

A  
RADIACÃO SOLAR  
E O  
AMBIENTE

---

*JOSÉ PINTO PEIXOTO*

---

COMISSÃO NACIONAL DO AMBIENTE



---

A RADIAÇÃO SOLAR E O AMBIENTE

---



## COLECÇÃO O AMBIENTE E O HOMEM

### VOLUMES PUBLICADOS

- O CULTO DA NATUREZA — J. Vieira Natividade. 1976  
A POLÍTICA DO AMBIENTE E A QUALIDADE DE VIDA — M. Gomes Guerreiro. 1977  
A PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA DA TERRA — Luís S. Barreto. 1977  
O AMBIENTE E A ECONOMIA — Luís S. Barreto. 1977  
A ÁGUA. A ESCASSEZ NA ABUNDÂNCIA — Zózimo Castro Rego. 1977  
A ECOLOGIA DOS RECURSOS DA TERRA — M. Gomes Guerreiro. 1979  
O CICLO DA ÁGUA EM ESCALA GLOBAL (2.ª edição) — J. Pinto Peixoto. 1979  
A ECOLOGIA DA LUZ E DA VIDA — Germano da Fonseca Sacarrão. 1979  
A RADIAÇÃO SOLAR E O AMBIENTE — J. Pinto Peixoto. 1981  
A TEMPERATURA COMO FACTOR ECOLÓGICO — Germano da Fonseca Sacarrão. 1981

### VOLUMES A PUBLICAR

- A METEOROLOGIA E O AMBIENTE — J. Pinto Peixoto e T. Espírito Santo  
A BIO-ECOLOGIA DA ÁGUA — Germano da Fonseca Sacarrão

## NOTAS TÉCNICAS

### VOLUMES PUBLICADOS

- O CADMIO — Maria Júlia Ferreira Ribeiro. 1979  
OS HIDROCARBONETOS CLOROFLUORADOS — Alberto Carneiro. 1979  
OS EFEITOS DO RUÍDO NO HOMEM — Pedro Martins da Silva. 1980  
OS BIFENILOS POLICLORADOS — Margarida Conte de Barros. 1980

### VOLUMES A PUBLICAR

- OS ASBESTOS — Maria da Graça Cabeçadas e Maria João Magalhães  
O CRÓMIO — Alberto Carneiro  
O RUÍDO NA LEGISLAÇÃO PORTUGUESA

À Colega, Ao Amigo  
Ao Fernando, Ao Colaborador  
Ao Realizador, Ao Bom,  
Ao Sabedor  
que se chama

Carvalho Rodrigues

(Professor, Doutor e estético  
das Ópticas do  
Reino")

A RADIAÇÃO SOLAR  
E O AMBIENTE

J. PINTO PEIXOTO

*J. Pinto Peixoto*

## ÍNDICE

I — <i>INTRODUÇÃO</i> ... ..	11
A RADIAÇÃO SOLAR, O HOMEM E O AMBIENTE ...	11
A RADIAÇÃO SOLAR E A TERRA ... ..	14
II — <i>A RADIAÇÃO EMITIDA PELO SOL</i> ... ..	19
ENERGIA RADIANTE E O ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR ... ..	19
O SOL E A ORIGEM DA ENERGIA SOLAR ... ..	26
EMISSÃO DA ENERGIA RADIANTE. EMISSÃO POR INCANDESCÊNCIA E LUMINESCÊNCIA ... ..	31
Princípio de Prévost ... ..	31
Lei de Kirchoff. Emissividade ... ..	34
Leis de Stefan-Boltzman e de Wien ... ..	37
Lei de Plank e espectro da radiação solar ... ..	39
A RADIAÇÃO SOLAR NO ESPAÇO SEM MATÉRIA	43
A constante solar ... ..	43
Distribuição da radiação solar no topo da atmosfera	45
III — <i>O EFEITO DA ATMOSFERA DA TERRA NA RADIAÇÃO SOLAR</i> ... ..	55
PROPAGAÇÃO E DEPLECÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR NA ATMOSFERA ... ..	55

ABSORÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR NA ATMOSFERA	56
Os absorventes na atmosfera e os espectros de absorção	56
Lei de Beer e absorção da radiação solar	59
A transmissividade da atmosfera. Lei de Bouguer	62
DIFUSÃO DA RADIAÇÃO SOLAR NA ATMOSFERA	66
Caracterização da difusão	66
Factores de difusão	68
Depleção da radiação solar pela difusão	72
A difusão e fenomenologia da atmosfera	74
A difusão pelas nuvens e pelas partículas suspensas da atmosfera	77
EFEITO DAS NUVENS	80
A FORMAÇÃO DA IONOSFERA E DA OZONOSFERA	82
IV — <i>RADIAÇÃO SOLAR NA SUPERFÍCIE DO GLOBO</i>	91
MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR	91
CÁLCULO DA RADIAÇÃO SOLAR NA SUPERFÍCIE DO GLOBO	95
Cálculo da transmissividade total da atmosfera	95
A radiação solar à superfície do Globo	98
Exemplo	101
MÉTODOS EMPÍRICOS PARA A DETERMINAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR NA SUPERFÍCIE DO GLOBO	105
DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE SOLAR	108
BALANÇO DA RADIAÇÃO SOLAR	111
Distribuição da radiação solar na atmosfera e no Globo	111
Balanço da radiação solar na atmosfera e no Globo	118



DISTRIBUIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR EM PORTUGAL CONTINENTAL ... ..	125
Carta da insolação ... ..	125
Distribuição da radiação solar ... ..	127
Exemplo dum estudo local: a radiação solar em Lisboa ... ..	133
 V — <i>EPILOGO: O SOL, AGENTE DINÂMICO DA TERRA, DA VIDA E DO AMBIENTE</i> ... ..	 139
A RADIAÇÃO SOLAR E A MODELAÇÃO DA CROSTA TERRESTRE ... ..	139
A RADIAÇÃO SOLAR, O CLIMA E A BIOSFERA ...	143
A ENERGIA SOLAR NO QUADRO DA ENERGETICA DA TERRA ... ..	147
A ENERGIA SOLAR: ESPERANÇA DO FUTURO ...	149
A ENERGIA: ÍNDICE DE CULTURA ... ..	159
ENERGIA SOLAR, ENTROPIA E AMBIENTE ... ..	162
 RESUMO ... ..	 171
SUMMARY ... ..	175
BIBLIOGRAFIA ... ..	179

## I — INTRODUÇÃO

«Louvado sejas, Meu Senhor, com todas as tuas criaturas, especialmente o nosso irmão Sol que faz o dia e nos dá a luz. E ele é belo e radiante com o seu esplendor.»

.....

«Louvado sejas, Meu Senhor, pelo nosso irmão vento e o ar e as nuvens, e o céu sereno e toda a espécie de tempo pelo qual às tuas criaturas dás sustento...»

«O CANTICO DO SOL» — S. FRANCISCO DE ASSIS

### A RADIAÇÃO SOLAR, O HOMEM E O AMBIENTE

O Sol abençoa-nos de uma forma generosa e desinteressada com a luz que nos alumia e o calor que nos aquece.

O Sol é a fonte principal da energia da Terra. Origina a fenomenologia natural que ocorre no Globo e na atmosfera e determina todas as formas de vida possíveis no planeta Terra. É o factor modelador, por excelência, do sistema climático global, e da dinâmica dos climas. É o factor essencial da modelação do ambiente e da formação e manutenção do ciclo hidrológico, com todas as implicações de natureza ecológica.

O Sol fornece a energia que faz crescer as plantas e a luz sem a qual haveria noite perpétua. Sem plantas não haveria animais e sem estes não existiria o homem. O desenvolvimento cultural e social do homem e a sua diferenciação dos outros animais só foram possíveis pela capacidade que tem de explorar, concentrar e manipular fontes de energia exteriores, ultrapassando as limitações a que esteve confinado, enquanto utilizou sua energia própria obtida pelo consumo de plantas e animais. O que distingue o homem dos animais é a capacidade e a habilidade de conceber e fabricar ferramentas e máquinas que lhe permitem concentrar e utilizar a energia à sua volta.

O homem sabe usar fontes inanimadas de energia e aprendeu a dominar o ambiente em que vive, o que faz dele a espécie suprema do mundo.

A energia radiante solar que inunda a Terra constrói ordem na desordem aparente, através dos processos da vida, da organização das circulações gerais da atmosfera e dos oceanos.

A maioria dos processos naturais que ocorrem no Universo procedem com um aumento de entropia. Todavia, a vida adia o efeito desta lei, com a utilização da energia da luz solar, ao construir moléculas biológicas de estruturas mais complexas e organizadas, a partir de moléculas de estrutura bem mais simples. No complexo fabril dos processos naturais, o princípio da entropia é o gestor inexorável da contabilização da energia, ainda que esta assente no princípio da indestrutibilidade. A entropia pode ser criada — o que está a acontecer constantemente em processos naturais — ou destruída e nisso se distingue da energia, que não pode ser nem criada nem destruída: apenas se pode apresentar sob formas diferentes sem alteração do cômputo global.

O homem faz parte dum sistema dinâmico, que é o seu ecossistema, que inclui os componentes químicos e físicos, vivos e inertes do seu ambiente. Este sistema está a variar e a ajustar-se cons-

tantemente. A radiação solar é, de longe, a fonte de energia preponderante para a dinâmica do sistema. O resto da energia provém do calor da Terra e pouco mais...

Parte da radiação solar é captada pelas plantas que, através da fotossíntese, é transformada em energia química que constitui a fonte primária da energia da alimentação. Parte da energia solar mantém o ciclo hidrológico que forma um sistema gigantesco de destilação natural a partir da água dos oceanos. Outra parte, ainda, mantém a superfície da Terra e a atmosfera inferior a uma temperatura suficientemente elevada para permitir a existência da vida.

A energia química das plantas constitui a fonte de alimentação dos vários organismos animais; é também a energia que pode ser convertida em calor quando queimada, ou ser armazenada sob a forma de combustível fóssil. A energia da alimentação passa por intermédio dos animais herbívoros, para os animais carnívoros, através de uma cadeia complexa de alimentação. Esta constitui uma via do fluxo de energia, sempre acompanhado de dissipação.

O ecossistema actua como um reservatório de energia, através da flora e da fauna e dos outros componentes, ao mesmo tempo que trava a degradação da energia. Como não pode haver transferência de energia sem que alguma se transforme em calor, nem toda a energia transferida é utilizável pelo sistema. Em cada elo da cadeia de alimentação há uma perda enorme de energia disponível. Só uma pequena fracção da energia dos alimentos contida nos tecidos vivos é que é transferida para a fase seguinte da cadeia. E assim, por exemplo, para uma cadeia de alimentação que tenha início no mar o aumento de 1 kg de peso de um homem corresponde a uma produção de 1000 kg de matéria viva nos oceanos.



## A RADIAÇÃO SOLAR E A TERRA

Pode dizer-se que todas as formas de energia existentes na Terra são provenientes directa ou indirectamente do Sol. A quantidade de energia recebida da Lua e dos outros corpos celestes é muito pequena e praticamente inapreciável.

A energia solar constitui a verdadeira causa de todos os processos físicos e químicos que ocorrem na Terra, responsáveis pelas condições meteorológicas, pelas circulações oceânicas, pela modelação da crosta terrestre e por todos os fenómenos biológicos.

Ao atravessarem a atmosfera os raios solares dão origem a uma série de fenómenos provenientes dos acidentes de propagação da radiação, tais como a reflexão, a refacção, a difracção, a absorção e a difusão da luz solar. A difusão da luz, que permite ver os objectos não directamente iluminados, à sombra, é a causa do cor azul do céu e dos matizes avermelhados dos crepúsculos. A reflexão, a refacção, a difracção e a absorção da luz originam vários fenómenos ópticos da atmosfera, designadamente o arco-íris, os halos, as coroas, as auroras polares, etc.

O aquecimento desigual da atmosfera e da superfície do globo terrestre, devido à absorção da radiação solar, é a causa da circulação geral da atmosfera. Esta, por sua vez, induz e modela a circulação dos oceanos, originando os grandes sistemas de correntes marítimas que transportam grandes quantidades de água e de calor para diversas regiões do Globo. Os ventos da circulação geral constituem, por sua vez, uma fonte secundária e renovável de energia.

É a radiação solar que mantém o grande sistema do ciclo hidrológico. A evaporação da água devido à absorção da radiação solar, lança na atmosfera quantidades enormes de vapor, que condensando-se dá origem às nuvens e à precipitação. É esta que alimenta os cursos de água, cujo escoamento para os oceanos vai compensar

as perdas em água devido à evaporação, permitindo a renovação constante do ciclo hidrológico: «os rios correm para os mares, contudo estes nunca se enchem» (\*).

A radiação solar é o factor principal do clima. Pode dizer-se que todos os outros factores são apenas consequências da radiação solar. Fundamentalmente, todos os componentes do sistema climático, designadamente a atmosfera, a hidrosfera, a criosfera, a litosfera e a biosfera, devem a sua origem e as suas características à radiação solar. A grande variedade de climas que se observa à superfície do Globo resulta directa ou indirectamente da energia solar, desde os que caracterizam as regiões polares, aos que se observam nos grandes desertos, aos que se verificam nas zonas subequatoriais com valores elevadíssimos da precipitação e em que predominam as grandes florestas.

A atmosfera actual da Terra resultou da acção da radiação solar. De facto, na sua fase inicial a Terra não teria tido qualquer atmosfera. Os elementos leves, tais como o hidrogénio e o hélio, por terem uma densidade muito pequena, e velocidades de agitação molecular muito elevadas, ter-se-iam escapado furtando-se ao efeito da gravidade. Não existiam oceanos. A superfície do Globo teria sido povoada por vulcões em actividade, que teriam lançado para o exterior lavas, hidrogénio, vapor de água, amoníaco, etc. Por acção da radiação solar, as moléculas de água teriam sofrido uma forte dissociação, originando oxigénio e hidrogénio. Este, por sua vez, ter-se-ia escapado para o espaço, enquanto que o oxigénio, reagindo com o metano e como o amoníaco, teria levado à formação de anidrido carbónico e de azoto, que numa fase inicial, seriam os principais componentes da atmosfera.

A transição para a atmosfera actual deu-se com o aparecimento

---

(\*) Eclesiastes.

da vegetação, que, ao absorver o anidrido carbónico, libertou mais oxigénio. À medida que a temperatura da Terra foi baixando e os processos iniciais da formação da atmosfera se estabilizaram, verificou-se a condensação do vapor de água, depositando-se o excesso da água líquida resultante nas depressões, dando origem aos oceanos. E com a precipitação que se passou a observar surgiram os cursos de água, os lagos, etc.

Todas as formas de vida requerem energia para a sua manutenção e para o seu crescimento. As algas, e alguns tipos de bactérias podem obter essa energia directamente da radiação solar. As plantas superiores e os animais não podem utilizar directamente a radiação solar como fonte de energia. Os animais obtêm a energia que necessitam alimentando-se de outros animais ou de plantas, que por fotossíntese fazem a conversão da energia solar.

Assim, a fonte última de toda a energia metabólica na Terra é o Sol e a fotossíntese desempenha um papel essencial para a conservação de todas as formas de vida na Terra. A fotossíntese pode considerar-se como o processo de conversão da energia radiante do Sol em energia química dos tecidos das plantas.

Os combustíveis fósseis que actualmente utilizamos, tais como, o carvão, o gás natural, o petróleo, etc. são produtos da decomposição de plantas e de animais terrestres e marinhos e a energia que armazenam foi capturada da radiação solar, há milhões de anos.

As fontes de energia da Terra são a energia solar (actual e armazenada), as marés, o calor do interior da Terra, os combustíveis de fissão e possivelmente de fusão nuclear. Do ponto de vista da história do Homem, a era dos combustíveis fósseis é relativamente breve.

Um organismo vivo pode ser encarado como um sistema termodinâmico, em que predomina a energia química, concebido para reproduzir e manter réplicas de si próprio, com base na utili-

zação da energia solar. Mas, a quantidade de energia só por si, não basta para manter a vida na Terra. Deve possuir também uma distribuição espectral bem definida e adequada.

A intensidade da radiação recebida na superfície do Globo é muito variável em grandeza e qualidade, devido, entre outras causas, à transmissividade não uniforme da atmosfera e à variação da nebulosidade. A atmosfera da Terra filtra a luz solar ao absorver a maior parte da radiação ultravioleta e parte da infravermelha, mantendo as condições propícias à vida, tal como a conhecemos.

Mas o que faz a radiação solar senão modelar o ambiente adequado à vida? E essa modelação estende-se ao «ECOS» na concepção lata do termo. Não modela a radiação solar a crosta terrestre, e não move a atmosfera e os oceanos? Não condiciona a sua estrutura e a sua evolução? Não renova em reciclagens perenes a flora e a fauna que determinam a paisagem geográfica? Não mantém o ciclo hidrológico que dá a água indispensável à vida? Não determina a circulação geral da atmosfera que gera os vários climas?

Por isso, podemos dizer, com propriedade, que a radiação solar é o factor essencial do ambiente.



## II — A RADIAÇÃO EMITIDA PELO SOL

### ENERGIA RADIANTE E O ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR

A energia recebida pela Terra provém na sua quase totalidade do Sol, e essa energia é constituída quase na íntegra por energia radiante de natureza electromagnética, porque a energia corpuscular, embora qualitativamente importante pela sua interacção com a alta atmosfera, por exemplo, é quantitativamente desprezável perante a energia radiante. A energia radiante propaga-se sob a forma de ondas electromagnéticas com um campo eléctrico e um campo magnético associados. A propagação da energia radiante não exige a existência de um meio material de suporte e pode, portanto, propagar-se no espaço desprovido de matéria.

A quantidade de energia radiante exprime-se em unidades de energia, e a sua qualidade é caracterizada pela frequência,  $\nu$ , ou, conhecidas as características do meio de propagação, pelo seu comprimento de onda,  $\lambda$ . Os comprimentos de onda exprimem-se em unidades de comprimento. Para os comprimentos de onda pequenos usam-se o micrómetro ( $\mu\text{m}$ ) que vale  $10^{-6}$  m, o nanómetro (nm) que vale  $10^{-9}$  m e, por vezes, ainda, o angstrom ( $\text{\AA}$ ) que vale  $10^{-10}$  m. A frequência exprime-se em Hertz, ou segundo<sup>-1</sup> ( $\text{s}^{-1}$ ).

Se a Terra recebesse radiação solar sem ela própria perder energia, a sua temperatura aumentaria indefinidamente. Ora, verifica-se que a temperatura média do Globo é praticamente constante, sofrendo pequenas variações dentro de certos limites bastante apertados. Logo, a Terra, incluindo a atmosfera, deve perder ener-radiante para o espaço exterior. O balanço entre a energia solar recebida e a energia terrestre emitida constitui o balanço energético que permite a existência de um ambiente em que é possível a existência de formas de vida, tais como as conhecemos. Qualquer ruptura deste balanço pode conduzir a sérias consequências, tais como um aquecimento global, glaciações, etc., originando portanto, variações do clima.

A atmosfera tem um papel importante, porque condiciona a quantidade de energia solar que atinge o Globo e a quantidade de energia terrestre que se escapa para o exterior. Portanto, a atmosfera influencia a temperatura média da superfície do Globo e determina a climatologia e a meteorologia da Terra.

O Sol emite energia electromagnética, cujos comprimentos de onda ( $\lambda$ ) vão de centenas de metros até valores inferiores a  $10^{-10}$  metros. No entanto, cerca de 99 % da energia solar está concentrado na região espectral, cujos comprimentos de onda estão entre 0,15 e 4,0 micrómetros ( $\mu\text{m}$ ).

O espectro da radiação solar compreende todo o espectro electromagnético desde os raios cósmicos, raios gama ( $\gamma$ ) e raios X, de comprimentos de onda muito pequenos e, portanto, de grande frequência, até às ondas hertzianas de grande comprimento de onda (c.d.o.) e pequena frequência, conforme se representa esquematicamente na Fig. 1.

A parte do espectro a que somos mais sensíveis e que afecta a nossa vista designamo-la por luz e constitui o *espectro visível*, ê muitas vezes conhecido por *espectro óptico*. Este corresponde apenas, a uma banda estreita do espectro em que a energia ra-

diante produz a sensação de luz quando atinge a retina. Compreende a região entre 0,40 e 0,70  $\mu\text{m}$ , ou seja, entre 4 000 e 7 000 Å. As cores, caracterizadas pelos vários comprimentos de onda, vão desde o violeta e o azul até ao vermelho.

O conjunto da radiação electromagnética tem características ondulatórias e propaga-se no vazio com uma mesma velocidade,  $c$ , que não depende do comprimento de onda, e que tem o valor de  $2,998 \times 10^8$  m/s. Por isso, entre o comprimento de onda,  $\lambda$ , e a frequência,  $\nu$ , existe uma relação única bem definida, dada pela expressão:

$$\lambda \nu = c$$

A algumas regiões do espectro são dadas designações de acordo com os comprimentos de onda e a outras de acordo com a frequência. As regiões do espectro do *ultravioleta* e do *infravermelho* referem-se, respectivamente, a frequências mais elevadas e mais baixas, quando comparadas às frequências do *visível*. É mais usual caracterizar a radiação do espectro solar pelos seus comprimentos de onda do que pelas frequências. Ultravioleta quer dizer no domínio das frequências «para além do violeta» e infravermelho «abaixo do vermelho».

O espectro da radiação solar compreende, como dissemos, todo o espectro electromagnético, dedse os raios  $\gamma$  e raios X até às ondas hertzianas da rádio. Todavia, as regiões mais importantes do espectro solar são a do *ultravioleta* ( $\lambda < 0,430 \mu\text{m}$ ), a do *visível* ( $0,430 < \lambda < 0,760 \mu\text{m}$ ) e a do *infravermelho* ( $\lambda > 0,760 \mu\text{m}$ ). As radiações de comprimento de onda inferiores aos do ultravioleta, designadamente os raios  $\gamma$ , raios X e raios cósmicos, assim como as radiações de comprimento de onda superiores à dos raios infravermelhos (ondas ultracurtas e ondas hertzianas) são, prati-

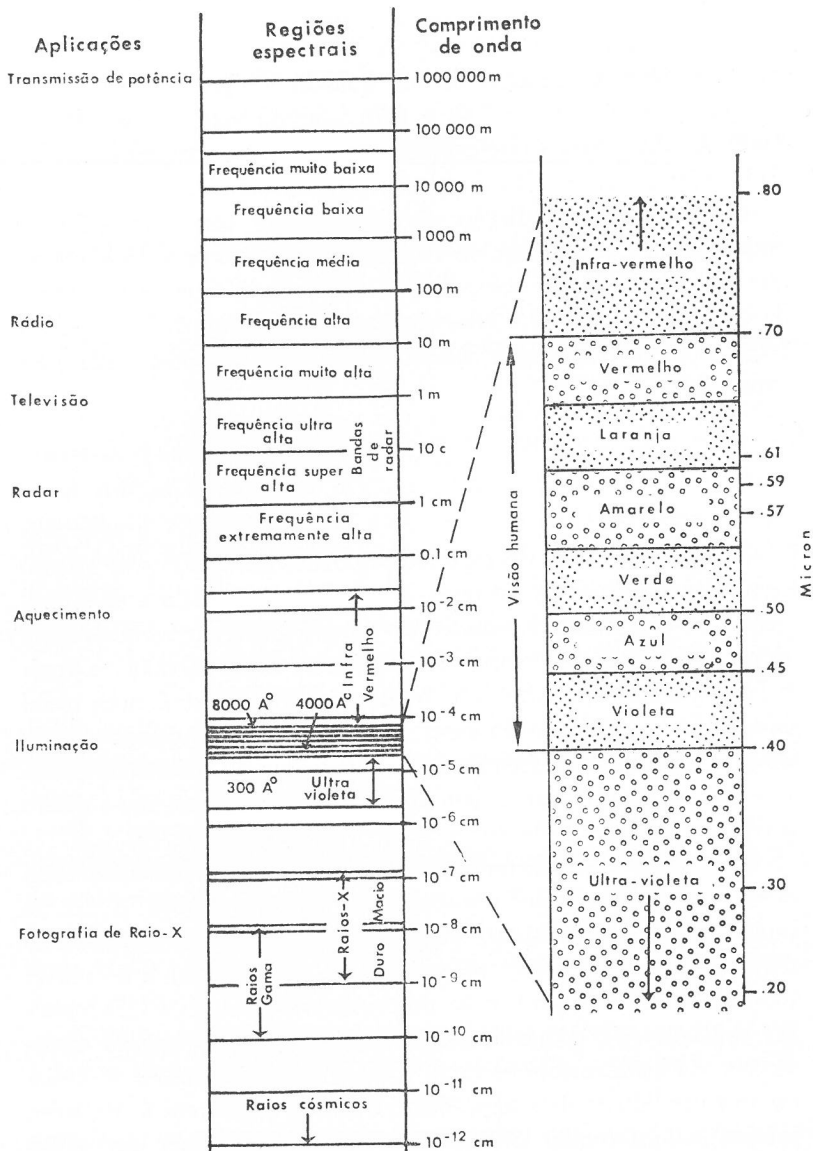


Fig. 1 — O espectro electromagnético. À direita faz-se o desdobramento da região visível do espectro, do ultravioleta e do infravermelho. O máximo da sensibilidade da vista humana corresponde ao verde-amarelado ( $\lambda = 0,555 \mu\text{m}$ )



camente, absorvidas pela atmosfera e não atingem a superfície do globo terrestre.

No QUADRO I indica-se a relação entre os vários comprimentos de onda do espectro da radiação solar e as cores respectivas na parte visível do espectro.

### QUADRO I

*Comprimentos de onda (c.d.o.) e cores correspondentes do espectro da radiação solar na região do visível*

Cor	Intervalo de c.d.o. ( $\mu\text{m}$ )	c.d.o. característico ( $\mu\text{m}$ )
Violeta	0,390 — 0,455	0,430
Azul escuro	0,455 — 0,485	0,470
Azul claro	0,485 — 0,505	0,495
Verde	0,505 — 0,550	0,530
Amarelo esverdeado	0,550 — 0,575	0,560
Amarelo	0,575 — 0,585	0,580
Laranja	0,585 — 0,620	0,600
Vermelho	0,620 — 0,760	0,640

Pode aceitar-se que 0,99 da energia solar que atinge a Terra está compreendida na região do espectro que se estende de 0,15 a 4,0  $\mu\text{m}$ , compreendendo, portanto, não só o visível (com 0,45 da energia) como grande parte do ultravioleta (com 0,09) e do infravermelho (0,46). Esta parte do espectro designa-se, por isso, região da radiação solar.

O espectro da radiação solar compreende, portanto, além das radiações luminosas que impressionam a retina, as radiações ultravioletas, invisíveis, mas capazes de impressionar chapas fotogrâ-

ficas, e com profunda influência nos processos bioquímicos, e as radiações infravermelhas, também invisíveis, e facilmente absorvidas pelos gases da atmosfera. Na Fig. 2 está representada a curva da irradiância espectral da radiação solar que atinge o topo da atmosfera e as curvas de emissão do corpo negro às temperaturas de 5700 e 6000 graus Kelvin ( $^{\circ}\text{K}$ ) (\*).

Na Fig. 2 as ordenadas dão a irradiância espectral (\*\*\*) em  $W/(\text{cm}^2 \cdot \mu)$  e as abscissas o c.d.o. em  $\mu\text{m}$  (micrómetros).

O máximo da intensidade de radiação solar situa-se no c.d.o. de cerca de  $0,49 \mu\text{m}$  ( $4.900 \text{ \AA}$ ) na zona do visível correspondente ao verde-azulado, diminuindo rapidamente a intensidade para ambos os lados, como mostra a Fig. 2.

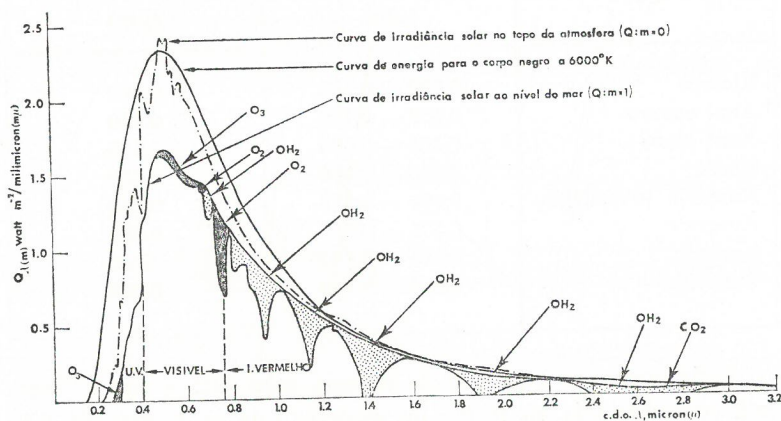


Fig. 2 — Curvas da irradiância solar no topo da atmosfera e na superfície do Globo. Na figura está também representada a curva de emissão do corpo negro para uma temperatura de  $6000^{\circ}\text{K}$ , que corresponde à temperatura do Sol

(\*) A temperatura em graus Kelvin obtém-se juntando  $273,15$  à temperatura em graus Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ).

(\*\*) Adiante precisaremos este conceito (pág. 32).

A vista humana é sobretudo sensível ao amarelo e ao verde. E assim, a fotografia de uma paisagem a cores não se apresenta exactamente como a vemos, porque a sensibilidade da emulsão da chapa (ou do filme) para as várias regiões do espectro é diferente da sensibilidade da nossa retina. É, por isso, que em fotografia a paisagem se apresenta como nós a veríamos através dum filtro azulado ou violeta.

\*

\*        \*

Em 1900, Max Planck enunciou a «teoria dos quanta» segundo a qual a emissão da energia radiante se faz de forma descontínua, o que implica a existência de uma estrutura granular com «grânulos de energia» que se chamam quanta. Esta teoria pode exprimir-se matematicamente atribuindo a cada *quantum* uma energia  $E$  dada pela expressão  $E = h\nu$  em que  $\nu$  é a frequência da radiação (número de ondas transmitidas por unidade de tempo) e  $h$  é uma constante universal — a constante de Planck — com dimensões do produto de energia pelo tempo («acção») e cujo valor mais provável é:  $h = 6,625 \times 10^{-34}$  joules . seg. (J . s).

A teoria de Planck admite que um oscilador de frequência fundamental  $\nu$  aumenta a sua energia de forma descontínua por quantos  $h\nu$ ,  $2h\nu$ ,  $3h\nu$ ...  $nh\nu$ , múltiplos da energia de um quanta, que é  $h\nu$ . A energia de um *quantum* de luz, que se designa também por *fóton*, é o produto da frequência da luz,  $\nu$ , pela constante de Planck,  $h$ , isto é:  $E = h\nu$ . Dada a relação entre a frequência e o comprimento de onda,  $\lambda$ , ( $\nu\lambda = \text{Inv.}^{\text{te}}$ ) conclui-se que, quanto menor for o comprimento de onda,  $\lambda$ , maior será a sua frequência,  $\nu$ , e, portanto, mais elevado é o conteúdo de energia do respectivo fóton. Os fótons de luz azul de um extremo do espectro do visível têm uma energia mais elevada do que os fótons da radiação vermelha do outro extremo do espectro visível.

Um mole de qualquer substância (massa expressa em gramas pelo mesmo número que a sua massa molecular) contém  $6 \times 10^{23}$  moléculas; este número é o *número de Avogadro* ou de *Loschmidt*. Ao tratar da interacção da energia radiante com a matéria, convém que a interacção seja referida a um mole da substância. O conteúdo em energia duma ligação molecular pode multiplicar-se por  $6 \times 10^{23}$  para obter a energia química referida a um mole. Podemos agora admitir, que tudo se passa como se um mole contivesse  $6 \times 10^{23}$  quantos de energia e obter o equivalente molar em energia radiante.

Vejam os alguns exemplos de aplicação.

O equivalente molar da energia da radiação azul, cujo comprimento de onda é  $0,45 \mu\text{m}$  ou  $450 \text{ nm}$  é  $64$  quilocalorias por mole; para o infravermelho ( $\lambda = 900 \text{ nm}$ ) é  $32$  quilocalorias por mole e a da radiação ultravioleta ( $\lambda = 225 \text{ nm}$ ) é  $128$  quilocalorias por mole.

## O SOL E A ORIGEM DA ENERGIA SOLAR

Começemos por dar algumas noções gerais sobre a constituição do Sol.

O Sol é uma estrela comum, constituída principalmente por hidrogénio e com uma temperatura à superfície da ordem de  $6000^\circ \text{ K}$ . É um corpo gasoso animado de movimento de rotação relativamente lento, e com um diâmetro da ordem de  $1,4 \times 10^6 \text{ km}$ . Aceita-se que o Sol, além do *núcleo*, é constituído por três camadas principais que são a *fotosfera*, a *camada de inversão* e a *coroa*. Tem uma atmosfera ténue, que se estende por vários diâmetros.

A *fotosfera* ou «esfera de luz» é a principal fonte da radiação solar. É uma camada de algumas centenas de quilómetros, que

delimita o disco solar visível e é a parte exterior do núcleo, com um raio da ordem de  $10^5$  km. Supõe-se que é constituída por gases com uma grande densidade ( $100 \text{ g/cm}^3$ ), em que a temperatura atinge valores muito elevados, da ordem de milhões de graus.

A superfície visível da fotosfera, quando observada ao telescópio, apresenta-se como uma estrutura granulada como se estivesse coberta por grânulos brilhantes, alternando com outros mais escuros. As células brilhantes — designadas por *fáculas* — têm dimensões da ordem de 2000 km e uma vida média de 10 minutos. Além disso têm valores da temperatura cerca de 100 graus mais elevados do que as regiões vizinhas mais escuras. Os gases que por convecção atingem a superfície irradiam quase imediatamente o excesso de calor que transportam. À medida que se dá o arrefecimento verifica-se a subsidência dos gases, de forma mais acentuada, na orla exterior da célula convectiva. Devido ao forte gradiente de temperatura no interior da fotosfera as células convectivas que emitem radiação para o espaço têm temperaturas que apresentam variações de, pelo menos, algumas centenas de graus. O coeficiente de absorção dos gases das camadas exteriores variam também com o comprimento de onda da radiação o que explica, em grande parte, a distribuição e o afastamento do espectro da radiação solar, do espectro do corpo negro.

A observação e a investigação da estrutura do Sol revelaram a existência de regiões muito activas, com vários fenómenos que aparecem interligados. Entre estes, temos as *manchas solares* que são zonas escuras (frias) que interrompem a configuração quase regular da granulação fotosférica. Os grupos de manchas solares são acompanhados de campos magnéticos muito intensos com orientações definidas e que se invertem nos dois hemisférios solares. As manchas solares têm uma vida média que varia de alguns dias até meses. As *fáculas*, que são regiões brilhantes das configurações da supergranulação, aparecem muitas vezes em



conjunção com as manchas solares. São também acompanhadas de campos magnéticos muito intensos.

Além das fáculas devem ainda considerar-se as erupções solares da fotosfera, que são constituídas por jactos muito violentos e intensos, de radiação acompanhados de partículas de alta energia que emanam da atmosfera exterior do Sol nas regiões activas. As erupções têm uma vida média da ordem de uma hora.

A frequência da actividade solar parece ser modelada por um ciclo solar de 11 anos. Nos anos que correspondem aos máximos no ciclo (como aconteceu no Ano Geofísico Internacional, 1958), as manchas solares, as fáculas e as erupções são muito numerosas, enquanto que nos anos de actividade mínima (como o Ano Internacional do Sol Calmo, 1964) a actividade solar desaparece quase por completo. Entre dois ciclos sucessivos há uma reversão na orientação dos campos magnéticos associados às manchas solares. Por isso se considera, por vezes, o ciclo solar com 22 anos.

Acima da fotosfera existe a *camada de inversão*, mais fria, com temperaturas da ordem de  $5\,400^\circ\text{K}$  e que dá origem a riscas de absorção no espectro da radiação emitida pelas camadas inferiores. A terceira camada é a *cromosfera*, ou «esfera da cor», assim designada por causa da particularidade da sua cor (avermelhada). A cromosfera, tem uma espessura de cerca de 2500 km e a sua temperatura varia de poucos milhares de graus na base, até valores da ordem de um milhão de graus no limite superior.

A cromosfera lança para o exterior jactos de partículas ionizadas, com temperaturas extremamente elevadas e que constituem o *vento solar*, com velocidades da ordem de 500 k/s e temperaturas de cerca de um milhão de graus. A radiação difundida pelos electrões livres da parte interior mais densa do vento solar produz uma luminosidade difusa que constitui a *coroa solar*. Como veremos, de acordo com a lei do deslocamento de Wien, os gases na cromosfera exterior e na coroa emitem radiação com o pico da irra-

diância nas regiões do ultravioleta afastado e dos raios X. A parte do espectro da radiação solar de pequeno comprimento de onda e a de grande comprimento de onda provêm da cromosfera superior e da coroa solar.

As propriedades da fotosfera («esfera de luz») não variam substancialmente com o tempo. A maior parte da quantidade de radiação solar, que corresponde às regiões do visível e do infravermelho do espectro, provêm da fotosfera e, por isso, é de esperar que a variabilidade da quantidade total da radiação recebida na Terra seja relativamente pequena.

Em contraste com a quase constância da emissão da fotosfera, a intensidade da radiação da cromosfera exterior e da coroa solar aumenta com a actividade solar e, em particular, quando se observam as erupções. A reacção da emissão é notavelmente forte nas regiões do ultravioleta e dos raios X do espectro. Assim, durante as erupções, a radiação de comprimento de onda inferior a  $0,2 \mu\text{m}$  tem intensidades superiores em duas ordens de grandeza às correspondentes a períodos calmos. No entanto, deve acentuar-se que a contribuição da cromosfera e da coroa solar para a irradiância total da energia radiante emitida pelo Sol, constitui apenas uma fracção pequeníssima, da ordem de 1 para  $10^5$ . Por isso, os efeitos das erupções na quantidade de radiação que atinge a Terra, nem sequer são detectáveis.

Vejam agora as teorias sobre a origem da energia emitida pelo Sol. A energia emitida pelo Sol distribui-se em todas as direcções propagando-se pela vastidão do espaço; só uma fracção diminuta dessa energia é intersectada pela Terra. Mesmo assim é enorme e da ordem de  $8 \times 10^{10}$  kcal/s.

Para explicar a quantidade de energia prodigiosa, emitida pelo Sol, têm sido apresentadas numerosas teorias. Começaremos por nos referir às antigas teorias da combustão (Lord Kelvin), à hipó-

tese da contracção de Helmholtz e às teorias baseadas na radioactividade natural.

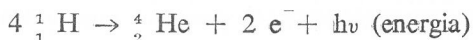
Estas teorias não eram adequadas para explicar a energia solar que se observa e levariam a admitir para o Sol uma vida média muito curta, absolutamente irrisória. Além disso, os mecanismos implícitos nessas teorias conduziram a uma exaustão quase imediata das fontes de alimentação da energia irradiada pelo Sol. Por outro lado, não são consistentes com o conhecimento que hoje se dispõe sobre a composição do Sol, o seu estado físico e a sua estrutura.

O problema da origem da energia solar começou a ser encarado mais tarde por Eddington (1920) numa forma mais objectiva, a partir do estudo da constituição do interior das estrelas e da forma como emitiam energia. Hautermans, um físico austríaco, e Atkinson, um astrónomo britânico, formularam a hipótese de que a produção de energia no interior das estrelas, e portanto do Sol, se podia atribuir a transformações nucleares causadas pela temperatura extremamente elevada do seu interior com a formação de núcleos de hélio a partir de núcleos de hidrogénio. Esta hipótese aproxima-se, nas suas linhas gerais, com as ideias actuais.

Teller e Gamow admitiram uma série de reacções termonucleares possíveis no interior do Sol. Mas foi a teoria apresentada por Bethe e Von Weizäcker que permitiu explicar e conciliar as temperaturas observadas no Sol, com a energia libertada, com as vidas médias das fontes e com a quantidade de hélio existente no Sol.

De acordo com a teoria de Bethe, a energia radiada pelo Sol provém de reacções termonucleares complexas, que convertem protões (núcleos de hidrogénio) em partículas  $\alpha$  (núcleos de hélio), à custa de quatro núcleos de hidrogénio. Neste processo há uma conversão de massa,  $m$ , em energia,  $E$ , de acordo com a conhecida relação de Einstein,  $E = m c^2$ , em que  $c$  representa a velo-

cidade de propagação da luz no vácuo. A energia solar provém da fusão nuclear, em que quatro núcleos de hidrogénio (H) se associam para formar um núcleo de hélio (He), de acordo com um esquema do tipo:



em que  $\text{e}^-$  representa a massa de um electrão.

A contracção da enorme massa do Sol pela acção da gravidade produz a temperatura necessária para que sejam possíveis as reacções termonucleares. Nestas reacções há consumo de hidrogénio com uma taxa de conversão de cerca de  $4 \times 10^6$  toneladas por segundo. O Sol produz energia com uma taxa da ordem de  $3,90 \times 10^{26}$  watts. A julgar pela quantidade de hidrogénio ainda disponível no Sol podemos estar descansados, porque mesmo com esta taxa de consumo, o Sol continuará a brilhar ainda por mais  $10^{11}$  anos, visto que o consumo de hidrogénio por segundo é apenas  $0,5 \times 10^{-21}$  da massa total do Sol. A conversão de massa em energia resulta, imediatamente, da análise do esquema anterior, notando que  $4\text{H} = 4,03257$  amu (\*) e que  $\text{}^4_2\text{He} = 4,00389$  amu.

## EMISSÃO DA ENERGIA RADIANTE. EMISSÃO POR INCANDESCÊNCIA E LUMINESCÊNCIA

### PRINCIPIO DE PRÉVOST

Quando se analisa o espectro da energia radiante emitida pelo Sol na região que mais nos interessa, verifica-se que aquele se

---

(\*)  $1 \text{ amu} = 1,492 \times 10^{-10} \text{ J}$ .

comporta como se emitisse energia por incandescência, isto é, energia cuja quantidade e qualidade (distribuição espectral) dependem unicamente da temperatura.

Ora, sabe-se desde Prévost (1790) que todo o corpo emite energia radiante, cujas características dependem, fundamentalmente, da sua temperatura absoluta. É por isso que a Terra, a atmosfera, os oceanos e os continentes, emitem para o espaço a radiação própria de acordo com a sua temperatura. Esta não é visível, porque se localiza no domínio do infravermelho do espectro electromagnético. É esta radiação que ao ser intersectada pelos satélites constitui a base para a detecção remota da estrutura da atmosfera, por exemplo.

Nem todos os corpos emitem energia ao mesmo ritmo. Convém, portanto, avaliar a taxa de emissão de energia radiante, que designaremos por *fluxo radiante* ( $\Phi$ ). Este exprime-se em joules por segundo ou watts. Por exemplo, o fluxo radiante do Sol é cerca de  $3,90 \times 10^{26}$  watts. Se dividirmos o fluxo radiante pela área da superfície emissora obtemos a *irradiância* ( $E$ ), que se exprime em watts por metro quadrado. Muitas vezes ainda se usa a unidade tradicional, que é a caloria por centímetro quadrado e por minuto [ $\text{cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ ]. A irradiância do Sol, cujo raio é aproximadamente  $7 \times 10^8 \text{m}$ , é portanto dada por:

$$E = \frac{3,90 \times 10^{26}}{4\pi(7 \times 10^8)^2} = 6,34 \times 10^7 \text{ W/m}^2$$

Mas a irradiância depende do comprimento de onda da radiação emitida. Por isso, define-se também a irradiância específica dum radiação de um determinado comprimento de onda  $\lambda$ , designada por *irradiância monocromática* ( $E_\lambda$ ) e que se avalia em watts por metro quadrado e por micrómetro, por exemplo.



Em geral, a irradiância que incide sobre um elemento de área, é constituída por radiações com direcções diferentes. Torna-se, por isso, muitas vezes necessário identificar a fracção da irradiância que provém dum feixe com uma dada direcção e cuja abertura é um ângulo sólido elementar  $d\omega$  (\*). Esta grandeza, que tradicionalmente se designava por intensidade, passou a designar-se agora por *radiância* e avalia-se em watts por metro quadrado e por esteradiano.

A radiação proveniente duma fonte que subtende um ângulo sólido finito é constituída por radiação distribuída por todas as direcções possíveis, no seu interior. No caso limite duma fonte pontual de energia, a radiância, tal como se definiu, torna-se infinitamente grande porque o ângulo subtendido pela fonte se aproxima de zero, e, neste caso, toda a radiação tem praticamente da mesma direcção e pode admitir-se que todos os feixes são paralelos. É o caso do Sol que se considera como uma fonte pontual, o que nos leva a aceitar que a radiação solar que atinge a Terra é constituída por feixes paralelos permitindo eliminar o efeito global do ângulo sólido.

Consideremos a radiação monocromática  $E_\lambda$  (inc.) que incide na superfície de um corpo, parcialmente opaco para essa radiação. Uma parte da radiação incidente,  $E_\lambda$  (ref.), é reenviada para o espaço por reflexão; outra,  $E_\lambda$  (abs.), penetra no corpo e é parcialmente absorvida por ele; e, finalmente, a parte restante que não foi absorvida,  $E_\lambda$  (tra.), é transmitida também sob a forma de energia radiante.

---

(\*) O ângulo sólido num ponto avalia-se pela área que o feixe determina sobre uma esfera de raio unidade e centrada nesse ponto. Se tomarmos as coordenadas esféricas usuais  $(r, \theta, \lambda)$ , o ângulo sólido  $d\omega$  é dado por  $d\omega = \sin\theta \cdot d\lambda \cdot d\theta$ , e exprime-se em esteradianos.

Pelo princípio da conservação da energia tem que verificar-se, para a radiação de comprimento de onda  $\lambda$ , a seguinte igualdade:

$$E_{\lambda} (\text{inc.}) = E_{\lambda} (\text{ref.}) + E_{\lambda} (\text{abs.}) + E_{\lambda} (\text{tra.})$$

Se dividirmos os termos desta igualdade pela irradiância monocromática incidente  $E_{\lambda} (\text{inc.})$  vem:

$$1 = \frac{E_{\lambda} (\text{ref.})}{E_{\lambda} (\text{inc.})} + \frac{E_{\lambda} (\text{abs.})}{E_{\lambda} (\text{inc.})} + \frac{E_{\lambda} (\text{trans.})}{E_{\lambda} (\text{inc.})}$$

Se introduzirmos os conceitos de reflectividade,  $r_{\lambda}$ , de absorvidade,  $a_{\lambda}$  e de transmissividade,  $\tau_{\lambda}$ , para a radiação  $\lambda$ , a expressão anterior reduz-se a:

$$1 = r_{\lambda} + a_{\lambda} + \tau_{\lambda}$$

Estas grandezas não têm dimensões e só podem ter valores compreendidos entre 0 e 1.

#### LEI DE KIRCHOFF. EMISSIVIDADE

Um corpo emite energia radiante, que depende da sua temperatura. Podemos, pois, considerar a irradiância específica monocromática, de comprimento de onda  $\lambda$ , emitida pelo corpo. Esta designa-se, tradicionalmente, por poder emissivo do corpo, para o c.d.o.  $\lambda$ , e representa-se por  $e_{\lambda}$ . Se considerarmos a irradiância para todas as radiações de vários comprimentos de onda emitidas pelo corpo, devemos considerar em vez de  $e_{\lambda}$  o poder emissivo total,  $e$ , que se define pelo integral:

$$e = \int e_{\lambda} \cdot d\lambda$$

Um passo decisivo para o estudo e compreensão da emissão da radiação por incandescência foi dado pelo físico alemão Kirchoff (1860) ao mostrar que a emissividade e a absorvidade dum corpo não são independentes entre si. Estão relacionadas por uma lei muito simples, que afirma que o quociente do poder emissivo  $e_\lambda$  pela absorvidade  $a_\lambda$  é uma função universal da temperatura  $T$  e do comprimento de onda  $\lambda$ ,  $E(\lambda, T)$ , isto é:

$$e_\lambda / a_\lambda = E(\lambda, T)$$

Logo, para uma dada radiação de comprimento de onda  $\lambda$ , o quociente anterior é independente da natureza do corpo e só depende da sua temperatura (Lei de Kirchoff).

Quando a radiação solar incide simultaneamente sobre uma superfície enegrecida e sobre uma superfície branca, verifica-se que a superfície enegrecida absorve a maior parte da energia incidente, enquanto que a superfície branca reflecte a maior parte da radiação recebida. A diferença de temperatura das duas superfícies permite avaliar a quantidade da radiação solar incidente. É este o fundamento de alguns instrumentos de mediação da radiação solar e que se designam por solarígrafos.

Pois bem, por uma extensão analógica deste facto experimental, vamos definir um corpo ideal que absorveria integralmente toda a energia de todos os comprimentos de onda que nele incidisse e que designaremos por *corpo negro*. Constitui um caso limite, ideal em que a absorvidade  $a_\lambda$  é igual a 1, enquanto que a reflectividade  $r_\lambda$  e a transmissividade  $\tau_\lambda$  são nulas, qualquer que seja  $\lambda$ .

Se  $a_\lambda = 0$  diz-se que se trata dum *corpo branco*. Podemos ainda definir *corpo cinzento* como aquele em que  $a_\lambda$  está compreendido entre zero (corpo branco) e a unidade (corpo negro) para qualquer comprimento de onda. Devemos acentuar que os

corpos reais podem comportar-se umas vezes como um corpo branco e ainda outras como um corpo cinzento, conforme os comprimentos de onda. No entanto, o corpo cinzento constitui no caso geral o melhor modelo dos corpos reais.

Como, por definição, para o corpo negro é  $a_\lambda = 1$ , qualquer que seja o comprimento de onda, a lei de Kirchoff mostra que a função  $E(\lambda, T)$  representa o poder emissivo do corpo negro para a temperatura e o comprimento de onda, considerados. Por outro lado, para os corpos reais  $a_\lambda < 1$  e, por isso é também  $e_\lambda < E_\lambda$ . Logo, o poder emissivo de um corpo real para um dado comprimento de onda é sempre inferior ao do corpo negro à mesma temperatura.

À expressão da lei de Kirchoff pode ainda dar-se a forma:

$$a_\lambda = \frac{e_\lambda}{E_\lambda} = \varepsilon_\lambda$$

o que nos permite introduzir o conceito de emissividade,  $\varepsilon_\lambda$ , e afirmar que a absorvidade  $a_\lambda$  é igual à emissividade  $\varepsilon_\lambda$ . Por isso, *se um corpo absorve radiações de forma selectiva (absorvente selectivo), também passa a emitir as mesmas radiações (emissor selectivo)*. Ainda mais: para que um corpo real, a uma dada temperatura, emita energia de determinado comprimento de onda ( $e_\lambda \neq 0$ ), é necessário que o corpo negro emita energia àquela temperatura ( $E_\lambda \neq 0$ ) e que o corpo real possa absorvê-la ( $a_\lambda \neq 0$ ).

Para um corpo real a emissividade é inferior à unidade por ser igual à absorvidade. Assim, conclui-se que o poder emissivo do corpo negro é o valor máximo, limite dos poderes emissivos dos corpos reais.

## LEIS DE STEFAN-BOLTZMAN E DE WIEN

No fim do século XIX um dos problemas mais importantes da Física ainda por resolver, consistia na determinação da forma da função  $E_\lambda = E_\lambda(\lambda, T)$ , que a experiência mostrava existir emitida e a temperatura do corpo.

A resolução deste problema constitui um exemplo fascinante do progresso da ciência por aproximações sucessivas e da interação da experiência com a teoria. Os primeiros resultados obtidos referiam as propriedades específicas de  $E(\lambda, T)$  sem darem a forma da função. Mais tarde, Stefan (1879) estabeleceu, por via experimental, e Boltzman confirmou depois (1894), por via teórica, que a integração de  $E(\lambda, T)$  em todas as direcções e para todos os comprimentos de onda  $\lambda$ , que define a irradiância do corpo negro,  $E$ , conduz a um valor desta, proporcional à quarta potência da temperatura absoluta, isto é:

$$E = \int_0^\infty E_\lambda \cdot d\lambda = \sigma T^4 \quad (\text{lei de Stefan-Boltzman})$$

em que a temperatura é expressa em graus Kelvin ( $^\circ\text{K}$ ) e  $\sigma$  é uma constante cujo valor mais provável é  $5,67 \times 10^8$ ,  $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{grau}^4$ .

A dependência com a temperatura da emissão do corpo negro é evidente, quando se inspeccionam fotografias obtidas com a radiação infravermelha pelos satélites na banda, por exemplo, compreendida entre 10,5 e 12,5  $\mu\text{m}$  que está próxima do pico da curva de emissão do corpo negro relativa à radiação terrestre. As áreas mais claras representam regiões de emissão mais forte, isto é, a temperaturas mais elevadas. O contraste observado nas fotografias permite obter a configuração da corrente do Golfo, por exemplo, e revelar a existência de nuvens médias e elevadas, porque os topos são mais frios do que a superfície da Terra, etc..



A lei de Stefan pode ser utilizada para obter o valor da temperatura do Sol, se aceitarmos que este se comporte como um corpo negro, que emitisse a mesma quantidade de radiação que o Sol. Esta temperatura, designa-se por *temperatura efectiva* do Sol, e é fácil de calcular.

De facto, já vimos que a irradiância média da radiação solar que atinge a Terra é  $1,38 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ ; praticamente a radiação provém da camada exterior visível do Sol, cujo raio médio é  $7 \times 10^8 \text{ m}$ . Vamos avaliar a irradiância total,  $E$ , da superfície do Sol a partir do valor que atinge a Terra. Ora, pela lei de Lambert, a irradiância varia na razão inversa do quadrado da distância. Como a distância média da Terra ao Sol é cerca de  $1,5 \times 10^{11} \text{ m}$  o valor de  $E$  é então dado por:

$$E = 1,38 \times 10^3 \times \left[ \frac{1,5 \times 10^{11}}{7 \times 10^8} \right]^2 \text{ W/m}^2 = 6,34 \times 10^7 \text{ W/m}^2$$

Obtido  $E$ , a temperatura efectiva,  $T_E$ , do Sol pode calcular-se a partir da lei de Stefan. Tem-se:

$$T_E = \sqrt[4]{\frac{E}{\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{6,34 \times 10^7}{5,67 \times 10^8}} = (1118)^{1/4} \times (10^{12})^{1/4} = 5780 \text{ }^\circ\text{K}$$

Em 1893 Wien mostrou que *o comprimento de onda da radiação  $\lambda_m$ , que corresponde ao valor máximo do poder emissivo do corpo negro, varia na razão inversa da temperatura absoluta do corpo*, isto é:

$$\lambda_m T = A \quad (\text{Lei de Wien})$$

Quando  $\lambda_m$  vem expresso em micrómetros ( $\mu\text{m}$ ) e  $T$  em graus Kelvin a constante  $A$  vale  $2897 \mu \text{ }^\circ\text{K}$ .

Esta é a famosa lei do deslocamento de Wien, representada na Fig. 3 e que lhe mereceu o Prémio Nobel da Física em 1911. O comprimento de onda  $\lambda_m$ , que corresponde ao máximo de intensidade da radiação emitida, desloca-se para os menores comprimentos de onda à medida que a temperatura aumenta. Quanto mais elevada for a temperatura do corpo, menor é o valor do comprimento de onda  $\lambda_m$ .

A lei do deslocamento permite estimar a temperatura duma fonte de radiação, a partir do conhecimento do seu espectro de emissão. No caso do Sol, o valor máximo do poder emissivo corresponde ao verde amarelado, cujo comprimento de onda é de  $0,475 \mu\text{m}$ . Logo, a «temperatura de cor» do Sol pode obter-se a partir da lei de Wien e é dada por:

$$T = 2897/\lambda_m = 2897/0,475 = 6100^\circ\text{K}$$

O Sol parece mais amarelo do que azul devido à assimetria da curva do espectro do corpo negro em que a maior parte da radiação é emitida em comprimentos de onda superiores aos do máximo da irradiância.

Uma consequência importante, que resulta da lei do deslocamento de Wien, é a radiação solar estar concentrada nas regiões do visível e do infravermelho próximo, enquanto que a radiação emitida pela Terra e pelos outros planetas fica largamente confinada à radiação infravermelha.

#### LEI DE FLANK E ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR

Voltemos novamente à forma da função  $E(\lambda, T)$ . Em 1896 Wien propôs uma forma da função  $E(\lambda, T)$  que parecia verificar-se satisfatoriamente para os pequenos comprimentos de onda. Entre-

tanto, Rayleigh e Jeans (1900) propuseram uma lei para  $E(\lambda, T)$ , diferente da anterior, e que se verificava só no domínio dos grandes comprimentos de onda. Parecia, assim, que se tinha chegado à situação paradoxal de haver duas soluções «diferentes» para a expressão de  $E(\lambda, T)$  em que ambas explicavam muitos factos conhecidos da Física das Radiações. Foi, portanto, um período de crise da Física, visto que a aplicação da teoria de Rayleigh-Jeans impunha que os valores de  $E(\lambda, T)$  aumentassem à medida que os valores de  $\lambda$  diminuíssem, em total desacordo com a experiência no domínio dos pequenos comprimentos de onda. Deu-se assim a «tragédia» de constatar que o raciocínio brilhante e, aparentemente tão seguro e bem fundamentado, conduzia a resultados em completa contradição, na região dos pequenos c.d.o., com aqueles que se obtinham a partir da experiência! Foi a *catástrofe do ultravioleta*, porque a «tragédia» só se verificava no domínio dos pequenos comprimentos de onda; nos domínios dos grandes comprimentos de onda a lei de Rayleigh-Jeans era a que conduzia a resultados realistas.

Esta discrepância entre a experiência e a teoria, na Física das Radiações, foi resolvida em 1901 por Plank, introduzindo ideias que eram não só novas, mas que estavam em desacordo drástico com os conceitos da Física tradicional. Essas ideias foram substanciadas no seguinte postulado: «a emissão de energia faz-se de forma descontínua e por quantos de energia proporcionais à frequência». E, foi assim, que Planck (1901) conseguiu estabelecer a forma da função  $E(\lambda, T)$ , que satisfazia a todas as condições. Para referência, apresenta-se a solução de Planck, para a função  $E(\lambda, T)$ , que é da forma:

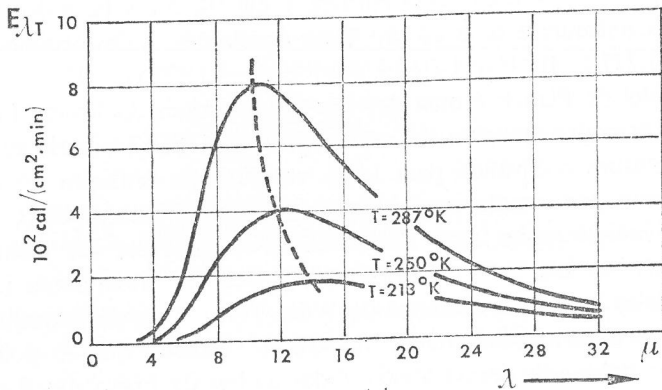
$$E(\lambda, T) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}$$

Esta expressão constitui a *lei da radiação de Planck*, em que  $\lambda$  (c.d.o.) vem expresso em *cm*,  $T$  em  $^{\circ}\text{K}$ , e é a base dos logaritmos naturais e  $c_1$  e  $c_2$  são duas constantes, cujos valores são  $c_1 = 1,777 \times 10^{-12}$  cal./(cm<sup>2</sup>. min) e  $c_2 = 1,432$  cm  $^{\circ}\text{K}$ .

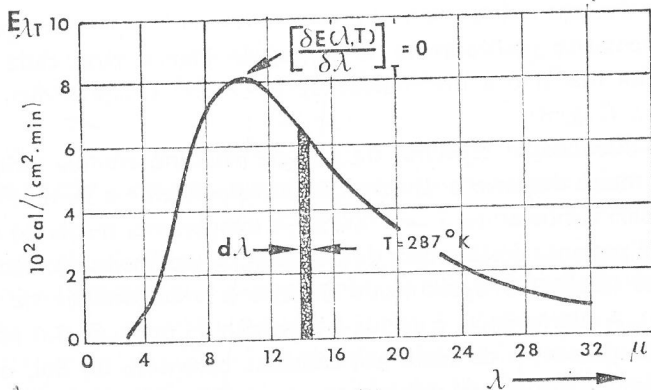
A lei de Planck é uma das leis fundamentais da Física. Indica como o poder emissivo de um corpo negro,  $E(\lambda, T)$ , varia com a temperatura e é válida para todos os c.d.o. da radiação. Esta lei tem sido confirmada experimentalmente para valores de  $\lambda$  e  $T$  entre limites muito afastados. Verifica-se que esta lei, além de satisfazer às leis de Wien e de Rayleigh-Jeans, contém ainda como corolários as leis de Stefan e de Wien. A validade da formulação de Planck ficou confirmada, quando se verificou que se podiam derivar dela, e de forma lógica, todas as leis da Física das Radiações, que assim passaram a constituir apenas corolários da lei de Planck.

Se fixarmos sucessivamente os valores da temperatura podem representar-se graficamente as curvas de Planck para cada temperatura que dão a distribuição de  $E(\lambda)$  com o comprimento de onda  $\lambda$  (Fig. 3).

A distribuição espectral da energia radiante emitida pelo Sol segue muito de perto a distribuição correspondente à lei de Planck para uma temperatura  $T = 6\,000^{\circ}\text{K}$ . A temperatura média do disco Solar é portanto desta ordem de grandeza. A «temperatura efectiva» do Sol (Stefan) é ligeiramente inferior à «temperatura de cor» (Wien). A discrepância é devida à absorção da radiação dos pequenos comprimentos de onda nas camadas exteriores do Sol, o que não afecta a posição do máximo  $\lambda_{\text{max}} = 0,4750 \mu\text{m}$  responsável pela «temperatura de cor». Justifica-se, portanto, que no tratamento de muitos dos problemas que se relacionam com o estudo da energia solar, se possa aceitar que o Sol emite energia como um corpo negro.



(a)



(b)

Fig. 3 — Curvas de emissão do corpo negro para várias temperaturas. Os máximos das curvas deslocam-se na direcção dos pequenos comprimentos de onda, quando a temperatura aumenta. (Lei de Wien)



## A RADIAÇÃO SOLAR NO ESPAÇO SEM MATÉRIA

### A CONSTANTE SOLAR

A quantidade de energia de origem solar, que em cada segundo atravessa a unidade de área colocada no topo da atmosfera normalmente à direcção de propagação, é praticamente constante e chama-se *constante solar*. De facto, era o que seria de esperar, tendo presente que a fonte de energia solar predominante é a fotosfera que, como acentuámos, tem uma irradiância quase constante no decurso do tempo. A ideia do conceito de «constante solar»,  $E_0$ , foi apresentada por Pouillet (1837), mas a sua determinação experimental quantitativa só foi conseguida mais tarde por Langley (1881).

de energia solar predominante é a fotosfera que, como acentuámos tem uma irradiância quase constante no decurso do tempo. A ideia do conceito de «constante solar»  $E_0$  foi apresentada por Pouillet (1837), mas a sua determinação experimental quantitativa só foi conseguida mais tarde por Langley (1881).

A constante solar,  $E_0$ , define-se como o fluxo de energia solar através da unidade de área normal à direcção de propagação situada à distância média da Terra ao Sol. Determinações recentes obtidas a partir de observações realizadas à superfície do Globo e por satélites atribuem-lhe um valor de  $135,3 \pm 1,8$  mW/cm<sup>2</sup> ou 1,940 cal cm<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup> (Kondratyev, 1972).

As determinações obtidas até ao lançamento de foguetões e de satélites, baseavam-se na extrapolação de medições efectuadas a várias altitudes e para várias posições do Sol. A determinação obtida por Langley foi depois aperfeiçoada por Abbot (1902) da «Smithsonian Institution» dos Estados Unidos da América e chegou à conclusão que o valor da constante solar estava compreen-

dida entre 1,9 e 2,0 cal./ $(\text{cm}^2.\text{min})$  com um valor mais provável de 1,94.

Como as medições pirheliométricas são executadas dentro da própria atmosfera tem que extrapolar-se os resultados das medições até ao limite superior da atmosfera. A extrapolação é baseada em leis físicas de extinção e só foi possível graças aos estudos que levaram ao conhecimento dos factores que influenciam a deplecção da energia solar na atmosfera e ao aperfeiçoamento dos instrumentos de medição da radiação solar. De facto, esta realização equivale a uma perfuração através da atmosfera, onde a radiação solar se propagaria nas condições ideais do vácuo. E os resultados das observações obtidos com as dos satélites confirmam brilhantemente a validade das hipóteses formuladas para a aplicação daquelas leis. A determinação da constante solar pode considerar-se, com razão, «uma das grandes vitórias do entendimento humano».

As incertezas associadas às várias determinações da constante solar são pequenas e a sua possível variabilidade, periódica ou accidental, constitui um problema que aguarda, por enquanto, solução final. E esta, só poderá obter-se com medições directas extra-atmosféricas da distribuição espectral da radiação solar no decurso de um longo período de tempo.

\*  
\*     \*

A quantidade média de energia  $Q_s$  que é emitida pelo Sol pode determinar-se, a partir da definição da constante solar, pela expressão:

$$Q_s = 4 \pi R_s^2 E_0$$

em que  $R_s$  designa a distância média da Terra ao Sol.

O valor médio de  $Q_s$  é, assim, da ordem de  $3,85 \times 10^{23}$  kw, mas só uma parte desta energia atinge a orla exterior da atmosfera da Terra. E esta corresponde à energia média intersectada normalmente por um plano conceptual diametral da Terra ( $1,275 \times 10^{14}$  m<sup>2</sup>). Esta fracção é portanto igual ao produto da constante solar  $E_0$  pela área  $\pi r^2$  do circulo máximo da Terra:

$$Q = E_0 \pi r^2,$$

ou seja  $1,73 \times 10^{14}$  Kw. Mas, esta quantidade de energia intersectada é distribuída por toda a superfície da Terra, cuja área vale  $4 \pi r^2$ . Logo, a radiação solar média por unidade de área e por unidade de tempo que atinge a orla superior da atmosfera terrestre é:

$$\frac{E_0 \cdot \pi r^2}{4 \pi r^2} = 33,8 \text{ mW/cm}^2 = 0,485 \text{ cal/(cm}^2 \cdot \text{min)}$$

#### DISTRIBUIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR NO TOPO DA ATMOSFERA

A radiação solar no topo da atmosfera não é a mesma em todas as latitudes e varia no decurso do ano. A distribuição é condicionada por factores astronómicos e geográficos.

A forma quase esférica da Terra, o seu movimento de rotação, a inclinação do eixo de rotação sobre o plano da eclíptica e o movimento anual aparente da Terra, condicionam fortemente a distribuição da radiação solar, não só na orla exterior da atmosfera, como também na própria superfície do globo terrestre, como veremos.

A Terra no seu movimento anual descreve uma elipse em torno do Sol, em que este ocupa um dos focos. A excentricidade da órbita terrestre é muito pequena (0,016 733) e, por isso, a distância da Terra ao Sol não varia muito, sendo máxima em 2 de Julho e mínima em 1 de Janeiro.

Se na distância da Terra ao Sol, se abstrair da parte que corresponde à distância do centro da Terra à orla exterior da atmosfera, pode dizer-se que o valor médio anual da intensidade da radiação solar na orla exterior da atmosfera terrestre é igual ao valor da constante solar,  $E_0$ .

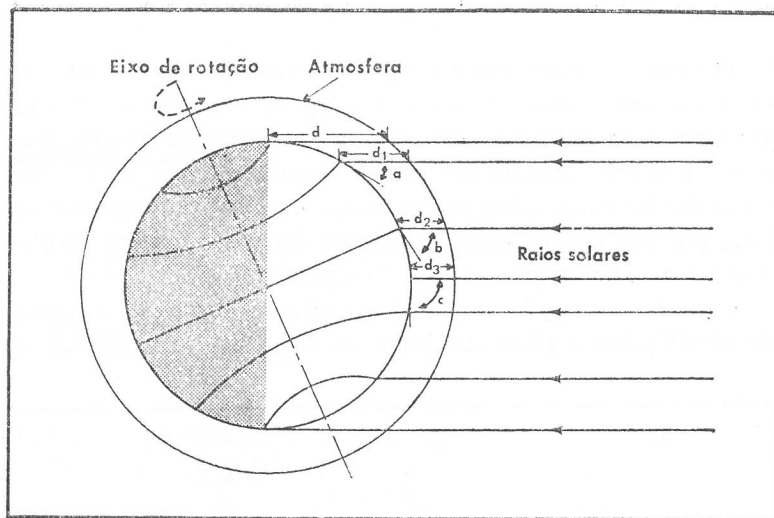
\*  
\*      \*

Consideremos um elemento de área  $dA$  situado num ponto da superfície exterior da atmosfera terrestre, iluminada pelo Sol numa dada direcção (Fig. 4). A quantidade  $dQ$  de radiação solar que incide no elemento  $dA$  no intervalo de tempo  $dt$  é, evidentemente, dado por:

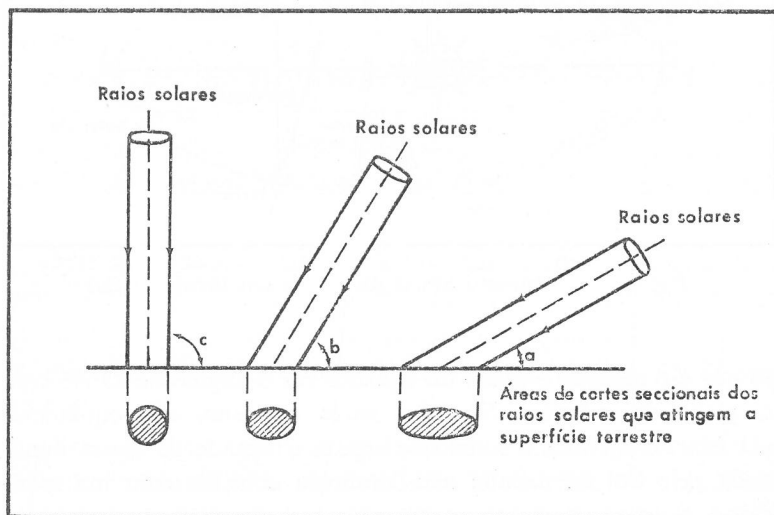
$$dQ = E_a \cdot dA \cdot dt \cdot \text{sen } \alpha = E_0 \cdot dA \cdot dt \cdot \cos z$$

sendo  $E_a$  a intensidade da radiação solar na orla exterior da atmosfera terrestre, relacionada com a constante solar  $E_0$  como acabámos de ver,  $\alpha$  a altura angular do Sol acima do horizonte do ponto no instante considerado e  $z$  o ângulo zenital do Sol (ângulo de incidência).

O quociente  $dQ/dA$  é a quantidade de radiação solar que incide no ponto da superfície exterior da atmosfera por unidade de área. O integral de  $dQ/dA$  para um intervalo finito de tempo (1 minuto, 1 hora ou 1 dia) é a quantidade de radiação incidente no intervalo de tempo considerado.



(a)



(b)

Fig. 4 — A intensidade da radiação solar depende do ângulo de incidência dos raios solares. Na figura (a) mostram-se os ângulos de incidência,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ; e as penetrações,  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ , para as diferentes latitudes. Mostra-se também (b) a influência da inclinação dos raios solares na área varrida na superfície do Globo

O ângulo  $\alpha$  varia durante o dia: é nulo ao nascer e ao pôr-do-Sol e tem o valor máximo ao meio-dia local. Mas a quantidade diária da radiação solar incidente por unidade de área num ponto também depende do tempo durante o qual o Sol está acima do horizonte desse ponto, isto é, da insolação astronômica. Esta, por sua vez, depende da latitude do ponto e varia durante o ano em todos os pontos fora do equador.

Com efeito (Fig. 5), o eixo de rotação da Terra está inclinado de  $66,55$  sobre o plano da órbita da Terra em volta do Sol, ou

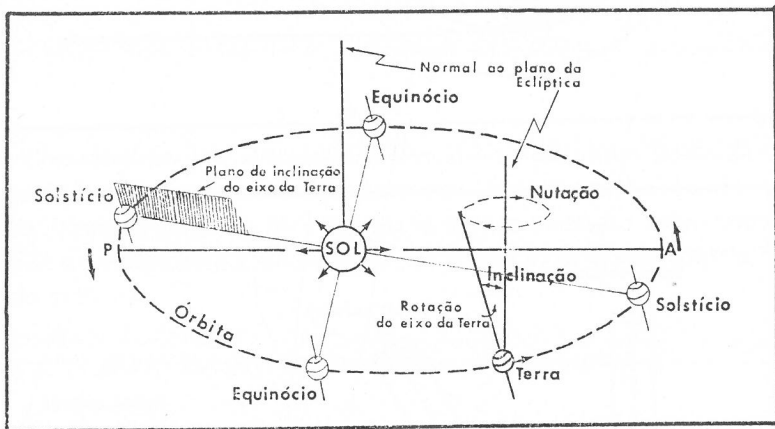


Fig. 5 — Movimento anual da Terra em torno do Sol

(o que é o mesmo) o plano do equador faz o ângulo de  $23,45$  com o plano da eclíptica. Só duas vezes por ano, nos equinócios (21 Mar. e 23 Set.), a linha que separa a metade da Terra iluminada pelo Sol da metade não-iluminada coincide com um meridiano e passa, portanto, pelos pólos. A insolação astronômica nestes dois dias é a mesma em todos os pontos da Terra (12 horas)



é a radiação solar diária depende só do valor de  $\text{sen } \alpha$ , que é máximo no equador e mínimo nos pólos.

Desde 21 Mar. até Set. o Pólo Norte da Terra está virado para o Sol. A partir de 23 Dez. a insolação astronómica aumenta no Hemisfério Norte e diminui no Hemisfério Sul até ao solstício de 22 Jun., passando depois a variar em sentido contrário, até 23 Dez. A radiação solar diária acompanha esta variação, e daí resulta que quando é Verão no Hemisfério Norte, é Inverno no Hemisfério Sul.

De 23 Set. até 21 Mar. é o Pólo Sul da Terra que fica voltado para o Sol, quando é Verão no Hemisfério Sul, e o valor extremo da insolação astronómica atinge-se no solstício de 22 Dez.

Nos pontos de latitude superior a  $66^{\circ},55$  a insolação astronómica é nula no solstício de Inverno e é máxima (24h) no solstício de verão. Nos pólos o Sol está acima do horizonte durante os seis meses de Verão e abaixo do horizonte durante os seis meses de Inverno.

A radiação solar incidente no Hemisfério Sul durante o Verão (23 Set. a 21 Mar.) é maior do que a radiação incidente no Hemisfério Norte durante o Verão correspondente (21 Mar. a 23 Set.), porque, como vimos, a distância da Terra ao Sol é mínima em 1 Jan. e, portanto, a intensidade da radiação solar é máxima.

Deve notar-se que, embora a insolação astronómica seja máxima nos pólos, os pequenos valores da altura angular do Sol nas latitudes altas fazem com que a quantidade diária efectiva de radiação solar no verão seja máxima nas regiões de  $30^{\circ}$  de latitude.

Como já vimos, pela lei de Lambert, a intensidade da radiação num ponto varia na razão inversa do quadrado da distância da fonte luminosa ao ponto considerado. Torna-se então evidente, que em cada local, e num certo instante, a intensidade da radiação

solar num ponto da orla exterior da atmosfera  $E_a$ , está relacionado com a constante  $E_o$  por uma expressão da forma

$$E_a = \frac{E_o}{\left(\frac{R}{R_m}\right)^2} \cos z$$

em que  $z$  é o ângulo zenital do Sol e  $R$  e  $R_m$  são as distâncias no instante considerado, e média da Terra ao Sol, respectivamente. Logo, a intensidade da radiação solar da orla exterior da atmosfera terrestre apresenta uma variação periódica anual com o máximo em 1 de Janeiro e o mínimo em 2 de Julho. No entanto, a distância da Terra ao Sol não varia muito durante o ano e, portanto, a intensidade da radiação solar que atinge a orla exterior da atmosfera é só cerca de 6 por cento maior em Dezembro-Janeiro do que em Junho-Julho.

Como vemos, a distribuição da radiação solar no limite superior da atmosfera depende de factores astronómicos e geográficos. Com efeito, a intensidade da radiação solar decresce da região equatorial para os pólos, devido à curvatura da Terra, e está sujeita a variações periódicas em consequência da inclinação do eixo da Terra e da excentricidade da eclíptica.

Vamos procurar mostrar como se pode determinar a radiação solar total incidente, durante um dia, numa superfície horizontal no topo da atmosfera.

Para isso retomemos a expressão (6) anterior, que combinamos com a equação (7):

$$dQ = \frac{E_o}{\left(\frac{R}{R_m}\right)^2} \cos z \, dA \cdot dt$$

O quociente  $dQ/dA = Q'_s$  representará a quantidade de energia solar recebida por unidade de área entre os instantes  $t$  e  $t+dt$ .

O ângulo zenital do Sol,  $z$ , varia de instante para instante, com o dia do ano e com a latitude do local,  $\varphi$ . Com efeito, a distância zenital,  $z$ , está relacionada com o ângulo horário,  $h$ , com a declinação,  $\delta$ , do Sol e com a latitude local,  $\varphi$ , como se depreende da aplicação de fórmulas da trigonometria esférica ao famoso triângulo PZS (Pólo, Zenite, Estrela) da Astronomia. Nestas condições, a expressão de  $\cos z$  é dada por:

$$\cos z = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos h$$

Para um dia, a quantidade de radiação solar directa recebida por unidade de área colocada horizontalmente, será dada por:

$$\int_{\text{nascer-do-Sol}}^{\text{pôr-do-Sol}} Q'_s dt = E_o \left( \frac{R_m}{R} \right)^2 \int_{-H}^{+H} (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos h) dt$$

designando por  $H$  o ângulo horário correspondente ao intervalo de tempo entre o meio-dia solar verdadeiro ( $h = 0$ ) e o pôr-do-Sol ( $h = H$ ). Notemos que  $h$  é negativo antes do meio-dia: ao nascer-do-Sol é  $h = -H$ . Mas  $\frac{dh}{dt} = \omega$  representa a velocidade angular de rotação da Terra. Portanto, a expressão anterior pode escrever-se, por extenso:

$$\begin{aligned} Q_s &= E_o \left( \frac{R_m}{R} \right)^2 \int_{-H}^{+H} (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos h) \frac{dh}{\omega} \\ &= \frac{2E_o}{\omega} \left( \frac{R_m}{R} \right)^2 [H \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos H] \end{aligned}$$

$$= \frac{1440}{\pi} E_0 \left( \frac{R_m}{R} \right)^2 [H \operatorname{sen} \varphi \operatorname{sen} \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos H]$$

exprimindo  $E_0$  em  $\text{cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{dia})$  e  $H$  em radianos.

Ao nascer e ao pôr-do-Sol este está sobre o horizonte e portanto  $z = 90^\circ$ , ou seja  $\cos z = 0$ , e o ângulo horário  $h$  é então metade do período diurno, isto é  $h = H$ . A expressão anterior de  $\cos z$  permite escrever nestas condições:

$$\cos H = - \frac{\operatorname{sen} \varphi \operatorname{sen} \delta}{\cos \varphi \cos \delta}$$

E, assim, a expressão pode tomar uma forma mais conveniente para os cálculos. E obtém-se a expressão desejada:

$$Q_s = \frac{1440}{\pi} E_0 \left( \frac{R_m}{R} \right)^2 [\operatorname{sen} \varphi \operatorname{sen} \delta (H - \operatorname{tg} H)]$$

expressa em  $\text{cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{dia})$ , que permite resolver o problema. Os valores das grandezas  $R$ ,  $H$  e  $\delta$  são dados em tábuas astronómicas.

As expressões anteriores permitem determinar a distribuição latitudinal da radiação solar directa por unidade de área colocada horizontalmente no topo da atmosfera, no decurso do ano.

Foi assim, que Milankovitch, utilizando esta metodologia, apresentou em 1920 a sua famosíssima publicação, em que pela primeira vez se apresentava, de forma sistemática, a distribuição da quantidade de radiação solar para as diferentes latitudes e para as várias épocas do ano no topo da atmosfera. Os valores estão representados esquematicamente na Fig. 6.

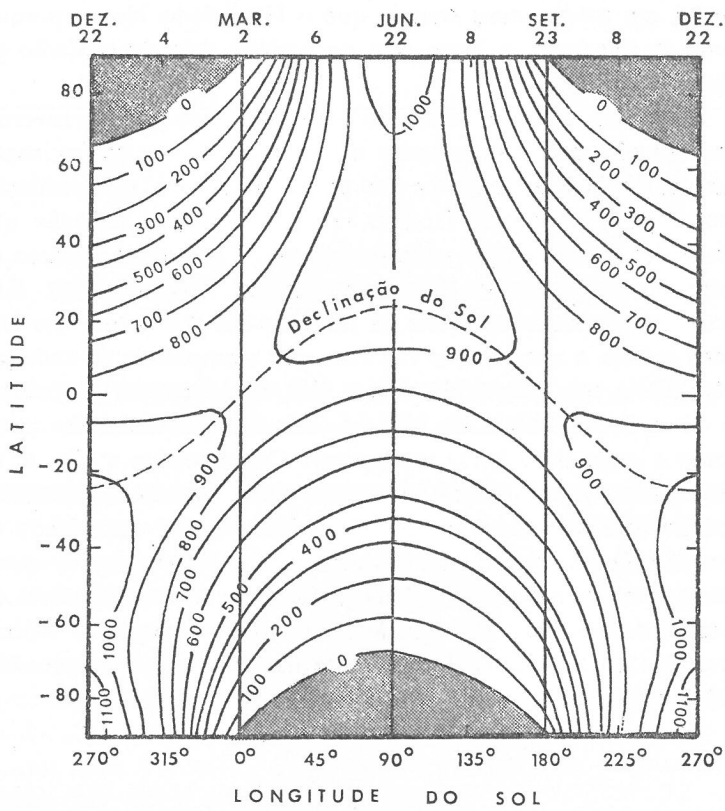


Fig. 6 — Radiação solar recebida no topo da atmosfera em ly/dia em função da latitude e da época do ano. As áreas a tracejado indicam as latitudes do Globo não iluminadas pelo Sol

A análise da Fig. 6 mostra que o valor é quase constante no equador, onde varia entre 7 900 e 8 200 cal/(cm<sup>2</sup>. dia). Nos pólos a variação é máxima: a energia incidente vai de zero, no Inverno, a 1 100 cal/(cm<sup>2</sup>. dia) nos solstícios de Verão. O Hemisfério Sul

recebe, em média, mais energia que o Hemisfério Norte, porque, como já referimos, a Terra está no periélio durante o Verão do Hemisfério Sul.

No Verão não só a altura do Sol é maior do que no Inverno, mas também o Sol se mantém mais tempo acima do horizonte, porque, os dias são maiores que as noites. Assim, se considerássemos iguais os outros factores, a quantidade de radiação que atinge determinado local seria sempre proporcional ao número de horas do Sol acima do horizonte (insolação astronómica). Este facto tem grande importância na radiação que é recebida nas latitudes médias e altas, o que faz com que a amplitude da radiação solar diária seja grande durante o ano. Por exemplo, na latitude de 40° o Sol está cerca de 15 horas acima do horizonte em pleno Verão e cerca de 9 horas no Inverno. Como mostra a Fig. 6, na orla exterior da atmosfera as regiões polares recebem nos solstícios de verão de cada um dos hemisférios maior quantidade de energia solar do que qualquer outro ponto. No entanto, a quantidade total de radiação recebida durante o ano é apenas 0,41 da quantidade recebida no equador, devido aos pequenos valores da altura do Sol acima do horizonte nas zonas das latitudes elevadas e polares.



### III — O EFEITO DA ATMOSFERA DA TERRA NA RADIAÇÃO SOLAR

#### PROPAGAÇÃO E DEPLECÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR NA ATMOSFERA

Vamos agora analisar as conseqüências que resultam da existência da atmosfera da Terra na propagação da radiação solar, nas suas modificações e na sua distribuição à superfície do Globo.

Como indicámos anteriormente (Cap. II), nas regiões do visível e do infravermelho do espectro da energia radiante, a intensidade da radiação solar sofre apenas pequenas flutuações que não excedem 1 por cento do valor médio total. As variações mais substanciais da radiação solar ocorrem nos domínios do ultravioleta, dos raios X e raios  $\gamma$  e nas radiações de natureza corpuscular, emitidas pelo Sol e que chegam à Terra.

A radiação solar no limite superior da atmosfera está sujeita a estas variações irregulares, às variações periódicas devidas à elipticidade da órbita da Terra, e ainda a variações regulares devidas à geometria do sistema globo-atmosfera.

Depois da radiação solar atingir e penetrar na atmosfera fica sujeita aos acidentes já referidos da propagação, designadamente, *a)* à difusão pelas moléculas da atmosfera e por partículas em suspensão; *b)* à absorção pelos gases da atmosfera e pelas gotículas e

partículas de água; c) à difracção por gotas de água das nuvens; d) à refração pelos cristais de gelo que formam as nuvens altas; e) à reflexão pelas nuvens e pela superfície do Globo. Da radiação restante que chega ao Globo, uma parte é absorvida pela sua superfície, sendo utilizada na evaporação da água e no aquecimento da mesma superfície, na fotossíntese, etc., e a outra é reflectida. A energia absorvida, empregada no aquecimento da atmosfera e do Globo, é finalmente radiada para o espaço, principalmente na região do infravermelho. Notemos, no entanto, que só a radiação que é absorvida pela atmosfera e pela superfície do Globo é que entra no balanço energético da Terra e da atmosfera.

A energia solar reflectida e retrodifundida para o espaço, constituindo ainda uma fracção apreciável da energia solar total, é devolvida sem entrar na economia energética geral do sistema globo-atmosfera. A intensidade da radiação solar, à medida que penetra e atravessa a atmosfera, vai sofrendo uma diminuição e uma atenuação progressiva que se designa, genericamente, por *deplecção* da radiação solar.

Entre os factores da deplecção da radiação solar, os que têm maior importância são a absorção e a difusão e, por isso, trataremos destes processos em pormenor.

## ABSORÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR NA ATMOSFERA

### OS ABSORVENTES DA ATMOSFERA E OS ESPECTROS DE ABSORÇÃO

A absorção é um processo em que a energia radiante é convertida noutra forma de energia. Em geral, a conversão manifesta-se pela transformação em calor e só, ocasionalmente, a conversão

conduz a outro tipo de radiação. A absorção ocorre nos gases, nos líquidos e nos sólidos. Por analogia com o corpo negro, um corpo que absorva toda a energia radiante e de todos os comprimentos de onda que nele incida constitui um absorvente perfeito.

A maioria dos corpos reais comporta-se de forma muito variada: são absorventes para radiações dum dado c.d.o., e transparentes para outras, apresentando, portanto, absorvidades variadas para as radiações de diferentes comprimentos de onda. Isto significa que a maioria dos corpos reais são absorventes selectivos, em que, a absorvidade varia com o comprimento de onda da radiação incidente.

Os absorventes gasosos mais importantes da atmosfera são o oxigénio ( $O_2$ ), o ozono ( $O_3$ ), o anidrido carbónico ( $CO_2$ ), o vapor de água ( $H_2O$ ) e, ainda, o óxido azotoso ( $N_2O$ ) e o metano ( $CH_4$ ).

Na Fig. 7 apresentam-se os espectros de absorção dos principais absorventes da atmosfera para os vários comprimentos de onda  $\lambda$ .

O espectro de absorção do ozono tem uma banda de absorção forte entre 0,23 e 0,32  $\mu m$  (banda de Hartley) que Fabry e Buisson (1930) mostraram ser responsável pelo fim brusco do espectro solar em 0,292  $\mu m$  (2920 Å), em espectrogramas obtidos até 11 km de altitude da atmosfera, o que representa uma perda de cerca de 2 por cento da intensidade inicial da radiação solar. Observa-se também uma banda de fraca absorção entre 9 e 10,5  $\mu m$ , centrada em 9,6  $\mu m$ , uma outra entre 13 e 16  $\mu m$  centrada em 15  $\mu m$ .

O espectro de absorção do anidrido carbónico apresenta uma primeira banda de forte absorção, mas muito estreita em 4,3  $\mu m$ ; uma outra, mais fraca, mas larga, apresentando vários picos em 9, 10 e 11  $\mu m$  e, finalmente, uma banda que se estende de 14 a 16  $\mu m$  com uma absorção média muito intensa.

O espectro de absorção do vapor de água foi estudado por Hettner (1918). Apresenta, além de riscas, três bandas centradas

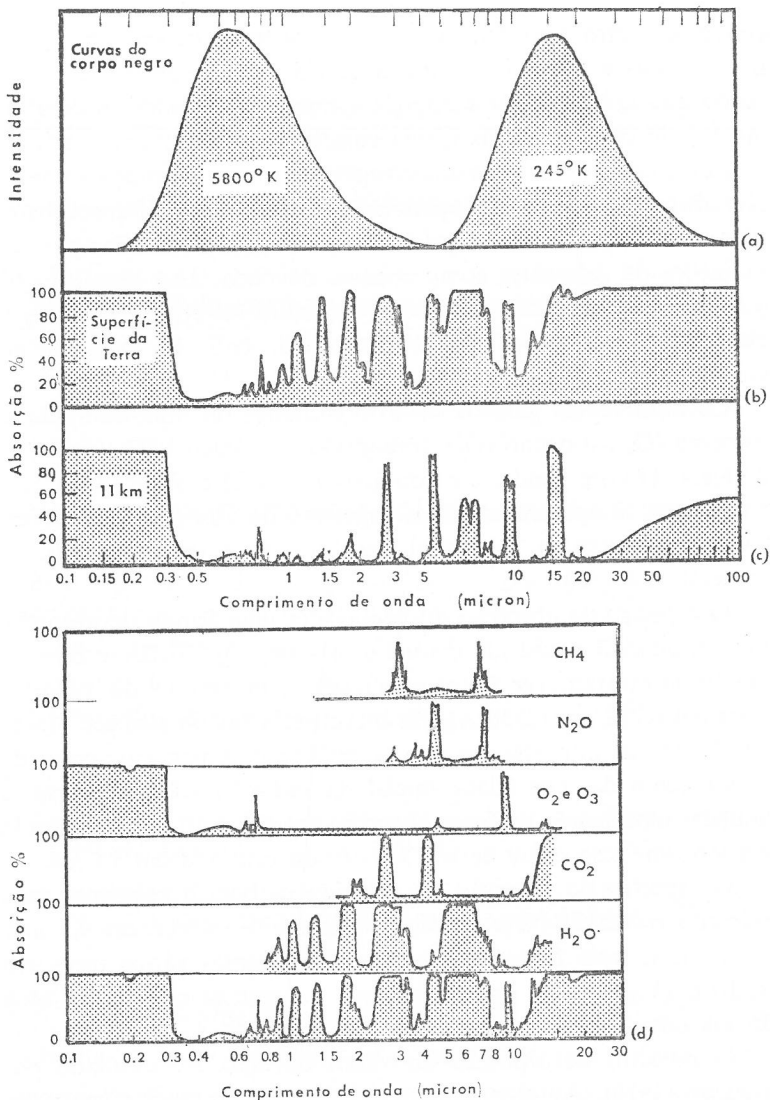


Fig. 7 — Espectro de absorção da radiação solar para os vários comprimentos de onda à superfície da Terra e a 11 km de altitude e espectros de absorção dos principais gases absorventes da atmosfera

em  $1,37 \mu\text{m}$ , em  $1,84 \mu\text{m}$  e em  $2,66 \mu\text{m}$ ; uma banda muito forte em  $6,26 \mu\text{m}$ ; e uma banda muito extensa, que começa em cerca de  $9 \mu\text{m}$  e se estende para além de  $34 \mu\text{m}$ .

Além do oxigênio, do ozono, do anidrido carbônico e do vapor de água, que são os absorventes mais importantes, devemos considerar ainda a absorção do óxido de carbono (CO) com uma forte banda de absorção em  $4,7 \mu\text{m}$ ; do metano ( $\text{CH}_4$ ) e do óxido azotoso ( $\text{NO}_2$ ) com bandas de absorção em  $7,8$  e  $8,6 \mu\text{m}$ .

Na realidade, são estas distribuições da absorvidade que condicionam a absorção da energia radiante solar pela atmosfera, sendo dominante a absorção pelo vapor de água, ainda que os componentes do ar seco, azoto e anidrido carbônico sejam também considerar. É o que se depreende da inspeção da Fig. 7. Na parte inferior apresenta-se o espectro resultante da sobreposição dos espectros individuais de absorção da radiação solar em condições médias, na superfície do Globo.

Para se fazer uma ideia mais completa da influência da atmosfera na absorção da radiação solar indica-se também na Fig. 7 o espectro de absorção a  $11 \text{ km}$  de altitude. Esta é devida principalmente aos efeitos da presença do ozono, do oxigênio e do anidrido carbônico nas camadas superiores da atmosfera.

#### LEI DE BEER E ABSORÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR

A absorção da radiação solar na atmosfera é regida pela lei de Beer, que vamos estabelecer de forma elementar.

Na ausência de difusão, a absorção da radiação dum feixe paralelo, à medida que atravessa uma camada horizontal de gás de espessura  $dl$  é proporcional ao número de moléculas por unidade de área na camada (Fig. 8).

A fracção da irradiância absorvida,  $-\frac{dE_\lambda}{E_\lambda}$ , na camada de espessura  $dl$  ao longo da direcção de propagação depende do número de moléculas por unidade de área e da natureza do gás. É dada por  $k_\lambda \rho dh \sec z$ , em que  $\rho$  é a densidade do ar e  $z$  o

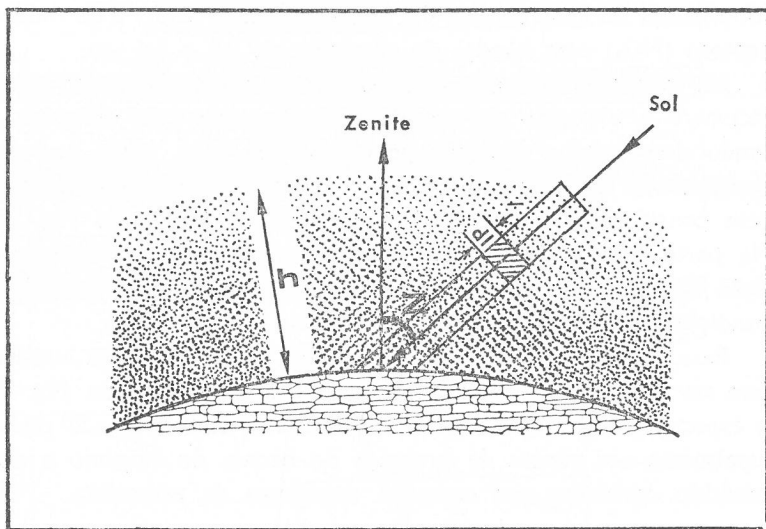


Fig. 8 — Efeito da atmosfera na radiação solar

ângulo zenital do Sol (Fig. 8), visto que  $dl = dh \sec z$ . A fracção da irradiância absorvida exprime-se pois na forma:

$$da_\lambda \equiv \frac{dE_\lambda}{E_\lambda} = -k_\lambda \rho \sec z \cdot dh$$

O produto  $(\rho \sec z \cdot dh)$  representa a massa do volume de base unitária atravessado pela radiação incidente, como se depreende



da Fig. 8. O coeficiente de absorção  $k_\lambda$  constitui uma medida da fracção das moléculas de gás por unidade de comprimento de onda que absorvem a radiação desse c. d. o. O coeficiente  $k_\lambda$  depende, portanto, da composição, da temperatura e da pressão do gás na camada. Exprime-se em  $m^2/kg$ , transformando o produto  $k_\lambda \cdot \rho \cdot dh$  num número sem dimensões.

Deve acentuar-se que: *a*) a fracção da radiação incidente absorvida numa camada de uma dada espessura, não depende da irradiância incidente nessa camada; *b*) camadas sucessivas de igual espessura absorvem a mesma fracção da radiação que nelas incidem. Assim, podemos dizer que o meio absorve em cada camada de espessura unitária, a mesma fracção do fluxo da radiação.

Se agora integrarmos a equação anterior (10) desde o nível  $h$  até ao topo da atmosfera, que representaremos pelo símbolo infinito, ( $\infty$ ), vem:

$$\text{Log } E_{\lambda\infty} - \text{Log } E_\lambda = \sec z \int_h^\infty k_\lambda \rho \, dh$$

Se tomarmos antilogarítmos, obtemos a desejada expressão da lei de Beer:

$$E_\lambda = E_{\lambda\infty} \left[ e^{-\int k_\lambda \rho \, dh} \right] \sec z$$

que rege a absorção da radiação solar na atmosfera. Esta lei é fundamental no estudo da radiação solar e é através dela que se pode avaliar a quantidade de energia solar que chega ao Globo e a sua distribuição geográfica.

A TRANSMISSIVIDADE DA ATMOSFERA.  
LEI DE BOUGUER

A expressão anterior da Lei de Beer pode escrever-se na forma:

$$\frac{E_{\lambda}}{E_{\lambda_{\infty}}} = \left[ e^{-\int k_{\lambda} \rho \, dh} \right] \sec z$$

Mas, se tivermos presente o conceito de transmissividade, vemos que  $E_{\lambda}/E_{\lambda_{\infty}}$  é, nada mais nada menos, do que a transmissividade da atmosfera visto que representa a fracção da energia incidente ( $E_{\lambda_{\infty}}$ ) que é transmitida ( $E_{\lambda}$ ) depois de ser submetida à absorção.

Então, para a incidência normal ( $\sec z = 1$ ) podemos representar aquele quociente pela grandeza  $q_{\lambda}$ , tal que:

$$q_{\lambda} = \frac{E_{\lambda}}{E_{\lambda_{\infty}}} = e^{-\int k_{\lambda} \rho \, dh}$$

e que constitui, de facto, um *coeficiente de transparência* da atmosfera. Este representa a fracção da irradiância solar que incide no topo da atmosfera e que é transmitida depois de atravessar normalmente as camadas da atmosfera. Este coeficiente coincide com o coeficiente de transmissividade da atmosfera, quando se considera apenas a acção da absorção na propagação da energia radiante solar.

Voltando à equação da Lei de Beer, com a introdução do coeficiente de transmissividade,  $q_{\lambda}$ , para a radiação de c. d. o.,  $\lambda$ , devido à absorção da atmosfera, podemos escrevê-la na forma:

$$E_{\lambda} = E_{\lambda_{\infty}} q_{\lambda}^{\sec z}$$

Esta expressão é conhecida por Lei de Bouguer. As expressões das leis de Beer e de Bouguer mostram que a irradiância duma radiação decresce monotonicamente com o percurso de propagação.

Para incluir a influência da natureza do absorvente convém considerar a grandeza  $\tau_\lambda$ , que se designa por *percurso óptico*, ou *massa óptica*, definida por:

$$\tau_\lambda = \left( \int_h^\infty k_\lambda \rho \cdot dh \right) \sec z$$

Além disso, é vantajoso exprimi-la em termos da massa seccional atravessada:

$$u_\lambda = \sec z \int_h^\infty \rho \cdot dh$$

A grandeza  $u_\lambda$  representa a massa seccional atravessada pela radiação ao longo do percurso de propagação. Se  $k_\lambda$  for independente do percurso, então as grandezas  $\tau_\lambda$  e  $u_\lambda$  estão relacionadas pela expressão simples:

$$\tau_\lambda = k_\lambda u_\lambda$$

Como se conclui da Lei de Beer (ou da de Bouguer) a transmissividade da camada acima do nível,  $h$ , até ao topo da atmosfera, pode determinar-se imediatamente, conhecido  $\tau_\lambda$ :

$$q_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_{\lambda\infty}} = e^{-\tau_\lambda}$$

Portanto, na ausência da difusão, a absorvidade  $a_\lambda$ , para a radiação de comprimento de onda  $\lambda$ , vale:

$$a_\lambda = 1 - q_\lambda = 1 - e^{-\tau_\lambda}$$

Esta igualdade mostra que a absorvidade se aproxima exponencialmente da unidade quando o percurso óptico aumenta indefinidamente.

Vamos considerar um exemplo, que ajudará a esclarecer a exposição. Consideremos um feixe de radiação que atravessa uma camada de 100 m de espessura da atmosfera, cuja densidade é 0,1 kg/m<sup>3</sup>, com um ângulo de incidência de 60°. Vejamos como se calculam o percurso óptico, a transmissividade e a absorvidade para radiações de comprimento de onda  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ , em que os coeficientes de absorção são 10<sup>-3</sup>, 10<sup>-1</sup> e 1 m<sup>2</sup>/kg, respectivamente.

Começemos por determinar a massa seccional. Vem

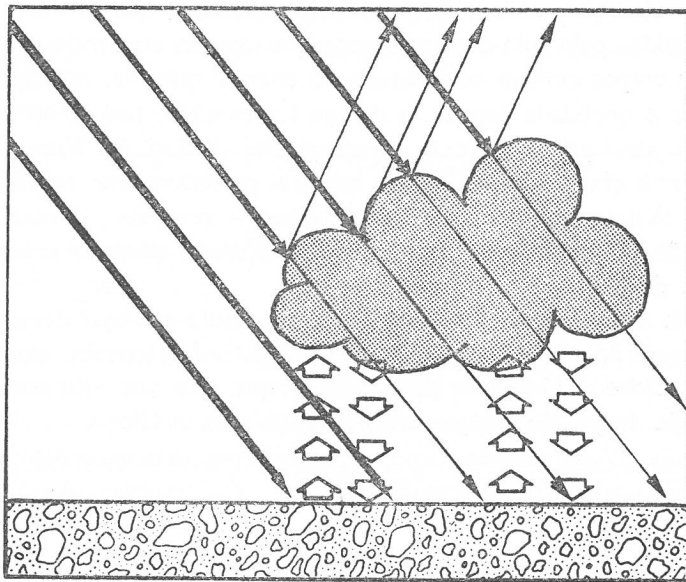
$$u = \sec z \int \rho \, dh = 2 \times 0,1 \, \text{kg/m}^3 \times 100 \, \text{m} = 20 \, \text{kg/m}^2$$

Como  $k_\lambda$  não depende do caminho, o percurso óptico  $\tau_\lambda$ , a transmissividade  $q_\lambda$  e a absorvidade  $a_\lambda$  determinam-se facilmente por aplicação das fórmulas anteriores. Os resultados estão tabulados no QUADRO III.

QUADRO III

	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$
$\tau_\lambda$	0,02	2	20
$q_\lambda$	0,98	0,135	$2 \times 10^{-9}$
$a_\lambda$	0,02	0,865	1,00

A inspeção dos valores do quadro anterior mostra que a transmissividade, no primeiro caso ( $\lambda_1$ ) é muito maior que nos outros dois casos. Podemos usar uma linguagem sugestiva, afirmando que na região do espectro de comprimento de onda  $\lambda_1$ , a atmosfera apresenta uma «janela espectral» porque, para o comprimento de onda  $\lambda_1$ , a atmosfera é praticamente transparente. Nos outros dois casos a transmissividade diminui rapidamente e a atmosfera absorve fortemente essas radiações. Se a absorvidade  $a_\lambda$





 Radiação de grande comprimento de onda  
 Radiação de pequeno comprimento de onda

Fig. 9 — Efeito de estufa na atmosfera

for pequena o meio é transparente, porque absorve fracamente a radiação que o atravessa; mas se  $a_\lambda$  for grande a radiação é fortemente absorvida e o meio é praticamente opaco. Por exemplo, o vidro vulgar é transparente para a região do visível do espectro solar e, por isso, absorve fracamente as radiações visíveis. Mas absorve fortemente as radiações ultravioletas e infravermelhas para as quais é praticamente opaco.

Este facto explica o conhecido «efeito de estufa»: a cobertura e as paredes laterais de vidro de uma estufa deixam entrar, com fraca absorção, as radiações visíveis incidentes, que depois são absorvidas pelo solo e pelos corpos que existem dentro da estufa. Estes corpos emitem constantemente energia radiante, cuja quantidade e qualidade dependem da sua temperatura, mas sempre na região do infravermelho como se conclui da Lei de Wien. Ora esta radiação é absorvida pelo vidro e posteriormente reenviada para dentro da estufa. Como o ar não é renovado, a não ser quando se pretende arejar a estufa, verifica-se aumento considerável de temperatura no seu interior.

Na atmosfera aparece um efeito de estufa análogo devido à presença de nuvens (Fig. 9). A radiação infravermelha emitida pelo Globo é absorvida pelas nuvens que, por sua vez, emitem energia de grande comprimento de onda para o Globo.

## DIFUSÃO DA RADIAÇÃO SOLAR NA ATMOSFERA

### CARACTERIZAÇÃO DA DIFUSÃO

Outra causa da depleção da energia solar na atmosfera é, como mencionámos, a difusão devida à presença de partículas de

natureza muito variada, que existem na atmosfera. A difusão, ao contrário do que sucede com a absorção, não envolve qualquer transformação da energia radiante noutra forma de energia. A difusão origina a redistribuição da energia radiante em torno das partículas difusoras.

A difusão provoca apenas uma nova distribuição de energia e, por isso, depois da difusão, verifica-se, em geral, um decréscimo da irradiância ao longo da direcção incidente inicial. Não há transformação de energia, nem modificações nas «características» da radiação. Os comprimentos de onda da radiação transmitida depois da difusão são os mesmos que eram na radiação incidente.

A energia pode ser reemitida uniformemente em todas as direcções e a difusão é *isotrópica*, ou pode haver predominio numa direcção, e diz-se que a difusão é *anisotrópica*. É o que se verifica com o radar, em que há retrodifusão, isto é, uma difusão em que há predominio da direcção incidente, mas com sentido oposto de propagação.

A radiação electromagnética que constitui a luz é caracterizada pela existência de um campo eléctrico e de um campo magnético, ortogonais entre si, e normais à direcção de propagação. As forças originadas pelo campo eléctrico sobre os electrões das moléculas que constituem as partículas difusoras, aceleram-os. Os electrões acelerados emitem uma radiação modelada pelas características do campo eléctrico da radiação incidente, mas com uma direcção de propagação que pode ser diferente da incidente. E assim, a frequência, ou o comprimento de onda da radiação transmitida são iguais aos da radiação incidente.

Para que se dê o fenómeno da difusão é necessário que as dimensões das partículas difusoras,  $r$ , sejam da mesma ordem de grandeza que o comprimento de onda da radiação excitante. Por isso, a difusão é selectiva, quer dizer, uma partícula pode ser difu-



sora para uma radiação de um dado comprimento de onda, e não o ser para outra. De facto, o parâmetro

$$\alpha = \frac{2 \pi r}{\lambda}$$

é fundamental para a análise do fenómeno da difusão e cuja utilização faremos mais tarde.

Se não houvesse difusão da luz solar não teríamos a possibilidade de ver os objectos à sombra. Só poderíamos ver e observar os que fossem iluminados directamente pelo Sol. As janelas duma casa só serviriam quando recebessem directamente a radiação solar. Num dia de céu coberto, sem a difusão, ficaríamos praticamente às escuras... Como veremos, sem a difusão o céu não seria azul; seria escuro como o «breu»... Quando o Sol estivesse acima do horizonte só veríamos o disco solar luminoso, não haveria a claridade do dia e as estrelas continuariam a ser visíveis em fundo negro... Não veríamos as nuvens esbranquiçadas, nem haveria as tintas crepusculares sobre o horizonte, associadas ao nascer e ao pôr-do-Sol.

#### FACTORES DE DIFUSAO

E agora põe-se a seguinte questão: quais são os factores que condicionam a difusão da radiação solar na atmosfera? Ou melhor, de que depende a difusão da radiação solar na atmosfera?

Pois bem, depende da existência e das dimensões médias das partículas, ditas difusoras, do comprimento de onda da radiação incidente e, em menor escala, do índice de refração do meio. E que partículas e qual a sua natureza?

Comecemos por referir as próprias moléculas de ar que têm dimensões da ordem de  $10^{-8}$  cm. Mas, além das moléculas há em

suspensão na atmosfera partículas sólidas e líquidas de natureza muito variada. Há ainda as nuvens que são suspensóides de gotículas de água e de cristais de gelo na atmosfera, cujas dimensões variam entre 5 e 100  $\mu\text{m}$ , e cuja concentração é muito variável, indo de 200 a 500 gotículas por centímetro cúbico.

O espectro das dimensões das partículas da atmosfera é muito amplo, como se mostra no QUADRO IV.

QUADRO IV

Partículas	Diâmetro médio
Moléculas de ar .....	$10^{-8}$ a $10^{-9}$ cm
Núcleos de condensação (partículas no estado fluido ou sólido, fumos) .....	$10^{-5}$ a $10^{-6}$
Poeiras .....	$10^{-5}$
Gotículas das nuvens .....	$10^{-3}$
Gotas de precipitação .....	$10^{-1}$
Gotas de aguaceiros, granizo, etc. ....	$10^{-1}$ a 10

As partículas sólidas são constituídas por poeiras, esporos, sal marinho, fumos e outros poluentes, uns visíveis outros invisíveis. As partículas imersas na atmosfera constituem verdadeiros aerossóis (suspensões em fase aérea, isto é, na atmosfera), cuja concentração é em geral maior sobre os continentes e nas regiões de forte poluição do que sobre os oceanos.

Quando a concentração de poeiras é elevada, e a atmosfera é estável, forma-se a bruma seca que imprime um tom acastanhado sujo à camada da atmosfera, reduzindo muito a visibilidade.

Vejamos agora como o comprimento de onda  $\lambda$  intervém na difusão. O comprimento de onda  $\lambda$  aparece combinado com

o perímetro médio das partículas,  $2\pi r$ , através do parâmetro  $\alpha = 2\pi r/\lambda$ , já referido. E isto, porque Rayleigh (1909) mostrou que o coeficiente de difusão  $k_d$  é proporcional à quarta potência de  $\frac{2\pi r}{\lambda}$ , isto é:

$$k_d \sim \left(\frac{2\pi r}{\lambda}\right)^4$$

O parâmetro  $\alpha$  tem valores muito variáveis e fornece o fundamento de um critério que permite deduzir qual a natureza do fenómeno óptico que sofre a radiação ao incidir sobre uma partícula. Só quando  $\alpha < 1$  é que se dá a difusão de Rayleigh. Nos outros casos, conforme os valores de  $\alpha$ , pode ocorrer ainda a difusão de Mie, a reflexão difusa ou a reflexão especular. Na Fig. 10 dá-se a distribuição do parâmetro  $\alpha$  em função do comprimento

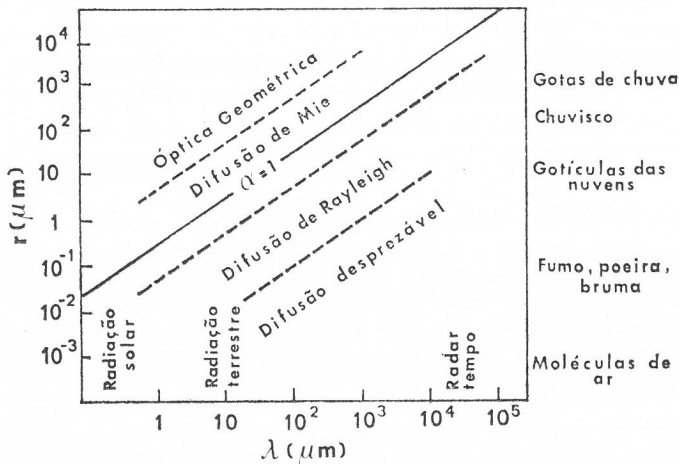


Fig. 10 — Distribuição do parâmetro  $\alpha$  em função das dimensões das partículas difusoras e fenómenos associados, e dos comprimentos de onda da radiação solar

de onda da radiação incidente e das dimensões das partículas difusoras para os vários acidentes de propagação da radiação.

Para valores de  $\alpha < 10^{-1}$  há difusão; para valores de  $\alpha \simeq 1$  dá-se a difracção da radiação e para valores de  $\alpha > 10^1$  passa a observar-se a reflexão difusa e outros fenómenos de óptica geométrica (refracção, reflexão, etc.).

\*  
\*   \*   \*

Veamos o que se passa com a radiação solar visível, quando esta encontra vários tipos de partículas na atmosfera. Tomaremos para valor do comprimento de onda do visível o valor  $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$ . Vamos depois calcular  $\alpha$  para os seguintes três casos importantes e concluir se há ou não difusão da luz.

- a) Consideremos as moléculas de ar (diâmetro entre  $10^{-7}$  e  $10^{-8}$  cm)

$$\alpha = \frac{3,14 \times 10^{-7}}{0,5 \times 10^{-4}} < 10^{-1}$$

Portanto, atendendo ao valor de  $\alpha$ , verifica-se que há difusão da radiação visível.

- b) Consideremos as poeiras e partículas suspensas na atmosfera. Têm, em média, diâmetros  $10^{-5}$  cm. Logo, vem:

$$\alpha = \frac{3,14 \times 10^{-5}}{0,5 \times 10^{-4}} \simeq 10^0 \simeq 1$$

Com este valor de  $\alpha$  podemos concluir que as poeiras provocam a difracção ou a reflexão difusa da radiação visível.

- c) Por fim, tomemos as gotículas das nuvens, que têm, em média, diâmetros de  $10^{-3}$  cm:

$$\alpha = \frac{3,14 \times 10^{-3}}{0,5 \times 10^{-4}} > 10^1$$

Por isso, podemos dizer que as gotículas das nuvens provocam a reflexão difusa da radiação visível solar.

A presença de nuvens modifica profundamente a propagação da radiação solar, porque uma parte da irradiância solar é refletida e a restante é absorvida e difundida, não só pelas partículas que constituem a nuvem, como pelo vapor de água. Os efeitos da difusão e da reflexão difusa são muito variáveis com o tipo e com a estrutura das nuvens.

A intensidade da radiação difundida numa direcção que faz o ângulo  $\Phi$  com a direcção da radiação incidente é dada por:

$$E(\Phi) = \text{const} \times \frac{(1 + \cos^2 \Phi)}{2}$$

o que mostra que a difusão não é uniforme em torno da partícula difusora, apresentando direcções privilegiadas, com um máximo para  $\Phi = k\pi$  e um mínimo para  $\Phi = (2k + 1)\pi/2$ .

#### DEPLECÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR PELA DIFUSÃO

Será possível calcular a quantidade de energia transmitida, numa dada direcção depois de se dar a difusão? É, e o método para se estabelecer a lei é análogo ao que conduziu ao estabelecimento das leis de absorção de Beer ou de Bouguer.

Assim, a fracção da radiação dum feixe paralelo que é difundido ao passar através duma camada de espessura  $dh$ , com um ângulo de incidência  $z$ , que é o ângulo zenital do Sol, é dada por:

$$\frac{dE_\lambda}{E_\lambda} = -k_{d\lambda} \sec z : dh$$

em que  $k_{d\lambda}$  é agora coeficiente de difusão do ar para a radiação do comprimento de onda  $\lambda$ , que desempenha um papel análogo ao do coeficiente de absorção da Lei de Beer.

Rayleigh (1909) apresentou a teoria da difusão da luz, que permite exprimir o coeficiente de difusão em termos das características dos difusores e da natureza da radiação incidente, pela expressão:

$$k_{\lambda d} = \frac{32 \pi^3}{3 \lambda^4} \frac{(n_\lambda - 1)^2}{N}$$

em que  $N$  é o número de partículas por centímetro cúbico e  $n_\lambda$  o índice de refração do meio para a radiação de c. d. o.  $\lambda$ .

Esta expressão mostra que o coeficiente de difusão é inversamente proporcional a  $\lambda^4$ .

A integração daquela equação ao longo dum feixe solar incidente, com um ângulo zenital  $z$ , conduz, por um tratamento análogo ao que levou ao estabelecimento da equação de Beer, à seguinte lei:

$$E_{\lambda d} = E_{\lambda 0} e^{-\sec z \int k_d dh}$$

que tem a mesma forma da Lei de Beer.

O quociente que dá a fração da quantidade de radiação que incide normalmente e é transmitida, quando se considera apenas a difusão,  $E_{\lambda d}/E_{\lambda 0}$ , define o coeficiente de transmissividade que se representa usualmente por  $q_{d\lambda}$ , tal que

$$q_{d\lambda} = e^{-\int k_d dh}$$

Por isso, a equação anterior pode tomar uma forma análoga à da Lei de Bouguer, escrevendo-se:

$$E_{\lambda} = E_{\lambda 0} (q_{d\lambda})^{\sec z}$$

#### A DIFUSÃO E FENOMENOLOGIA DA ATMOSFERA

É interessante comparar a difusão originada pelas moléculas de ar para a radiação azul-escuro ( $\lambda = 0,47 \mu\text{m}$ ) e para o vermelho alaranjado ( $\lambda = 0,64 \mu\text{m}$ ). Para isso, basta comparar os coeficientes de difusão relativos às duas radiações, atendendo a que estes variam na razão inversa da quarta potência de  $\lambda$ . Tem-se, imediatamente, que

$$\frac{k_d (\text{azul})}{k_d (\text{vermelho})} = \left( \frac{0,64}{0,47} \right)^4 = 3,45$$

Logo, o azul-escuro é 3,45 vezes mais difundido do que o vermelho alaranjado. Se compararmos o violeta ( $\lambda = 0,41 \mu\text{m}$ ), com o vermelho distante ( $\lambda = 0,80 \mu\text{m}$ ), vê-se que a razão entre difusões correspondentes seria 16 e portanto o violeta é muitíssimo mais difundido pelas moléculas da atmosfera do que o vermelho.

Então, os valores da transmissividade da atmosfera,  $q_{d\lambda}$ , variam de forma drástica, consoante a natureza da radiação incidente,



tendo em vista a expressão de  $q_{\lambda d}$ . E assim, se a transmissividade para  $\lambda = 0,7 \mu\text{m}$  é, por exemplo, 0,90, será apenas 0,37 para a radiação de  $\lambda = 0,4 \mu\text{m}$ . Logo, concluímos que a luz azul do espectro solar é muito mais difundida do que a luz vermelho. Por consequência, se um feixe de luz natural fica sujeita à difusão, a parte que é «mais» transmitida será avermelhada, já que a difusão molecular dispersa predominantemente o azul e outras radiações de pequenos comprimentos de onda.

A difusão é provocada pelas próprias moléculas de ar e, eventualmente, pelas pequenas partículas de fumos. E é, por isso, que a cor do céu é azulada, visto que o azul é a radiação que é mais difundida pelas moléculas do ar (Fig. 11). Quando o Sol está próximo do horizonte, a luz solar (branca) tem que atravessar uma grande espessura da atmosfera para atingir um observador na superfície do Globo. A luz solar apresenta uma cor alaranjada, ou mesmo vermelha (maior percentagem de grandes comprimentos de onda), porque a difusão «eliminou», por dispersão, a maior parte das radiações do pequeno comprimento de onda (azul, verde, etc.). Daí as colorações avermelhadas da atmosfera ao nascer e ao pôr-do-Sol.

Com bruma seca as partículas difusoras são as poeiras que predominam na camada junto ao Globo. Estas, por terem dimensões superiores às das moléculas de ar, difundem de preferência o vermelho e daí a coloração «acastanhada suja» da atmosfera, quando há bruma seca e a consequente diminuição da visibilidade.

Resumindo, podemos dizer que o domínio dos pequenos comprimentos de onda na radiação difundida pelas moléculas do ar é responsável pela cor azul do céu, pelas sombras e pela visão de objectos distantes. De forma análoga, o domínio de radiação de maiores comprimentos de onda transmitida através da atmosfera, depois da difusão, imprime uma cor avermelhada ou

alaranjada aos objectos vistos à luz natural, como as nuvens, principalmente ao nascer e ao pôr-do-Sol, quando o percurso óptico da radiação solar é mais prolongada (Fig. 11).

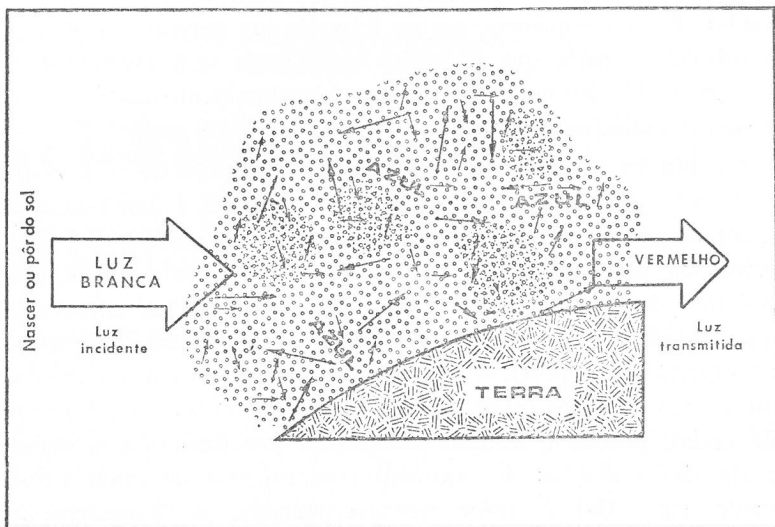


Fig. 11 — Difusão da luz solar pela atmosfera. O azul é a cor mais difundida dadas as dimensões das partículas difusoras que são as moléculas dos componentes da atmosfera.

Com dias de céu limpo em Portugal o azul do céu é muito límpido, porque a difusão é quase exclusivamente devida à difusão molecular, já que a percentagem de impurezas, de poluentes e de poeiras é muito pequena. Depois dum dia de aguaceiros, que fazem a «limpeza» por arrastamento das impurezas da atmosfera, através da precipitação, o céu tem colorações azuis esplêndidas e muito intensas.

## A DIFUSÃO PELAS NUVENS E PELAS PARTÍCULAS SUSPENSAS DA ATMOSFERA

A difusão da radiação pelas gotas da precipitação também cai no regime de difusão de Rayleigh. O aumento rápido do coeficiente  $k_d$  com as dimensões das gotas torna possível a discriminação entre as gotas da precipitação e as das nuvens. Este princípio é, como se sabe, utilizado pelo radar que, emitindo radiações de ondas centimétricas ( $\lambda = 3 \text{ cm}, \dots 10 \text{ cm}$ ), permite «ver» a precipitação devido à retrodifusão (e não ao «eco», como impropriamente se diz) provocada pela difusão pelas gotas de precipitação.

Quando o parâmetro  $\alpha$  é elevado, o coeficiente de difusão  $k_d$  é aproximadamente igual a 2 unidades e a distribuição angular da radiação transmitida pode ser descrita pelos princípios da óptica geométrica (ver Fig. 10). A interacção da radiação visível com as gotículas das nuvens, com as gotas da precipitação e com as partículas de gelo situa-se neste regime e reduz-se à reflexão difusa e à reflexão e refacção organizadas, que produzem os conhecidos fenómenos ópticos, tais como arco-íris, halos, etc.

Para valores intermédios do parâmetro  $\alpha$ , isto é, para valores de  $\alpha$  compreendidos entre 0,1 e 50 o fenómeno da difusão já não é explicado pela teoria de Rayleigh. Neste caso é descrito em termos duma teoria mais geral desenvolvida por Mie. No chamado regime de Mie, o parâmetro de difusão  $\alpha$  apresenta uma variação oscilatória com o comprimento de onda como se mostra na Fig. 12. A distribuição angular da radiação difusa é muito complexa e varia rapidamente com  $\alpha$ , com o predomínio da difusão avançada sobre a retrodifusão.

A difusão da luz solar por partículas de neblina, fumos, nevoeiro e poeiras cai no regime de Mie. Se as partículas têm dimensões quase uniformes, a luz difundida pode apresentar uma

matiz azulada ou avermelhada, conforme o coeficiente  $k_d$  aumenta ou diminua com  $\alpha$ , para comprimentos de onda na região do visível. No caso real, as partículas têm uma gama de dimensões sufi-

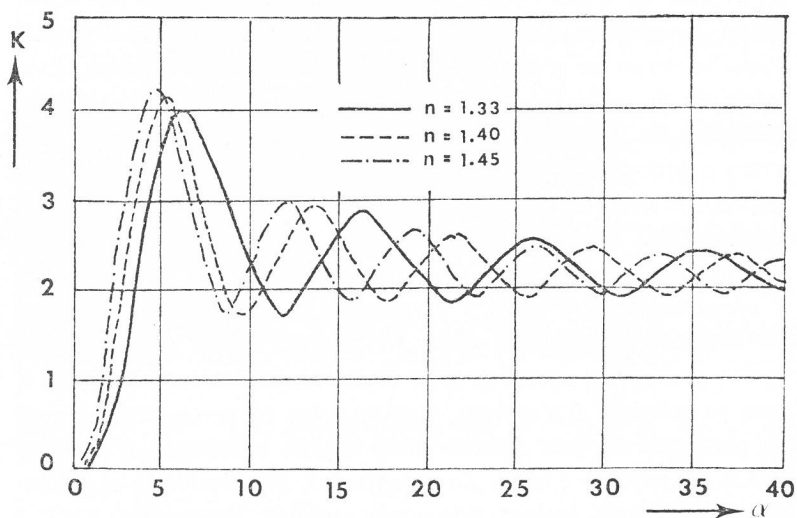


Fig. 12 — Difusão da luz em regime de Mie para alguns valores do índice de refração da atmosfera. O coeficiente de difusão  $k_d(\alpha)$  não é constante e sofre flutuações quase sinusoidais amortecidas

cientemente larga para abranger vários máximos e mínimos na curva que dá a distribuição de  $k_d(\alpha)$ , e a luz difundida apresenta uma cor neutra ou esbranquiçada. Para valores de  $\alpha$  elevados verifica-se mesmo a reflexão difusa, não organizada. Portanto, a luz solar continua a ser esbranquiçada, visto que a reflexão difusa não é selectiva e observa-se igualmente para todos os comprimentos de onda. É por isso que as nuvens nos parecem brancas, principalmente quando as olhamos de lado. Neste caso a luz

é reflectida de forma desordenada em todos os comprimentos de onda na banda do visível. Por outro lado, quando a luz do Sol encontra uma nuvem, parte da energia difundida ou reflectida de forma difusa é reenviada para o espaço exterior. Nestas condições, a luz difusa que emerge da base das nuvens tem uma densidade relativamente fraca e a base das nuvens parece-nos enegrecida.

Vejamos agora que não há razão para se aceitarem algumas ideias muito divulgadas, como por exemplo, a penetração da luz amarela no nevoeiro. De facto, os diâmetros das gotículas do nevoeiro têm valores da ordem de  $d = 10^{-3}$  cm e o c. d. o. da luz amarela é  $\lambda = 0,6 \times 10^{-4}$  cm. Logo, o valor do parâmetro  $\alpha$  correspondente mostra que se dá a reflexão difusa e não a difusão. Por isso, não há selectividade para a luz amarela; portanto, o amarelo não tem «preferência» para a penetração do nevoeiro.

Para altitudes muito elevadas, a atmosfera está muito rarefeita e, por isso, não se dá a difusão da luz solar, porque as moléculas de ar, que são as partículas difusoras, são em número muito pequeno. Por isso, um astronauta a bordo duma nave espacial que olhe para o céu só poderá receber luz directamente do Sol ou das estrelas. O céu apresenta-se-lhe negro, enquanto que o Sol e as estrelas brilham muito mais intensamente do que na atmosfera, porque a luz emitida não é atenuada pela difusão, nem pela absorção.

No fumo do tabaco vêem-se tons azulados devido à difusão da luz solar pelas partículas que o constituem e que têm diâmetro da ordem de  $0,02 \mu\text{m}$  ( $2 \times 10^{-6}$  cm); vêem-se também tons esbranquiçados devido à reflexão difusa da luz por partículas maiores. O fumo, quando expellido, torna-se rapidamente esbranquiçado, porque as partículas em suspensão são geralmente higroscópicas e aumentam de volume devido à absorção de vapor de água, que forma uma película à volta das partículas.

## EFEITO DAS NUVENS

A simples observação mostra que as nuvens modificam profundamente a propagação da radiação solar na atmosfera. Uma fracção substancial da radiação solar incidente nas nuvens é reflectida. A esta fracção, que é um coeficiente de reflexão, chama-se *albedo*.

Da radiação que penetra nas nuvens, uma parte é absorvida pelas gotas de água, pelos cristais de gelo e pelo próprio vapor de água e a outra parte da radiação que emerge da base das nuvens é difusa.

A grande variedade de estrutura, de forma e extensão das nuvens torna difícil determinar os valores do albedo das nuvens. Atribui-se na generalidade ao albedo global das nuvens um valor médio da ordem de 0,78. Durante mais de vinte anos usou-se o valor 0,78 indiscriminadamente para todos os tipos de nuvens. Só recentemente se verificou a incoerência desta atitude. Usando observações executadas em avião viu-se que o albedo varia de 0,31 a 0,75 nos estratos, de 0,56 a 0,81 nos estrato cúmulos, de 0,17 a 0,36 nos altostratos e de 0,44 a 0,50 nos cirrostratos, etc. O valor médio é substancialmente inferior a 0,78, e hoje aceita-se que o valor médio do albedo global das nuvens é da ordem de 0,55 e não de 0,78.

A absorção pelas nuvens da radiação solar é muito pequena na banda do visível, e só é de considerar na região do infravermelho.

Nem toda a radiação solar incidente na superfície do Globo é absorvida por este, visto que há uma parte que é imediatamente reflectida, ainda que o albedo do Globo seja relativamente pequeno. Se exceptuarmos as superfícies dos gelos e das águas a superfície do Globo comporta-se como um reflector difuso. Ora, como a

maior parte da superfície do Globo está coberta pelos oceanos, a reflectividade da água assume uma grande importância.

A reflectividade dum superfície lisa de água depende do ângulo de incidência. É, no entanto, pequena, excepto para ângulos de incidência elevada ( $\alpha > 70^\circ$ ). Como nós só vemos a superfície das águas com ângulos de incidência muito grandes, parece-nos que tem uma grande reflectividade, o que origina o «espelhamento» das águas. Acontece, porém, que a maior parte da radiação solar é recebida com ângulos de incidência muito inferiores a  $70^\circ$  e, por isso, só uma pequena fracção se perde por reflexão. Por outro lado, a reflexão na água da radiação difundida pela atmosfera é cerca de 6,5 por cento. Das duas reflectividades, resulta um valor global para o albedo da superfície das águas de cerca de 0,07. No Hemisfério Norte, o valor médio do albedo da superfície do Globo é de 0,10, valor que é superior ao valor do albedo dos oceanos, o que mostra o domínio do albedo dos continentes no albedo do Globo.

Vejamos agora o que se passa com o albedo planetário, incluindo o Globo e a atmosfera. É evidente que o albedo planetário é muito influenciado pela presença das nuvens que têm um albedo bastante elevado (0,55). A título de apontamento citemos que o albedo da Lua é apenas de 0,07, devido ao facto de não ter atmosfera e, portanto, não ter nuvens e o do planeta Vénus é de 0,59 por ser envolvido por uma atmosfera de gases a alta temperatura.

O valor do albedo planetário apresenta variações latitudinais apreciáveis. O mínimo do albedo (0,28), que se observa cerca de  $25^\circ$  de latitude, resulta do mínimo observado na nebulosidade. O aumento do albedo acima de  $40^\circ$  de latitude para 0,70 é, em primeiro lugar, devido ao aumento da nebulosidade nas latitudes médias e aos valores elevados do albedo nas latitudes subpolares devido à existência de neve e à cobertura dos gelos.



O valor médio do albedo planetário (Globo e atmosfera) é 0,34, um pouco inferior às estimativas anteriores, mas que agora é confirmado pelos resultados das observações obtidos através dos satélites artificiais. Isto significa que só 0,66 da radiação incidente são absorvidos pela atmosfera e pelo Globo. É esta fracção da energia solar que constitui a fonte de energia para toda a fenomenologia que ocorre na Terra.

Cerca de metade da radiação absorvida é utilizada na evaporação da água. O calor latente de vaporização do vapor de água é libertado mais tarde, na atmosfera, provavelmente num local diferente, quando ocorre condensação. A outra metade é absorvida pelo Globo. Por fim, toda a radiação absorvida pelo Globo e pela atmosfera é reenviada para o espaço como radiação infravermelha.

Interessa conhecer em alguns casos a distribuição vertical da absorção na atmosfera. Em geral, essa variação é expressa em termos do aumento da temperatura do ar, em graus por dia ( $^{\circ}\text{C}/\text{dia}$ ), que resultaria da absorção da radiação solar, se não actuassem outros efeitos. Na baixa troposfera este aquecimento seria, em média, cerca de  $0,5^{\circ}\text{C}/\text{dia}$ , decrescendo para zero, junto da tropopausa. O aquecimento depende, em grande parte, da concentração do vapor de água da atmosfera e está, portanto, sujeito a grandes variações, de dia para dia, e com as estações do ano.

## A FORMAÇÃO DA IONOSFERA E DA OZONOSFERA

A difusão da luz solar na atmosfera dá-se de forma contínua para as radiações de vários comprimentos de onda, enquanto que a absorção da radiação é em geral selectiva. Como já vimos, os constituintes absorventes da atmosfera mais importantes são o oxigénio ( $\text{O}_2$ ), o ozono ( $\text{O}_3$ ), o vapor de água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), o anidrido

carbónico ( $\text{CO}_2$ ), o azoto ( $\text{N}_2$ ), o oxigénio atómico (O), óxidos de azoto ( $\text{N}_x\text{O}$ ) e, em menor escala, o metano ( $\text{CH}_4$ ).

Começaremos por dar a interpretação da absorção da radiação pelos gases da atmosfera. Uma molécula contém uma certa quantidade de energia além da energia associada ao seu movimento no espaço. A maior parte daquela energia é de natureza cinética e electrostática, como se sabe. Uma molécula, além destas formas de energia, tem energia associada à vibração dos átomos individuais que a constituem, e energia devida à rotação da molécula em torno do seu centro de massa.

Mas, como a mecânica quântica prevê, só são permitidas determinadas configurações das órbitas dos electrões em cada átomo e, no caso das moléculas, só são permitidas certas frequências e amplitudes de vibração e, apenas, certas velocidades de rotação. Cada uma das possíveis combinações das energias orbital de vibração e de rotação define um nível de energia, caracterizado pela soma das três formas de energia associadas. Uma molécula, ao absorver radiação electromagnética, pode passar a um nível de energia mais elevado (excitada) e, inversamente, se emitir energia radiante pode passar para um nível de energia menos elevado. No entanto, como a mecânica quântica impõe, só são permissíveis determinadas variações no nível de energia, e estas variações são as mesmas, quer se dê a absorção, quer se dê a emissão de energia.

A emissão de energia radiante é descontínua e faz-se sob a forma de fotões. A quantidade de energia associada a um fotão é, como vimos,  $E = h\nu$  em que  $\nu$  é a frequência da radiação e  $h$  é a célebre constante de Planck ( $h = 6,62 \times 10^{-34}$  J. s). A radiação propaga-se com a velocidade da luz,  $c$ , e a frequência  $\nu$  e o comprimento de onda  $\lambda$  estão relacionados pela expressão:

$$\nu = c/\lambda$$

Por isso, a quantidade de energia associada a um fóton é inversamente proporcional ao comprimento de onda da radiação. Os fótons de grande comprimento de onda têm menos energia que os de pequeno comprimento de onda.

Ora, uma molécula só pode absorver ou emitir quantidades discretas de energia, correspondentes às variações permissíveis nos seus níveis de energia. Logo, só pode interactuar com radiações de comprimento de onda bem definidos e discretos. Portanto, as propriedades de emissão ou de absorção de energia radiante por uma molécula isolada, podem ser descritas em termos dum espectro de riscas constituído por um número finito de riscas de emissão ou de absorção, separadas por intervalos em que nem a absorção nem a emissão são possíveis.

A maioria das riscas de absorção associadas a variações orbitais verificam-se nas regiões dos raios X, do ultravioleta e do visível. As riscas associadas ao modo vibracional observam-se no infravermelho próximo, enquanto que as riscas associadas ao modo rotacional, que envolvem quantidades de energia muito menores, ocorrem na região do infravermelho e das microondas.

Alguns dos componentes da atmosfera, tais como o anidrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ), o vapor de água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e o ozono ( $\text{O}_3$ ) têm estruturas que lhes permitem absorver ou emitir energia, quando sofrem uma transição rotação-vibração. Estas moléculas apresentam, por isso, espectros com riscas muito próximas umas das outras na região do infravermelho do espectro da radiação electromagnética. Outras moléculas, como as de oxigénio ( $\text{O}_2$ ) e as de azoto ( $\text{N}_2$ ) só podem interactuar com a radiação pelo modo vibracional e os seus espectros de absorção não apresentam tantas riscas na região do infravermelho.

Há ainda outros processos que permitem a absorção e a emissão de energia radiante pelos átomos e pelas moléculas. Assim, uma molécula pode absorver radiação, cuja energia é sufi-

ciente para provocar a ruptura dos átomos que a compõem e, por sua vez, átomos instáveis podem recombinar-se para forma moléculas mais estáveis, libertando o excesso de energia na forma radiante. Trata-se, como se vê, de reacções em que intervém a energia radiante e, por isso, se chamam reacções fotoquímicas. Nestas, a absorção ou a emissão da radiação electromagnética desempenham um papel importantíssimo ao fornecer energia necessária, ou ao remover excesso de energia para que se dê a reacção fotoquímica.

Os espectros, devido a transições electrónicas no oxigénio molecular e atómico, no azoto e no ozono, confinam-se principalmente à região ultravioleta. Os espectros devidos a modos vibracionais e rotacionais de moléculas poliatómicas, tais como o vapor de água, o anidrido carbónico e o ozono aparecem na região infravermelha. No domínio do visível dá-se uma absorção muito pequena.

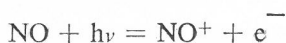
Como os valores dos coeficientes de absorção associados a transições electrónicas são, em geral, muito elevados, a maioria da radiação ultravioleta é absorvida nas camadas elevadas da atmosfera. Parte das moléculas do oxigénio e do azoto dissociam-se, por acção da radiação de p. c. d. o., em oxigénio atómico e em azoto atómico, respectivamente, ao passo que as moléculas dos outros componentes da atmosfera são apenas ionizadas.

O oxigénio e o azoto atómicos podem ainda absorver radiação de outros comprimentos de onda, de que pode resultar a sua ionização parcial. As camadas ionizadas que se formam na alta atmosfera são devidas principalmente a estes processos de ionização. Parte da energia absorvida é reemitida pelos átomos e moléculas excitadas ao voltarem ao estado normal e a restante, transformada em calor, é utilizada em aquecer a camada.

\*  
\*       \*  
\*

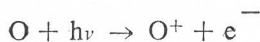
A absorção da radiação solar ultravioleta está intimamente associada às reacções fotoquímicas, que conduzem à formação de camadas ionizadas, que constituem a ionosfera e à formação do ozono. A teoria foi inicialmente proposta por Chapman (1931) e continua a ser aperfeiçoada.

A ionização da atmosfera começa a acentuar-se a cerca de 60 km de altitude e a primeira camada desta região em que se verifica uma forte ionização, entre 60 e 90 km, é designada por camada D. Resulta de reacções do tipo



em que a energia dos fotoões,  $h\nu$ , tem valores entre 9 e 12 electrão volt (eV)(\*). A energia necessária à ionização pode atribuir-se à radiação na região de risca Lyman. Esta radiação pode, no entanto, penetrar, por vezes, até cerca de 10 km.

Acima da camada D, a cerca de 100 km de altitude, forma-se a camada E, e acima desta ainda a camada F. Estas duas camadas atribuem-se à ionização por radiações cujos comprimentos de onda são inferiores a 0,1  $\mu\text{m}$ . Esta radiação actuará sobre o oxigénio atómico para o ionizar e libertar electrões, segundo um esquema do tipo:



Note-se que as radiações de curto comprimento de onda (raios X, raios ultravioleta) são as responsáveis pela formação da ionosfera,

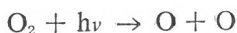
---

(\*) 1 eV =  $4,602 \times 10^{-19}$  J.

porque só estas têm energia suficientemente elevada (frequências elevadíssimas) para remover um electrão do cortejo electrónico dos átomos (ou das moléculas). A ionosfera, devido à forte concentração de iões e de electrões, é uma camada fortemente electrizada capaz de afectar a propagação das ondas hertezianas, como se sabe.

\*  
\*      \*

Vejamos agora a formação da ozonosfera. A radiação com comprimentos de onda até  $0,2 \mu\text{m}$  é consumida na alta atmosfera, principalmente na dissociação do oxigénio molecular, ( $\text{O}_2$ ):

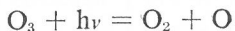


A cerca de 50 km de altitude ocorre uma outra reacção entre o oxigénio atómico, O, e o oxigénio molecular,  $\text{O}_2$ , para produzir uma molécula de ozono,  $\text{O}_3$ , na presença de componentes muito estáveis, cuja massa molecular representamos genericamente por M, segundo o esquema:



O excesso de energia libertado é absorvido pela «terceira molécula», que representámos por M.

Por outro lado, a radiação solar entre  $0,2$  e  $0,3 \mu\text{m}$  ( $2\,000 \text{ \AA}$  e  $3\,000 \text{ \AA}$ ) é absorvida pelo ozono que, por sua vez, se fotodissocia para originar oxigénio molecular e atómico:



O máximo do ozono na atmosfera ocorre a cerca de 25 km de altitude. A quantidade de ozono existente na atmosfera é muito pequena, mas tem um papel decisivo na absorção da radiação ultravioleta próxima na atmosfera. O estudo da fotoquímica do ozono tem vindo a ter um incremento notável por causa da importância vital que a ozonosfera tem, protegendo a vida terrestre contra os efeitos perigosos da radiação ultravioleta.

Recentemente, tem vindo a causar certa preocupação a introdução de poluentes na estratosfera, como no caso dos aviões supersónicos, que lançam vários produtos ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{OH}_2$ , etc.), provocando o desequilíbrio químico da estratosfera e a ruptura da tropopausa. Esta ruptura permite a entrada na estratosfera de produtos, que podem alterar o equilíbrio da ozonosfera, tais como o vapor de água, o ácido nítrico, o freon e outros. Esta alteração do equilíbrio poderia permitir que uma maior quantidade de radiação na banda do ultravioleta próximo ( $\lambda \approx 0,3 \mu\text{m}$ ) atinjissem a superfície do Globo.

No QUADRO V indicam-se quatro tipos de radiação que afetam várias camadas da atmosfera, cada um deles associado a mecanismos diferentes de absorção.

## QUADRO V

### *Absorção da radiação solar na atmosfera da Terra*

Comprimento de onda ( $\lambda$ )	Camadas de absorção	Mecanismos de absorção	Fracção absorvida
$< 0,1 \mu\text{m}$	90-200 km	fotodissociação	toda
$0,1 - 0,2 \mu\text{m}$	50-110 km	» ( $\text{O}_2$ )	»
$0,2 - 0,3 \mu\text{m}$	30- 60 km	» ( $\text{O}_3$ )	»
$> 0,3 \mu\text{m}$	0- 10 km	absorção pelo $\text{H}_2\text{O}$	17%

Como mostra a análise do QUADRO V, só a radiação, cujo comprimento de onda é superior ao ultravioleta ( $\lambda > 0,31 \mu\text{m}$ ), pode atingir a superfície do Globo. As radiações de comprimento de onda inferiores ( $\lambda < 0,31 \mu\text{m}$ ) são consumidas na fotoionização e fotodissociação nas camadas elevadas da atmosfera, e, por isso, não atingem a superfície do Globo.



## IV — RADIAÇÃO SOLAR NA SUPERFÍCIE DO GLOBO

### MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR

O instrumento fundamental para a medição da radiação solar é o *radiómetro* que detecta e mede a energia radiante, convertendo esta em energia eléctrica ou mecânica, que aplicadas a mecanismos fazem actuar um indicador ou um registo. Há vários instrumentos que realizam esta função. O *pirheliómetro* é um instrumento que mede a intensidade do feixe de radiação solar directa. O *piranómetro* mede a radiação solar global (directa mais difusa). A radiação solar difusa pode medir-se com um *difusómetro*, que é um piranómetro provido de um arco que intercepta a radiação solar directa e mantém na sombra o órgão sensível do piranómetro.

Durante muitos anos, utilizaram-se os *actinógrafos* de Robitch, em que o órgão sensível é constituído por uma placa pintada de branco, ladeada por duas placas pintadas de negro de fumo. A absorção desigual da radiação pelas placas provoca uma dilatação diferencial que é transmitida por um dispositivo mecânico a um registo. Estes instrumentos estão a cair em desuso. Actualmente usam-se termopilhas do tipo Eppley e outras, que trans-

formam a energia térmica associada à absorção diferencial, em energia eléctrica em que a intensidade da corrente gerada, depois de ampliada, é registada. Actualmente estas estão a ser substituídas por outros radiómetros mais baratos, que usam como parte sensível, uma célula fotovoltaica de silício.

Os radiómetros podem ser instalados em aviões, em satélites ou na superfície do Globo, conforme o fim em vista.

O langley (ly) é a unidade que se tem utilizado para exprimir a radiação solar. Equivale a uma caloria por centímetro quadrado ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ ). A potência exprime-se, usualmente, em langleys por minuto ( $\text{ly}/\text{min}$ ).

Em geral, as estações meteorológicas avaliam a radiação solar em termos do número total de langleys que incide numa hora, num dia ou num mês, etc., sobre uma superfície plana e horizontal situada ao nível do solo.

Vejam os significado prático de um langley por minuto. Um kilowatt é equivalente a  $14\,300 \text{ cal}/\text{min}$ . Se a radiação solar observada é 1 langley por minuto, a potência recebida por  $\text{cm}^2$  é  $7 \times 10^5$  kilowatt. Logo, para se receber 1 kilowatt será necessária uma área de  $14\,300 \text{ cm}^2$ , ou seja, de  $1,43 \text{ m}^2$  ( $1:7 \times 10^{-5}$ ). Portanto, a conversão de  $\text{ly}/\text{min}$  em  $\text{kilowatts}/\text{m}^2$  faz-se muito facilmente: basta multiplicar os valores expressos em  $\text{ly}/\text{min}$  por 0,7.

Na Fig. 13 mostra-se a configuração do registo da radiação solar em três dias sem nuvens no Instituto Geofísico D. Luís, que correspondem a dias típicos, próximos dos solstícios do Verão e de Inverno e do equinócio. Como se vê, a partir do meio-dia e até à tarde, os registos tendem a apresentar pequenas flutuações que se podem atribuir, pelo menos no Verão e no Outono, à existência de poeiras e de outros materiais poluentes na baixa atmosfera.

A radiação solar recebida num dia calcula-se pela área limitada pela curva do registo, e exprime-se em  $\text{ly}/\text{dia}$ .

Em dias sem nuvens, a variação diurna da irradiância total recebida é, como mostram as figuras, aproximadamente sinusoidal.

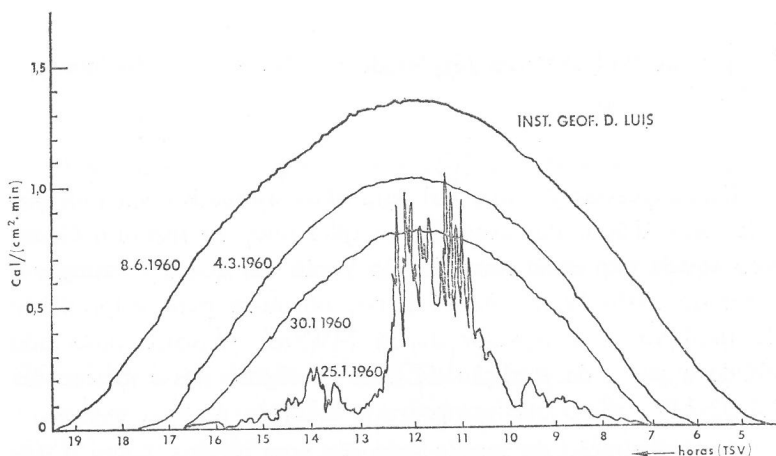


Fig. 13 — Registos dos piranómetros do Instituto Geofísico D. Luís em dias de céu limpo e de céu parcialmente coberto pelas nuvens. A radiação solar no dia obtém-se por integração e é representada pela área limitada pela curva do registo

Então, o fluxo total  $s_t$ , da radiação  $t$  horas depois do nascer-do-Sol, pode ser dada pela expressão:

$$s_t \simeq s^{\max} \text{ sen } (\pi t/M)$$

em que  $s^{\max}$  é a irradiância máxima recebida (em geral, ao meio-dia solar verdadeiro) e  $M$  o intervalo de tempo do Sol acima do horizonte, expresso em horas.

A radiação solar total recebida num dia, obtém-se por integração daquela expressão, e tem-se:

$$\int_0^N s_t dt = \int_0^N s^{\max} \sin(\pi t/N) dt = 2 N s^{\max} / \pi \quad (\text{ly/min})$$

Esta expressão é muito útil para obter estimativas da radiação solar total diária. Por exemplo, se aplicarmos ao Instituto Geofísico aquela expressão num dia de Verão em que  $s^{\max}$  atingiu o valor de 1 050 W/m<sup>2</sup>, às 14 horas, obtém-se para valor diário da radiação solar o valor de 34 MW/m<sup>2</sup>. O valor observado obtido a partir da medição da área do registo nesse mesmo dia foi 32 MW/m<sup>2</sup>, o que comprova a utilidade daquela expressão.

A configuração do registo num dia com nuvens, como o que se mostra na Fig. 13, é completamente diferente, apresentando flutuações e irregularidades muito marcadas. É interessante notar os valores muito elevados da irradiância, imediatamente antes e depois do encobrimento do Sol pelas nuvens, e a sucessão de valores mínimos quando o Sol está completamente encoberto. O aumento da irradiância antes e depois do Sol estar encoberto resulta da forte difusão da radiação pelas gotículas minúsculas que existem nos bordos de transição das nuvens. Num dia de céu encoberto, recebe-se só quase a radiação solar que é difundida e o registo corresponde, portanto, à radiação solar difusa.

## CÁLCULO DA RADIAÇÃO SOLAR NA SUPERFÍCIE DO GLOBO

### CÁLCULO DA TRANSMISSIVIDADE TOTAL DA ATMOSFERA

Acabámos de mostrar que a radiação solar à superfície se pode avaliar usando instrumentos de medida. Mas também se pode determinar através de cálculos simples, se se souber determinar a transmissividade total da atmosfera num dado local. Uma vez obtida a transmissividade total, podemos, a partir da constante solar e do percurso óptico, aplicar a Lei de Beer e estimar a radiação solar à superfície do Globo.

Vejamos, então, como se procede para determinar a transmissividade da atmosfera.

Numa atmosfera sem nuvens, a radiação solar sofre uma deplecção que resulta da difusão e da absorção. A difusão é devida às moléculas do ar, aos suspensóides, aos núcleos de condensação e a fumos existentes na atmosfera. A absorção é devida principalmente ao vapor de água. Tanto a difusão como a absorção são selectivas e dependem do comprimento de onda da radiação incidente.

Por isso, em princípio, deveria calcular-se a transmissividade para cada radiação em separado, e depois obter o valor final para todo o espectro. Veremos que se pode obter logo este valor total, sem passar por estes passos intermédios. A transmissividade total da atmosfera,  $q_\lambda$ , para uma radiação de comprimento de onda  $\lambda$ , resulta das transmissividades parciais devidas à difusão pelos componentes do ar,  $q_{d,\lambda}^{ar}$ , à difusão pelo vapor de água,  $q_{d,\lambda}^{OH_2}$ , à absorção associada ao vapor de água,  $q_{a,\lambda}^{OH_2}$ , ao anidrido carbó-

nico,  $q_{a,\lambda}^{\text{CO}_2}$ , e ao ozono,  $q_{a,\lambda}^{\text{O}_3}$ . O valor de  $q_\lambda$  será dado pela expressão:

$$q_\lambda = \left( q_{d,\lambda}^{\text{ar}} \times q_{d,\lambda}^{\text{OH}_2} \times q_{d,\lambda}^{\text{poeiras}} \right) \times \left( q_{a,\lambda}^{\text{O}_3} \times q_{a,\lambda}^{\text{OH}_2} \times q_{a,\lambda}^{\text{CO}_2} \right)$$

Este resultado provém, como mostrámos já, dos coeficientes de absorção,  $k_a$ , e de difusão,  $k_d$ , serem aditivos e conduzirem, portanto, a um coeficiente de atenuação  $k = k_a + k_d$ , que figura na Lei de Beer generalizada.

O quarto factor de depleção, que afecta a transmissividade, é a existência de poeiras na atmosfera, a que corresponde uma transmissividade  $q_{d,\lambda}^{\text{poeiras}}$ . Esta só é importante nas camadas baixas da atmosfera, porque a níveis mais elevados como, por exemplo, no topo das montanhas, a concentração de poeiras é muito pequena.

A difusão da luz pelo vapor de água não é de origem molecular: é devida aos núcleos de condensação. Mantém-se esta designação, porque depende da quantidade de vapor de água que existe na atmosfera. Os núcleos de condensação são geralmente higroscópicos e crescem de volume com o teor de humidade. A depleção devida ao vapor de água é particularmente importante nas regiões do infravermelho do espectro solar.

No cálculo efectivo da transmissividade temos que considerar todo o espectro solar, o que se pode conseguir a partir do conhecimento das transmissividades,  $q_\lambda$ , para as radiações de vários comprimento de onda, obtendo depois a transmissividade integrada para todo o espectro da radiação solar.

Na atmosfera seca, a transmissividade calcula-se em função do percurso óptico avaliado em termos da massa seccional, que, como mostrámos, é proporcional a  $\sec z$  ( $m \sim \sec z$ ). No caso da atmosfera húmida, que é o mais natural, a transmissividade resul-

tante da difusão e da absorção pelo vapor de água, calcula-se em função do percurso óptico, avaliado em termos da massa de vapor de água por unidade de área ao longo do percurso. A quantidade total de vapor de água numa coluna, cuja área da base vale  $1 \text{ cm}^2$ , e que se estende verticalmente ao longo da atmosfera, chama-se *água precipitável*. Representa-se por  $W$  e exprime-se em centímetros: seria a espessura que atingiria a água da coluna, se todo o vapor de água se condensasse. Para um percurso, não normal, com uma certa inclinação, a massa total do vapor de água é igual à que corresponderia à de uma coluna vertical,  $W$ , multiplicada pela massa seccional, isto é:

$$W \times m \quad \text{ou} \quad W \times \sec z$$

A Fig. 14, obtida por Houghton (1954), permite determinar numa vez só, para todo o espectro, as várias componentes da transmissividade, sem ter que recorrer ao cálculo da transmissividade para cada comprimento de onda em separado. As transmissividades devidas à difusão pelo ar seco e à difusão e à absorção pelo vapor de água, integrados para todo o espectro solar, obtêm-se das curvas da figura, em função da massa seccional  $m$  ou de  $m \times W$ , conforme for apropriado.

A transmissividade total para a atmosfera sem poeiras, com uma massa seccional  $m$  e uma quantidade de água precipitável  $W$ , é, de forma análoga, o produto das transmissividades devidas a cada um dos factores de depleção, tomados separadamente:

$$q = q_a(m) \times q_w(W \times m) \times q'_w(W \times m)$$

Nesta expressão os símbolos têm os seguintes significados:  $q_a(m)$  designa a transmissividade devida à absorção e à difusão pelo ar seco numa coluna de massa seccional  $m$ ;  $q_w(W \cdot m)$  a transmissi-

vidade devida à absorção do vapor de água e  $q'_w$  (W . m) a transmissividade devida à difusão do vapor de água.

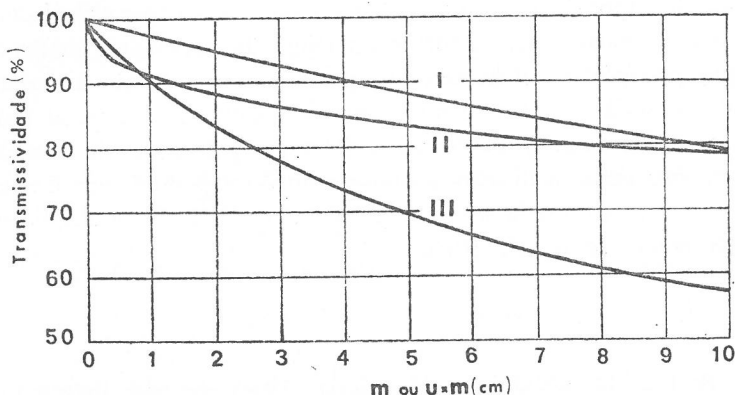


Fig. 14 — Curvas da transmissividade global da atmosfera. A curva I dá a transmissividade devida à difusão do vapor de água; a curva II a que é devida à absorção do vapor de água e a curva III a transmissividade devidas à difusão pelo ar seco. As abcissas das curvas I e II são o produto da massa óptica pela água precipitável e para a curva III a massa óptica da atmosfera

#### A RADIAÇÃO SOLAR A SUPERFÍCIE DO GLOBO

Uma vez determinada a transmissividade total da atmosfera é fácil calcular as várias componentes da radiação solar que chega à superfície do Globo. Para calcular a radiação solar directa, começaremos por multiplicar a transmissividade total,  $q$ , pela constante solar  $E_0$ , o que permite obter a densidade do fluxo da radiação directa que atinge a superfície do Globo (Fig. 15-a e 15-b).



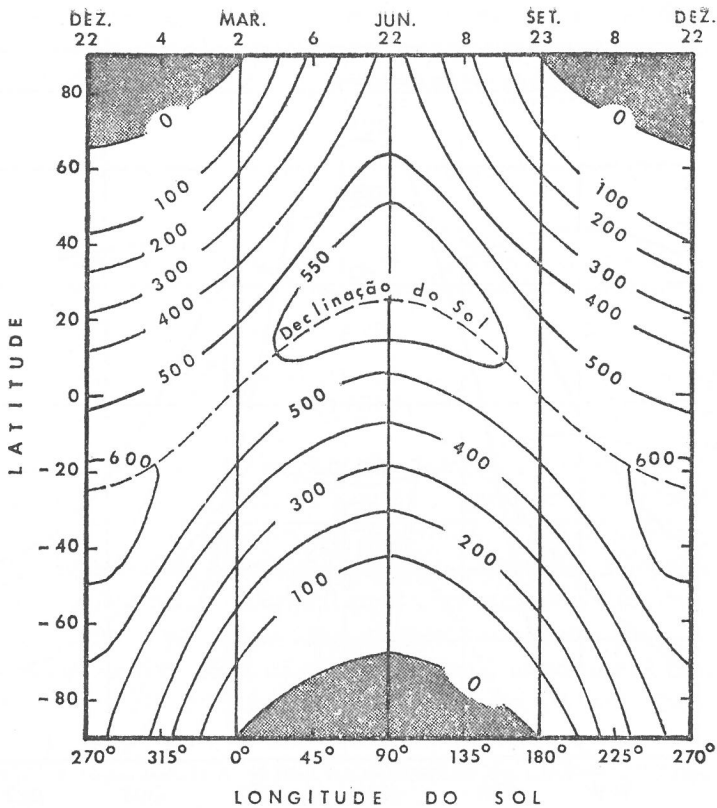


Fig. 15-a — Radiação solar recebida na superfície do Globo em ly/dia em função da latitude e da época do ano, quando a transmissividade da atmosfera é 0,7

Notemos que não é ainda a radiação global, porque não inclui a radiação difundida pela atmosfera. A radiação exprime-se, usualmente, em termos do fluxo por unidade de área, colocada horizontalmente sobre a superfície do Globo e não por unidade

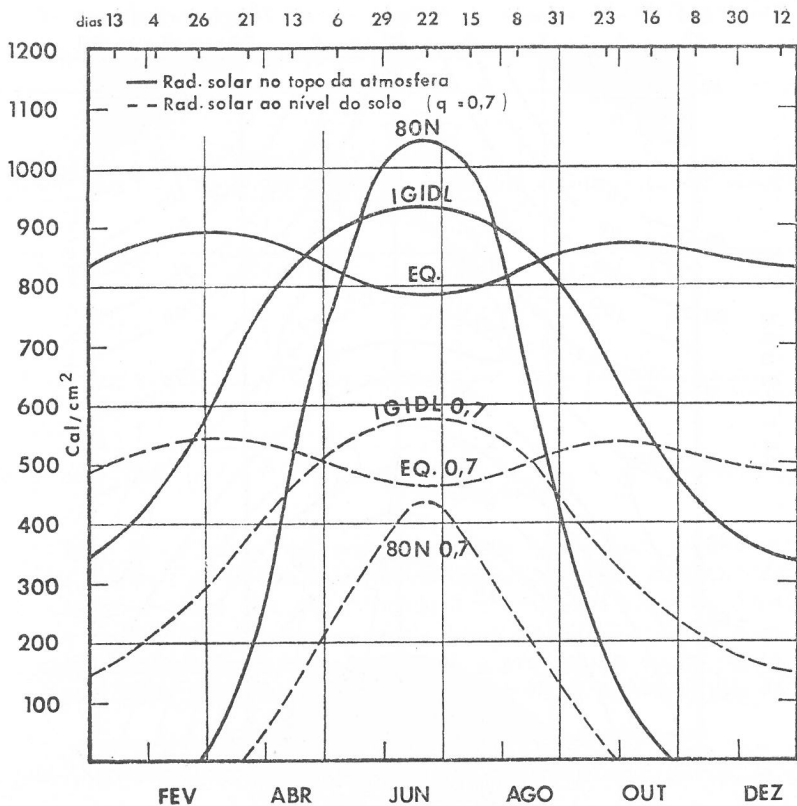


Fig. 15-b — Radiação solar recebida na superfície do Globo e variações ao longo do ano para várias latitudes típicas

de área normal ao feixe solar incidente, que foi o que nós acabamos de obter. O valor que pretendemos, obtém-se multiplicando aquele valor pelo cosseno do ângulo zenital do Sol, como é óbvio. Mas, devemos também tomar em consideração a variação da distância da Terra ao Sol, introduzindo a correcção da excentri-

cidade da órbita da Terra. Por isso, a irradiância,  $E$ , recebida por unidade de área colocada horizontalmente sobre a superfície do Globo, atendendo à Lei de Lambert, é dada por:

$$E = E_0 \left( \frac{R_0}{R} \right)^2 q \cos z$$

O ângulo zenital do Sol,  $z$ , pode determinar-se, desde que se conheçam a latitude do local,  $\varphi$ , a declinação,  $\delta$ , e o ângulo horário,  $t$ , do Sol, recorrendo à fórmula da trigonometria esférica:

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t$$

Como referimos no início deste parágrafo, a transmissividade total deve incluir o efeito das poeiras, que é muito variável de dia para dia. Em condições médias, Houghton (1954) propôs para a transmissividade devida às poeiras a expressão  $q_a = (0,95)^m$ . Logo, a transmissividade total para uma atmosfera húmida, sem nuvens, mas com poeiras, deve também incluir este factor.

Antes de considerar os efeitos devidos à presença das nuvens, parece conveniente recorrer a um exemplo para aclarar a discussão geral exposta e penetrar na metodologia da estimativa da radiação solar directa, difusa e global na superfície do Globo por meio de cálculos relativamente simples.

#### EXEMPLO

Suponhamos que pretendemos determinar a radiação solar global (directa e difusa) recebida no Instituto Geofísico do Infante D. Luís ( $\varphi = 38^\circ 42' 59''$ ) às 15 horas do dia 17 de Agosto de 1977, sabendo que o céu está limpo. Da radiossondagem efectuada a

essa hora sabe-se que a atmosfera contém 2,7 cm [(g/cm<sup>2</sup>)] de água precipitável.

Vejamos como se procede.

Consultando as tábuas astronómicas verificamos que nesse dia a declinação do Sol é  $\delta = 13^\circ 41'$  e que a razão entre as distâncias real e média da Terra ao Sol,  $R/R_0 = 1,0124$ . Às 15 horas locais (T. S. V.) o ângulo horário (tempo avaliado em graus a partir da culminação do Sol) é  $3 \times 15^\circ = 45^\circ$ . Calculemos o ângulo zenital,  $z$ , do Sol nesse instante porque é necessário para cálculos futuros. Podemos calcular  $\cos z$  aplicando a expressão anterior da trigonometria esférica, visto que conhecemos todos os outros elementos. E vem:

$$\begin{aligned}\cos z &= \sin 38^\circ 43' \cdot \sin 13^\circ 41' + \\ &+ \cos 38^\circ 43' \cdot \cos 13^\circ 41' \cdot \cos 45^\circ = 0,6840\end{aligned}$$

Agora podemos calcular a massa seccional,  $m$ , visto que:

$$m = \sec z = 1/\cos z = 1,462$$

Conhecido o valor de  $m$ , vamos determinar as transmissividades recorrendo às curvas dos diagramas da Fig. 14. Vê-se que para este valor de  $m$  a transmissividade do ar seco, associada à difusão, é  $q_d = 0,860$ ; a transmissividade resultante do vapor de água determina-se a partir da curva III entrando em abcissas com o produto  $W \times m = 2,7 \times 1,46 = 3,98$ . O valor que se obtém é  $q = 0,905$ . Por fim, a transmissividade devida à absorção do vapor de água, para  $W \times m = 3,98$ , é  $q_a = 0,846$ .

Podemos agora determinar a transmissividade total ao longo do percurso óptico da radiação solar, visto que  $q = \bar{q}_d \times q_w \times$

$\times q_a \times q_p$ . Como a transmissividade devida às poeiras é dada pela expressão  $(0,95)^{1,46}$ , vem para a transmissividade total,  $q$ :

$$q = 0,860 \times 0,905 \times 0,846 \times (0,95)^{1,46} = 0,610$$

Conhecida a transmissividade total estamos em posição de calcular imediatamente a quantidade de radiação solar directa que atinge o Instituto Geofísico.

Empregando a expressão  $E = E_0 \left( \frac{R_0}{R} \right)^2$  determina-se o fluxo da radiação solar directa por unidade de área,  $Q$ , na superfície do Globo, naquele instante. O resultado será dado por:

$$Q = \frac{1,94}{(1,0124)^2} \times 0,610 \times 0,6840 = 0,790 \text{ ly/min}$$

Vejam agora como se determina a quantidade de radiação difundida. Como a radiação solar é simultaneamente absorvida e difundida pela atmosfera, é difícil separar os dois efeitos. Mas, como já acentuámos, a difusão ocorre predominantemente com as radiações do espectro solar de pequenos comprimentos de onda, enquanto que a absorção se verifica, de forma mais acentuada, com as radiações de maior comprimento de onda. Por isso, parece razoável que se aplique em primeiro lugar a transmissividade devida à absorção do vapor de água à radiação incidente, e depois atribuir à difusão o valor que resulta do balanço para a depleção total.

A quantidade de radiação absorvida,  $Q_a$ , na atmosfera, é fácil de determinar. Aplicando as expressões anteriores vem:

$$Q_a = \frac{1,94}{(1,0124)^2} \times (1-0,846) \times 0,6840 = 0,199 \text{ ly/min}$$

Os valores de  $Q$  e  $Q_a$  estão já referidos a uma superfície horizontal, visto que se multiplicaram pelo vapor de  $\cos z = 0,6840$ .

Por outro lado, a depleção total da energia solar pode ser determinada, imediatamente, visto que se conhece a transmissividade total. A quantidade de energia,  $Q''$ , correspondente à depleção, é dada por:

$$Q'' = \frac{1,94}{(1,0124)^2} \times (1-0,610) \times 0,6840 = 0,504 \text{ ly/min}$$

Uma vez conhecidos os valores de  $Q''$  e de  $Q_a$ , pode determinar-se a quantidade de energia total difundida,  $Q'''$ , visto que:

$$Q''' = Q'' - Q_a = 0,504 - 0,199 = 0,305 \text{ ly/min}$$

Por outro lado, uma parte da radiação difundida é reenviada para o espaço e outra é remetida para o Globo. Se a difusão fosse do tipo de Rayleigh, a radiação difundida para o espaço e para o Globo dividia-se em duas partes iguais. Mas, a difusão da luz solar pelo vapor de água e pelas poeiras não é isotrópica, predominando a fracção que é reenviada para o Globo. Por isso, em geral, o Globo recebe mais de metade da radiação difundida. No entanto, como é difícil de avaliar o excesso, admitiremos que a radiação difundida e que é reenviada para o Globo é 50 por cento da radiação total difundida. É por isso que aceitamos que no nosso exemplo a quantidade de radiação difusa recebida à superfície é:

$$Q_d = \frac{0,305}{2} = 0,155 \text{ ly/min}$$

A radiação solar global, directa mais difusa, será, por isso:

$$Q = 0,790 + 0,155 = 0,945 \text{ ly/min}$$

A relação entre a radiação difusa recebida e a radiação global é de  $0,155/0,945 \approx 16,4\%$ , valor que está entre os valores de 15 a 20%, que correspondem a um dia típico.

Os valores observados no Instituto Geofísico à mesma hora (15 horas T. S. V.) foram para a radiação difusa 0,200 ly/min e para a radiação global 0,930 ly/min, o que comprova bem a consistência do método teórico seguido no exemplo.

### MÉTODO EMPÍRICO PARA A DETERMINAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR NA SUPERFÍCIE DO GLOBO

Em virtude da influência que a nebulosidade exerce na radiação solar, e por aquele elemento ser obrigatoriamente observado nas estações meteorológicas de todo o mundo, tem-se procurado, desde há muito, estabelecer uma expressão que relacione a quantidade de radiação solar global,  $Q$ , com a nebulosidade,  $N$ , e com a radiação máxima possível em dias de céu limpo,  $Q_0$ .

Assim, Angstrom, Kimball, Houghton e Fritz propuseram equações do tipo  $\frac{Q}{Q_0} = f(N)$  em que  $f(N)$  é uma função de distribuição da nebulosidade. O valor de  $Q_0$  pode determinar-se por via teórica, ou usando tábuas, ou ainda, empiricamente, através de um diagrama da variação anual da radiação global para dias de céu limpo.

A forma de função  $f(N)$  que se considera mais frequentemente é a linear, isto é, faz-se:

$$\frac{Q}{Q_0} = a N + b$$

Muitas vezes, e para obter uma melhor aproximação, usa-se uma lei quadrática da forma:

$$\frac{Q}{Q_0} = a'' + b' N + c' N^2$$

Em vez da nebulosidade, Fritz prefere utilizar como preditando a insolação, I, propondo equações do tipo:

$$Q/Q_0 = a'' I + b''$$

Verificou-se que as constantes que figuram nas várias equações lineares são complementares ( $a + b = 1$ ). Por isso, passam a depender dum único parâmetro, k, e assumem a forma:

$$Q/Q_0 = k + (1-k) I$$

Como já referimos, a razão entre a radiação solar difusa, D, e a radiação solar global, Q, está, em geral, compreendida entre 15 e 20%. Daí ensaiarem-se equações, que se verificou serem muito úteis, da forma:

$$D/Q = a''' I + b'''$$

Os valores dos parâmetros que figuram nas várias equações devem ser calculados para cada estação actinométrica por serem representativos da região. No QUADRO VI dão-se os valores das várias constantes para o Instituto Geofísico D. Luís. O valor de  $Q_0$ , para o Instituto Geofísico D. Luís, corresponde a um dia de céu limpo, pode ser dado, com suficiente aproximação, pela seguinte



QUADRO VI

*Coefficientes da recta  $Q/Q_0 = a' I + b''$  para a determinação de valores totais diários da radiação global*

	Jan.	Fev.	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Set.	Out.	Nov.	Dez.
a''	0,631	0,630	0,679	0,673	0,649	0,677	0,670	0,685	0,627	0,603	0,582	0,610
b''	0,339	0,325	0,271	0,281	0,318	0,339	0,308	0,281	0,335	0,336	0,380	0,347

*Coefficientes da recta  $D/Q_0 = a''' I + b'''$  para a determinação dos valores totais diários da radiação difusa*

	Jan.	Fev.	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Set.	Out.	Nov.	Dez.
a'''	-0,743	-0,804	-0,772	-0,773	-0,750	-0,833	-0,737	-0,792	-0,780	-0,707	-0,631	-0,848
b'''	0,911	0,942	0,902	0,901	0,876	0,923	0,888	0,893	0,883	0,857	0,816	0,923

expressão, obtida a partir dos resultados das observações e recorrendo a um desenvolvimento de Fourier:

$$Q_0 = 561,9682 + 283,4830 \left[ \text{sen} \left( \frac{2d}{365} - 0,4466 \right) \pi \right] \text{ (ly/dia)}$$

em que  $d$  é o número de ordem do dia do ano contado a partir de 1 de Janeiro.

### DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE SOLAR

Por ser muito instrutivo, vamos ver como a aplicação da Lei de Beer permite determinar o espectro da radiação solar no topo da atmosfera, a partir dos valores observados na superfície do Globo, conhecidos os espectros de absorção dos componentes absorventes da atmosfera, representados na Fig. 7. Trata-se dum problema inverso daquele que tratámos no parágrafo anterior. De passagem, notemos que esta determinação foi efectuada muitos anos antes de se dispor de observações da radiação solar sem sofrer qualquer atenuação, como agora é possível obter com os foguetes e os satélites.

A Lei de Beer pode escrever-se, como se viu, na forma:

$$\text{Log } E_\lambda = \text{Log } E_{\lambda \infty} - \sec z \int_h^\infty k_\lambda \rho \, dh$$

em que  $k_\lambda$  é o coeficiente geral de atenuação.

No decurso de um dia a distância zenital do Sol vai variando desde o nascer até ao pôr-do-Sol. Além disso, podem obter-se também valores de  $E_\lambda$  observados, nos vários instantes, à superfície. Por outro lado, a estrutura da atmosfera mantém-se pratica-

mente constante no decurso de um dia e, por isso, as variações dos valores observados são, em larga medida, devidas à variação do ângulo zenital do Sol. Nestas condições a equação anterior pode, de facto, reduzir-se à forma linear:

$$\text{Log } E_{\lambda} = A - B \sec z$$

em que as constantes A e B são, respectivamente, :  $A = \text{Log } E_{\lambda \infty}$

$$\text{e } B = \int_h^{\infty} k_{\lambda} \rho \, dh$$

Ora, esta equação pode resolver-se para cada radiação monocromática de c. d. o.  $\lambda$ , visto que A e B são, nestas condições, bem determinadas. No entanto, vê-se que aquela equação constitui a representação paramétrica duma recta num referencial semi-logaritmico ( $\text{Log } E_{\lambda}$ ,  $\sec z$ ). Logo, os valores de  $E_{\lambda}$  da radiação de c. d. o.  $\lambda$  para os vários ângulos zenitais, z, do Sol dispõem-se sobre uma recta (Fig. 16-a), cujo coeficiente angular, B, é a massa óptica normal, que se conhece. Como a massa seccional é proporcional a  $\sec z$ , o valor da irradiância monocromática no topo da atmosfera, obtém-se prolongando a recta, que se obteve com os vários valores de  $E_{\lambda}$  para os vários ângulos zenitais do Sol, até ao eixo de  $\text{Log } E$  e na intersecção obtém-se o valor  $E_{\lambda}^{\circ}$ .

Consideremos agora outras componentes espectrais de comprimentos de onda  $\lambda_i$  ( $i = 1 \dots$ ), cujos valores observados à superfície serão  $E_{\lambda_i}$ . Com cada uma das componentes obtém-se por extrapolação o valor correspondente no topo da atmosfera,  $E_{\lambda_i}^{\circ}$ .

Na Instituição Smithsonian utilizou-se este método para determinar a constante solar. Vejamos como. Fizeram-se determinações dos valores de  $E_{\lambda_i}$  na superfície do Globo para 44 radiações monocromáticas componentes da radiação solar, com comprimentos de onda entre  $0,35 \mu\text{m}$  e  $2,5 \mu\text{m}$ , para diferentes ângulos zenitais do Sol (Fig. 16-b). Com os valores de  $E_{\lambda_i}$ , construiu-se para cada

radiação a recta que corresponde às diferentes posições  $S_i$  do Sol. Obtêm-se assim 44 gráficos, a partir dos quais se obtêm, por extrapolação, os valores correspondentes de  $E_{\lambda_i}$  no topo da atmosfera. Com os 44 valores de  $E_{\lambda_i}^0$  ( $i = 1, 2, \dots, 44$ ) construiu-se o respectivo espectro, tomando para abcissas os valores de  $\lambda_i$ . A curva que se obtém, análoga à curva a traço-ponto da Fig. 2, não é regular e as irregularidades podem identificar-se com as bandas

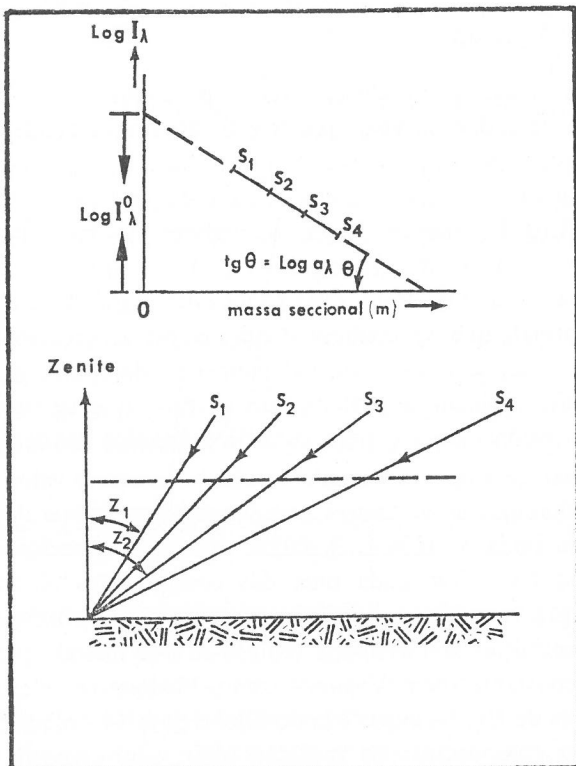


Fig. 16 — Determinação da constante solar. O símbolo  $I_{\lambda}$  da figura é o símbolo  $E_{\lambda}$  do texto

de absorção dos absorventes selectivos da atmosfera (ozono, oxigénio, vapor de água, anidrido carbónico, etc.).

Noutras regiões do espectro não se podem identificar as irregularidades como simples bandas de absorção destes absorventes, mas cuja existência se explica, como mostraremos adiante. Por isso, toma-se para curva espectral final da radiação solar a curva regular envolvente. Verifica-se que numa grande extensão do espectro esta curva se ajusta à curva espectral de 6 000°K do corpo negro. Todavia, na região do infravermelho afastado, ajusta-se melhor à curva de 7 000°K e na outra região extrema ( $\lambda < 0,22 \mu\text{m}$ ) ajusta-se bem à curva de 5 000°K ou de 4 000°K. Para completar a curva espectral, foi sugerido que para as correcções dos extremos, na região do ultravioleta, entre  $0,29 \mu\text{m}$  e  $0,40 \mu\text{m}$ , se utilizassem as informações obtidas através dos foguetões V2 e dos satélites e na região de  $0,22$  a  $0,29 \mu\text{m}$ , a absorção referente às riscas de Fraunhofer, se possível; e que na região do infravermelho se utilizasse a curva espectral de 5 750°K do corpo negro. As correcções são respectivamente  $0,077 \text{ ly/min}$  e  $0,071 \text{ cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ .

O valor da constante solar determina-se medindo a área limitada pela curva espectral resultante. Este valor não inclui ainda a radiação solar absorvida pelo ozono e pelo oxigénio na região do espectro em que  $\lambda < 0,29 \mu\text{m}$ , que se sabe ser considerável, e da ordem de  $0,02$  da radiação total e que, por isso, se deve incluir no valor final da constante solar ( $1,94 \text{ ly/min}$ ).

## BALANÇO DA RADIAÇÃO SOLAR

### DISTRIBUIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR NA ATMOSFERA E NO GLOBO

A distribuição da radiação solar na atmosfera e na superfície do Globo pode determinar-se desde que se conheça a transmissivi-

dade total da atmosfera. Antes de abordarmos o problema geral vamos apresentar o balanço médio da radiação solar para o sistema atmosfera-Globo e para cada um dos subsistemas, em separado.

Vimos anteriormente que a intensidade média da radiação solar que incide na orla exterior da atmosfera é 0,485 ly/min. Como o valor do albedo global da Terra, incluindo o Globo e a atmosfera é 0,34, isto significa que 34 por cento da radiação solar total incidente são reenviadas para o espaço e só os restantes 66 por cento são absorvidos pela Terra. A intensidade média da radiação solar que penetra na atmosfera e é absorvida pela Terra é, portanto:

$$0,66 \times 0,485 = 0,330 \text{ ly/min}$$

A transmissividade média da atmosfera para o conjunto das radiações da luz solar tem valores entre 0,62 e 0,82, com um valor médio de 0,71. Logo, em média, só 71 por cento da quantidade de radiação solar que é absorvida pela Terra (Globo + + atmosfera) é que atinge a superfície do Globo. Desta forma, a intensidade média da radiação solar que é absorvida pelo Globo será:

$$0,71 \times 0,330 = 0,234 \text{ ly/min}$$

Portanto, dos 0,330 ly/min que participam na energética global da Terra, só 0,234 ly/min chegam à superfície do Globo. A diferença é absorvida pela atmosfera, o que dá o seguinte valor:

$$0,330 - 0,234 = 0,096 \text{ ly/min}$$

Estes valores mostram que da energia que, em média, penetra no sistema Globo-atmosfera, 18 a 19 por cento são absorvidos pela atmosfera, enquanto que 48 ou 47 por cento são absorvidos pelo

Globo e utilizados na biosfera, na manutenção e estabelecimento das circulações gerais planetárias dos oceanos e da atmosfera, no ciclo hidrológico, etc.

A «parte de leão» dos vários processos energéticos que ocorrem na superfície do Globo, todos derivados deste mesmo manancial, é tomada pelo ciclo hidrológico. De facto, se notarmos que a evaporação média é cerca de 100 cm por ano, a quantidade de energia necessária para evaporar esta quantidade enorme de água, tendo em conta que o calor latente de vaporização é 584,9 cal/g (a 20° C), será:

$$\frac{584,9 \times 100 \text{ ly/ano}}{525\,960 \text{ min/ano}} = 0,112 \text{ ly/min}$$

ou sejam, 23 unidades convencionais, expressas no valor da energia inicial média incidente no topo da atmosfera (0,485 ly/min). Por outro lado, aquele valor mostra que cerca de metade da energia que atinge o Globo é utilizada em evaporar a água necessária para o ciclo hidrológico.

\*  
\*      \*

A distribuição da radiação solar na superfície do Globo pode calcular-se, conhecida a transmissividade total da atmosfera,  $q$ . A distribuição que assim se obtém (Fig. 15) difere radicalmente da distribuição teórica de Milankovitch no topo da atmosfera, referida anteriormente (Fig. 6).

Em face da importância que a transmissividade desempenha no cálculo da radiação solar e na sua disposição no sistema, parece vantajoso que nos detenhamos no seu estudo e alarguemos as considerações atrás feitas. A transmissividade total,  $q$ , da atmosfera proveniente, quer da absorção ( $a$ ), quer da difu-

são (d), obtém-se conhecendo as transmissividades parciais correspondentes, pela expressão:

$$q = (q_d^{\text{ar}} \times q_d^{\text{poeiras}} \times q_d^{\text{OH}_2}) \times (q_a^{\text{O}_3} \times q_a^{\text{CO}_2} \times q_a^{\text{OH}_2})$$

notando que combinando a absorção e a difusão se pode definir um coeficiente de atenuação  $k$ , tal que  $k = k_a + k_d$ .

Os valores das transmissividades parciais devidas à difusão,  $q_d$ , e à absorção,  $q_a$ , podem calcular-se, em cada caso, conhecidos os elementos fornecidos pela radiossondagem (pressão, temperatura e humidade), a concentração do ozono (que se mede diariamente) e a concentração do anidrido carbónico que tem, como se sabe, uma razão de mistura quase constante, a concentração das poeiras e a nebulosidade.

O cálculo da radiação solar, em dias de céu limpo, descontando a incerteza proveniente da existência de poeiras, pode efectuar-se, para qualquer ângulo zenital, desde que se conheçam a quantidade de água precipitável e os valores da quantidade de ozono, como mostrámos em exemplo anterior. No caso de interessar apenas a quantidade da radiação solar na superfície do Globo, os valores da radiação, para  $\lambda < 0,29 \mu\text{m}$ , não interessam e não é preciso tomar em conta a absorção pelo ozono (que predomina a estratosfera a altitudes da ordem de 25 km).

O recurso a coeficientes empíricos de turvação que foram importantes e desempenham o seu papel (Angstrom e Linke) para calcular os efeitos do vapor de água e das poeiras, está ultrapassado. Em cada caso, deve proceder-se ao cálculo da água precipitável, o que é fácil a partir dos elementos obtidos com a radiossondagem.

Fundamentalmente, o cálculo da radiação solar, em cada caso, faz-se aplicando a lei generalizada de Beer, o que é extremamente fácil, desde que se conheça a transmissividade total. Usando os



símbolos adoptados anteriormente tem-se, com grande aproximação:

$$q(m) = q_a \left( m \frac{P}{P_0} \right) \times q_w (W \times m) \times q_w' (W \times m) \times (q_d)^m$$

e os resultados são bastante satisfatórios. Cada um dos quatro coeficientes de transmissividade da expressão anterior representa a depleção do feixe solar como se as outras causas não existissem. Logo, para o caso de ar seco, sem poeiras, a depleção por difusão é  $1 - q_a(m)$ . É evidente que, quando há várias causas independentes de depleção, cada perda sucessiva é inferior à que seria se as outras não existissem, visto que depois de cada perda fica menos energia disponível.

No cálculo efectivo da radiação solar deveria entrar-se com a absorção e a difusão simultaneamente, o que não é possível. Como a humidade específica diminui muito rapidamente com a altitude, admite-se que se dá em primeiro lugar a difusão pelo ar seco, seguida pela absorção e difusão pelo vapor de água. De facto, a radiação difundida fica sujeita à mesma absorção que a radiação directa não difundida. Além disso, a absorção dá-se na região dos maiores comprimentos de onda do espectro, enquanto que a difusão ocorre no domínio dos pequenos comprimentos de onda. Por isso, parece mais coerente aceitar que a absorção do vapor de água ocorre primeiro, seguindo-se depois a difusão. Deve, no entanto, acentuar-se que esta repartição é hipotética e só se justifica pelo conhecimento que se tem das características dos fenómenos de absorção e de difusão da atmosfera.

A inspecção da Fig. 6 mostra que a intensidade da radiação solar é quase constante no equador, ao longo do ano, variando entre 895 ly/dia e 790 ly/dia. Nos pólos sofre uma grande variação que vai de zero, no Inverno, até 1 100 ly/dia nos solstícios

de Verão. O Hemisfério Sul recebe em média mais energia que o Hemisfério Norte, porque a Terra está no periélio no Verão do Hemisfério Sul.

Vejamos agora o que se passa, devido à existência da atmosfera, aceitando que a transmissividade é constante com um valor 0,71. Os valores da intensidade da radiação solar na superfície do Globo são inferiores aos da Fig. 6 e a configuração é profundamente alterada como mostra a Fig. 15, devido principalmente ao efeito de  $\sec z$ , que varia com a latitude, com a declinação e com o ângulo horário do Sol. Por exemplo, no equador dos 790 ly/dia que incidem no topo da atmosfera, só 462 ly/dia atingem a superfície do Globo. Nas regiões polares, o máximo à superfície do Globo da Fig. 6 desaparece na Fig. 15 aparecendo nesta um máximo da ordem de 600 ly/dia na região de 35° latitude.

\*  
\*   \*  
\*

Houghton (1954) apresentou num trabalho, hoje considerado clássico, uma discussão muito cuidada e minuciosa do balanço energético da atmosfera, do Globo e da Terra, cujos resultados para as diferentes latitudes do Hemisfério Norte constam do QUADRO VII.

Analisemos os valores deste Quadro pela importância que assumem.

A radiação solar com céu limpo foi calculada a partir da determinação das transmissividades em função da massa seccional de ar seco, da água precipitável, da quantidade de ozono, como fizemos no exemplo da pág. 101. A radiação solar na superfície, com uma nebulosidade média, obteve-se a partir daqueles valores, usando a equação de Houghton. A radiação solar absorvida, obteve-se multiplicando a radiação solar que atinge o Globo, com

QUADRO VII

*Disposição média anual da radiação solar no Hemisfério Norte em ly/dia (Houghton, 1954)*

Lat. (°N) (1)	Radiação solar na superfície do Globo (céu limpo) (2)	Nebulosi- dade média (3)	Radiação solar à superfície (com nuvens) (4)	Albedo do Globo (5)	Radiação solar absorvida na superfície (6)	Absorvida pela atmosfera (com nuvens) (7)	Absorção total (8)	Albedo planetário (9)
0	570	0,54	410	0,071	381	192	573	0,326
10	664	0,50	429	0,080	395	183	578	0,310
20	548	0,44	452	0,098	408	166	574	0,283
30	518	0,42	438	0,110	390	142	532	0,284
40	466	0,49	359	0,102	322	122	444	0,335
50	402	0,57	277	0,090	252	100	352	0,389
60	325	0,63	204	0,091	185	76	261	0,443
70	276	0,67	161	0,168	134	58	192	0,527
80	245	0,65	148	0,360	95	52	147	0,602
90	224	0,59	150	0,560	66	51	117	0,669
0-90°N	475	0,52	361	0,100	325	136	461	0,34

nebulosidade normal, pelo complemento aritmético do albedo. O albedo planetário calculou-se dividindo a radiação reenviada para o espaço (radiação total incidente menos a radiação absorvida) pela radiação incidente no topo da atmosfera.

Um dos resultados mais interessantes é o que dá a distribuição latitudinal do albedo planetário. Apresenta um mínimo de 0,28 nas regiões dos grandes anticiclones sub-tropicais, o que reflecte a existência duma nebulosidade muito pequena, e um máximo de 0,67 nas regiões polares, devido à existência de gelo e neve permanentes.

Se se aceitar que a nebulosidade média é da ordem de 0,50, como o valor do albedo das nuvens é da ordem de 0,55, verifica-se que 0,25 da radiação solar total é reenviada pelas nuvens para o espaço. Por outro lado, calcula-se que 0,19 da energia solar é absorvida pela atmosfera, com nebulosidade média normal. Por isso, pode aceitar-se que a energia solar que chega à superfície do Globo é da ordem de  $1 - (0,34 + 0,19) = 0,47$  da energia solar incidente no topo da atmosfera, valor que já tínhamos obtido anteriormente, por via diferente.

#### BALANÇO DA RADIAÇÃO SOLAR NA ATMOSFERA E NO GLOBO

Vamos procurar reunir as considerações feitas sobre a disposição média da radiação solar na atmosfera e no Globo sob a forma de balanço. No QUADRO VIII apresentamos os valores médios das várias componentes da radiação solar na atmosfera e no Globo nas várias latitudes, para dar uma ideia da distribuição geográfica. A fim de completar essa distribuição, vamos apresentar no QUADRO VIII o balanço da radiação solar, com a discriminação

### QUADRO VIII

*Distribuição dos valores médios anuais da radiação solar na atmosfera e no Globo, para uma nebulosidade média*

	ly/min	(%)	k ly/ano
1. Radiação solar incidente Irradiância média no topo da atmosfera	0,485	100	720
2. Absorção da radiação na atmosfera			
a) ozono	0,014	2,8	20,16
b) vapor de água e poeiras	0,065	13,0	93,6
c) nuvens	0,008	1,6	11,52
<i>absorção total</i>	0,087	17,4	125,28
3. Reflexão e difusão da radiação para o espaço			
a) pela atmosfera	0,034	6,8	48,96
b) pelas nuvens	0,121	24,2	174,24
c) pela superfície do Globo	0,021	04,2	30,24
<i>reflexão total</i>	0,176	35,2	253,44
4. Absorção pela superfície do Globo			
a) radiação solar directa	0,112	22,4	161,28
b) depois da passagem pelas nuvens	0,072	14,4	103,68
c) radiação difusa	0,053	10,6	76,32
<i>absorção total pela superfície do Globo</i>	0,237	47,4	341,28

dos acidentes de propagação. Ao mesmo tempo apresentamos na Fig. 17 os aspectos essenciais do balanço.

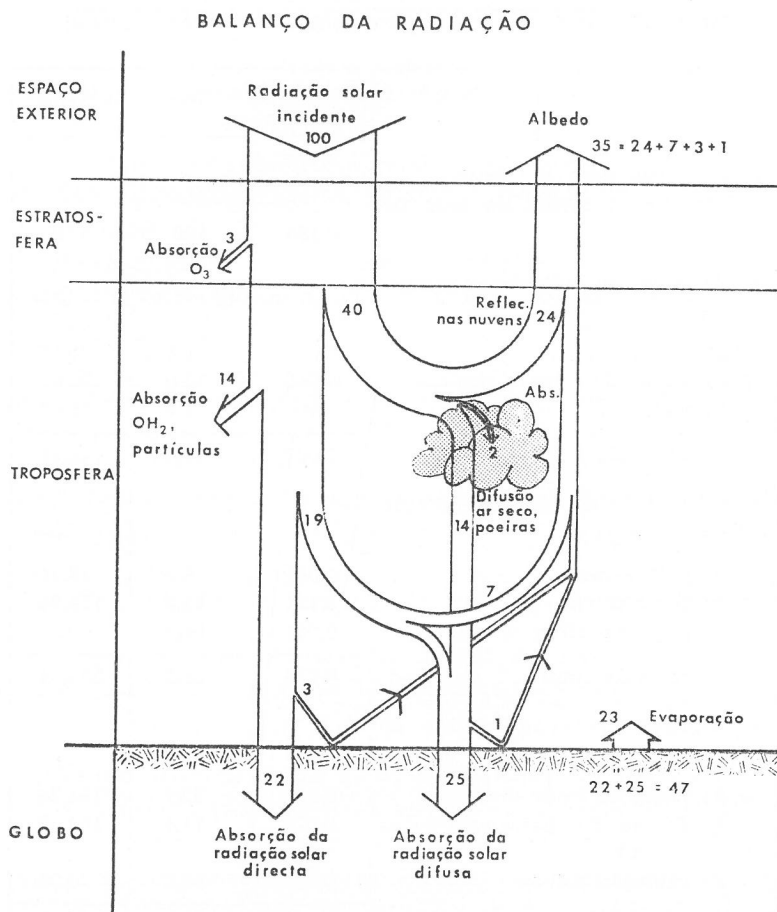


Fig. 17 — Balanço da energia solar no sistema globo-atmosfera e disposição das várias componentes do balanço

Para tornar mais sugestiva a representação gráfica do balanço vamos admitir que a intensidade média da radiação solar que atinge o topo da atmosfera ( $0,485 \text{ cal}/(\text{cm}^2 \text{ min})$ ) corresponde a 100 unidades convencionais (Fig. 17).

- a) Das 100 unidades incidentes no topo da atmosfera, 3 são absorvidas na estratosfera, principalmente pelo ozono (nesta região a difusão não é importante).
- b) Das 97 unidades da radiação solar directa que penetram na troposfera, 14 são absorvidas pela atmosfera, principalmente, pelo vapor de água e pelas poeiras e 2 pelas nuvens; das restantes, 22,5 unidades são absorvidas pelo Globo e 5 unidades são reflectidas directamente pelo Globo para o espaço.
- c) Avalia-se em 17,5 unidades a quantidade da radiação solar que é difundida pela atmosfera, sendo 10,5 unidades enviadas para o Globo e 7 unidades para o espaço.
- d) A radiação solar ao incidir nas nuvens, é fortemente reflectida (com um albedo médio de 0,55); para a nebulosidade média de 0,52 calcula-se em 23 unidades a quantidade de energia que é remetida para o espaço; outra parte da energia solar que penetra nas nuvens é difundida e são transmitidas para o Globo 14 unidades.

Das 35 unidades que são reenviadas para o espaço exterior (albedo), 5 provêm da reflexão do Globo, 7 da difusão do ar e 23 da reflexão das nuvens.

\*  
\*       \*  
\*

A título de exercício, vamos ainda tratar do balanço da radiação nos casos de céu limpo e de céu encoberto de nuvens.

### *Caso de céu limpo*

Das 100 unidades incidentes, 3 são igualmente absorvidas pelo ozono na estratosfera.

Das 97 unidades que penetram na troposfera, 20 são absorvidas e 20 difundidas, das quais 10 são remetidas para o Globo e outras 10 reenviadas para o espaço. Das 57 unidades do feixe solar directo, que incidem na superfície do Globo, 7 são reflectidas para o espaço.

Portanto, para as condições médias de céu limpo, o albedo médio é de 0,17. Da energia inicial incidente 60 por cento são absorvidos pelo Globo e 20 por cento pela atmosfera.

### *Caso de céu encoberto*

Das 100 unidades incidentes 3 são absorvidas na estratosfera pelo ozono, principalmente.

Das restantes 97 unidades 5 são absorvidas pela camada superior da troposfera, acima das nuvens e 5 são difundidas, sendo reenviadas para o espaço exterior.

Das 87 unidades que atingem as nuvens, 48 unidades ( $0,55 \times 87$ ) são reflectidas; admitimos, no entanto, que destas, 2 unidades são ainda absorvidas.

Admitindo uma absorvidade de 0,07 nas nuvens, vê-se que estas absorvem 6 unidades ( $0,07 \times 87$ ). Das 88 unidades incidentes no topo da nuvem são transmitidas 33 unidades [ $87 - (6 + 48)$ ].

Mas, na camada entre a base das nuvens e a superfície do Globo, são absorvidas 6 unidades sendo, portanto, praticamente toda absorvida.

O albedo da Terra seria, neste caso, 0,51.



*Caso de céu parcialmente encoberto*

Para uma dada nebulosidade, a disposição da radiação solar seria a que resultava duma combinação dos casos extremos anteriores. Consideremos o caso da nebulosidade ser 0,54. Então, deve optar-se por valores médios pesados, em que o caso do céu limpo deve ser afectado por um peso 0,46 e o do céu encoberto por 0,54.

Portanto, no caso da nebulosidade ser 0,54, tem-se:

- a) Radiação absorvida na estratosfera: 3 unidades;
- b) Radiação absorvida na troposfera:  
 $0,46 (20) + 0,54 (19) = 20$  unidades;
- c) Radiação absorvida na superfície do Globo:  
 $0,46 (60) + 0,54 (27) = 42$  unidades;
- d) Radiação reflectida para a troposfera:  
 $0,46 (17) + 0,54 (51) = 35$  unidades.

Deve acentuar-se, que os resultados anteriores se referem a valores médios. Por exemplo, as quantidades de radiação absorvida, reflectida e transmitida pelas nuvens dependem da sua estrutura, designadamente, da espessura. A natureza e a concentração das poeiras e dos fumos influenciam igualmente a quantidade da radiação absorvida e difundida. Mas o conhecimento dos dados fundamentais que influenciam a propagação da radiação solar na atmosfera, como a nebulosidade, tipo de nuvens e sua espessura, a distribuição do vapor de água na atmosfera, a natureza e a concentração das impurezas, a quantidade de anidrido carbónico e de ozono, etc., permite estabelecer para cada local o balanço da energia solar no sistema Globo-atmosfera, graças ao progresso da Meteorologia.

\*  
\*   \*  
\*

A radiação total, média anual, recebida na superfície do Globo, varia substancialmente de região para região (Fig. 18). Nas latitudes médias e elevadas a radiação total apresenta uma distribuição regular quase zonal, enquanto que nas regiões tropicais, apresenta desvios consideráveis.

Os valores mais elevados observam-se nas cinturas subtropicais de altas pressões, especialmente nas regiões desérticas devido aos baixos valores da nebulosidade. Os valores elevados da nebulosidade explicam os valores relativamente baixos da radiação total recebida nas regiões de monção e nas regiões equatoriais.

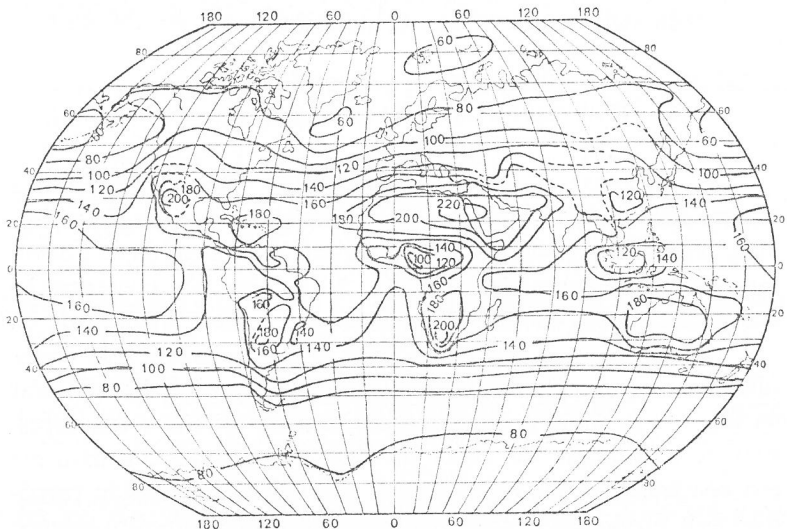


Fig. 18 — Distribuição geográfica da radiação solar total média no ano recebida na superfície do Globo em kcal/cm<sup>2</sup>.ano

## DISTRIBUIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR EM PORTUGAL CONTINENTAL

### CARTA DA INSOLAÇÃO

Ao tratar da radiação solar não podemos deixar de referir, e de nos determos por algum tempo numa manifestação importante dessa radiação que é o «número de horas de Sol descoberto».

Com efeito, designa-se por *insolação* o número de horas de céu descoberto durante um intervalo de tempo. A insolação constitui um elemento climático de grande relevância. Os seus valores exprimem-se em horas por ano, por exemplo. A insolação não constitui uma medida da quantidade de radiação solar, mas está relacionada com ela, como vimos na pág. 105 deste capítulo.

A observação da insolação é feita utilizando *heliógrafos* e é mais fácil de medir que a radiação solar. O heliógrafo mais usual é o heliógrafo de Campbell. Este é constituído por uma esfera de vidro que concentrando a luz solar queima uma tira de papel quando o Sol se encontra descoberto.

A insolação é importante pela influência que tem no comportamento e evolução dos ecossistemas, no desenvolvimento de numerosas actividades humanas, designadamente no urbanismo, na arquitectura, no turismo, na agricultura, na pecuária, etc. É um elemento importante e decisivo para o planeamento de instalações destinadas ao aproveitamento da energia solar. Parece, portanto, apropriado que se apresente a Carta de Insolação de Portugal Continental. A carta da Fig. 19 foi preparada no Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica, com base nos valores médios no ano, obtidos com as observações realizadas em 56 estações no período de 1931-1960.

A inspecção da Carta de Insolação mostra que o valor médio cresce, em geral, de Norte para Sul e de Oeste para Leste e que

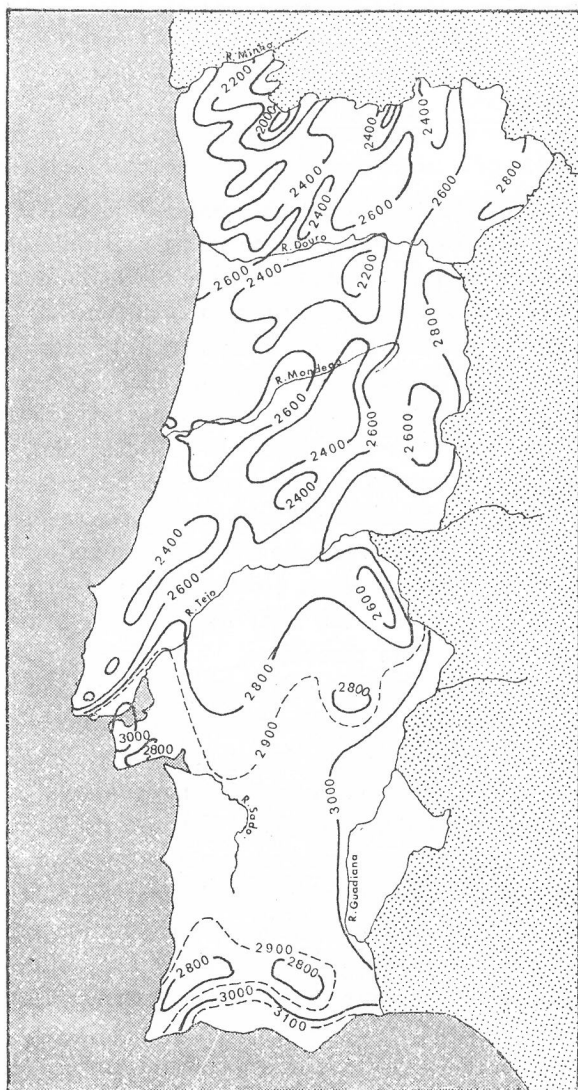


Fig. 19 — Carta com a distribuição da insolação média de Portugal em número de horas de céu descoberto por ano (h/ano)

decrece com a altitude. Os valores mais baixos da insolação ocorrem nas terras altas do Minho, com 1 800 horas por ano, devido principalmente à grande nebulosidade que ali se observa. Os valores maiores verificam-se na região de Lisboa (Estoril), na península de Setúbal, na raia Alentejana e no litoral do Algarve, onde os valores excedem 3 000 horas por ano.

A insolação em Portugal é muito superior ao valor médio da Europa e, muito poucas regiões na Europa têm valores tão elevados de insolação, a não ser os que ocorrem em manchas restritas no litoral do Mediterrâneo.

#### DISTRIBUIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR

Analisemos agora a distribuição da radiação solar.

Na Fig. 20 apresenta-se uma carta com a distribuição espacial da radiação solar.

Na carta dão-se os valores médios anuais da quantidade total de radiação global em Portugal, com os valores das isolinhas expressos em kilolangleys (kly) ou  $10^3$  cal/cm<sup>2</sup>. Esta carta foi preparada pelo Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica utilizando os resultados das observações efectuadas nas várias estações da rede da radiação solar.

Os valores mais baixos encontram-se na região Noroeste, designadamente no Alto Minho. Mas há outras regiões em que os valores são inferiores aos das regiões vizinhas, como acontece com a região centro litoral e da serra de Monchique no Algarve. Isto traduz mais o efeito da nebulosidade, que aumenta de Sul para Norte e do interior para a costa, do que o efeito da latitude. Paralelamente, observa-se um aumento dos valores de radiação global do litoral para o interior. Os máximos relativos nas regiões

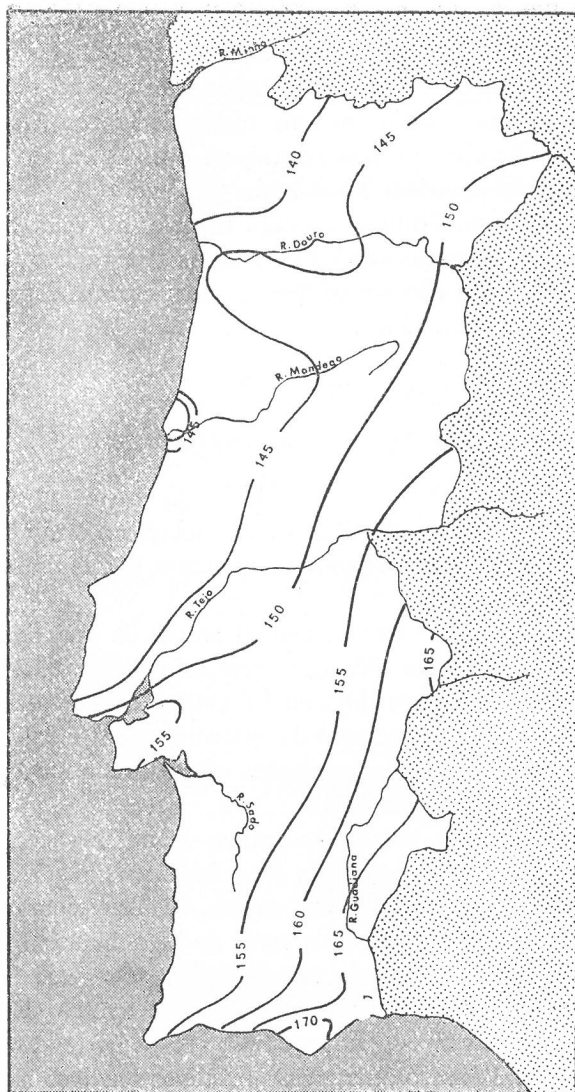


Fig. 20 — Carta com a distribuição média anual da radiação solar global em Portugal (kly)

da Figueira da Foz e de Lisboa são devidos à diminuição da nebulosidade nestas regiões.

A partir da carta da radiação podem calcular-se os valores médios da quantidade de radiação global numa região qualquer, usando, por exemplo, o método planimétrico. Assim, a radiação global em Portugal Continental é em média 151 158 ly/ano ou de 413,8 ly/dia. Na região a norte do Douro é 139,8 kly/ano, na região entre Douro e Tejo é 146,2 kly/ano e na região a sul do Tejo é 157,8 kly/ano.

No QUADRO IX dá-se a distribuição no ano da quantidade de radiação solar global que atinge as várias regiões do País. A última coluna dá os valores médios intermensais no ano. Para obter os valores totais médios anuais em kly/ano, basta multiplicá-los por 12.

Os valores variam consideravelmente no decurso do ano. Os valores máximos observam-se no mês de Julho, sendo de 21,70 kly/mês para todo o território e 21,37, 21,18 e 22,34 kly/mês para cada uma das regiões citadas, respectivamente. Os valores mínimos ocorrem em Dezembro: 4,66 kly/mês para Portugal Continental e 3,34; 4,58 e 5,38 kly/mês para as regiões a norte do Douro, entre Douro e Tejo e a sul do Tejo, respectivamente.

Como se depreende da análise feita, o conhecimento destes valores é essencial para o planeamento enegético duma região, ou mesmo do País.

\*

\*      \*

Vejam agora como se reparte esta energia pelos vários processos que ocorrem à superfície em Portugal. Ora, o valor médio global do albedo em Portugal é de 0,18. Este valor, determinado a partir dos valores do albedo das várias coberturas vegetais e

## QUADRO IX

*Distribuição regional dos valores médios no ano da radiação global em Portugal (kly/mês)*

Região	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Média no ano
A Norte do Rio Douro	3,96	6,11	9,85	14,14	17,73	18,77	21,37	18,25	12,79	8,48	5,09	3,34	11,65
Entre Douro e Tejo	5,16	6,96	10,53	14,80	18,16	17,97	21,18	18,37	13,10	9,47	5,96	4,58	12,19
A Sul do Tejo	5,92	7,65	11,15	15,70	18,91	20,28	22,34	19,36	14,18	10,32	6,63	5,38	13,15
Total Portugal	5,23	7,07	10,65	15,04	18,38	19,09	21,70	18,76	13,48	9,62	6,06	4,66	12,48



das respectivas áreas, da natureza do solo e do seu revestimento, tem sido confirmado por algumas determinações experimentais. Por isso, a fracção

$$151\ 158 \times 0,18 = 27\ 208 \text{ ly/ano}$$

é reflectida pelo solo e não participa nos processos energéticos que ocorrem à superfície.

Vejam agora qual é a fracção da energia incidente que é dispendida na evaporação e na evapotranspiração. Como a evaporação real média,  $E$ , em Portugal, é cerca de 511 mm/ano, a energia necessária para produzir esta evaporação é 30 660 ly/ano, ou seja, 22 por cento da energia que atinge a superfície de Portugal Continental.

Há ainda uma outra fracção de energia,  $Q_1$ , que é transferida da superfície para a atmosfera sob a forma de calor sensível (entalpia). Esta pode calcular-se desde que se disponha duma estimativa da razão de Bowen,  $B$ , visto que:

$$B = Q_1 / LE$$

em que  $L$  designa o calor latente de evaporação  $E$ .

Várias determinações da razão de Bowen,  $B$ , permitem tomar para Portugal Continental um valor médio de 0,12. Sendo assim, vê-se que a entalpia transferida para a atmosfera,  $Q_1$ , é dada por:

$$Q_1 = 30\ 660 \times 0,12 = 3\ 680 \text{ ly/ano}$$

O balanço final da radiação solar em Portugal Continental,  $Q$ , é, portanto, tal que:

$$151\ 158 = 27\ 208 + 30\ 660 + 3\ 680 + Q,$$

ou seja:

$$Q = 89\ 610 \text{ ly/ano}$$

É esta energia que fica disponível para participar nos processos da biosfera, na fotossíntese, nos fenómenos convectivos e turbulentos que ocorrem na camada limite da atmosfera, etc. A quantidade de energia disponível, depois da que é consumida nos processos naturais anteriores, é enorme, quando comparada com o consumo de energia no nosso País.

A Fig. 21 apresenta uma síntese da energética global média diária em Portugal Continental e a sua repartição pelos vários fenómenos naturais que ocorrem à superfície do Globo e na atmosfera.

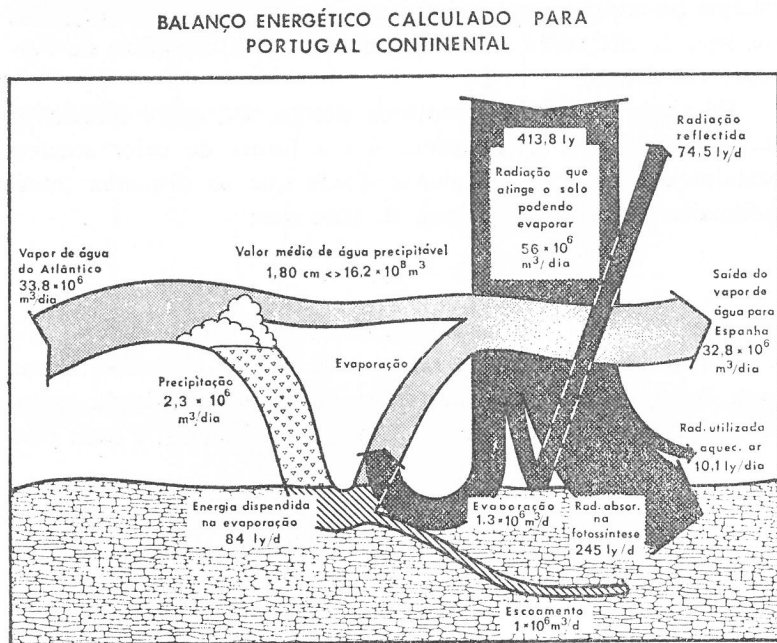


Fig. 21 — A energética global média diária em Portugal Continental para os vários processos dos fenómenos naturais

EXEMPLO DUM ESTUDO LOCAL:  
A RADIAÇÃO SOLAR EM LISBOA

A título de exemplo de estudos locais, vamos apresentar alguns resultados do estudo da radiação solar e da insolação em Lisboa, no Instituto Geofísico D. Luís, onde se fazem observações meteorológicas com regularidade desde 1857. As observações da radiação solar (observações actinométricas) começaram mais tarde e a estação do Instituto Geofísico tem-se mantido como a estação fundamental da rede actinométrica nacional. Em Portugal Continental fazem-se registos da insolação em 57 estações, enquanto que as observações da radiação solar directa e global só se fazem no Porto, Coimbra, Lisboa e Faro, e as de radiação global em Bragança, Penhas Douradas e Évora.

A partir das expressões do Cap. II e dos valores médios da declinação do Sol,  $\delta$ , e da razão ( $R_m/R$ ) para cada um dos meses, determina-se que a radiação solar que seria recebida no topo da atmosfera no Instituto Geofísico D. Luís (Lisboa). Aquela expressão pode tomar uma forma mais adequada ao cálculo e escrever-se

$$E_{\infty} = \frac{2 E_0}{\omega} \left( \frac{R_m}{R} \right)^2 \sin \varphi \sin \delta (H - \text{tg } H) \quad (\text{ly/min})$$

porque, como se sabe da trigonometria esférica, atendendo ao valor de  $H$  (intervalo entre o meio-dia solar verdadeiro e o pôr-do-Sol, expresso em radianos):

$$\cos H = - \text{tg } \varphi \text{ tg } \delta$$

A inspecção da expressão mostra que o fluxo da radiação solar recebido por unidade de área no topo da atmosfera, ou o que é o mesmo, na superfície do Globo se não houvesse atmos-

fera, depende da latitude do lugar,  $\varphi$ , da declinação do Sol,  $\delta$ , e da duração do dia,  $2H$ , portanto, da época do ano.

Os valores médios mensais figuram no QUADRO X. No mesmo quadro apresentam-se ainda os valores médios mensais da radiação global, da radiação directa e da radiação difusa, expressos em ly/dia, observados em Lisboa. No mesmo quadro figuram também os valores médios da insolação em h/dia e os valores da insolação relativa expressa em percentagem do máximo de insolação possível (insolação astronómica, isto é, a duração do dia).

A Fig. 22 dá os valores da radiação em Lisboa para as várias horas do dia, nos diferentes meses do ano, em ly/min.

A análise dos valores do QUADRO X mostra que a radiação global é máxima em Julho e mínima em Dezembro. A radiação

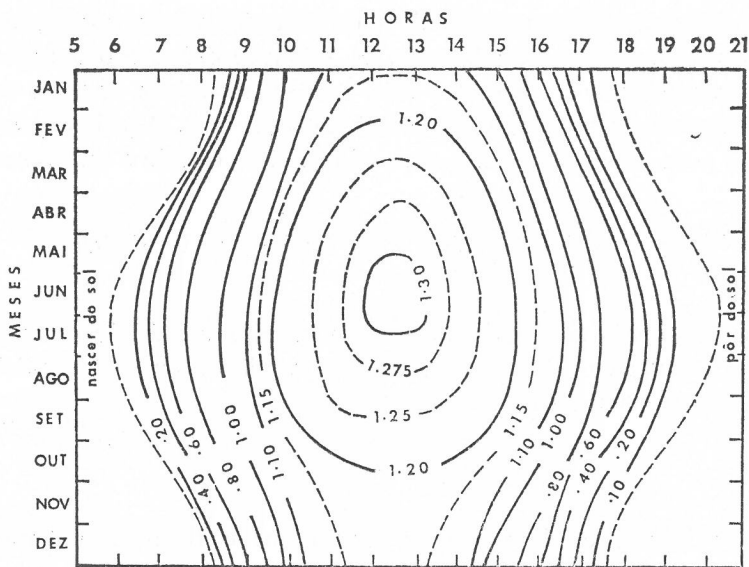


Fig. 22 — Isoplethas da radiação directa (ly/min) em Lisboa

## QUADRO X

*Valores médios no ano da radiação (ly/dia) e da insolação (h/mês) em Lisboa*

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Ano
Radiação topo da atm.	381,5	504,6	671,5	831,2	942,1	986,6	961,7	873,7	732,7	564,3	418,3	346,2	250 289,0
R. Global (37)*	188,1	275,5	373,4	510,3	592,0	653,7	684,7	611,8	466,4	328,9	220,4	176,6	154 863,0
R. Difusa (21)*	83,0	114,2	150,2	172,6	179,7	179,0	144,5	130,9	132,4	110,6	84,4	71,0	46 318,0
Insolação mens. média (63)*	154,4	171,6	206,2	257,6	304,0	327,5	375,2	360,3	272,6	224,6	170,8	156,3	2 981,1
Insolação mens. máx. possível	304,0	301,2	370,2	395,4	442,0	443,7	457,7	422,9	373,7	347,4	303,3	295,5	4 451,0

\* Entre parêntesis estão indicados o número de anos da série.

solar directa segue uma variação no ano semelhante. Já o mesmo se não verifica com a radiação difusa, que em consequência da altura solar, da duração do dia e da nebulosidade, apresenta um máximo nos meses de Maio-Junho e um mínimo em Dezembro-Janeiro. A variação anual é da ordem de 100 ly/dia para a radiação difusa, enquanto que para a global é de 427 ly/dia.

A comparação dos valores médios da radiação solar em Lisboa, na ausência da atmosfera, com os valores da radiação global no topo da atmosfera, com os valores da radiação global (ou directa, ou difusa) mostra bem a influência que a atmosfera tem na propagação da energia solar. Esta influência fica bem patente pelos valores médios da transmissividade da atmosfera em Lisboa, cujos valores mensais se apresentam no QUADRO XI. Como se vê, e era de esperar, a transmissividade varia durante o dia, com valores mais baixos ao meio-dia solar verdadeiro, e no decurso do ano, com os valores menores nos meses de Verão.

Já referimos as limitações que afectam as determinações das transmissividades a partir da razão dos valores observados e os do topo da atmosfera.

Os valores que assim se obtêm são úteis, mas não deixam transparecer a variabilidade associada às flutuações do estado da atmosfera, designadamente no conteúdo de vapor de água, do ozono, do anidrido carbónico, dos poluentes, etc. Além disso, vêm eivados da indeterminação dos erros de medição dos instrumentos de observação, indeterminação essa que depende muito do tipo de instrumento. Por isso, os valores do QUADRO XI devem usar-se com as precauções indispensáveis. As mesmas considerações se poderiam fazer sobre a utilização das razões dos valores médios da radiação solar difusa e da radiação solar global para a obtenção de «coeficientes de difusão», etc.

A Fig. 22, anteriormente referida, mostra que dum modo geral os valores da radiação solar directa são maiores no Verão do

QUADRO XI

*Valores médios do coeficiente de transmissividade em Lisboa, calculados a partir da radiação directa*

Horas T.S.V.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Ano
9 h	0,805	0,783	0,742	0,719	0,690	0,699	0,691	0,700	0,718	0,762	0,785	0,812	0,742
12 h	0,776	0,761	0,729	0,694	0,674	0,682	0,669	0,681	0,699	0,722	0,761	0,782	0,719
15 h	0,804	0,780	0,746	0,716	0,691	0,693	0,699	0,708	0,723	0,756	0,792	0,807	0,743

que no Inverno e com um máximo no mês de Julho ao meio-dia solar verdadeiro e com valores maiores de tarde do que de manhã. É interessante acentuar que as flutuações poderiam ser muito maiores, se não se desse a circunstância dos valores mais elevados da transmissividade no Inverno atenuarem a variação da radiação solar no topo da atmosfera e esbaterem a influência da massa seccional, maior na época de Inverno.

Os valores médios da insolação apresentados no QUADRO X mostram que a insolação tem valores maiores no Verão com um máximo de 375,2 horas em Julho, que corresponde a 84 por cento do máximo possível e o mínimo em Janeiro. Em geral, os valores da insolação são mais elevados de tarde do que de manhã.



## V — EPÍLOGO: O SOL, AGENTE DINÂMICO DA TERRA, DA VIDA E DO AMBIENTE

### A RADIAÇÃO SOLAR E A MODELAÇÃO DA CROSTA TERRESTRE

Em cada ano a energia solar que atinge a atmosfera do nosso planeta é aproximadamente 1,5 quadrilhões ( $1,55 \times 10^{15}$ ) megawatts hora. Como vimos, cerca de 34 por cento desta energia é reflectida para o espaço, 17 por cento é absorvida pela atmosfera e só 47 por cento é recebida pela superfície do Globo.

Mesmo assim, e só para referência, a quantidade de energia que atinge a superfície da Terra é cerca de 13 000 vezes a energia consumida pelo homem em forma comercial, excluindo portanto a da alimentação.

Provavelmente, a quantidade de energia reflectida para o espaço e a quantidade de energia absorvida pelo Globo e pela sua atmosfera não terão sido constantes no decorrer da história geológica. Mas, mesmo que tenham variado, a quantidade total de energia absorvida é enorme. Parte da energia absorvida terá sido utilizada na evapotranspiração, na fotossíntese e noutros processos que ocorrem na Terra. Alguns destes processos levam à formação de produtos que ainda retêm energia. Os combustíveis fósseis

representam energia solar, capturada e armazenada, como se sabe. Mas haverá outros exemplos!

Em vista dos números extremamente grandes envolvidos na descrição da energia foi introduzida uma unidade de energia que é definida pela quantidade de energia que atinge a superfície exterior da atmosfera no decurso dum ano, e que se designa por SERPY (Solar Energy Received Per Year). Um «serpy» é equivalente a 1,5 quadrilhões de megawatts hora. É uma quantidade de energia muito elevada e que corresponde a cerca de 28 000 vezes a energia que agora se consome.

Voltando à energia solar capturada e armazenada, uma das maiores contribuições da energia tem sido o aquecimento da superfície e da camada superficial da crosta da Terra. Para avaliar bem a contribuição enorme da radiação solar para os processos da Terra, vejamos o que aconteceria se a radiação solar não existisse. A temperatura da Terra, sem o aquecimento solar seria da ordem de  $-238^{\circ}\text{C}$ , ou seja,  $253^{\circ}\text{C}$  mais baixa do que aquela que agora se observa. A quantidade de energia de origem solar, armazenada na parte superior da crosta, no decurso da vida do planeta é cerca de 32 000 SERPYs. Se considerássemos os movimentos convectivos envolvidos nos fenómenos de grande cirurgia plástica da Terra, que levaram à formação de montanhas, de baías e dos oceanos, a quantidade de energia seria ainda maior.

Sem este calor, isto é, com a temperatura de  $-238^{\circ}\text{C}$  o azoto condensar-se-ia e a água só podia existir na fase sólida. Não existiria nada que se assemelhasse aos oceanos, mesmo de gelo e os processos de erosão e de sedimentação que têm modelado a crosta terrestre nunca poderiam ter ocorrido.

Supõe-se que a matéria viva resultou da acção da radiação ultravioleta sobre compostos orgânicos, tais como o metano. Logo, sem a radiação solar não se verificava a fotossíntese nem teria

ocorrido a vida. Por outro lado, aceita-se que a fotossíntese foi fundamental na formação e no desenvolvimento do geofluido constituído pela atmosfera e pelos oceanos, tal como hoje existem. Por isso, podemos dizer com verdade, que a energia solar tem tido importância fundamental em toda a história da Terra.

Quando se começa a pensar como é que a energia solar teria sido captada pela Terra, ocorre imediatamente o oxigénio da atmosfera, que é um produto da fotossíntese, que se aceita ter resultado da fotodissociação do vapor de água em oxigénio e hidrogénio. O oxigénio da atmosfera representa um armazenamento enorme de energia química, que em larga medida, é responsável pela meteorização e decomposição de materiais orgânicos e inorgânicos à superfície do Globo. O oxigénio existente corresponderia a um armazenamento de 3 SERPY ( $4,4 \times 10^{15}$  Mwh). O oxigénio da atmosfera é substituído em média cada 3 000 anos (vida média do oxigénio da atmosfera) e há sempre uma fracção que é «fossilizada». A maior parte do oxigénio fossilizado teria sido empregado na oxidação e na formação de novos minerais (sulfatos, carbonatos, sílica, etc.). Em geral, estas reacções são exotérmicas, o que corresponde a uma dissipação de energia.

\*  
\*   \*   \*

A energia cinética da atmosfera, associada à sua circulação geral é cerca de 1/60 de 1 SERPY ( $2,6 \times 10^{13}$  Mwh) por ano; constitui uma forma de energia armazenada, mas que é muito pequena em comparação com a energia solar recebida. Ainda que os oceanos e a atmosfera recebam alguma energia sob a forma de calor do interior do Globo, o grosso da energia provém do Sol e representa um grande armazenamento de energia, à volta de 146 SERPY ( $2,2 \times 10^{17}$  Mwh).

Além desta energia interna, os oceanos contêm mais a energia das circulações (correntes) que resultam da acção da força de Coriolis e dos ventos sobre os oceanos, e ainda a que resulta das forças gravitacionais de maré.

Os oceanos contêm ainda energia associada à salinidade. Com efeito, a adição de água proveniente da precipitação, do degelo, etc., à água salgada já existente, origina uma solução que é exotérmica e que, portanto, liberta calor. Mas a salinidade dos oceanos resulta da acumulação dos sais transportados pelos cursos de água para os oceanos, e a sua distribuição é devida à evaporação e à precipitação sobre os oceanos e às correntes marítimas, fenómenos que são, por sua vez, determinados pela energia solar recebida na Terra.

A energia solar, a energia gravitacional e a energia devida à rotação da Terra, com o efeito de Coriolis, constituem o manancial que estabelece e mantém as circulações dos oceanos e do ciclo hidrológico. Por isso, a radiação solar é a fonte essencial no processo de meteorização, erosão e de transporte de sedimentos. A energia envolvida na circulação da água é relativamente pequena:  $1,7 \times 10^{-5}$  de 1 SERPY ( $2,5 \times 10^9$  Mwh). Mas, no decurso das eras geológicas o trabalho dispendido nos processos hidrológicos tem sido enorme. Basta considerar as montanhas que foram quase arrasadas por erosão e os sedimentos que foram carreados e, por vezes, transportados para o fundo dos oceanos, etc.

O processo de erosão e de sedimentação envolve uma redistribuição substancial de matérias na crosta terrestre. E, assim, foram aumentar a carga sobre a crosta numas regiões, com a acumulação de materiais nas bacias sedimentares, e aliviar outras regiões onde outrora existiram as montanhas destruídas. O mesmo desequilíbrio se torna evidente quando as grandes calotes de gelo crescem e se desenvolvem sobre certas regiões da crosta. O equi-

líbrio isostático é portanto alterado no decurso do tempo e tem que verificar-se um ajustamento.

Até que ponto esta sobrecarga numas regiões e subcarga noutras contribui para a dinâmica da crosta terrestre?

Até há 15 anos predominava a teoria do geossinclinal e aceitava-se que a sobrecarga com a subsidência que se verificava nestas regiões e a ascensão da crosta noutras por compensação, originariam a formação de novas cadeias de montanhas. Mas, agora, com a nova teoria da tectónica das placas, as montanhas resultam dum processo de muito maior escala associado ao movimento e à subdução das placas. Ainda continua a aceitar-se a teoria da isostasia, segundo a qual as cargas da crosta são suportadas como se boiassem no manto, à semelhança de icebergs nos oceanos, com as cargas maiores penetrando até maiores profundidades.

## A RADIAÇÃO SOLAR, O CLIMA E A BIOSFERA

Os sistemas vivos têm que ser protegidos contra a radiação capaz de originar a ruptura das moléculas. A atmosfera inicial da Terra não conteria oxigénio livre e seria altamente transparente à radiação ultravioleta. Logo que se começou a verificar a fotossíntese, talvez com microorganismos do oceano, libertou-se oxigénio para a atmosfera. Como os processos metabólicos dos organismos primitivos eram fundamentalmente anaeróbios, o oxigénio foi-se acumulando na atmosfera. À medida que as moléculas de oxigénio ( $O_2$ ) se difundiram na atmosfera, aquelas que atingiram os níveis superiores foram decompostas pela radiação ultravioleta em oxigénio atómico (O). Parte deste combina-se com oxigénio molecular remanescente originando a formação de ozono ( $O_3$ ). Mas o ozono absorve fortemente a radiação ultravioleta, e à medida que se foi acumulando na estratosfera, passou a actuar como um

filtro selectivo para esta radiação. E, assim, a superfície do Globo ficou protegida contra a radiação ultravioleta que, como vimos, tem um conteúdo muito elevado de energia.

A interacção da matéria viva com a atmosfera faz-se sentir por várias formas. Sabemos, com efeito, que a atmosfera contém em média 320 partes por milhão (0,032%) de anidrido carbónico, essencial no mecanismo da fotossíntese, que é transformado nas plantas em hidratos de carbono. Ora, o anidrido carbónico, que é um gás transparente para a radiação solar na banda do visível, é um forte absorvente da radiação em certas regiões do infravermelho do espectro. Se não houvesse atmosfera, ou se esta fosse completamente transparente, a amplitude da variação diurna da temperatura seria muito maior do que a actual e a temperatura durante a noite seria muito mais baixa.

O anidrido carbónico absorve ainda parte da radiação infravermelha emitida pelo Globo. A energia captada por absorção volta depois a ser irradiada em duas direcções: para baixo, em direcção ao Globo, e para o espaço exterior. E assim a superfície do Globo recebe o fluxo da radiação emitida pelo anidrido carbónico da atmosfera, o que impede que a temperatura à superfície desça abaixo de certos limites.

As nuvens e o vapor de água na atmosfera absorvem e emitem também radiação infravermelha. Com céu limpo, o anidrido carbónico só em parte pode proteger a superfície do Globo, impedindo o seu arrefecimento. Com o céu coberto, as camadas de nuvens constituem como que uma cobertura praticamente opaca para a radiação emitida pelo Globo terrestre, e a radiação que é emitida para o espaço reduz-se apenas àquela que é originada na camada superior das nuvens e à que é emitida pela camada da atmosfera, acima das nuvens (Fig. 9).

As plantas não só utilizam o anidrido carbónico no processo da fotossíntese, como beneficiam ainda do aquecimento resultante do

fluxo da energia radiante que da atmosfera é reenviado para a superfície do Globo. A atmosfera é quase transparente para a radiação visível ( $0,400 \mu\text{m} < \lambda < 0,700 \mu\text{m}$ ), e quase opaca para a radiação ultravioleta e para a radiação infravermelha. Esta sinergia das plantas e da atmosfera em macro-escala, é o resultado de milhões de anos na evolução da vida e da atmosfera, que assim se apresentam fortemente dependentes. E é, por isso, que a vida é condicionada pela transparência ou pela opacidade da atmosfera.

O crescimento da vegetação verde depende, simultaneamente, da luz solar que atinge a superfície do Globo, da temperatura junto ao solo e da quantidade de água disponível. Quando alguma destas condições é inadequada, o crescimento é reduzido. O excesso de energia solar numa região, combinado com uma deficiência em água origina o deserto. Mas se o excesso de radiação solar numa região estiver associado a temperaturas baixas pode criar condições para a formação da tundra. Por outro lado, um excesso de água (precipitação) numa região com radiação solar deficiente origina, quando muito, uma floresta enfiada.

A produtividade anual da vegetação verde é condicionada pelas distribuições sazonais da luz solar, da temperatura e da humidade do ar. A radiação solar que atinge a atmosfera, é em parte absorvida pelo ozono, pelo anidrido carbónico, pelo vapor de água, pelo azoto, pelo oxigénio e pelos aerossóis resultantes da poluição, etc. Quando atinge a superfície do Globo a sua intensidade baixou e a distribuição espectral, que caracteriza a qualidade, foi modificada. A radiação solar junto à superfície (Fig. 18), constituída pela radiação solar directa e difusa varia entre 200 a 220 quilocalorias por centímetro quadrado e por ano nas regiões desérticas e 70 quilocalorias por centímetro quadrado e por ano nas regiões polares. As regiões das florestas chuvosas tropicais recebem entre 120 e 160 quilocalorias, enquanto que a Europa, por exemplo, recebe entre 80 e 120 quilocalorias. A radiação solar no Equador

tem uma variação relativamente pequena no decurso do ano a não ser aquela que é devida à nebulosidade. As regiões polares têm o Sol da meia-noite no Verão e a escuridão completa durante o Inverno.

Quando a radiação solar incide sobre as rochas ou sobre o solo nu é em parte reflectida e em parte absorvida, podendo, por isso, atingir temperaturas elevadas. Se há cobertura vegetal, parte da radiação solar incidente é utilizada na fotossíntese e a outra parte (cerca de 10 a 15% na região do visível) é reflectida.

Da energia solar que entra na atmosfera só 53% atingem a superfície do Globo depois de sofrer os acidentes da difusão, da absorção e da reflexão na atmosfera. A superfície do Globo permuta energia com a atmosfera por radiação, por evaporação e por condensação do vapor de água, e por condução de calor do solo para a atmosfera.

Durante o dia há um excesso de energia à superfície do Globo, enquanto que durante a noite se verifica um défice de energia. Durante o dia, quando a temperatura do solo é superior à da atmosfera vizinha, há uma transferência de calor do Globo por condução e por convecção para a atmosfera. De noite, o ar está geralmente mais quente do que o solo e há uma transferência de calor da atmosfera para o solo.

A evaporação da água da superfície requer um gradiente de humidade na atmosfera que não corresponda ao estado de saturação e uma energia suficiente para fornecer o calor latente associado à transição de fase. Este é cerca de 580 calorias por grama à temperatura de 20° Celsius. A evaporação, através da transpiração das plantas, dá-se de forma contínua durante o dia e nalguns casos durante a noite. A evaporação da água através das folhas das plantas chama-se, por isso, *evapotranspiração*.

Quando o solo está seco, a radiação incidente é principalmente utilizada na convecção da atmosfera, originando, por vezes, forte



A quantidade de radiação solar que é interceptada por segundo pelo círculo diametral da Terra ( $1,27 \times 10^{14} \text{ m}^2$ ) é da ordem de  $1,73 \times 10^{17}$  watts.

O fluxo de calor devido à condução do interior do Globo pode determinar-se a partir das medidas do gradiente geotérmico e da conductividade térmica das rochas que constituem a crosta terrestre. O valor médio é da ordem de 0,063 watt por metro quadrado. Para a superfície do Globo ( $510 \times 10^{12} \text{ m}^2$ ) a quantidade total é cerca de  $32 \times 10^{12}$  watts. A taxa de calor transportada por convecção nas águas termais e nos vulcões é estimada em cerca de 1% da taxa de transporte de calor por condução, isto é,  $0,3 \times 10^{12}$  watts. A potência associada às marés tem sido estimada em cerca de  $3 \times 10^{12}$  watts.

Quando se consideram todas as fontes, a potência correspondente é cerca de  $173,035 \times 10^{12}$  watts. A radiação solar constitui 99,98 por cento de toda a energia disponível pela Terra, ou seja, 5000 vezes a energia de todas as outras fontes.

Cerca de 33 por cento da potência solar incidente ( $52\,000 \times 10^{12}$  watts) é reflectida directamente e retrodifundida para o espaço como radiação de pequeno comprimento de onda. Outros 47 por cento ( $81\,000 \times 10^{12}$  watts) são absorvidas pela atmosfera, pela superfície do Globo, pelos oceanos e convertida directamente em calor, à temperatura do ambiente. Cerca de 23 por cento ( $40\,000 \times 10^{12}$  watts) são consumidos para manter o ciclo hidrológico, designadamente a evaporação, a convecção, a precipitação e o escoamento à superfície. Da restante uma pequena fracção,  $370 \times 10^{12}$  watts, é utilizada nas circulações e ondulação dos oceanos (correntes, ondas e vagas) e que é, eventualmente, dissipada por atrito. Por fim, uma quantidade ainda menor, cerca de  $40 \times 10^{12}$  watts, é captada pelas plantas, constituindo a fonte de energia dos processos de fotossíntese.

A fotossíntese fixa o carbono e armazena energia solar sob a

forma de hidratos de carbono. Liberta oxigénio, e com a caída das folhas, dissipa energia. O balanço entre estes processos no decurso de um ano é quase perfeito. No entanto, uma pequena fracção da matéria orgânica produzida é depositada em pântanos, ou noutros meios com deficiência de oxigénio, em condições que evitam o decaimento completo dos materiais, com o conseqüente armazenamento de energia.

Algum deste material orgânico produzido antes do Cambrico, há cerca de 600 milhões de anos, foi preservado. Neste período, parte deste material ficou subterrado a grandes profundidades por camadas espessas de sedimentos, de areias, de lamias e de calcários. E foram estes materiais que deram origem aos combustíveis fósseis, tais como o carvão, o petróleo, as areias betuminosas, o gás natural, etc. Este processo continua a decorrer, como é evidente, mas só ao fim duma acumulação de cerca de 1 milhão de anos é que poderá levar à produção de combustíveis fósseis, tais como hoje os concebemos.

## A ENERGIA SOLAR: ESPERANÇA DO FUTURO

A fonte de energia mais utilizada hoje pelo homem é constituída pelos combustíveis fósseis, principalmente o petróleo e o gás natural, que continuam a fornecer cerca de 70 por cento da energia necessária às actividades humanas actuais, tendo o seu consumo quadruplicado nas duas últimas décadas. Como as reservas conhecidas e recuperáveis são limitadas e não são renováveis, não podem aguentar por muito mais tempo taxas de consumo cada vez mais elevadas. E, assim, dar-se-á a exaustão dessa reserva de energia.

A manter-se a actual lei de crescimento da população e a lei exponencial dos consumos de energia, as reservas naturais de petróleo e gás natural ficarão exauridas dentro de cerca de 80 anos.

O aumento dos consumos globais e o aumento dos preços que originaram a chamada «crise de energia», que todos experimentamos, levam-nos a encarar a dura realidade: a energia, abundante, dócil e barata, é um ...paraíso perdido...

Calcula-se, com efeito, que o consumo de energia pelo homem, desde o início da Era Cristã até meados do século XIX, foi da ordem de 8 unidades Q ( $1Q = 10^{18}$  BTU =  $2,93 \times 10^{14}$  Kwh). Ora, no último século, consumiram-se já 4 unidades Q e as necessidades previstas para o próximo século excederão em muito 100 unidades Q, devido não só ao aumento da população, como à melhoria da qualidade de vida.

Impõe-se, portanto, o recurso a outras fontes de energia. O carvão e o urânio constituem alternativas com reservas para muito maior duração e especialmente o urânio que poderia garantir o fornecimento de energia por vários séculos. Todos conhecemos, porém, as implicações ecológicas, ambientais, económicas e sociais da utilização destas fontes de energia, principalmente da energia nuclear. Ressalta, assim, a importância decisiva que assumem outras formas de energia renováveis, que interfiram o mínimo possível com o ambiente, através de possíveis perturbações no sistema climático, originadas pelas cargas térmica e química lançada na atmosfera com produtos finais da utilização das fontes de energia. Dentre as formas de energia renováveis, não poluentes, e cuja utilização potencial não origina problemas ecológicos, ressalta a energia solar. Esta é praticamente ilimitada e, no entanto, é virtualmente desaproveitada pelo homem. Basta notar que a radiação solar recebida em Portugal, por exemplo, é cerca de quatro mil vezes superior ao consumo de energia utilizada sob todas as formas.

Quando se considera que 0,47 da energia solar que incide sobre a orla exterior da atmosfera atinge a superfície do Globo, avalia-se bem a potencialidade desta fonte de energia. O valor

elevado desta fonte dá a medida da importância transcendente do enorme manancial de energia solar disponível na superfície do Globo, que físicos e engenheiros, num esforço comum, procuram tornar em energia utilizável, com o rendimento máximo possível. A avaliar pelas realizações actuais, o futuro se encarregará de mostrar o altíssimo valor económico que há-de resultar do aproveitamento deste manancial de energia.

\*

\*      \*

As várias formas de aproveitamento de energia solar podem agrupar-se nos tipos seguintes: aproveitamentos indirectos, usando efeitos hidrológicos e meteorológicos e aproveitamentos directos, quer pela absorção da radiação solar, quer pela sua conversão directa em energia eléctrica. Os aproveitamentos hidroeléctricos, tão importantes na contabilidade energética presente, vão estando quase utilizados *in toto*. Além disso, há razões de natureza ecológica que desaconselham a proliferação de barragens.

Os aproveitamentos da energia solar baseada na transformação em calor por absorção, estão já a ser largamente utilizados para fins domésticos e industriais, utilizando colectores solares parabólicos e planos, que, entretanto, se tornaram muito populares. Os materiais empregados são de uso comum, e de natureza local. Por exemplo, uma instalação para uma casa típica vulgar, que requeira uma instalação pequena, que não exceda, digamos, 2 m<sup>2</sup> de superfície colectora, pode ser feita numa pequena oficina interessada e o custo não é sequer elevado.

Noutro tipo de aproveitamento por via termodinâmica, o calor obtido por absorção da radiação solar é utilizado no aquecimento do vapor de água (ou de outros fluidos) que, por sua vez, faz accionar uma turbina que vai mover um gerador eléctrico,

por exemplo. Torna-se assim possível operar sistemas de refrigeração, de ar condicionado, etc., utilizando indirectamente a energia solar por via termodinâmica.

O projecto da «casa de energia-zero» desenvolvido na Dinamarca, pode considerar-se uma realização decisiva no domínio do aproveitamento da energia solar: toda a energia necessária para a manutenção duma casa em que vive uma família típica dinamarquesa (casal com dois filhos) é de origem solar.

A utilização de sistemas de concentração óptica com espelhos parabólicos permite obter energia a temperaturas muito elevadas. O sistema em uso em Odeillo (Pirinéus Franceses) produz cerca de 1 megawatt de potência, atingindo a temperatura valores de 3 300° C. De resto, já Arquimedes soube utilizar a energia solar, por concentração óptica, ao incendiar a frota assaltante romana de Marcellus em Siracusa, há 2200 anos.

Neste domínio não devemos esquecer a contribuição dada pelo Português Padre Himalaia que construiu uma fornalha solar, que foi apresentada na Exposição Internacional de S. Luís em 1904.

A estrutura, ainda hoje considerada de avançada concepção, permitia seguir o Sol, com extremo rigor, no seu movimento diurno aparente. O colector era constituído por um mosaico de espelhos planos que cobriam uma superfície parabólica que funciona como concentrador. Este dispositivo ampliava, por concentração, 2 000 vezes o fluxo solar recebido, permitindo mesmo a fusão de metais. As dimensões enormes da estrutura, tornando-a vulnerável aos ventos fortes e a tempestades, não permitiram a sua divulgação. Podemos dizer que ainda hoje subsistem, apesar dos avanços tecnológicos verificados, problemas desta natureza.

Mas vejamos agora a conversão directa da energia solar em energia eléctrica. Além da conversão, indirecta, sequencial, pela via: calor → energia mecânica → energia eléctrica, há que considerar a conversão directa da energia solar em energia eléctrica,

sem necessidade de quaisquer ciclos intermédios, nem transformações termo-mecânicas. Este é o método mais desejável de utilizar a energia solar.

Os processos de conversão mais utilizados assentam no efeito fotovoltaico, ainda que estejam em estudos os efeitos fotogalvânico e fotoquímico. O princípio do efeito fotovoltaico é conhecido há mais de trinta anos, mas a sua utilização na conversão directa de radiação solar em energia eléctrica, data, praticamente, desde sua utilização nos satélites artificiais, como fonte de alimentação da energia. A investigação do efeito fotovoltaico está bastante avançada, enquanto que a investigação dos efeitos fotogalvânico e fotoquímico está ainda numa fase incipiente.

A conversão directa através de sistemas fotovoltaicos, conhecidos por células solares, baseia-se na propriedade que tem determinados sólidos cristalinos de quando iluminados pela radiação solar, libertarem electrões que se podem organizar em corrente eléctrica. Os materiais mais utilizados são os semi-condutores como o silício e o selénio. Há no entanto, outros materiais que se podem utilizar nas células solares, como o sulfureto de cádmio, o sulfureto de cobre, o arseneto de gálio, etc. Actualmente estão em curso esforços com o fim de ser possível o emprego de silício amorfo, o que faria descer substancialmente o preço das células solares.

Notaremos, porém, que ambos os processos de conversão em energia eléctrica, por via termo-mecânica e por via fotovoltaica, só actuam enquanto se dispuser da radiação solar durante o dia. Portanto, para manter o consumo de energia de forma continuada, há necessidade de um sistema de armazenamento de energia que para o sistema fotovoltaico tem que ser sob a forma de energia eléctrica, mecânica ou química.

Na fase actual de desenvolvimento, as principais aplicações das células solares, compreendem já o uso sistemático em gera-

dores de energia para comunicações por satélites, para rádio ajudas e sinalização no alto mar, estações repetidoras para rádio e televisão, para radiotelefonos, para balizas de sinalização, em locais de acesso difícil, para instalação de estações meteorológicas automáticas, etc..

A principal aplicação das células solares, usando mono-cristais de silício, foi o fornecimento de energia eléctrica à instrumentação das naves espaciais e de satélites artificiais e às suas câmaras de televisão para transmitir imagens para a Terra, etc..

A utilização em escala industrial das células solares tem vindo a fazer-se progressivamente, associando-a a outros tipos de aproveitamento, designadamente a colectores planos, esperando-se que num futuro próximo a associação de todas as formas de aproveitamento da energia solar possa cobrir algumas das nossas necessidades energéticas.

\*

\*        \*

Há alguns anos que está muito em voga a ideia de considerar a Terra como uma embarcação, com dimensões finitas e recursos fixos e limitados, navegando no espaço. No entanto, tem à disposição uma fonte de energia exterior, generosa e que não regateia os seus serviços, que é a radiação solar. E cumpre-nos a nós corresponder ao desafio que nos é posto pela crise energética, tendo presente que para aprendermos a utilizá-la de forma prudente e sensata é antes de mais, indispensável e avisado estudá-la, compreendê-la e conhecê-la. Só assim se construirá uma base sólida sobre a qual venha assentar uma técnica propícia e uma tecnologia eficiente, que nos libertem da fase quase artesanal do presente.

Vamos agora referir-nos a um projecto de aproveitamento de energia solar por conversão directa em energia eléctrica utilizando o efeito fotovoltaico, que assenta numa concepção extremamente

ousada e ambiciosa (Fig. 23). Trata-se de recolher a energia solar por um colector de 32 Km<sup>2</sup> de células solares, incorporado num satélite geostacionário, colocado numa órbita síncrona, a 22 300 milhas de distância acima do Equador. O colector receberia cerca de  $8,5 \times 10^{17}$  quilowatts (kw) de radiação solar, que para o rendimento actual de 18 por cento das células solares, seria convertida em 15 000 megawatts de potência eléctrica. Esta, por sua vez, seria convertida em energia radiante no domínio das microondas e reenviada para a Terra onde seria recebida numa estação terrestre fixa, porque o movimento do colector é geostacionário. Depois

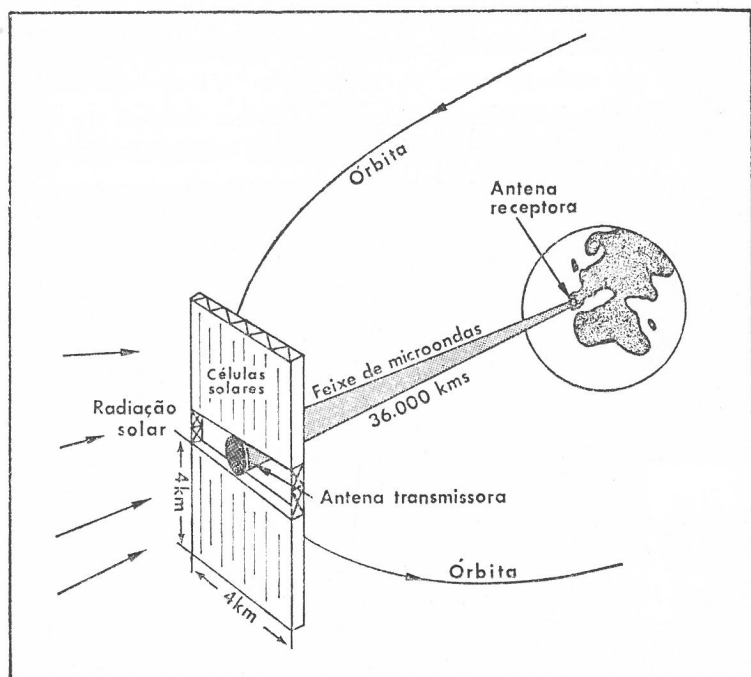


Fig. 23 — Colector de células solares de um satélite geostacionário, para aproveitamento da radiação solar



seria novamente reconvertida em energia eléctrica, o que poderia equivaler, descontadas as perdas inevitáveis, a uma potência de 10 000 megawatts, mais do que suficiente para satisfazer o consumo de uma grande metrópole.

É interessante notar que este esquema tem a vantagem da conversão se processar de forma contínua, durante as 24 horas do dia, eliminando a necessidade de armazenamento.

Mas a energia solar pode ser utilizada sob outros aspectos, como acontece, por exemplo, na forma artesanal, com a exploração das salinas, desde tempos imemoriais.

Merece a pena referir grandes projectos de engenharia, que, fundamentalmente, assentam no mesmo mecanismo, que é o da utilização da radiação solar na evaporação. Vamos mencionar o grande projecto heliohidroeléctrico de Dawhat Salwah no Golfo Pérsico (Figs. 24-a, b). A construção de uma barragem separaria o

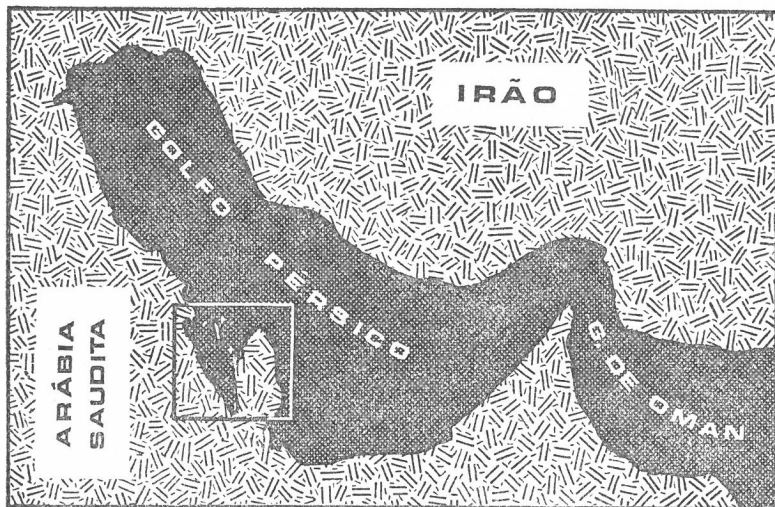


Fig. 24-a — Projecto heliohidroeléctrico de Dawhat Salwah.  
Localização geográfica

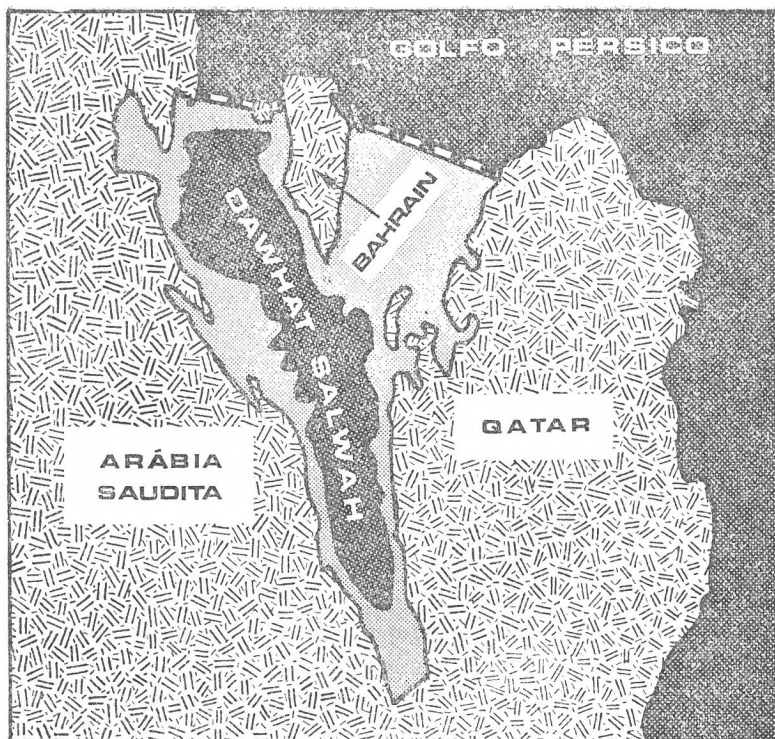


Fig. 24-b — Projecto heliohidroeléctrico de Dawhat Salwah.  
Pormenor

golfo de Dawhat Salwah do restante Golfo Pérsico, constituindo um complexo de dois reservatórios ligados por uma conduta, conforme se mostra esquematicamente na Fig. 25. A perda rápida de água devido à evaporação no reservatório confinado a Dawhat Salwah originaria uma altura de carga hidráulica através da conduta, visto que o nível das águas no Golfo Pérsico não é praticamente afectado pela evaporação, por serem «águas abertas». Portanto, uma vez

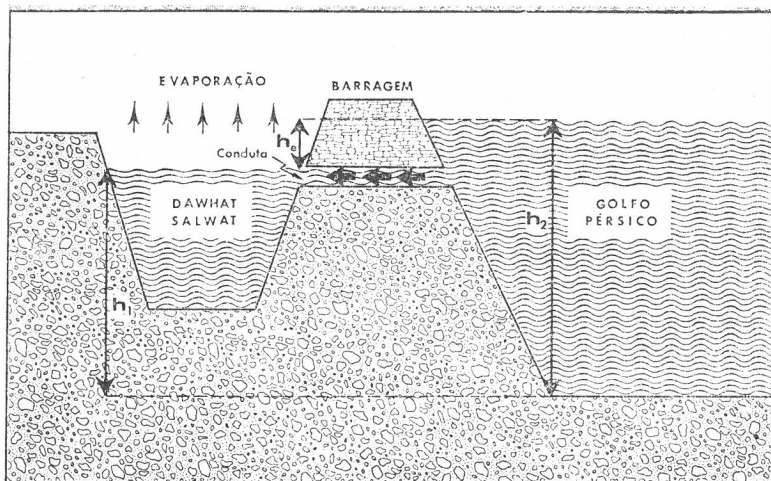


Fig. 25 — Esquema do Complexo

estabelecido o desnível necessário pode utilizar-se na produção de energia eléctrica. Com uma taxa de evaporação de 3,5 metros por ano, poderiam produzir-se cerca de 300 milhões de Kwh.

Rasgam-se ainda mais horizontes na exploração do projecto, tais como a produção mineral, vias de comunicação, solos ganhos ao mar, maricultura, etc.

Devemos, no entanto, ter presente que há outras formas de energia, não renováveis, que devem considerar-se no esquema geral de alternativa para as fontes de energia, que hoje usamos. Por isso, não devemos tomar o esquema de aproveitamento exclusivo da energia solar como a panaceia para o futuro. Há outras formas de energia a explorar, como a energia geotérmica, a energia das marés, a energia da fermentação química e a energia eólica, entre outras.

## A ENERGIA: ÍNDICE DE CULTURA

Desde o seu aparecimento na Terra, que o homem tem vindo a tentar dominar, com relativo sucesso, os elementos e forças da Natureza em seu proveito. A energia, representa na luta do homem contra a hostilidade do meio e contra as vicissitudes da Natureza um bem precioso, que é factor decisivo para a manutenção da vida do homem e mesmo para a sua sobrevivência na Terra.

O homem vive imerso num manancial de energia, que é a radiação solar, mas, que até hoje, pouco tem sabido utilizar de forma directa. E a dificuldade reside, fundamentalmente, na sua conversão noutras formas de energia, mais facilmente utilizáveis e controláveis pelo homem. Quanto melhor o homem souber utilizar a sua energia própria no controlo doutras formas de energia, tanto maior será o seu domínio sobre o ambiente e mais elevadas as realizações naquilo que o emancipa duma existência meramente animal.

O conceito de cultura é frequentemente utilizado para distinguir o homem dos animais. Uma forma de interpretar este conceito é encarar o homem como um ser com capacidade para controlar o seu ambiente. Tem a possibilidade de influenciar e de guiar a Natureza, para satisfazer as suas necessidades e a sua vontade própria. Embora esta capacidade não seja ilimitada, o avanço na cultura é caracterizado pelo aumento da capacidade que o homem possui de controlar o mundo em que vive.

Num primeiro estágio de desenvolvimento cultural, o homem utilizava como única fonte a sua própria energia. Depois, noutra fase de desenvolvimento da cultura, o homem pré-histórico começou a ser capaz de fazer a conversão da sua energia muscular noutras formas de energia, quando começou a usar os calhaus rolados em que um dos topos foi aguçado intencionalmente. Passou deste modo a dispor de instrumentos de trabalho, de luta e de

defesa. E, assim, o homem aprendeu a concentrar a sua própria energia de forma mais eficiente, ao aplicar o «mesmo esforço» em áreas muito mais reduzidas em que incidiam as pontas «aguçadas».

Desde então, a marcha da Humanidade processou-se de forma imparável, ao reconhecer que podia agir sobre a Natureza. A descoberta e o domínio do fogo, e o aparecimento da roda constituíram verdadeiras revoluções na conversão de energia, a que corresponderam uma melhoria considerável na qualidade de vida do homem. O homem encontrou formas e processos de aumentar os seus recursos em energia, sendo, portanto, capaz de elevar o seu nível cultural acima daquilo a que poderemos designar por «nível de cultura energia-homem».

Outro passo decisivo na evolução cultural do homem foi aquele que o revelou capaz de cultivar as plantas e domesticar os animais. Conseguiu assim armazenar energia solar sob a forma biológica, não humana.

Convém acentuar a diferença profunda entre a fase da utilização das plantas e de animais no estado natural, espontâneo e selvagem e a fase que corresponde à domesticação dos animais e à agricultura. Quando o homem começou a criar animais e plantas, de forma sistemática, começou, de facto, a utilizar e a controlar a energia solar para produzir alimentos, agasalhos e energia mecânica.

Podemos dizer que os bens e serviços por unidade de trabalho humano, aumentaram. O aparecimento da agricultura corresponde já a uma utilização consciente da energia solar: o homem passou a saber quando deve semear ou plantar para que o Sol «faça crescer» as culturas, para depois recolher os seus frutos para se alimentar a si e aos animais que aprendeu a domesticar.

Além disso, estas novas fontes de energia são controláveis e disponíveis, e o homem deixa de estar à mercê da existência e dispo-

nibilidade de caça, que nem sempre aparece, ou de plantas espontâneas, nem sempre utilizáveis. Logo, a cultura avançou em consequência do aumento da segurança que o homem passou a sentir ao depender de formas de energia armazenadas no decurso do ano, cujo consumo poderia comandar.

O uso da energia solar, sob a forma de calor, tem vindo a fazer-se há mais de 2000 anos, designadamente na destilação de líquidos para obter álcool e perfume, na secagem de frutos para obter passas, na secagem de animais e peixes, etc. No entanto, o aproveitamento e o controlo da energia solar teria que esperar até aos nossos dias para assumir a importância que a chamada crise de energia originou.

\*

\*      \*

A busca contínua e a ânsia de procurar novas formas de energia, conduziram à descoberta da electricidade no século XVIII e no século XIX à conversão de calor em energia mecânica. Mas não chega dispor duma forma de energia; tem que se dispor duma tecnologia que permita a sua utilização e emprego. E acontece que a energia eléctrica é uma das formas de energia mais conveniente e na qual todas as outras formas de energia se podem converter. É fácil de transportar e de controlar; é fácil de converter em qualquer forma de energia necessária. Mas, muitas vezes, a conversão em energia eléctrica só pode fazer-se, através de transformações intermédias, o que reduz e limita muito a eficiência da conversão.

Com o aumento do conhecimento do comportamento e da estrutura da matéria, e com o progresso da tecnologia dos materiais, tem sido possível converter directamente, várias formas de energia em energia eléctrica. E está neste caso, ainda que numa

fase incipiente, a radiação solar através de dispositivos fotovoltaicos, como referimos.

O termo *energia* é relativamente recente, pois foi inventado em 1807 e os princípios que regem a energia só foram estabelecidos a partir de 1847 com Mayer e outros. Mesmo assim, têm sido modificados e ajustados várias vezes, para vencer várias crises por que têm passado, como aconteceu quando Einstein estabeleceu a equivalência da massa,  $m$ , e da energia,  $E$ .

O homem apreendeu o conceito de energia cientificamente, sabe medi-la, é capaz de a controlar tecnologicamente e sabe utilizá-la. Todavia, por mais paradoxal que pareça, está longe de prever o impacto social da sua utilização, de prever as consequências irreversíveis resultantes para o ambiente, ou mesmo, de antever as disponibilidades futuras dos recursos energéticos, tal é a complexidade da interação homem-energia-cultura-sociedade.

## ENERGIA SOLAR, ENTROPIA E AMBIENTE

A Terra constitui um sistema fechado e não isolado. É um sistema fechado, porque não há transferência de matéria com o seu universo complementar. Mas os seres vivos são sistemas abertos, e não isolados, porque há trocas de energia e de matéria com o ambiente que os rodeia, através da alimentação, da respiração, etc. A vida só é possível devido às fontes de energia exteriores aos seres vivos, e aos fenómenos do metabolismo, que permitem a assimilação dos alimentos e a transformação de energia proveniente do ambiente complementar.

Num sistema fechado, como a Terra, tem que haver um sistema de mecanismos internos que permita a reciclagem de vários componentes vitais e a sua regeneração, de forma quase contínua. É o que acontece com os ciclos do azoto e do oxigénio; com o



ciclo do carbono e com o ciclo hidrológico, em que se renovam os componentes correspondentes.

A Terra não é um sistema isolado, porque recebe a energia solar que participa nos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no sistema e se transforma, finalmente, em energia térmica. Esta é depois emitida para o espaço exterior sob a forma de radiação de grande comprimento de onda, na banda do infravermelho.

\*

\*      \*

Há leis fundamentais que regem o comportamento do sistema global, que constitui o ambiente, e que não se podem evitar, nem repelir. São a lei da gravitação e a primeira e a segunda lei fundamentais da Termodinâmica. Estas são as leis, que em princípio, partilham entre si o governo da nave terrestre, frágil como é.

A lei da gravidade manifesta-se e impõe-se de forma inexorável e cruel no dia a dia, desde o problema da «maçã de Newton», ao movimento da Lua em torno da Terra e dos planetas em torno do Sol, etc.

A primeira lei fundamental da Termodinâmica traduz afinal um facto, que agora é visto como se tratasse duma questão de simples senso comum: «ninguém pode obter alguma coisa a partir de nada». É o princípio da conservação da energia. Num processo qualquer, a energia não pode ser criada nem destruída, pode apenas transformar-se e aparecer sob formas diferentes. Se um sistema recebe energia tem que ser proveniente do ambiente que o rodeia e vice-versa: se o sistema perde energia há uma transferência equivalente para o ambiente. Em qualquer processo a energia total do sistema sob as várias formas possíveis e a do seu ambiente permanece constante.

Da energia recebida por um sistema, uma parte é retida ou



armazenada, possivelmente sob formas diferentes, e outra pode ser transferida. E assim, da energia solar recebida pela Terra, uma parte é utilizada nas circulações gerais dos oceanos e da atmosfera, na formação dos sistemas frontais e das perturbações associadas; na distribuição dos climas, na manutenção do ciclo hidrológico, na fotossíntese, etc. A energia solar inicial vai gerar energia potencial disponível, que por sua vez se transforma em energia cinética, energia química, e, finalmente, em energia térmica, num encadeamento bem ordenado com um sentido bem definido e não inversível.

A energia solar aparece assim, como se fosse diferida no tempo, sob as formas de energia, ditas renováveis, designadamente a energia eólica, a energia das marés e das correntes marítimas, a energia hídrica, a energia química, etc. Há energia solar armazenada sob a forma de energia utilizável nos combustíveis fósseis (carvão, petróleo, gás natural), nos oceanos, na biosfera, etc.

\*

\* \*

Vejamos agora a segunda lei fundamental da Termodinâmica e analisemos algumas das suas implicações. Implicitamente temos vindo a referir-nos aos dois tipos de processos que se observam na fenomenologia: os processos naturais, que ocorrem espontaneamente, sem necessidade de uma excitação energética exterior, e os processos não naturais, forçados por energia exterior, fornecida ao sistema. Nos processos naturais, há sempre uma diminuição de mérito das várias formas de energia que se vão sucedendo em cadeia unidireccional nas transformações. Com esta degradação, a utilizabilidade da energia decresce consideravelmente e a reconversão duma forma de energia numa forma anterior da cascata da energia não pode ocorrer naturalmente. Não há inversão; há irreversibilidade.

As formas de energia que se vão sucessivamente obtendo na cascata, são cada vez menos nobres e o grau de desordem ou de desorganização aumentam irremediavelmente. Podemos sintetizar estes aspectos, que são outras tantas formas de enunciar a segunda lei da Termodinâmica, introduzindo o conceito de *entropia*, dizendo, simplesmente, que a *entropia em todos os processos naturais aumenta e a utilizabilidade, a organização e a ordem das formas de energia diminuem*. Todo o sistema, entregue a si mesmo, evolui para um estado de entropia mais elevada e de maior desordem. A entropia aparece como um aferidor do grau de desorganização ou de desordem dum sistema e como um indicador do nível de qualidade da energia e da sua disponibilidade.

Num processo natural, que envolva transferência de energia, esta mantém-se constante, mas o seu nível de entropia aumenta. Os processos naturais são entropizantes no sentido de tirarem viabilidade à utilização da energia. Não há nada que se pareça com um princípio de conservação de entropia. Pelo contrário! A entropia em todos os processos naturais aumenta.

A entropia está para a energia, assim como um objecto para a sua sombra. São inseparáveis! Na grande fábrica dos processos naturais, que é a própria Natureza — o princípio do aumento da entropia é o princípio de gestão, de decisão e das grandes opções, enquanto que o princípio da conservação da energia desempenha o papel do contabilista, preocupado apenas com o balanço do «deve» e «haver».

\*

\*

\*

A Terra recebe cerca de  $1,55 \times 10^{15}$  megawatts hora de energia do Sol, por ano, sob a forma de radiação electromagnética e que é reirradiada para o espaço exterior no domínio do infravermelho constituindo a radiação terrestre. Há, portanto, um

balanço da energia entre a que é recebida pela Terra e a que é emitida por esta. Mas não são da mesma «qualidade». De facto, o que se passa com a entropia? Vejamos. Aceitando que as temperaturas médias da Terra e do Sol são respectivamente cerca de 300° K e de 6 000° K a entropia da energia emitida pela Terra é cerca de 20 vezes maior do que a entropia da radiação solar incidente <sup>(1)</sup>. A energia da radiação solar recebida é de melhor qualidade do que a da radiação terrestre expurgada!

O abaixamento da frequência (aumento do comprimento de onda) e o espraiamento da distribuição espectral da energia radiante parece ser equivalente à tendência para a uniformização do caos molecular. E, assim, como não esperamos que a água morna se separe espontaneamente em água fria e água quente, também não esperamos que a energia da radiação de baixa frequência e de grande extensão espectral se transforme espontaneamente em energia equivalente da radiação de frequência elevada e maior concentração espectral. Estas transformações, no entanto, em nada contrariam o primeiro princípio da Termodinâmica.

A radiação de menor comprimento de onda tem menos entropia do que a radiação de maiores comprimento de onda. Logo, a transição natural da energia radiante dá-se no sentido de aumentar o comprimento de onda e o alargamento do domínio das frequências, porque só assim se verifica o aumento inexorável de entropia.

O uso da energia solar na Terra é constituído por um complexo de transformações internas, com fluxos de energia termodinamicamente permissíveis, até a energia ser termicamente degra-

---

(1) De facto, a entropia da energia solar incidente é  $S_s = \frac{1,55 \times 10^{15} \times 10^6 \times 3600}{6000} \text{ J/}^\circ\text{K}$  e a entropia da energia terrestre emitida é  $S_t = \frac{1,55 \times 10^{15} \times 10^6 \times 3600}{300} \text{ J/}^\circ\text{K}$ .

dada à temperatura média no Globo ou quimicamente degradada por difusão no ambiente. Ao armazenar energia diferenciadamente no espaço (lagos, nuvens, massas de ar, florestas, etc.), aparecem subsistemas que podem não estar em equilíbrio com o seu ambiente e ao evoluírem, até atingirem o máximo de entropia consentido pelo ambiente, podem realizar trabalho.

Os subsistemas encontram-se num estado vivo em relação ao seu ambiente complementar. Ao evoluir identifica-se com este, passando ao estado morto. A diferenciação entre o estado vivo do sistema e o estado morto do universo complementar permite avaliar a energia máxima utilizável que se pode obter dum sistema e que se designa por *disponibilidade* ou *exergia*. Estes subsistemas constituem verdadeiras ilhas de rarefação de entropia, e é só por isso que dispomos de outros recursos naturais em energia na Terra, para além da radiação solar. A Terra não é um sistema inerte. No seu interior decorrem processos, evoluções e transformações que envolvem a concentração e a transferência de energia e, portanto, a geração de entropia.

À luz do segundo princípio fundamental da Termodinâmica, ao considerarmos os processos químicos, físicos e biológicos, temos que fazer ressaltar os dois seguintes pontos: *em todos os processos naturais a exergia diminui e a entropia aumenta*. O Universo, tomado como um todo, evolui num sentido de maior desorganização. É como se se tratasse dum relógio gigante a que se tivesse dado corda no passado e a fosse perdendo gradualmente.

\*

\*            \*

Surge, por vezes, numa análise superficial, a ideia de que os seres vivos desafiam a segunda lei da Termodinâmica, porque

os seres vivos nascem, crescem, reproduzem-se, metabolizam e, revelam, de facto, um aumento de energia livre e uma diminuição de entropia.

Durante a fase de crescimento um organismo fabrica moléculas complexas, aumenta o número de células e origina a formação de tecidos específicos diferenciados. O crescimento faz-se com ordem, com simetria, duma forma quase contínua e num todo harmonioso, como se fosse refractário à entropia.

Que mais harmonia do que a que revela o ser vivo em que o desenvolvimento, o crescimento e o envelhecimento seguem uma lei de simetria?

Não é verdade que temos um par de olhos, dois pares de membros, simétricos, uma boca e um nariz centrados?

O ser vivo transforma-se dentro de uma organização e de uma ordem que mantém as características intrínsecas das espécies. A reprodução e o crescimento em ordem perpetuam as espécies.

Mas agora põe-se a seguinte questão: pode tomar-se um ser vivo como um sistema independente e desenquadrado do meio em que vive, isto é, do seu Universo complementar?

Através do fluxo de energia e da transferência de matéria, o ser vivo está decisivamente ligado ao seu Universo complementar. Constitui, como já dissemos, um sistema aberto e não isolado. Nenhum organismo é independente das fontes da energia do exterior. De facto, praticamente, toda a energia dos seres vivos na Terra provém do Sol. Logo, o Sol, o Globo, as plantas e os animais são subsistemas dum sistema termodinâmico global.

Os seres vivos apresentam aumento de energia livre e uma diminuição de entropia à custa de outros subsistemas, nos quais a energia livre diminuirá e a entropia aumentará. E o balanço global final pronuncia-se em favor da segunda lei da Termodinâmica: a entropia resultante do ser vivo final e do seu Universo complementar aumenta e a energia livre diminui.

A herança material do homem é constituída por dois elementos fundamentais: um «stock» de materiais de baixa entropia existentes na superfície e no interior do Globo (recursos naturais), e o fluxo de energia solar, que se vai sucessivamente transformando, ainda que sempre e com uma inevitável degradação.

A utilização destes dois elementos pelo homem conduzirá, pela sua transformação irreversível, à formação de subprodutos que, ao serem devolvidos como desperdícios ou resíduos ao meio ambiente, constituem formas de poluição. Esta surge, assim, como uma consequência da inexorabilidade da 2.<sup>a</sup> lei da Termodinâmica.

Em termos objectivos, verificamos que o conceito generalizado de civilização se confunde, portanto, com o de progresso material e de desperdício. Mas o desenvolvimento económico e o progresso material constituem aspirações de todos os povos da Terra. Só uma profilaxia adequada, pode impedir uma deterioração progressiva do ambiente, devido à poluição generalizada resultante.

Toda a poluição é fruto dum processo entrópico e, quando muito, o seu controlo e redução corresponderão a uma optimização do processo no sentido de tornar o aumento inevitável da entropia o mínimo possível. A crise do ambiente é uma crise da entropia e resulta da «nossa arrogância» em desprezar a segunda lei fundamental da Termodinâmica. A entropia, ao contrário da energia, pode ser criada. E não há dúvida de que o aumento da entropia que se dá nas transformações da energia associadas às actividades humanas se traduz, de forma inexorável, numa depreciação do ambiente.

É a inexorabilidade da Termodinâmica, através da segunda lei, a mais universal de todas as leis da Natureza, que faz da entropia um relógio do tempo. A entropia acompanha indissolavelmente o tempo que vai decorrendo, de forma monotónica crescente. «A entropia é a seta do tempo». Da energia livre do sistema

Sol-Terra só uma pequena fracção é capturada pelos organismos vivos e utilizada para manter o seu elevado nível de organização.

A segunda lei da Termodinâmica é inexorável. Nada há na Natureza que a desafie, ou que a conteste, quer nos mundos da Física, da Química e da Biologia, quer nos domínios da Economia e da Cultura.

Energia, entropia, ambiente, homem e cultura andam indissoluvelmente ligados. Foi, por isso, que o Dr. M. King Hubert da Academia Nacional das Ciências dos Estados Unidos afirmou na sua comunicação *Energy Resources* (1962) (1):

«Since energy is an essential ingredient in all terrestrial activity, organic and inorganic, it follows that the history of the evolution of human culture must also be a history of man's increasing ability to control and manipulate energy.»

E ao cântico a todas as criaturas, ao irmão Sol, ao irmão ar, às nuvens e ao céu sereno, deixemos S. Francisco de Assis continuar a cantar, como só ele seria capaz, os outros elementos essenciais do ambiente:

Louvado sejas, meu Senhor, pela irmã Água  
Que é tão útil e humilde, tão preciosa e casta

... ..

Louvado sejas, meu Senhor, por nossa irmã e mãe Terra  
Que nos alimenta e governa  
E produz frutos variados, ervas e flores coloridas».

---

(1) «Já que a energia constitui um ingrediente essencial em toda a actividade orgânica e inorgânica, na Terra, segue-se que a história da evolução da cultura humana é também a história da capacidade sempre crescente do homem em controlar e manipular a energia.»



## RESUMO

A radiação solar constitui o factor essencial do ambiente. O Sol é a fonte de todas as formas de energia existentes na Terra. A energia solar constitui a verdadeira causa de todos os processos químicos, físicos e biológicos que ocorrem na Terra. É a causa de toda a fenomenologia natural que se observa no Globo e na atmosfera e o factor determinante das formas de vida possíveis no planeta Terra.

A radiação solar modela o clima, determina as formas da circulação geral da atmosfera e dos oceanos e, por fim, origina, condiciona e mantém o ciclo hidrológico em escala planetária.

O Sol fornece a energia que faz crescer as plantas e, portanto, manter a vida e a luz que nos alumia. O desenvolvimento cultural e social do homem e a sua diferenciação dos outros animais, só foi possível pela capacidade que tem de concentrar, controlar e explorar fontes de energia exteriores a si próprio.

Ao saber utilizar fontes inanimadas da energia, o homem aprendeu a dominar o ambiente em que vive, construindo ordem na desordem aparente, que o rodeia. Com a energia radiante solar que inunda a Terra procura condicionar e moderar o aumento inexorável da entropia, mantendo portanto, o nível da qualidade da energia utilizável de que dispõe, que constitui a exergia.



Os raios solares ao atravessarem a atmosfera sofrem os conhecidos acidentes de propagação da radiação, tais como a reflexão, a refração, a difracção, a absorção e a difusão. A reflexão, a refração e a difracção da luz originam vários fenómenos ópticos da atmosfera, designadamente o arco-íris, os halos, as coroas, etc. A difusão da luz, que permite ver os objectos não iluminados directamente, à sombra, é a causa da cor azul do céu e das tonalidades amarelo-avermelhadas dos crepúsculos e das alvoradas.

O aquecimento desigual da atmosfera e da superfície do Globo terrestre é devido à absorção da radiação solar. Aquele aquecimento diferenciado gera e modela a circulação geral da atmosfera, que, por sua vez, induz os grandes sistemas de correntes marítimas que transportam não só grandes massas de água como grandes quantidades de calor, que condicionam os climas. Os ventos e as vagas constituem, assim fontes secundárias e renováveis de energia.

A atmosfera actual da Terra resultou da interacção da radiação solar com a matéria que, na fase inicial, constituía a atmosfera e a parte mais condensada do planeta.

A intensidade da radiação solar recebida na superfície do Globo é muito variável de ponto para ponto, de latitude para latitude, devido, entre outras causas, à transmissividade não uniforme da atmosfera e à variação da nebulosidade. A atmosfera filtra a luz solar, absorvendo a maior parte da radiação ultravioleta e parte da infravermelha, mantendo as condições propícias à vida, tal como a concebemos.

Recorrendo às leis fundamentais da Física é possível avaliar a quantidade da radiação solar que chega à Terra, determinar a sua distribuição planetária e estimar, em cada instante, as várias formas que a energia radiante solar assume. Pode bem dizer-se que tal constitui uma vitória do entendimento humano.

É desta análise e da aplicação das leis da Física à determinação da disponibilidade da radiação solar na superfície do Globo, que se ocupa o presente trabalho.

Depois de analisar o espectro da radiação solar, dá-se a sua distribuição no topo da atmosfera em função da latitude, para as várias épocas do ano. Em seguida, estuda-se o efeito da atmosfera da Terra na radiação solar, o que conduz a uma depleção sistemática desta devido, principalmente, à absorção, à difusão e ao efeito das nuvens. Apresenta-se depois a distribuição da radiação solar à superfície do Globo e indicam-se métodos para a sua avaliação e para a sua medição. Damos então as características e a distribuição da energia radiante solar em Portugal Continental.

Por fim, ao tomar o Sol como o agente dinâmico da história da Terra, do ambiente e da vida, faz-se a inserção da energia solar no quadro geral da energética do homem, apontando a energia solar como uma esperança do futuro.

## SUMMARY

Solar radiation constitutes the essential factor for the environment. The sun is the source of all the energy forms existing on Earth. Solar energy is the real cause of all the chemical, physical and biological processes occurring on Earth. It is the cause for all the natural phenomenology observed on the Globe and in the atmosphere and is the determining factor for all the forms of life possible on the planet Earth.

Solar radiation shapes the climate, determines the form of the general circulation of the atmosphere and of the oceans, finally originates conditions and maintains the hidrologic cycle on the planetary scale.

The sun provides the energy that makes the plants to grow, and, thus, to maintain the life and the light that illuminates us the social and cultural development of mankind and its differentiation from other species has only been possible due to his capacity in concentrating, controlling and exploiting energy sources external to Man.

By knowing how to use inanimate sources of energy Man has learned how to control his environment, building order out from the apparent disorder surrounding him.

With the solar radiant energy that floods the Earth he tries to condition and to moderate the inexorable increasing of entropy, thus maintaining the level of the quality of the available energy, that is to say, keeping up the exergy.

In crossing the atmosphere the solar rays undergo the well known accidents of propagation, such as diffraction, reflection, refraction, absorption and scattering. The reflection, the refraction the diffraction of the solar light lead to several optical phenomena namely, rainbows, halos, corona, etc. The scattering of the light that allows us to see objects non directly illuminated, is the cause of the blue of the sky and of the red-yellowish taintes of the sunset and dawn.

The unequal warming of the atmosphere and of the surface of the Globe is due to the absorption of the solar radiation. This differential warming generates and shapes the general circulation of the atmosphere, which in turn induces the large ocean currents that transport large quantities of water, as well as of heat that condition the climate. The winds and the waves constitute, therefore secondary and renewable sources of energy.

The present atmosphere of the Earth resulted from the interaction of solar radiation with the matter that in the primeval times constituted the atmosphere and the more condensed part of the planet.

The irradiation at the surface of the Globe varies considerably from one latitude to another due, among other causes, to the nonuniform transmissivity and to cloudiness variability. The atmosphere filters the solar radiation by absorbing the largest part of the ultra-violet and part of the infra-red radiation, maintaining conditions favorable to life as we conceive it.

The fundamental laws of Physics allow us to evaluate the amount of solar radiation reaching the Earth, to determine its

planetary distribution and to estimate at any time the various forms that it can assume. It may well be said that such an accomplishment is, in fact, a victory of the mankind understanding.

It is the analysis and the applications of the laws of Physics to the determination of the availability of solar radiation at the surface of the de Globe that constitutes the main object of the present work.

After analysing the spectrum of the solar radiation, its distributions at the top of the atmosphere at various latitudes within the year is presented. Afterwards, the effect of the atmosphere on the solar radiation is studie and the systematic depletion due to the absorption, to the scatering and to the clouds is fully discussed. Next, the distribution of radiation at surface is given and methods for its evaluation and measurements are indicated and described. The main characteristic of solar radiation in Portugal are also presented, namely the spacial distribution of the sunshine and the amounts of direct and diffuse radiation.

Finaly, taking the sun as the dynamical factor of the Earths history, of life and of the environment the situation of the solar radiation within the general framework of the energetics is analysed, pointing out to the solar energy as a hope for the future.

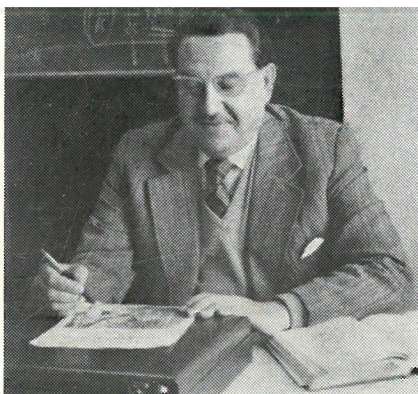
## BIBLIOGRAFIA

- A Radiação Solar e o Sistema Atmosfera-Globo da Terra* — J. Pinto Peixoto, R. Electricidade n.º 20, Lisboa, 1961.
- Noções Fundamentais sobre os Fenómenos da Radiação Solar* — J. Pinto Peixoto, R. Electricidade n.º 20, Lisboa, 1961.
- Solar Radiation* — N. Robinson, Elsevier, Amsterdam, 1966.
- Energy and Power* — A Scientific American Book, W. H. Freeman and Comp., São Francisco, 1971.
- Estimation des Ressources Énergétiques Solaires en France* — C. P. de Brichambaut. Cahiers A. F. D. E. S. Paris, 1975.
- A Radiação Solar no Instituto Geofísico do Infante D. Luís* — Lisboa (em publicação) — Lisboa.
- Boletins Actinométricos do Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica* — Lisboa.
- Anais do Instituto Geofísico do Infante D. Luís da Universidade de Lisboa* — Lisboa.

## AGRADECIMENTOS

O autor agradece aos Drs. José Rocha Faria, Carlos Valente Marques e Eng.º Manuel Bettencourt a ajuda que deram para a realização deste trabalho e as sugestões que foram prestando no decurso da sua elaboração. O Dr. Carlos Marques foi inextinguível na preparação de muitos elementos que figuram nesta publicação.





JOSÉ PINTO PEIXOTO é professor catedrático da Universidade de Lisboa e exerce, actualmente, as funções de Director do Instituto Geofísico do Infante D. Luís. Além das suas funções de professor de Física na Faculdade de Ciências é colaborador do Departamento de Meteorologia do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (M. I. T.) desde 1956. É Presidente da Secção Portuguesa das Uniões Internacionais de Astronomia, Geodesia e Geofísica (S.P.U.I.A.G.G.), Vice-Presidente da Comissão Permanente dos Estudos do Espaço Exterior.

É membro da Academia das Ciências de Lisboa e vogal do Programa Hidrológico Internacional. Perito de renome internacional nos domínios da meteorologia, em particular no que diz respeito ao ciclo da água, tem participado em diversas conferências e congressos internacionais sobre hidrologia.

Publicou numerosos trabalhos em revistas científicas nacionais e estrangeiras e elaborou, a convite da Organização Meteorológica Mundial e da UNESCO, a monografia «Atmospheric Vapour Flux Computations for Hydrological Purposes» (Publicação WMO/IND, n.º 20, Genebra 1973).

Colabora, desde há anos com os organismos da Secretaria de Estado do Urbanismo e Ambiente.