

que o movimento de rotação da Terra faz aparecer a força de Coriolis que actua perpendicularmente à velocidade de transporte. É esta força, que é responsável pelo des'ocamento para ocidente das correntes marinhas e dos ventos alísios que se dirigem para o Equador, quer no hemisfério norte quer no hemisfério sul. Note-se também que a circulação dos ventos em torno dum anticiclone ou duma depressão atmosférica é causada pela força de Coriolis e os seus sentidos são opostos nos dois hemisférios. Também no escoamento de líquidos em recipientes, o mesmo se deverá passar, pelo menos nas condições ideais referidas acima.

Assim, é de supor que um recipiente cuidadosamente preparado para pôr em evidência o escoamento determinado pe'a força de Coriolis, mostre num Liceu da Metrópole o escoamento com rotação para a esquerda e, com

rotação no sentido oposto, quando experimentado num Liceu de Lourenço Marques. Em S. Tomé, praticamente sobre o Equador, o escoamento far-se-ia sem rotação.

A realização, a experimentação e o intercâmbio de recipientes apropriados (com as características indicadas ou outras sugeridas pe'o engenho do experimentador) poderia constituir uma «experiência» interessante.

Agradeço aos colegas que participaram na discussão deste assunto e, em particular, a E. Martinho que indicou alguns livros de texto [1, 2] onde se aborda o problema.

C. MARCIANO

- [1] *Newtonian Mechanics*, A. P. French (1971) (WW Norton & Co, Inc., N. Y.).
- [2] *An Introduction to Physical Oceanography*, William Von Arx (1962) (Addison-Wesley Publ. Co.).

## Do Carvão à Fusão Nuclear e à Energia Solar

por RUI NAMORADO ROSA

### Recursos energéticos e perspectivas globais

Os recursos energéticos ao dispor da humanidade são de duas categorias: fluxos contínuos de energia provenientes de fontes exteriores ao globo terrestre ou do seu próprio interior; energia química, nuclear ou térmica armazenadas na litosfera e nos oceanos.

O fluxo de energia de longe mais importante é a radiação solar ( $1,8 \times 10^{17}$  W) do qual quase 1/4 acciona a circulação geral da água (mas sendo apenas  $3 \times 10^{12}$  W a potência hídrica mundial explorável) e quasi 1/4000 é acumulado quimicamente por via fotosintética. O fluxo global de

energia geotérmica é muito inferior (só  $3 \times 10^{15}$  W) do qual talvez 1/200 apenas será explorável, e menor ainda é a energia das marés ( $3 \times 10^{12}$  W) do qual só 1/50 será acessível à exploração.

Estes valores deverão ser apreciados em face da actual taxa mundial de consumo de energia sob todas as suas formas:  $0,7 \times 10^{15}$  W.

Das diversas fontes de energia armazenada a menos importante é a geotérmica. Seguem-se os combustíveis fosseis —  $0,6 \times 10^{17}$  kWh de carvões e lenhites, mais  $0,7 \times 10^{16}$  kWh de petróleos e gás natural — exauríveis, os primeiros, em poucos séculos e, os últimos, em algumas décadas apenas. Avaliada na escala de

tempo de alguns milénios de história da humanidade a era de exploração e esgotamento de recursos fósseis que hoje vivemos é um acontecimento efêmero de poucos séculos.

As reservas de combustíveis nucleares são suficientemente abundantes para que

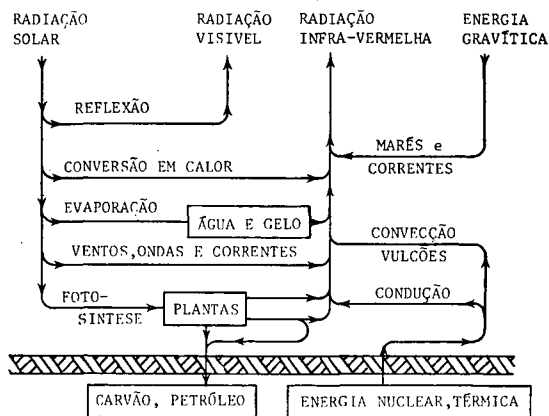


Fig. 1 — Esquema do balanço energético terrestre. Assinalem-se os fluxos contínuos, os processos de conversão e degradação de energia e os reservatórios naturais de energia armazenada.

desempenhem um papel decisivo no abastecimento energético mundial. Requeira-se, porém, o desenvolvimento e a implementação rápida de reactores nucleares reprodutores — por forma a tornar fissionáveis os isótopos férteis de urânio e tório, de longe os mais abundantes isótopos destes dois elementos naturais — o que assegurará as necessidades mundiais por séculos ou alguns milénios até. Da energia nuclear, a energia de fusão nuclear apresenta recursos ainda superiores ou, praticamente, inesgotáveis.

A longo termo, a energia de fusão nuclear e a energia solar acabarão por ter de desempenhar funções chave no abastecimento energético da humanidade.

## Combustíveis fósseis e energia nuclear

Pensando em termos de acessibilidade das fontes de energia logo se assinala que o consumo de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás) e nucleares (urânio, tório, deutério e lítio) implica a destruição permanente da fonte a que se recorre pelo que se é conduzido à comparação das taxas de consumo com as respectivas reservas naturais.

A quantidade de carvão de que se dispõe equivale a cerca de  $0,6 \times 10^{17}$  kWh o que, supondo que a sua taxa de extracção se expanda moderadamente, levará à sua exaustão em 3 ou 4 séculos. 70% das reservas globais localiza-se na Eurásia.

Tal como o carvão, o petróleo e o gás derivam de restos não oxidados de materiais da biosfera e ocorrem, de igual modo, no seio de bacias de rochas sedimentares ou sua imediata vizinhança. Quanto ao petróleo e ao gás as estimativas dão, para o primeiro, uma reserva de  $4 \times 10^{15}$  kWh (incluindo as reservas contidas em areias e depósitos betuminosos) e, para o segundo, uma reserva de  $3 \times 10^{15}$  kWh. Em face do consumo actual ambos estarão esgotados em 40 a 60 anos.

Do que fica dito se apreciará o carácter efêmero da época que se vive hoje no recurso aos combustíveis fósseis como fontes primordiais de energia; e assinala-se o contraste entre o período geológico de 700 milhões de anos ao longo do qual se processou a acumulação dessa energia e o período de poucos séculos da história humana durante o qual se presencia o seu aniquilamento.

A energia de origem nuclear é libertada por dois processos distintos: a cisão de núcleos pesados e a fusão de núcleos leves. Consideremos, em primeiro lugar, a produção de energia por cisão (ou fissão) nuclear, aliás, o único dos dois processos

que está para já desenvolvido e industrializado.

Dos elementos naturais aquele que apresenta secções eficazes e rendimentos mais favoráveis é o urânio. Os reactores nucleares da presente geração consomem o isótopo  $U^{235}$  (0,7% do urânio natural) e apenas uma pequena fracção (menos de 1%) do isótopo  $U^{238}$  (com 99% de abundância). A quantidade de urânio economicamente acessível corresponde a apenas  $2 \times 10^{15}$  kWh e estaria provavelmente

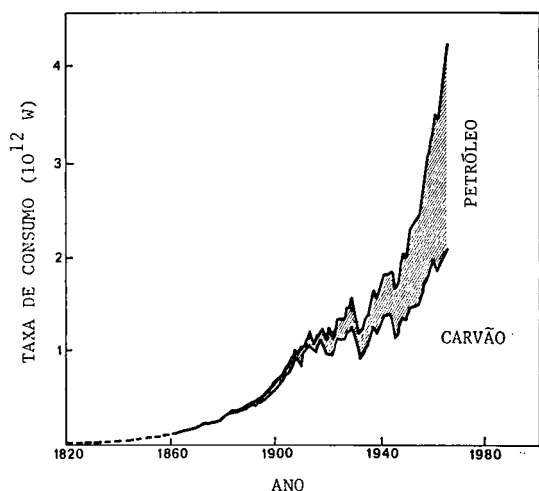


Fig. 2 — Taxa de consumo de combustíveis fósseis — carvão e petróleo — expressa em unidades de potência entre 1860 e 1965.

esgotada em cerca de 20 anos. A próxima geração de reactores nucleares — os reactores reprodutores (ainda em desenvolvimento) — consumirá integralmente o urânio e tório naturais através da conversão dos isótopos férteis destes elementos —  $U^{238}$  e  $Th^{232}$  — em isótopos físséis e sua ulterior cisão. Deste modo o grau de «combustão» do urânio natural será elevado mais de 50 vezes. Assim, também, o custo do combustível se tornará muito reduzido no balanço económico. Combustível de elevado custo de extracção — pre-

sente em baixa concentração em minérios pobres e na água do mar até — mas muito abundante, passará então a ser acessível. A quantidade de combustível nuclear disponível — então extraordinariamente elevada — será limitada, na prática, por critérios económicos apenas. Tais reservas poderão assegurar o abastecimento energético mundial durante séculos ou milénios.

Considere-se, seguidamente, a produção de energia por fusão nuclear. De entre as reacções de fusão a mais acessível do ponto de vista de exigências técnicas e, portanto, aquela que mais proximamente poderá ser explorada é a fusão de  $H^3$  (trítio) com  $H^2$  (deutério). O trítio não ocorre naturalmente e tem de ser produzido a partir de lítio por bombardeamento neutrónico (o que pode ser efectuado no próprio reactor de fusão

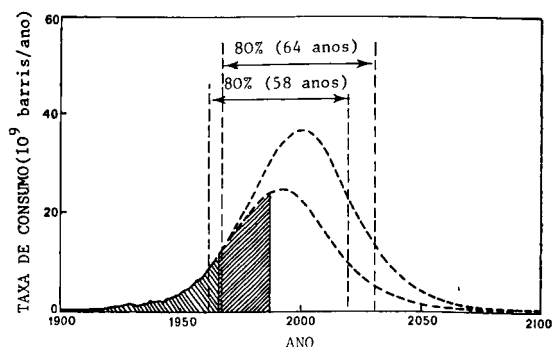


Fig. 3 — Esquema representativo do ciclo completo de consumo mundial de petróleo. Foram utilizadas duas hipóteses razoáveis sobre as reservas globais exploráveis.

nuclear). O deutério, presente na proporção 1:6500 no hidrogénio natural, existe em quantidades praticamente inesgotáveis na hidrosfera. O lítio é pouco abundante na crosta terrestre mas o conteúdo energético da reacção de fusão é tal que as reservas prováveis de minérios de lítio correspondem a cerca de

$2 \times 10^{18}$  kWh. Quando condições técnicas mais severas sejam realizáveis o reactor de fusão nuclear poderá consumir exclusivamente deutério. A disponibilidade de combustível será então praticamente inesgotável e o custo modesto.

### Energia geotérmica, das marés e hídrica

Vamos, agora, referirmo-nos a fontes de energia permanentes, isto é, fluxos de energia que a natureza assegura ao longo de escalas de tempo geológicas ou astronómicas. Tais fontes energéticas há que serem apreciadas do ponto de vista da densidade do seu fluxo e do ponto de vista económico (custos de manutenção e exploração assim como de capital posto na estação captora e conversora de energia; a fonte é obviamente gratuita). Existe, note-se, uma forte correlação entre a densidade do fluxo e o custo de capital; sendo a densidade do fluxo energético em geral muito baixo o custo de capital será, em geral, correspondentemente muito elevado; este o principal óbice que tem retardado o desenvolvimento e a implementação de técnicas de exploração destas fontes de energia.

A energia geotérmica é particularmente acessível em condições geológicas favoráveis. O fluxo convectivo, em áreas vulcânicas, é cerca de  $1,5 \times 10^{11}$  W. A maior estação instalada, em Lardarello (Itália), tem 370 MW de potência. O fluxo condutivo de energia geotérmica, associado ao gradiente natural de temperatura através da crosta terrestre, é uniformemente acessível. Tal fonte de energia, de muito baixa densidade, se efectivamente explorada em larga escala comportar-se-ia como uma fonte de energia armazenada pois que a taxa natural da sua renovação, sendo localmente excedida pela taxa de extracção, a fonte de energia estaria exaurida dentro de um prazo relativa-

mente breve (em talvez 50 anos à potência instalada de 60 GW eléctricos — estimativa elaborada sobre o exame de regiões geologicamente favoráveis).

A energia das marés, explorável em albufeiras, golfos e estuários, está associada à amplitude das marés e à capacidade dos reservatórios naturais. Os recursos acessíveis em condições geográficas favoráveis estimam-se em  $0,6 \times 10^{11}$  W o que corresponde a apenas 2% da dissipação global das marés. A estação de exploração mais notável é a de La Rance (França) com 320 MW instalados.

Outro importante fluxo natural de energia é o que está associado à circulação geral da água; em face do volume de precipitação e da altitude média dos continentes a potência hídrica global estima-se em  $10^{15}$  W da qual cerca de  $1/3$  será praticamente explorável e, desta, apenas  $1/10$  (em Portugal continental já perto de  $1/2$ ) está já sendo correntemente explorada. No contexto mundial, a potência hidroeléctrica contribui com 2,5% da potência total instalada (perto de 80% no nosso país). As regiões mundiais mais ricas em recursos hídricos localizam-se entre as duas faixas tropicais de tal modo que a África e a América do Sul possuem, entre si, 45% desses recursos.

### Energia solar

A densidade de fluxo de energia solar é baixa; o seu valor diurno médio é  $240 \text{ W/m}^2$  à superfície do globo. A continuidade e a intensidade deste fluxo são mais favoráveis entre as latitudes  $\pm 35^\circ$ . Para a produção industrial de energia eléctrica encaram-se como viáveis dois métodos — cujas tecnologias aguardam ainda o seu devido desenvolvimento — (i) captação e conversão via células fotovoltaicas e (ii) captação fototérmica, via superfícies planas selectivas (transparentes).

tes no visível e opacas no infravermelho) ou superfícies focalizantes, seguida de conversão via turbina a vapor. O segundo destes métodos é compatível com a acumulação expedita de energia, na forma de calor, em reservatórios de ligas metálicas ou sais minerais com baixo ponto de fusão e elevado calor latente — o que é um aspecto interessante em face das oscilações diurnas e da irregularidade a que está sujeita a colecção do fluxo de energia solar.

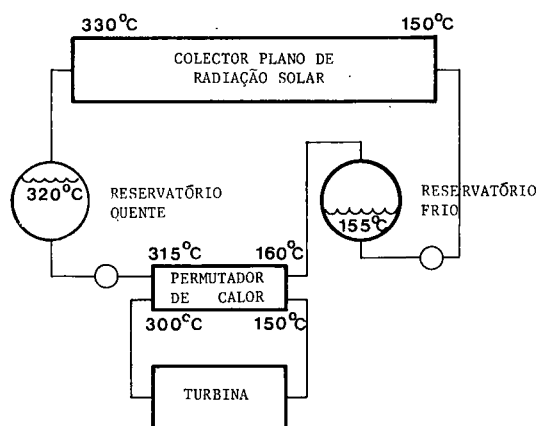


Fig. 4 — Esquema de uma instalação de aproveitamento de energia solar para fins industriais fazendo uso de um coletor plano e de dois reservatórios térmicos.

A utilização da energia solar na produção industrial de electricidade parece ainda remota, em face da tecnologia actual, por incorrer em despesas de capital comparativamente muito elevadas embora a fonte de energia seja em contrapartida gratuita. No entanto, a exploração da energia solar em pequena escala e em regiões remotas ou de ocupação dispersa — condições em que os critérios económicos são secundários ou o investimento de capital é pequeno em valor absoluto ou a extensão da rede de transmissão joga a favor da maior economia da disseminação de pequenas, ainda que relati-

vamente dispendiosas, estações individuais — é não só viável como é já uma realidade em diversos empreendimentos piloto. Entre estes citemos:

(i) Destilação de água salobre ou salgada; instalações de alto rendimento de aproveitamento energético ( $\sim 50\%$ ) em condições de boa insolação ( $\sim 600 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{dia}$ ) produzem cerca de  $5 \text{ l/m}^2 \cdot \text{dia}$  de água destilada; encontram-se plantas piloto em Las Marinas (Espanha), Universidade da Califórnia, etc..

(ii) Conversão em energia mecânica através de um ciclo térmico convencional (o que exige a focalização do fluxo solar para assim obter a elevada temperatura requerida) ou um ciclo térmico de baixa temperatura (com o recurso a simples colectores planos); encontram-se plantas piloto, utilizando o ciclo de baixa temperatura, destinadas ao bombeamento de água do subsolo em zonas tropicais áridas para abastecimento de pequenas comunidades e sua economia agro-pecuária, na Nigéria, Alto-Volta e Mauritânia; tais instalações experimentais comportam uma altura manométrica de 10 a 20 m e um débito de 1 a  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  consoante a potência, ou seja, a área do coletor ( $10 \text{ a } 90 \text{ m}^2$ ).

(iii) Refrigeração para condicionamento de ar e para refrigeração industrial; a Universidade da Flórida tem desenvolvido instalações experimentais as mais avançadas das quais funcionam com um único ciclo térmico de amoníaco; assinala-se a vantagem intrínseca da refrigeração solar: a acção refrigeradora e a sua necessidade estão ambas em fase com a intensidade do fluxo solar.

(iv) Produção de altas temperaturas através de elevada focalização do fluxo solar; as vantagens de tais instalações são as excepcionais temperaturas assim atingíveis e a pureza da fonte calorífica; estes são dois importantes factores na

metalurgia de materiais refractários e de extrema pureza; uma grande planta piloto encontra-se em funcionamento em Mont-Louis (França).

Em face dos exemplos enunciados conclui-se que a energia solar poderá desempenhar um papel relevante no desenvolvimento das regiões tropicais onde se encontra maior grau de insolação e grande disseminação de populações de economia basicamente agro-pecuária. Assinale-se, ainda, que as energias solar e

hídrica se encontram, em termos gerais, geograficamente associadas o que, aliás, tem fundamento geofísico facilmente compreensível. Em regiões de clima temperado-mediterrânico podem esses dois fluxos energéticos naturais considerar-se de algum modo complementares: o verão é seco e insolado ao passo que o inverno é nublado e chuvoso; esta circunstância poderia ser vantajosamente explorada para a produção industrial de energia eléctrica.

## A supercondutividade e o confinamento de plasmas

por J. F. M. AZEVEDO E SILVA

(Laboratório de Física da Faculdade de Ciências de Lisboa)

### 1. Introdução

O objectivo deste artigo é chamar a atenção para alguns aspectos das aplicações dos magnetes supercondutores quando se trate da produção de campos magnéticos intensos e, principalmente, quanto às possibilidades dessas aplicações no confinamento de plasmas. Para isso relembra-se previamente o que se considera necessário sobre supercondutividade e confinamento de plasmas.

Finalmente, aproveita-se para salientar (embora a esse respeito se não faça referência especial no texto) um aspecto curioso do assunto que é o facto de as técnicas das baixas temperaturas poderem, eventualmente, ser utilizadas para resolver problemas da física dos plasmas que envolvem, muitas vezes, temperaturas cinéticas da ordem dos milhões de graus Kelvin.

### 2. Supercondutividade

Denomina-se supercondutividade a propriedade que algumas substâncias podem apresentar quando a sua temperatura desce abaixo duma determinada temperatura crítica,  $T_c$ , (característica da substância e normalmente inferior a  $18^\circ\text{K}$ ) e que consiste, aparte outros efeitos que não nos vão interessar, no facto de a sua resistência óhmica ser praticamente nula. Designaremos tais substâncias por supercondutores, quer estejam ou não abaixo da temperatura crítica.

A temperatura à qual se dá a transição para a fase supercondutora depende (para determinado material) da pressão e do campo magnético exterior sendo, na ausência de qualquer campo magnético exterior, igual a  $T_c$ . Se, pelo contrário, o supercondutor se encontra mergulhado num campo exterior, que pode ser criado