de o colector ter um ou dois vidros, ou até mesmo nenhum.

Na fig. 9 apresentam-se alguns resultados obtidos.

Quando se fala em temperatura vizinha da temperatura ambiente, fala-se relativamente ao coeficiente U . Melhorando o isolamento do colector não se modifica o coeficiente de absorção mas aumenta-se o intervalo de temperatura em que se considera a aproximação indicada.

2 — Deixando que o colector atinja uma temperatura constante, a parcela referente ao aumento de temperatura do colector reduz-se a zero. Podemos então comparar o coeficiente de perdas caloríficas U do colector com a placa pintada e por pintar.

Dividindo membro a membro as equações para os dois colectores temos

$$(P_1 f_1)/(P_2 f_2) = (U_1/U_2) (T_{c1} - T_{a1})/(T_{c2} - T_{a2}),$$

admitindo que se fizeram as duas medições com potências da radiação incidente e temperaturas ambiente diferentes.

3 — Estando o colector a uma temperatura já elevada pode-se pô-lo num compartimento

às escuras. Neste caso a energia absorvida é zero, donde

$$U = - (cM/A) (\Delta T/\Delta t)/(T_c - T_a)$$

Fazendo medições com os dois colectores cuja diferença é apenas a pintura da placa, teremos a razão:

$$U_1/U_2 = [(\Delta T/\Delta t)/(T_c - T_a)]_1 / [(\Delta T/\Delta t)/(T_c - T_a)]_2$$

O resultado poderá ser comparado com o da experiência anterior.

Conclusão

Descreveram-se alguns exemplos de experiências que podem ser feitas com pouco material. As limitações monetárias que se exigiram implicam medições pouco rigorosas. No entanto os resultados foram bastante satisfatórios, estando razoavelmente de acordo com a teoria.

A alternativa Hidrogénio-Energia Solar

J. OREHOTSKY (*)

Wilkes College, Wilkes-Barre, Pa. 18166, USA

A conversão directa de energia solar em energia química através da produção de hidrogénio por fotoelectrólise da água constitui, por várias razões, uma alternativa potencialmente interessante. Ao contrário dos combustíveis fósseis, a combustão do hidrogénio não deixa resíduos nem é poluente. O hidrogénio obtido a partir da luz solar pode ser armazenado e usado mais tarde, em períodos de obscuridade, para produção de energia. A água para a fotoelectrólise é um produto natural extremamente barato e abundante que, de resto, é

regenerado na combustão do hidrogénio. Finalmente a luz solar representa uma fonte de energia (para o processo de fotoelectrólise) praticamente inesgotável.

Apesar de todas estas características eminentemente desejáveis o fenómeno da fotoelectrólise passou despercebido durante vários anos após a sua descoberta.

(*) O Dr. J. Orehotsky foi professor visitante no Laboratório de Física da Faculdade de Ciências do Porto, de Janeiro a Julho de 1981 (tradução por J. M. Araújo e J. B. Sousa).