

O crescimento demográfico, a inovação técnica, a substituição e diversificação de “fontes primárias” de energia, a diversificação de vectores energéticos, a multiplicação das utilizações de “energia final”, a omnipresença de “máquinas” e a integração económica mundial, são conducentes à intensificação da utilização de energia que suporta o “crescimento económico”. Será este sustentável?

A génese dos hidrocarbonetos é conhecida e o conhecimento dos seus recursos é quase exaustivo. São finitos e escassos. Os recursos mais “acessíveis” foram explorados primeiro, o “custo energético” de extracção cresce e a sua “disponibilidade” diminui: obter energia fóssil requer cada vez mais energia. Há um limite para a quantidade disponível: quando o custo em energia dispendida igualar o benefício em energia recolhida. A eficiência energética de extracção é uma medida física útil para abordar este problema.

RUI NAMORADO ROSA

Centro de Geofísica de Évora, Universidade de Évora
R. Romão Ramalho, 59
7000 Évora

Instituto Superior Técnico e Association for the Study
of Peak Oil and Gas

rosa@uevora.pt

OS COMBUSTÍV O PROBLEMA D

SUBSTITUIÇÃO DE MATÉRIAS-PRIMAS

A energia é crucial para todas as economias. O ferro pode substituir o cobre, o alumínio pode substituir o ferro ou o cobre, o ferro pode substituir a madeira, o betão pode substituir o ferro, o titânio pode substituir o alumínio, com eventuais constrangimentos ou até grandes vantagens. Mas energia só pode ser substituída por energia, eventualmente de outra origem, mas por opção ou por constrangimento? Com vantagem ou desvantagem?

A captação ou extracção de uma fonte de energia primária é uma actividade económica que ela própria consome recursos, e em particular energia. Por cada barril de petróleo investido no Golfo Pérsico podem ser extraídos, refinados e transportados trinta ou mais barris. O retorno, no caso de extracção de hidrocarbonetos a partir de areias betuminosas e xistos asfálticos, é próximo de 2 ou 3; essa extracção implica enorme mobilização de energia (actualmente gás natural) e de massa (desmonte de rochas e consumo de caudais de água) para obter quantidades relativamente modestas de energia útil. A evolução para fontes ou tecnologias de menor retorno energético implica

OS PELOS FÓSSIS - O PEAK OIL

a redução da energia efectivamente disponível para as restantes actividades e/ou o aumento do investimento e a diminuição da rentabilidade do sector energético.

A progressiva escassez dos hidrocarbonetos (petróleo e gás natural), que representam dois terços do aprovisionamento mundial de energia, é assunto que preocupa um número cada vez maior de cientistas, políticos e cidadãos.

HIDROCARBONETOS CONVENCIONAIS A CAMINHO DA EXAUSTÃO

Os sinais de alarme vão-se acumulando. A experiência industrial dos vários países produtores de petróleo tem revelado que a sua capacidade de produção atinge o respectivo máximo cerca de 25 a 40 anos após a ocorrência da taxa máxima de descoberta de reservas nos seus depósitos petrolíferos (esta variabilidade depende de factores geológicos, mas também de factores económicos e políticos). Essa observação tem-se repetido consecutivamente na larga maioria dos países produtores. Nos EUA a curva de produção exibiu o seu pico em 1971, na Indonésia em

1977 (e de novo em 1997, pois neste país tiveram lugar duas vagas de prospecção e dois picos distintos de descobertas), no Egipto em 1994, no Reino Unido em 1999, na Noruega em 2001, na Rússia em 1988 (prevendo-se um pico secundário em 2009, neste caso porque o “normal” curso da curva de produção foi distorcido por factores político-económicos), na China prevê-se que ocorra já em 2009. O lote de países que seguramente ainda não atingiram o pico da respectiva curva de produção é um pelotão já reduzido a apenas oito: Arábia Saudita, Iraque, Abu-Dhabi, Cazaquistão, Azerbeijão, Uzbequistão, Líbia e Bolívia. E se constataremos que o pico de descobertas, no plano mundial, se centrou na década de 1960, poderemos antecipar que o correspondente pico da produção poderá provavelmente ocorrer na primeira década do novo século.

Outro sinal de alarme tem a ver com o desempenho dos maiores campos petrolíferos. Quase metade da produção mundial é assegurada pelos 120 maiores campos petrolíferos. Destes, os catorze maiores (super-gigantes, com capacidade superior a 500 000 barris/dia) asseguram, só por si, 20% da produção mundial. Ora a descoberta de campos gigantes vem diminuindo em número e dimensão desde a remota década de 1950; o último super-gigante foi descoberto nos anos 1980. A larga maioria está envelhecida e muitos deles entraram já em franco declínio de produção; os maiores dos maiores, Gawar na Arábia Saudita, Burgan no Kuwait e Cantarel no México, depois de largas dezenas de anos de elevada produtividade, entraram em declínio, não obstante os esforços de produção assistida. Uma consequência desse envelhecimento e diminuição é a necessidade de incrementar a produção, requerida pelo crescimento da procura, por recurso à exploração de uma multidão cada vez mais numerosa de milhares de depósitos menores e cada vez mais pequenos, com acrescidos custos económicos e energéticos.

Outro sinal de alarme reside indiscutivelmente no facto de a taxa de extracção de petróleo manter ainda tendência ascendente, mas a taxa de descoberta de novas reservas exibir tendência descendente, com saldo consistentemente negativo desde 1980. Estamos a consumi-lo ao ritmo de 25 biliões de barris/ano (25 Gb/ano), enquanto o ritmo de descoberta se reduziu já a apenas 5 Gb/ano. Entrámos decisivamente num período em que exaurimos um *stock* definitivamente limitado (Fig. 1).

Finalmente falemos de reservas estimadas. As estimativas das últimas reservas recuperáveis (URR) a nível mundial são variáveis consoante os autores, mas o intervalo em que se situam mantém-se estável ao longo das últimas dezenas de anos; segundo a ASPO, esse montante estará próximo de 2000 biliões de barris (2000 Gb). Já não são de esperar surpresas, não obstante, ou justamente, por causa dos notáveis progressos realizados, quer na prospecção quer na

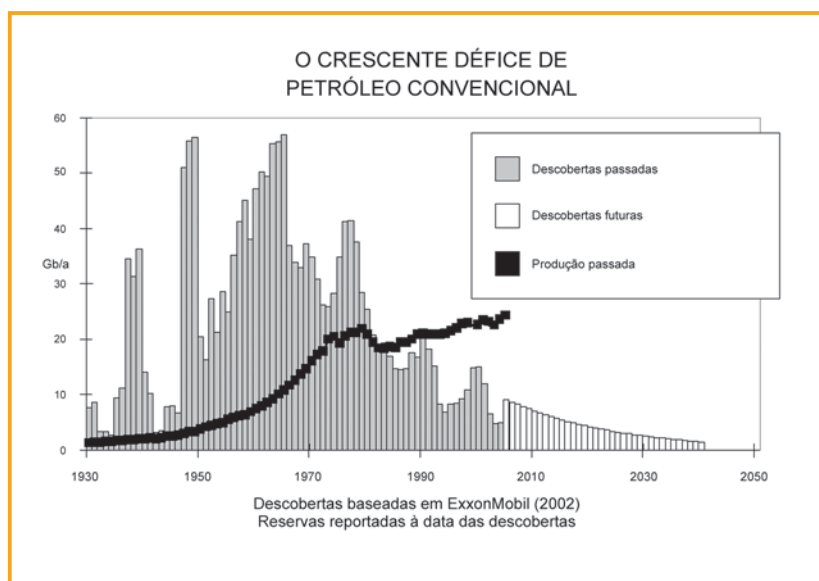


Fig. 1 - Descobertas e produção: o crescente défice de petróleo convencional.

exploração. E é por isso que se pode afirmar com segurança que estaremos (a nível mundial) próximo do ponto em que a quantidade de petróleo convencional já extraído e queimado (cerca de 945 Gb) é aproximadamente igual à quantidade de petróleo recuperável ainda preservado nas reservas remanescentes. A dúvida sobre se tal ocorrerá alguns anos mais cedo ou mais tarde é irrelevante e até não concretamente observável; o fundamental é a mudança da tendência que se avizinha, se não é que estamos a atravessá-la justamente agora.

SUBSTITUIÇÃO DE FONTES DE ENERGIA PRIMÁRIA

As repercussões económicas dessa transição poderão revelar-se (ou estarão a revelar-se já) determinantes no funcionamento da esfera sócio-económica. Sendo a energia um factor de produção cuja real produtividade é muito superior à respectiva contribuição na estrutura de preços dos factores, a disponibilidade de energia, independentemente do seu custo monetário, será determinante para a possibilidade de crescimento económico (numa métrica física).

Então, a escassez de uma determinada fonte de energia primária requer a sua substituição por outras fontes, de forma que a disponibilidade de energia não se torne em factor limitativo da produção. Cerca de 1880, as duas fontes de energia primária dominantes no plano mundial eram a biomassa (lenha) e o carvão mineral, em iguais proporções, a primeira em tendência descendente e o segundo ascendente; a energia solar, eólica e hídrica mantinham a sua histórica importância, que porém se tornara relativamente menor; o acelerado crescimento da produção suportava-se no consumo do carvão mineral, parte intrínseca da revolução industrial. Também, por essa época, o petróleo iniciava, nos EUA, o seu ciclo de vida como combustível de

futuro. Mais de um século volvido, no final do século XX, cinco fontes primárias asseguravam contribuições importantes e em boa medida especializadas no aprovisionamento mundial de energia: o petróleo com 40%, o gás natural e o carvão com cerca de 25% cada (mas com tendências contrárias, ascendente o primeiro, descendente o segundo), a fracção restante sendo assegurada pelas energias nuclear e hídrica (ambas na produção eléctrica).

Porém, as diversas fontes de energia não são equivalentes e, portanto, as respectivas substituições não são física e economicamente indiferentes. O petróleo substituiu o carvão não por exaustão do carvão; o gás natural, que em regra acompanha geologicamente o petróleo, começou por ser negligenciado, até passar a ser recuperado nas regiões onde escasseou o petróleo. O petróleo é, como líquido, facilmente armazenável, transportável e destilável, uma matéria-prima energética e química incomparável. Poderá ser substituído do ponto de vista de poder calorífico mas não o será no conjunto das suas propriedades superiores. Em particular, o petróleo é a mais eficaz fonte de combustíveis líquidos, universalmente utilizados em motores de combustão interna, quer em aplicações fixas quer sobretudo em aplicações móveis, com destacada predominância nos sectores de transportes aéreo, marítimo e terrestre. Por esta via o petróleo está omnipresente e tem uma importância imediata e determinante no comércio a todos os seus níveis de integração económica.

Daí que seja necessário e se assista a um esforço no sentido de diversificar as origens de hidrocarbonetos líquidos, para além do petróleo “convencional” que goza de baixa viscosidade e se encontra acumulado em rochas relativamente porosas e permeáveis. Segundo as avaliações da ASPO regularmente actualizadas, estamos a atravessar o pico mundial da capacidade de extracção de petróleo convencio-

nal. A pressão da procura exige investimento na extracção de outros hidrocarbonetos líquidos, menos acessíveis ou de menor qualidade. De entre estas contribuições não convencionais, a mais apreciável vem, e prevê-se que continue a vir, sobretudo dos líquidos que acompanham o gás natural e condensam aquando da sua extracção. Outras “fronteiras” de extracção de petróleo não convencional são o “petróleo polar” (depósitos a latitude superior ao círculo polar ártico), o “petróleo de águas profundas” (depósitos no *offshore* em fundos marinhos a profundidade superior a 500 metros, Fig. 2), o “petróleo pesado” (de elevadas densidade e viscosidade) e os “asfaltos” e “betumes” (correspondentes a fases geologicamente anteriores ou posteriores à formação de petróleo).

Os petróleos polar e de águas profundas exigem soluções técnicas sofisticadas e implicam pesados investimentos e custos de exploração; por isso, só depósitos de média ou grande dimensão justificam ser explorados. O aproveitamento de depósitos de petróleo pesado, de areias betuminosas ou de xistos asfálticos requer igualmente soluções técnicas complicadas e pesados investimentos; são tipicamente casos de baixo retorno de energia por energia investida na extracção; existem alguns grandes depósitos (Orinoco, na Venezuela, Athabasca, no Canadá e Green River, nos EUA), cuja taxa de recuperação é reconhecidamente baixa e que comportam impactos ambientais importantes.

ENERGIA E CRESCIMENTO ECONÓMICO

A econosfera, o conjunto das instituições e processos sociais de elaboração material, é um sistema aberto no seio da geosfera natural. Toda a actividade económica implica transformação material e decorre no seio da natureza,

sujeita às suas leis naturais. A civilização pré-industrial e o arranque da revolução industrial apoiaram-se inteiramente em fluxos directos de energia solar (ou indirectos, que suportam *stocks* renováveis como florestas e pesqueiros). O valor histórico da terra (solo) é atribuível à sua capacidade para captar e converter os fluxos naturais de energia e massa (mormente os ciclos do carbono e da água) accionados pelo fluxo primário de radiação solar.

Obter energia implica trabalho, ou seja dispêndio de energia. A relação entre energia obtida e energia dispendida, tem um significado primordial na base material de todas as sociedades e dita a sua sustentabilidade e a habilidade para o seu crescimento. Nas sociedades pré-industriais o trabalho somático do homem (e dos animais de trabalho domesticados), aplicado ao solo (e dadas as disponibilidades dos factores sol e água), deveria produzir alimentos suficientes para sustentar esse ciclo de realimentação, sem o que a fome poria em risco a sobrevivência da população e a estabilidade da sua estrutura. Nas sociedades industriais avançadas a intensidade de utilização de energia externa é dezenas de vezes a capacidade de realização de trabalho somático, até mesmo na agricultura, mas sobretudo nos transportes. As fontes de energia externa que suportaram o desenvolvimento industrial no passado foram os combustíveis fósseis, particularmente o petróleo, que ganhou predominância quantitativa e qualitativa ao longo de quase todo o século XX. Todavia os depósitos de combustíveis fósseis são finitos e apenas uma parte deles são ou poderão vir a ser tomados como “reservas”, isto é, passíveis de ser utilmente explorados, ponderados os factores tecnológicos e económicos. Lamentavelmente, as expectativas colocadas nas potencialidades de desenvolvimento tecnológico têm sido erradamente supostas ilimitadas pelo pensamento económico neoclássico dominante.

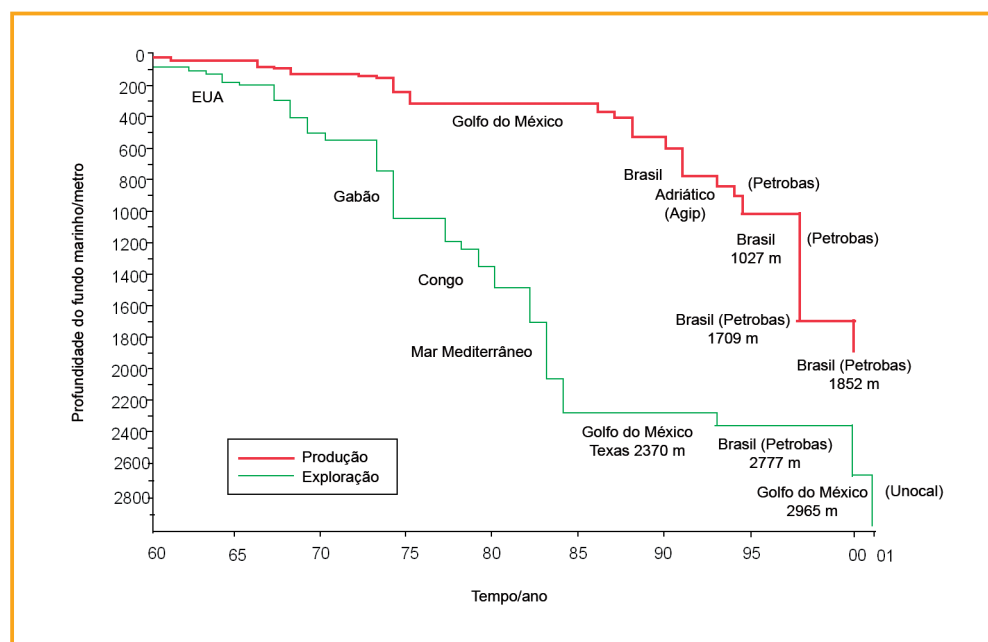


Fig. 2 - Novas Fronteiras da Prospecção e Exploração: O crescimento de reservas e de produção tem sido também assegurado pelo *offshore* a profundidades progressivamente maiores. (Fonte: ENSPM, Institut Français du Pétrole, 2002)

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DAS FONTES DE ENERGIA PRIMÁRIA

Quando nos ocupamos de extracção de matérias-primas energéticas (fósseis ou nucleares) é apropriado tomar a razão entre energia (bruta ou líquida) obtida e energia dispendida, *energy return on energy invested*, EROEI ou *energy profit ratio*, EPR como medida da eficiência energética de extracção da fonte de energia primária. Este indicador é, em regra, de aferição incerta porque a indústria e as entidades responsáveis pela recolha de informação não estão sensibilizados para ele. Consumos internos à indústria energética não são relatados ou sequer aferidos; há gás natural recuperado à saída dos poços que é re-injectado nos campos petrolíferos (para incrementar a taxa de recuperação do petróleo) e *stranded gas* consumido localmente pela própria indústria sem que sejam registados; o gás natural consumido na extracção de “petróleo sintético” a partir de areias betuminosas ou na beneficiação de “petróleo pesado” também não é registado; os “ganhos de refinaria” são acertos que confirmam a inconsistência de critérios e procedimentos.

Os hidrocarbonetos convencionais, petróleo e gás natural, são fluidos resultantes da lenta transformação de matéria orgânica incorporada em rochas sedimentares em afundamento e submetidas a temperaturas e pressões progressivamente elevadas (rocha mãe), que ficam retidos e armazenados em rochas porosas e permeáveis e naturalmente pressurizadas (rocha reservatório), pelo que, uma vez perfurada a rocha cobertura, a sua ejeção é espontânea. Com o avanço da extracção, a pressão baixa e, numa segunda etapa, o prosseguimento da extracção requer pressurização, mediante injeção ou de água sob o lençol de

hidrocarboneto ou de um gás (azoto, dióxido de carbono, ou mesmo gás natural) sobre o lençol de petróleo. Etapas mais avançadas exigem a extracção através de furos horizontais, a injeção de substâncias tensoactivas, a fragmentação da rocha com explosivos, a instalação de bombeamento subterrâneo, etc. Qualquer modalidade de extracção assistida (*enhanced oil recovery*, EOR) é não só exigente em recursos adicionais, particularmente em energia, como também é contrariada e limitada no seu alcance pelo facto de o escoamento se dar em mistura de fases, de que resulta a fragmentação do hidrocarboneto em bolsas isoladas cuja acessibilidade se torna progressivamente mais difícil; por estas razões, a taxa de recuperação frequentemente não excede 45% para o petróleo e 70% para o gás. A aceleração da extracção e a exploração gananciosa para satisfação de necessidades imediatas agravam as irreversibilidades, traduzindo-se, tanto na antecipação do pico da produção, como em mais rápido declínio da ulterior taxa de extracção e redução da taxa de recuperação final alcançada.

O incremento da taxa de recuperação do hidrocarboneto pré-existente exige, em particular, a intensificação do consumo de energia na extracção, isto é, a eficiência energética de extracção, EROEI ou EPR, degrada-se progressivamente ao longo do ciclo de vida de um campo petrolífero, pelo que o hidrocarboneto *in situ* nunca é totalmente extraído. Os limites económicos e técnicos da extracção do recurso não podem ser deixados deslizar indefinidamente, como é crença corrente, porque admitindo que o fossem, a extracção tornar-se-ia, a partir de certo momento, um sumidouro e não uma fonte de energia.

Os recursos de hidrocarbonetos não convencionais caracterizam-se por exibirem *ab initio* baixa eficiência energética de extracção, EROEI ou EPR. Mesmo que os recursos sejam muito vastos, os fluxos de massa e energia exigidos para obter uma unidade de energia líquida, a ser exportada e consumida fora da própria indústria energética, são substancialmente superiores aos exigidos para obter uma unidade de energia líquida partindo de recursos convencionais. Isso significa que os investimentos em meios de equipamento serão proporcionalmente maiores e os impactos ambientais também.

A escassez já patente em reservas de hidrocarbonetos convencionais faz com que se recorra, cada vez mais, a reservas não convencionais, nomeadamente petróleo pesado e ultra-pesado, areias betuminosas, jazidas no *offshore* profundo, jazidas na zona polar, líquidos de gás natural (NGL) e líquidos do carvão (CL), líquidos sintéticos derivados do gás à saída do poço (GTL) ou do carvão ou à boca da mina (CTL), *Coal Bed Methane* e *Tight Gas Sands*. Xistos asfálticos (rochas-mãe imaturas portadoras de querogénio ainda não convertido em hidrocarbonetos) e sedimentos marinhos (portadores de hidratos de metano)

FONTE DE ENERGIA PRIMÁRIA	Eficiência energética de extracção EROEI ou EPR
PETRÓLEO E GÁS NATURAL (À SAÍDA DO POÇO)	
1940 - 9	Descobertas >100
1970 - 9	Descobertas 8, Extracção 23
2000 - 5	Extracção 10
CARVÃO (À BOCA DA MINA)	
1950	80
1970	30
2000	8
OFFSHORE PROFUNDO	5
XISTOS ASFÁLTICOS	1 a 4
AREIAS BETUMINOSAS	2 a 4
LIQUEFAÇÃO DO CARVÃO	0,5 a 8

Tabela I - Eficiência energética de extracção de energia primária.

ocorrem em algumas vastas jazidas, mas o EROEI ou EPR da sua extracção é presumivelmente proibitivo (Tabela 1).

Assim, o pico de produção de hidrocarbonetos convencionais e a transição para hidrocarbonetos “não convencionais” significa, essencialmente, uma degradação progressiva da eficiência energética de extracção de energia primária, do nível muito elevado alcançado em meados do século XX, para níveis que foram os alcançados em fases anteriores da revolução industrial. É certo que as eficiências energéticas de conversão de energia primária em secundária (centrais termoeléctricas e refinarias, por exemplo) e de utilização final (motores térmicos, células de combustível, sistemas de energia total, por exemplo) podem ainda progredir, mas é já estreita a margem de progresso aí realizável. Ora uma economia industrial baseada em baixa eficiência energética de extracção de energia primária, verá a sua capacidade de acumulação de bens materiais (e capital) estrangida. O século XXI será tecnicamente muito mais avançado mas poderá ter capacidade de crescimento comparável à do século XIX.

BIBLIOGRAFIA

1. <http://www.cge.uevora.pt/aspo2005/>
2. <http://www.peakoil.net>
3. http://www.kva.se/KVA_Root/files/newspics/DOC_20051019115734_6666431682_energy_statement1_05.pdf
4. <http://www.aspo-usa.com/>
5. http://www.intnet.mu/iels/Fossil_Fuels.htm
6. <http://www.istp.murdoch.edu.au/publications/projects/oilfley/climaxingoil.html#2.2>
7. <http://www.ker.co.nz/pdf/Net%20Energy%20U.S.%20Oil%20and%20Gas.pdf>
8. <http://planetforlife.com/oilcrisis/oilreserves.html>

JÁ PAGOU AS QUOTAS DE 2006?

Caro Sócio da SPF: neste momento já deverá ter recebido uma carta solicitando o pagamento da sua quota.

A Sociedade Portuguesa de Física pede a todos uma resposta rápida. Ela é indispensável para a continuidade da SPF.