

## Fontes de energia Crescimento exponencial e substituição tecnológica

RUI NAMORADO ROSA

Laboratório de Física e Engenharia Nucleares, Sacavém

*Recordam-se as principais fontes de energia do globo terrestre; a sua maioria corresponde a fluxos permanentes de energia ou a depósitos alimentados por tais fluxos, sendo este sistema basicamente accionado pela radiação solar.*

*A produção mundial de energia revela um crescimento exponencial ao longo de períodos de tempo dilatados, à semelhança do que acontece com a produção das matérias-primas básicas. Com a travagem do crescimento demográfico e com o crescente custo de produção de matérias-primas e de energia, a produção mundial tende a desacelerar-se, o que parece intervir no processo inflacionário da economia (Hubbert, 1974).*

*A experiência da prospecção e desenvolvimento de reservas mostra que as fontes de matérias-primas e de energia tendem a esgotar-se. Nesta perspectiva, é necessário que o progresso tecnológico permita realizar com eficiência cada vez maior os processos de conversão e utilização de energia; todavia, este progresso tem alcance limitado. É também necessário que se proceda à substituição de fontes de energia, à semelhança do que aconteceu no passado por força da competição entre fontes de energia e entre técnicas para o seu aproveitamento mas, agora, por força da limitação dos recursos e correspondente agravamento dos custos de produção. Apresenta-se o modelo de Fisher & Pry (1970) da evolução tecnológica por substituição competitiva. Realça-se a importância deste modelo para a projecção do actual sistema energético para o futuro.*

### OS RECURSOS ENERGÉTICOS

Aquando da formação do planeta terrestre, a adição progressiva de material planetário e a sua sequente compressão gravítica geraram calor que ficou parcialmente conservado no interior do jovem planeta. Com o planeta já formado, o calor de origem radioactiva reiniciou o processo de aquecimento, conduzindo à fusão das camadas intermédias e culminando no colapso destas para o centro do globo. Este colapso libertou ainda mais calor, assim prolongando o processo de aquecimento do planeta, mas, por outro lado, estabilizou o processo de evolução e possibilitou a diferenciação do núcleo, do manto e da crosta. O calor remanescente, armazenado no manto e no núcleo, bem como o calor de origem radioactiva continuamente libertado na crosta, constituem as duas fontes de fluxo de energia interiores ao globo terrestre.

O calor armazenado no interior do globo é responsável pelas correntes de convecção através do manto que produziram a estratificação química do globo assim como os movimentos de deriva dos continentes e a formação das cristas oceânicas. É também a fonte de energia responsável pelos fluxos de calor que atravessam a crosta, quer por condução

generalizada quer por convecção em zonas de fractura, que se denomina calor geotérmico.

Sobre a origem e história geológica do planeta terrestre consulte-se Press & Siever (1974).

O globo terrestre está, por outro lado, sujeito a dois importantes fluxos de energia de origem exterior: a radiação solar e a energia gravítica orbital. O fluxo de energia gravítica deve-se à vizinhança das massas solar e lunar e traduz-se em movimentos oceânicos, designadamente as marés e as correntes oceânicas. A radiação solar (com características próximas da radiação do corpo negro a  $6000^{\circ}\text{K}$ ) incide e atravessa a atmosfera onde é parcialmente absorvida (pelos gases e nuvens), por forma que só cerca de metade do fluxo atinge o nível de solo onde a maior parte fica absorvida. As fracções absorvidas na atmosfera e ao nível do solo vão libertar aí calor e, em consequência, alimentar intensas trocas radiativas entre aqueles dois corpos bem como intensa irradiação para o espaço exterior no infravermelho (com características próximas da radiação do corpo negro a  $300\text{ K}$ ).

A fracção da radiação solar absorvida na atmosfera, que fica disponível, vai então dar aí lugar a fluxos verticais e horizontais (ventos). A fracção disponível da energia absorvida ao nível do solo vai accionar a evapotranspiração da cobertura vegetal e a evaporação das superfícies líquidas ou, simplesmente, aquecer as camadas inferiores de ar e, numa fracção mínima, accionar o processo da fotossíntese nas plantas verdes. As massas de água e gelo continentais, alimentadas por aqueles processos evaporativos, possuem significativa energia gravítica; a biomassa alimentada através da fotossíntese constitui, por seu lado, um substancial reservatório de energia química; um e outro reservatório são inesgotáveis fontes de energia porque alimentados por fluxos permanentes accionados pela radiação solar. Há ainda a registar que a acumulação de biomassa, a sua transformação química em meio redutor e a conservação sob condições favoráveis dos produtos dessa transformação permitiram preservar, até hoje, parte da energia da biomassa que vem sendo produzida desde há mais de 500 milhões de anos; com efeito, é essa a origem dos carvões, dos petróleos, do gás natural e demais produtos fósseis que têm constituído as mais importantes fontes de energia ao serviço do homem desde o início deste século.

As principais fontes de energia do globo terrestre encontram-se representadas na Fig. 1, bem como os fluxos energéticos dominantes por elas accionados e os reservatórios por estes alimentados. Os combustíveis nucleares, embora sendo matérias-primas energéticas ao dispôr do homem, não se incluem aqui por serem exteriores ao sistema de fluxos energéticos do globo.

Os recursos de uma qualquer matéria-prima são classificáveis de dois pontos de vista distintos: consoante o grau de certeza geológica e consoante o custo de extracção. Só aqueles recursos que são reconhecidos

## Quadro 1

### RECURSOS ENERGÉTICOS MUNDIAIS

#### Recursos não renováveis

	Reservas	Consumo	R/C
<i>Tecnologias já adquiridas</i>	10 <sup>3</sup> PJ	10 <sup>3</sup> PJ/ano	ano
Carvão	13 858(1)	70	197
Petróleo	3 957(2)	108	37
Gás natural	1 932(3)	52	38
Urânio	1 020(4)	11	94
<i>Tecnologias a desenvolver</i>			
Xistos betuminosos	19 870(5)	—	—
Areias betuminosas	6 380(6)	—	—
Urânio	98 160(7)	—	—
Tório	41 020(8)	—	—
Lítio	444 000(9)	—	—

#### Recursos renováveis

	Recursos	Consumo	R/C
Energia Solar:	10 <sup>3</sup> PJ/ano	10 <sup>3</sup> PJ/ano	ano
Radiação	3 900 000(10)	—	inesgotáveis
Oceânica térmica	100 000(11)	—	
Oceânica ondulatória	(12)	—	
Biomassa	3 250(13)	(14)	
Eólica	(15)	—	
Hidráulica	300(16)	5	
Energia Geotérmica	293 (17)	—	
Energia das Marés	95(18)	—	

#### NOTAS:

(1) — Reservas recuperáveis (a 3,5 a 8,0kcal/g); recursos totais in situ 18 vezes superiores.

(2) — Reservas provadas recuperáveis (a 10,3kcal/g); recursos finalmente recuperáveis 2 a 20 vezes superiores.

(3) — Reservas provadas recuperáveis (a 10,3kcal/g); recursos recuperáveis restantes 2 a 22 vezes superiores.

(4) — Recursos razoavelmente assegurados de baixo e alto custo (a 150GWh/t, aplicável a reactores LWR e a 0,25% de teor de rejeição do U-235, admitida a reciclagem do U mas não do Pu); recursos adicionais estimados 1100 10<sup>3</sup>PJ.

(5) — Recursos identificados (4370 com 10 a 40% de teor+15 500 com 4 a 10%; poder calorífico médio 10,3kcal/g); recursos hipotéticos 3 vezes superiores e recursos especulativos 112 vezes superiores.

(6) — Estimativa de recursos *in situ* (a 10,3kcal/g).

(7) — Valor energético correspondente aos recursos razoavelmente assegurados (a 14 000GWh/t, aplicável ao ciclo U/Pu em reactores reprodutores).

como certos e cujo custo de extracção é economicamente interessante se qualificam de «reservas». Pois as reservas das principais matérias-primas energéticas encontram-se registadas no Quadro 1. Este Quadro foi construído com base nos dados fornecidos em World Energy Conference (1974).

Quanto aos combustíveis fósseis, é patente o relevo dos carvões no quadro dos combustíveis actualmente aproveitados mas é também de assinalar a importância das rochas betuminosas no quadro dos combustíveis potenciais. Quanto aos combustíveis nucleares, o lítio é de todos o de maior importância energética enquanto é modesta a contribuição do urânio no quadro da actual tecnologia nuclear.

Os recursos renováveis, também incluídos no Quadro 1, correspondem aos fluxos energéticos permanentes accionados pelas fontes de energia atrás descritas. É patente o predomínio dos fluxos que têm a sua origem na energia solar. A radiação solar é, ela própria, o mais importante recurso disponível seguindo-se-lhe a energia oceânica; mas, uma e outra, parecem ser as fontes mais difíceis de controlar. As energias da biomassa, eólica e hídrica, sendo relativamente menos importantes, são mais acessíveis para já. A energia geotérmica, que tem a sua origem no calor remanescente no interior do globo e na radioactividade da crosta, assim como a energia das marés, que tem a sua origem na acção gravítica exercida pelas massas solar e lunar, são de importância relativamente reduzida e, provavelmente, de interesse muito localizado em alguns pontos favoráveis.

---

(8) — Valor energético correspondente aos recursos razoavelmente assegurados (a 14 300GWh/t, aplicável ao ciclo Th/U—233 em reactores reprodutores).

(9) — Recursos terrestres estimados (5 Mt a 25 000GWh/t, aplicável ao ciclo Li/H-3 em reactores term nucleares).

(10) — Radiação solar global ao nível da superfície terrestre (corresponde a 70% da radiação incidente acima da atmosfera: 0,139W/cm<sup>2</sup>); talvez só 0,1% utilizável.

(11) — Correspondente a gradientes térmicos verticais da ordem de 20°/1000 m; talvez só 1% utilizável.

(12) — Não dispomos de um número para o valor global deste recurso o qual será, todavia, muito elevado.

(13) — Correspondente à produção fotossintética global (155Gt/ano de biomassa seca a 5kcal/g de poder calorífico superior); 65% desta produção ocorre sobre os continentes.

(14) — Parte significativa do consumo não é contabilizável por se fazer à margem dos circuitos comerciais; a fracção contabilizável deverá exceder 22 10<sup>3</sup>PJ/ano.

(15) — Não dispomos de um número para o valor global deste recurso; mas a fracção utilizável já foi estimada entre 32 e 630 10<sup>3</sup>PJ/ano.

(16) — Na prática, crê-se que só 16% deste recurso é utilizável em condições médias; a potência total a instalar poderá, então, atingir 3000GW a 50% de factor de carga; só 10% deste potencial é actualmente explorado.

(17) — Compreende um fluxo calorífico de condução estimado em 288 10<sup>3</sup>PJ/ano sobre a área dos continentes (à média de 0,13cal/cm<sup>2</sup>-dia) mais um fluxo convectivo, localizado, estimado em 5 10<sup>3</sup>PJ/ano; talvez só este último seja praticamente utilizável.

(18) — Recurso total; 1/3 dissipa-se em águas de pouca profundidade; só talvez 2% potencialmente utilizável.

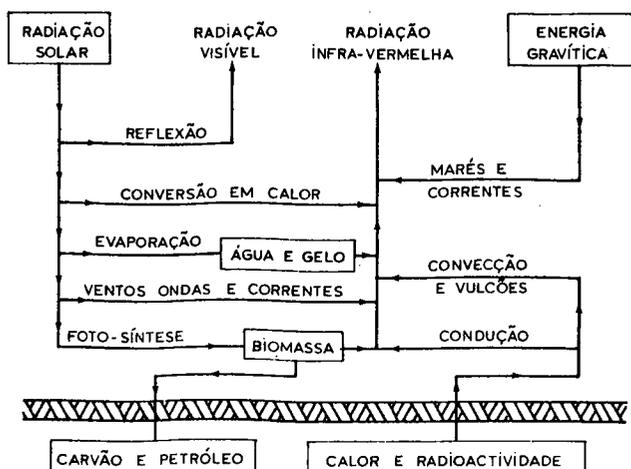


Fig. 1 — Fontes, fluxos e reservatórios de energia do globo terrestre.

## CRESCIMENTO EXPONENCIAL E INFLACÇÃO

A produção mundial de energia revela um crescimento exponencial ao longo de períodos de tempo dilatados. Este facto é ilustrado pela evolução das produções de carvões, petróleo e electricidade registadas nas Fig. 2, 3 e 4. No período de 100 anos que decorreu entre 1860 e 1960, a produção mundial de energia (carvões+petróleo+gás natural+energia hídrica) evoluiu à taxa anual média de 3,25%, tendo excedido 4% no início daquele período para se desacelerar depois. É de crer, porém, que os registos da produção comercial exagerem o crescimento das necessidades de energia até cerca de 1900 pois que, até essa altura, havia-se processado a substituição progressiva da lenha, até então fonte de energia dominante, pelas fontes de energia comerciais. Por outro lado, a evolução da produção comercial subestima as crescentes necessidades de energia após cerca de 1900 pois que, a partir dessa data, foi notável a melhoria de eficiência dos processos de conversão e utilização de energia. Assim, é de crer que, durante este século e fora os períodos de guerra mundial ou recessão económica, as necessidades mundiais de energia terão crescido a mais de 4% ano (ver Cipolla, 1967).

De qualquer modo, é certo que o nível de consumo mundial evoluiu mais rapidamente do que a população. Com efeito, a população mundial cresceu à taxa anual média de 0,7%, de 1850 a 1900, e a cerca de 1%, de 1900 a 1950. Portanto, o consumo «per capita» de energia cresceu a perto de 3%/ano no decurso do último século. Mas não podemos esquecer que o crescimento do consumo foi muito desigual de país para país, de harmonia com a posição de cada um destes dentro do sistema de divisão

internacional do trabalho, daí resultando um nítido desequilíbrio entre os actuais níveis de consumo. Assim, em 1968, os consumos «per capita» eram como se segue (Anónimo, 1971):

Areas	Consumos (tec/habitante)
<i>Economias desenvolvidas de mercado</i> ... ..	5,436
<i>Economias planificadas</i> ... ..	1,550
<i>Países em desenvolvimento</i> ... ..	0,299
<i>Mundo</i> ... ..	1,727

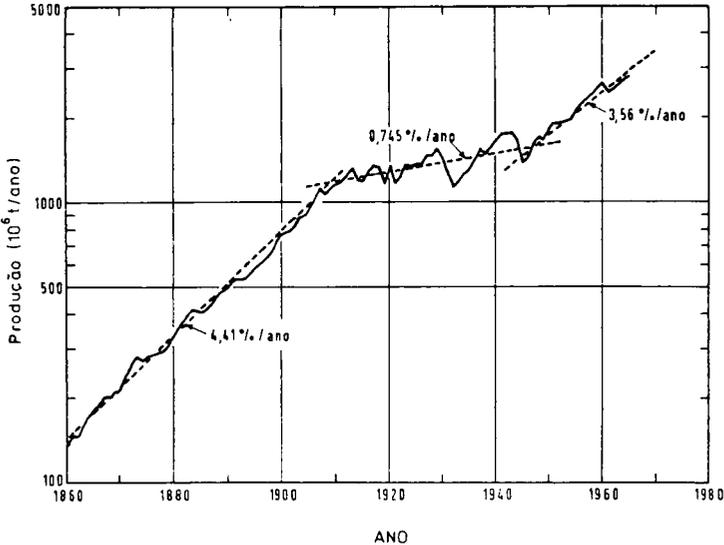


Fig. 2 — Produção mundial de carvão e lenhite no período 1860-1965.

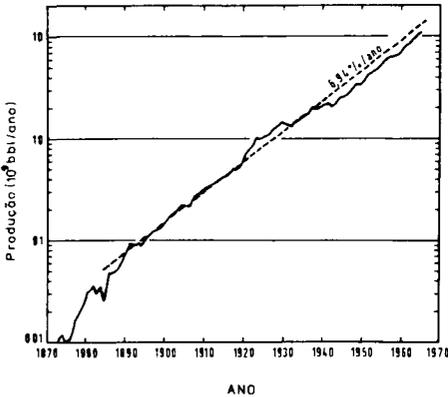


Fig. 3 — Produção mundial de petróleo bruto no período 1870-1965.

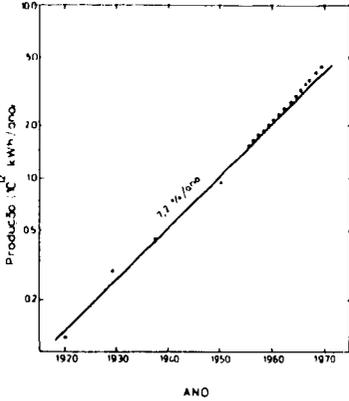


Fig. 4 — Produção mundial de electricidade no período de 1920-1970.

Hubbert (1974) chamou a atenção para a existência de íntima relação entre o crescimento da produção e o processo inflacionário, num país de economia de mercado (E.U.A.). Ele assinalou que, nos E.U.A., o crescimento da produção industrial apresentou uma quebra sensível cerca de 1910, época a partir da qual se verificou o progressivo agravamento do índice de preços ao consumidor. Com efeito, a taxa anual média de crescimento da produção de energia e de matérias-primas básicas apresentou então, quebras a seguir ilustradas:

Produto	Taxa de crescimento (%/ano)	
	1850-1910	1910-1970
Carvão ... ..	6,58	0,00
Energia térmica ... ..	6,91	1,77
Ferro (barra) ... ..	7,69	1,89

ao passo que a taxa de crescimento no índice de preços passou de 0 para perto de 3%/ano. Hubbert assinalou, também, que durante o século XIX, nos E.U.A., tanto a taxa de crescimento da produção industrial como a taxa de juro no mercado financeiro foram vizinhos de 7%/ano, isto é, o volume de bens industriais e o volume monetário cresceram em paralelo. A partir de 1900, porém, a taxa de crescimento da produção baixou para perto de 2%/ano enquanto a taxa de juro permaneceu em perto de 7%/ano, daí resultando um desequilíbrio entre a produção industrial e o crescimento do mercado financeiro traduzido numa taxa de inflação, inicialmente situada em cerca de 5%/ano, que, desde então, vem subsistindo.

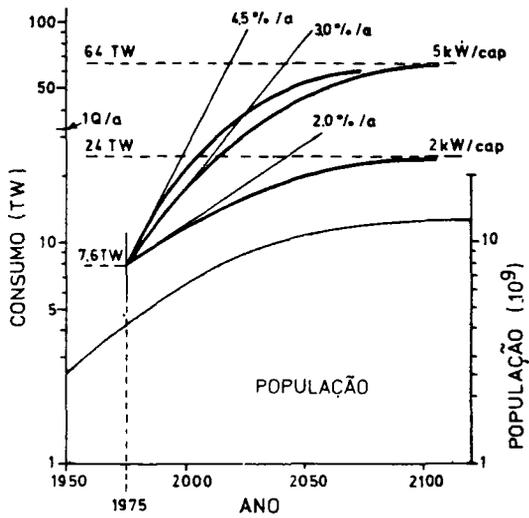


Fig. 5 — Projecção da evolução da população mundial e do consumo mundial de energia, desde a actualidade até ao ano 2100, para diferentes hipóteses de taxa anual de crescimento inicial, bem como de capitação limite.

As condições são actualmente favoráveis ao refreamento da produção à escala mundial e à repetição do processo inflacionário generalizado, enquanto se mantiverem as premissas da economia de mercado. Na verdade, embora o crescimento da população mundial seja agora tão rápido como nunca (a 2%/ano), é de crer que entre em franca estabilização nas próximas décadas, à semelhança do que já hoje se verifica nos países mais industrializados. Por outro lado, o agravamento do custo de produção das matérias-primas essenciais que, à parte factores políticos, se radica no progressivo esgotamento das fontes mais acessíveis ou de mais alto teor conduzirá, mais cedo ou mais tarde, à estabilização das capitações dos consumos de bens essenciais, ainda que a níveis superiores aos actuais (se contemplarmos a elevação do nível de vida nos países em desenvolvimento). Em síntese, é previsível a desaceleração e a estabilização da produção industrial mundial no decorrer do próximo século, como acontecerá, em particular, com o consumo de energia, cujo crescimento está ilustrado na Fig. 5. Esta desaceleração agravaria o processo inflacionário nas economias de mercado, como mostrou Hubbert.

#### ESGOTAMENTO DE RECURSOS

A experiência mostra que o ritmo de detecção de novas reservas de uma qualquer matéria-prima decresce exponencialmente, à parte flutuações no curto termo, com o trabalho de prospecção acumulado (aferido em km de sondagens, por exemplo). Em consequência, as reservas acumuladas seguem uma curva de configuração «logística» que tende para um limite finito  $Q_0$

$$Q = Q_0 (1 - \exp. (-ks))$$

onde  $Q$  designa o volume de reservas detectadas quando seja  $s$  o trabalho de prospecção entretanto acumulado. Esta lei reflecte, obviamente, a limitação dos recursos de uma qualquer matéria-prima mineral. Ela implica que, quando o crescimento da produção seja exponencial, a taxa de crescimento deva, mais cedo ou mais tarde, anular-se e o próprio ritmo de produção deva, eventualmente, anular-se também. Poderá pois falar-se, com propriedade, de um ciclo de produção para cada matéria-prima mineral, como ilustrado na Fig. 6 pelo exemplo da produção de petróleo bruto nos E.U.A.. Hubbert (1974) chamou a atenção tanto para a evolução logística da curva de desenvolvimento de reservas como para o refreamento do crescimento da produção do petróleo bruto nos E.U.A., país onde a prospecção e a exploração desta matéria-prima decorrem intensamente desde longa data e onde, por conseguinte, é de esperar serem mais visíveis e imediatos os efeitos da exaustão dos recursos.

A evolução a longo termo do custo de produção de bens industriais revela uma nítida tendência decrescente. A análise dos resultados revela uma lei geral segundo a qual o custo de produção (a preços constantes) é

reduzido de uma percentagem constante cada vez que duplica a produção acumulada. Esta lei pode exprimir-se matematicamente na forma:

$$P = P_0 \left( \frac{Q_0}{Q} \right)^\beta$$

onde  $P$  designa o custo de produção e  $Q$  o volume da produção entretanto acumulada; o coeficiente  $\beta$  depende, naturalmente, da indústria e do produto considerados. As «curvas de experiência» de numerosas indústrias, tal como a referente à produção de petróleo bruto nos E.U.A. (ver Fig. 7), revelam justamente este tipo de evolução. Porém, quando se trate de uma matéria-prima mineral, susceptível de esgotamento, este quadro complicar-se-á, mais cedo ou mais tarde. Haverá então que tomar em consideração o agravamento do custo de produção com o acréscimo do trabalho de extracção requerido pelos recursos mais inacessíveis e só marginalmente económicos. Embora aqui não nos possamos basear em experiência passada que chegue, podemos admitir (segundo Fisher, 1974), que o custo de produção virá afectado, para além do decréscimo percentual relativo à curva de experiência da produção, de um acréscimo progressivo variando com o inverso da fracção remanescente do recurso inicial. Em termos matemáticos:

$$P = P_0 \frac{Q_0}{Q_0 - Q}$$

É este agravamento do custo real de produção de matérias-primas básicas, radicado no esgotamento progressivo dos recursos mais acessíveis, que constitui o já referido factor concorrente para o processo inflacionário da economia de mercado.

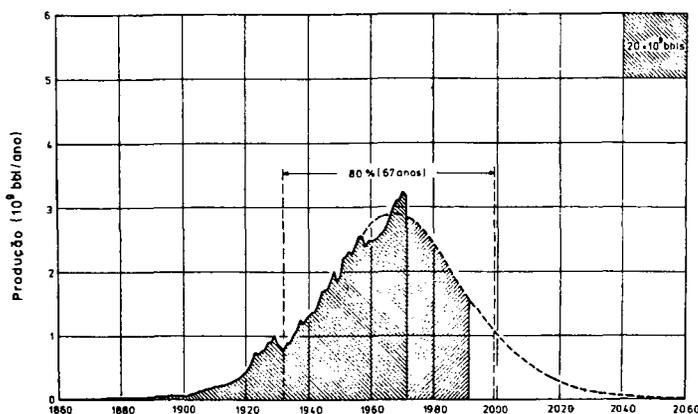


Fig. 6 — Ciclo de produção de petróleo bruto nos E.U.A. desde o início da sua exploração, cerca de 1860, até ao seu esgotamento, cerca de 2060, na hipótese de atingirem  $180 \cdot 10^9$  bbl as reservas finalmente recuperáveis. Distinguir as áreas correspondentes à produção já acumulada, às reservas «in loco» (que assegurarão a produção no período 1973 a 1993) e as reservas ainda por detectar (estimadas em menos de  $30 \cdot 10^9$  bbl). Fonte: Hubbert (1974).

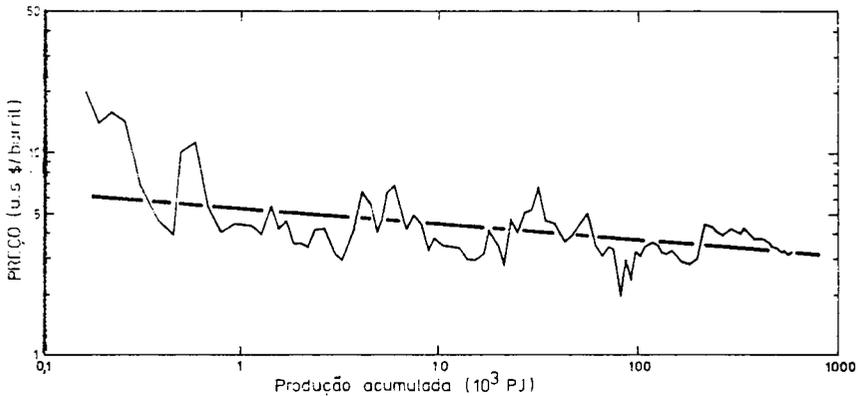


Fig. 7 — Curva de experiência de produção do petróleo bruto à boca do poço, nos E.U.A., no período de 1869 a 1971 (a preços constantes, na base de 1970-US\$). Fonte: Fisher (1974).

## AVANÇO E SUBSTITUIÇÃO TECNOLÓGICA

Na perspectiva do esgotamento de recursos naturais economicamente mais interessantes e do agravamento progressivo dos custos de produção, afigura-se necessário que a evolução tecnológica permita realizar com eficiência cada vez maior os processos de conversão e utilização de energia; todavia, este progresso tem um alcance limitado. Se tomarmos como exemplo as máquinas térmicas que realizam a conversão de calor em energia motriz, verificamos que a sua eficiência evoluiu espetacularmente desde 1700, quando era apenas 1%, até aos nossos dias, quando atinge já mais de 40%. A evolução da eficiência das máquinas térmicas encontra-se registada na Fig. 8 sendo de assinalar que a lei de variação é da forma

$$\frac{\eta}{1-\eta} = k \exp \alpha t.$$

A regularidade com que esta lei é obedecida ao longo de perto de 300 anos permite ousar prever a evolução da eficiência técnica das máquinas térmicas e vaticinar alguma grande inovação neste domínio. Depois da turbina a vapor de alta temperatura e da turbina a gás, que possibilitaram a ultrapassagem da barreira dos 40%, é previsível que a conversão magnetohidrodinâmica possa concretizar um novo salto em frente. Mas, se pensarmos que as temperaturas de funcionamento estão limitadas pela resistência dos materiais e que as eficiências teóricas não podem ser plenamente atingidas, temos que reconhecer que as eficiências hoje atingidas já não poderão ser dramaticamente ultrapassadas e que o avanço tecnológico previsível neste domínio não irá transformar qualitativamente a situação de penúria de matérias-primas energéticas que se avizinha.

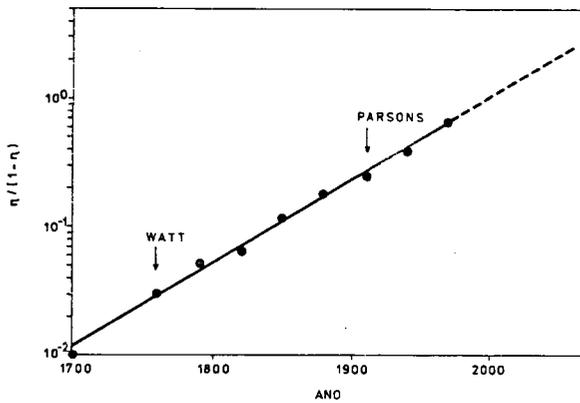


Fig. 8 — Evolução da eficiência de máquinas térmicas de conversão de energia desde 1700 até à actualidade.

Face à limitação dos recursos naturais e aos progressivo agravamento dos custos de produção das matérias-primas e, ainda, dado o alcance limitado da evolução tecnológica dos processos de conversão e utilização de energia, é necessária a substituição das fontes de energia convencionais, à semelhança do que aconteceu no passado por força da competição entre fontes alternativas e entre as técnicas do respectivo aproveitamento.

A Fig. 9 regista a evolução das fracções do mercado mundial de matérias-primas energéticas detidas pelas diversas fontes de energia, ao longo de mais de 150 anos, desde 1820 até 1975. É de assinalar a notável regularidade da evolução a longo termo das fracções ocupadas pelas diversas fontes, à semelhança do que também se verifica com os registos relativos a países e a áreas económicas suficientemente amplos. É de notar que a progressão e a sequente regressão da fracção detida por uma dada fonte é perfeitamente previsível em face do andamento das fracções detidas pelas restantes fontes, já que  $\sum F = 1$ , como está ilustrado na Fig. 10 relativa à recente involução do consumo de petróleo nos EUA (Marchetti, 1977).

A regularidade da evolução das fracções de mercado ocupadas por diversos produtos ou tecnologias alternativas é um fenómeno muito geral para que foi chamada a atenção e foi estudado por Fisher & Pry (1970). Estes autores propuseram um modelo de mudança tecnológica por substituição competitiva fundamentado nas seguintes premissas:

i — Muitas evoluções tecnológicas podem ser consideradas como substituições competitivas de um modo de satisfação de uma necessidade por um outro modo.

ii — Se um dado modo de satisfação de uma necessidade progredir para além de alguns %, então ele progredirá até completa substituição do modo anterior.

iii — A taxa de variação relativa da fracção que uma dada tecnologia representa entre os vários modos de satisfação de certa necessidade é proporcional à fracção que resta por substituir.

Esta última premissa é análoga à lei de Pearl (1925) para a evolução de populações biológicas e pode exprimir-se matematicamente na forma:

$$\frac{1}{F} \frac{dF}{dt} = 2\alpha (1-F)$$

donde

$$\frac{F}{1-F} = \exp. 2\alpha (t-t_0)$$

sendo:  $F(t-t_0) = 50\%$ ;  $\alpha = 2,2/\Delta t$ ;  $\Delta t = (F=90\%) - t(F=10\%)$ .

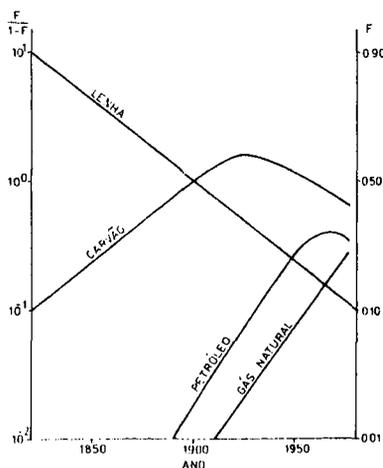


Fig. 9 — Evolução do mercado mundial das matérias-primas energéticas desde 1820 a 1975.

A aplicação deste modelo a algumas substituições tecnológicas num mesmo país (EUA) e a uma mesma substituição tecnológica em alguns países, encontra-se ilustrada nas Figs. 11 e 12. É notável o rigor com que o modelo descreve estas realidades. No Quadro 2 registam-se as datas e os períodos de substituição relativos a diversos exemplos de mudança tecnológica nos EUA.

É claro que este modelo, cuja fundamentação se radica na sua verificação experimental em face dos registos de evolução histórica dos mercados de produtos e de técnicas, tem em si implícito um complexo tecido de fenómenos sócios-económicos cuja análise não está feita, tanto quanto sabemos, e que ultrapassa o objectivo e o âmbito do presente trabalho.

Registe-se que os períodos de substituição são geralmente dilatados (mais de 40 anos) embora possam ser substancialmente mais curtos. É aparente uma ligeira aceleração dos mecanismos de substituição tecnológica ao longo do tempo, o que é certamente consequência da revolução científica e técnica, caracterizada pela integração progressiva da ciência no próprio processo produtivo e, em particular, pela aceleração da aplicação ao processo produtivo das descobertas científicas.

## Quadro 2

### ALGUNS EXEMPLOS DE SUBSTITUIÇÃO TECNOLÓGICA NOS E.U.A.

Tempos de substituição  $\Delta t$  e pontos de substituição  $t_0$

	$\Delta t$ (ano)	$t_0$ (ano)
Borracha: sintética/ natural	58	1946
Fibra: sintética/ natural	58	1969
Plástico/ cabedal	57	1957
Margarina/ manteiga	56	1957
Aço especial: arco eléctrico/forno aberto	47	1947
Tinta de água/ tinta de óleo	43	1967
Aço: forno aberto/ Bessemer	42	1907
Terebentina: sulfato/ incisão	42	1959
Pigmentos: $TiO_2$ / $PbO-ZnO$	26	1949
Pavimentos: plástico/ madeira	25	1966
Casco de barcos de recreio: plástico/ outro	20	1966
Insecticidas: orgânico/ inorgânico	19	1946
Fibra de borracha: sintética/ natural	17,5	1948
Carros: plástico/ metal	16	1981
Aço: BOF/ forno aberto	10,5	1968
Sabão: detergente/ natural	8,75	1951

Fonte: Fisher & Pry (1970)

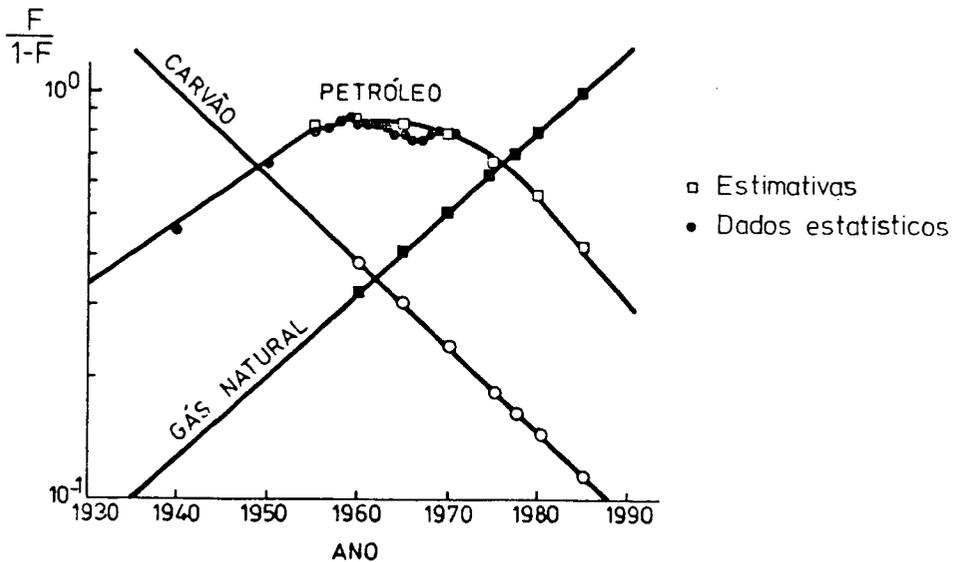


Fig. 10 — Evolução do mercado das matérias-primas energéticas, nos E.U.A, mostrando a regressão do petróleo. Com base no comportamento anterior a 1935, é possível prever a fracção do mercado detida pelo petróleo, em 1970, com uma precisão melhor do que 1%. Fonte: Marchetti (1977).

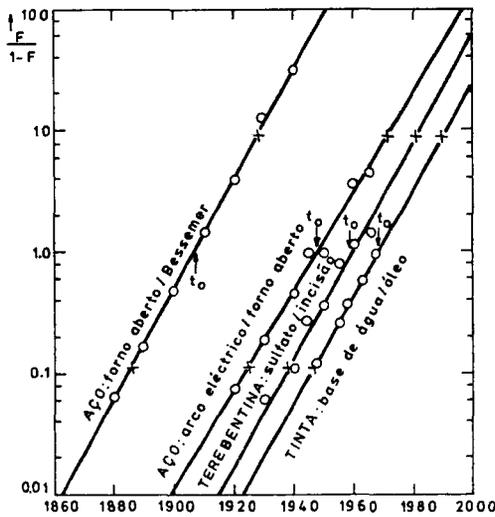


Fig. 11

Fig. 11 — Exemplos da evolução de algumas técnicas ou produtos em substituição competitiva, nos E.U.A.. Fonte: Fisher & Pry (1970).

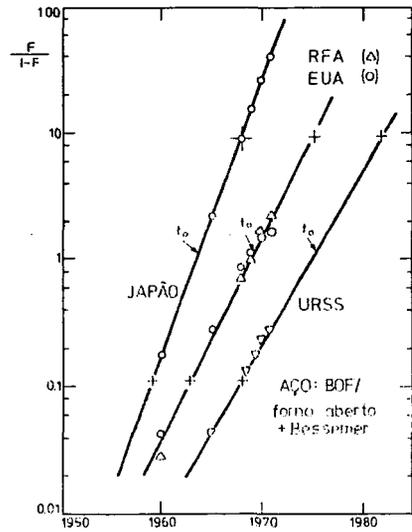


Fig. 12

Fig. 12 — Exemplos de uma mesma substituição competitiva em diferentes espaços económicos.

O modelo Fisher & Pry aplica-se igualmente bem em países de economia planificada como em países de economia de mercado. Fonte: Marchetti (1977).

A aplicação do modelo de Fisher & Pry à substituição de fontes de energia permite-nos afirmar que, em plena regressão da fracção do mercado detida pelo carvão, já iniciada a regressão do petróleo e na eminência da regressão do gás natural, exige-se a curto prazo uma nova fonte alternativa da energia. A apreciação do quadro das fontes de energia ao nosso dispor (recordar o Quadro 1) permite apontar como alternativas o carvão (a ser eventualmente aproveitado segundo tecnologias não convencionais), as rochas betuminosas, a energia nuclear (a ser aproveitada segundo as tecnologias dos conversores avançados e dos reprodutores), a fusão termo-nuclear e a energia solar (a ser aproveitada nas suas formas não convencionais). Todavia, o modelo de Fisher & Pry obriga-nos a reconhecer, também, que os períodos de substituição das fontes de energia são muito dilatados; os períodos necessários à evolução de 1 a 50% (ou de 10 a 90%) da fracção do mercado detida por uma dada fonte são, segundo as evoluções até agora registadas, os seguintes:

Matéria-prima	Período de substituição (ano)
Lenha	150
Carvão	150
Petróleo	80
Gás natural	90

Assim, as projecções que se façam dos consumos das diversas fontes de energia não poderão deixar de reflectir a muito lenta evolução das diversas fontes e, em particular, a muito lenta progressão das novas fontes que se queiram considerar. Por outro lado, pensamos poder afirmar, na actual fase de regressão geral das fontes convencionais, que não será viável, a curto prazo, qualquer expansão sensível do actual nível de consumo mundial e que será necessário recorrer, simultaneamente, a mais do que uma só fonte não convencional para que seja assegurado o actual nível de consumo ou a sua eventual expansão.

Anónimo. 1971. *World Energy Requirement and Resources in the Year 2000*. IV U. N. Int. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva 6-16 September 1971, Doc. A/Conf. 49/p/420. Vienna: IAEA.

Cipolla, C. M. 1967. *The Economic History of World Population*, a Pelican Original. Harmondsworth (Middlesex): Penguin Books.

Fisher, J.C. 1974. *Energy Crises in Perspective*. New York: John Wiley & Sons.

Fisher, J.C. & R.H. Pry. 1970. *A Simple Substitution Model of Technological Change*. Technical Information Series. Report 70-C-215, General Electric Company, Research and Development Center, Schenectady, New York.

Hubbert, M.K. 1974. *Essay on Exponential Growth, the Interest Rate and Inflation*, Statement to the Subcommittee on the Environment of the Committee on Interior and Insular Affairs, House of Representatives, United States XCIII Congress.

Marchetti, C. 1977. *Technological Forecasting and Social Change* 10, 345-356.

Press, F. & Siever, R. 1974. *Earth*. San Francisco: W.H. Freeman and Company. Part. I.

World Energy Conference, 1974. *World Energy Conference Survey of Energy Resources*. New York: US National Committee of the WEC.