

O ATUAL MODELO ENERGÉTICO BRASILEIRO É INSUSTENTÁVEL

Joaquim Francisco de Carvalho

Programa de Pós-Graduação em Energia da USP

Introdução

Os modelos de consumo de energia que vieram tomando forma a partir da Revolução Industrial são insustentáveis diante da degradação ambiental, da explosão demográfica e da limitação das reservas de petróleo e gás natural, que constituem as principais fontes de energia desses modelos e caminham inexoravelmente para o esgotamento, mesmo que se descubram novas jazidas.

Nos últimos 120 anos, graças ao petróleo e, mais recentemente, ao gás natural, boa parte da humanidade se desenvolveu, pelo menos materialmente, a um ritmo até então inigualado – consumindo, para isso, energia solar acumulada por fotossíntese ao longo de centenas de milhões de anos.

Agora, os mais respeitados geólogos do mundo consideram que o pico da produção mundial de petróleo e gás ocorrerá nos próximos 5 a 10 anos, o que significa que a “idade do petróleo” está chegando ao fim.

A tabela 1 mostra que, a partir de meados da década de 1980, o mundo passou a usar mais petróleo do que ia descobrindo. Antes de declinar abruptamente, o consumo deverá oscilar, devido a crescentes dificuldades na exploração, devidas ao esgotamento natural, com o conseqüente comportamento errático da demanda (Campbell, 2005, p. 126-147).

Tabela 1 - Novas descobertas de petróleo *versus* consumo (em Gbep/ano)

ANO	Descobertas	Consumo
1930	10,82	1,72
1940	26,36	2,54
1950	31,82	4,53
1960	49,27	8,90
1970	33,45	18,18
1980	27,27	22,72
1990	14,54	24,09
2000	10,09	28,18
2010	6,82*	34,10 [¶]
2020	4,55*	40,45 [¶]
2030	2,82*	46,30 [¶]

* Extrapolações [¶] Previsões

Fontes: Campbell, 2005; Aleklett, 2006

O petróleo e o gás abundantes e baratos tiveram uma influência decisiva sobre a criação e desenvolvimento de novas tecnologias para a indústria, para a agricultura e para os serviços. Os processos produtivos e, conseqüentemente, os modelos econômicos e os hábitos de consumo da sociedade moderna esteiam-se nessas tecnologias. Hábitos

de consumo e modelos econômicos que são energeticamente ineficientes na maioria dos países.

Foi graças aos fertilizantes e pesticidas de origem petroquímica e aos combustíveis derivados de petróleo (usados na mecanização das lavouras) que a agricultura mundial chegou à “revolução verde”, que a capacitou a alimentar uma população que se elevou de 2,5 bilhões para 6,5 bilhões de habitantes, em pouco menos de 60 anos. Ocorre que o uso de combustíveis fósseis implica emissões de CO₂ e outros gases de estufa, que vêm provocando sensíveis elevações na temperatura média da atmosfera, com conseqüências que podem comprometer seriamente a sustentabilidade e sobrevivência da espécie humana.

Um país com a população, a extensão territorial e peso econômico do Brasil, que depende basicamente de petróleo e gás natural para operar sua infra-estrutura de transportes, abastecer sua indústria e fazer produzir a sua agricultura, não deve aguardar que os problemas fiquem mais graves, para só então adotar medidas destinadas a ajustar sua matriz energética ao cenário de escassez desses combustíveis, cenário que será agravado pelas mudanças climáticas devidas aos gases de estufa, pelos quais o Brasil é um dos principais responsáveis.

É imperativo que modifiquemos, em curto prazo, os padrões de consumo da sociedade e que nos antecipemos no desenvolvimento de tecnologias apropriadas a fontes renováveis de energia, para evitar que o declínio da oferta de combustíveis fósseis cause tragédias tais como fome, revoltas sangrentas e epidemias, disputas geopolíticas e guerras.

Modificar os padrões de consumo da sociedade e desenvolver tecnologias apropriadas não implica só a redução dos desperdícios em geral, mas, principalmente, a reestruturação de modelos de urbanização, transportes, construção civil, produção e distribuição de alimentos *etc.*

A formação dos combustíveis fósseis

Graças às radiações solares que incidiram sobre a Terra há centenas de milhões de anos, tiveram origem e se desenvolveram desde microorganismos, como bactérias e micro-algas, até árvores gigantes e grandes animais, cada qual com seu ciclo de vida, terminando em morte e decomposição. Há cerca de 300 milhões de anos, troncos, raízes, galhos e folhas de árvores que cresceram e morreram em regiões pantanosas, depositaram-se no fundo lodoso e ficaram encobertas. O tempo e a pressão das camadas de terra que se foram acumulando sobre esses resíduos, fossilizando-os e os transformando em depósitos de materiais homogêneos – a turfa e o carvão. Durante as eras de aquecimento global – que se supõe terem ocorrido há 150 e há 90 milhões de anos – certas micro-algas, principalmente das famílias das *Botrycoccus* e das diatomáceas, ricas em lipídeos, além de bactérias e remanescentes de plantas que viveram e morreram sobre superfícies aquáticas, submergiam e se incorporavam aos leitos de mares e lagos, decompondo-se e gerando os componentes básicos dos depósitos de petróleo. E as folhas e outros resíduos de plantas terrestres iam sendo carregados para o fundo do mar pelos rios ou pela erosão, criando, sob elevadas pressões e temperaturas, condições para a formação de depósitos de gás.

Assim, embora sejam, remotamente, de origem solar, os combustíveis fósseis não são renováveis na escala temporal humana, pois foram acumulados por fotossíntese em vegetais e em determinados organismos que deles se nutrem, ao longo de milhões de

anos. A seguir são apresentadas algumas informações básicas sobre o carvão, o petróleo e o gás natural.

- **Carvão** - Dependendo da origem, o carvão pode conter 25% a 97% de carbono; 2% a 6% de hidrogênio; 2% a 20% de oxigênio, traços de nitrogênio e enxofre, além de diferentes minerais. A combustão do carvão é muito poluidora, implicando, entre outras, reações tais como $C + O_2 \rightarrow CO_2$; $S + O_2 \rightarrow SO_2$; $N + O_2 \rightarrow NO_2$ e minerais \rightarrow cinzas.

Em função do teor de carbono, o carvão é classificado em quatro categorias:

1. Os linhitos (25% a 35% de carbono), que se encontram mais à superfície e são usados principalmente em usinas termelétricas.
2. Os carvões sub-betuminosos, com 35% a 45% de carbono. Os carvões brasileiros são preponderantemente sub-betuminosos e linhitos, com poder calorífico médio em torno de 3.600 kcal/kg.
3. Os carvões betuminosos, ou hulhas, com poder calorífico que pode chegar a 7.800 kcal/kg. Estes carvões constituíram a principal fonte de energia dos processos produtivos que surgiram com a Revolução Industrial. Até hoje, são os combustíveis mais empregados na geração termelétrica. Por suas propriedades coqueificantes, são muito empregados na siderurgia.
4. Os antracitos, de alta dureza e teores de carbono de 86% a 97%. Por sua pureza, são adequados para uso urbano (aquecimento ambiental) e em determinadas indústrias.

- **Petróleo** - O termo petróleo designa uma grande variedade de misturas de hidrocarbonetos e outros compostos orgânicos, de diversas massas moleculares. Nos petróleos pesados e betumes a proporção de hidrocarbonetos está em torno de 50% e nos leves pode chegar a 95%. A rigor, o petróleo abrange três famílias de hidrocarbonetos:

1. Alcanos, que são hidrocarbonetos alifáticos saturados, de fórmula geral C_nH_{2n+2} , com cadeia linear ramificada ou não (Tabela 2). Em função do número de átomos de carbono, ocorrem em estado gasoso, líquido ou sólido, cada um podendo conter, em mistura, traços dos outros dois.

Tabela 2 – Famílias de hidrocarbonetos

Número de átomos de carbono na cadeia molecular	Estado físico, em temperatura ambiente
1 a 4	Gasoso
5 a 15	Líquido
Acima de 15	Sólido

Fonte: Campbell, 2005, p. 30

2. Hidrocarbonetos não saturados, com cadeia fechada, como os aromáticos, dos quais o mais simples é o benzeno (C_6H_6).

3. Betumes, asfaltos e graxas, que são compostos de elevada massa molecular, ricos em nitrogênio, oxigênio, enxofre, níquel, etc. A tabela 3 mostra a composição média do petróleo de diversas formações geológicas.

Tabela 3 – Composição aproximada do petróleo

Elemento	C	H	N	O	S	Metais
%	83 a 87	10 a 14	0,1 a 2	0,1 a 1,5	0,5 a 6	< 1000 ppm

Fonte: Carvalho, 2008, p. 31

- **Gás natural** - Sendo formado nas mesmas condições e a partir de componentes semelhantes aos do petróleo, o gás geralmente ocorre associado a este – ou nele dissolvido, quando o reservatório está sob pressão elevada.

A tabela 4 indica a composição do gás natural, em termos médios

Tabela 4 – Composição do gás natural

Componente	Metano (CH ₄)	Etano (C ₂ H ₆)	Propano (C ₃ H ₈)	Butano (C ₄ H ₁₀)	CO ₂ ; H ₂ S; N ₂ , etc.
%	75% a 90%	5% a 15%	< 5%	< 5%	Traços

Fonte: Carvalho, 2008, p. 31

Um pouco abaixo da temperatura ambiente, o butano e o propano condensam-se, formando o gás liquefeito de petróleo ou GLP.

Para os transportes terrestres, marítimos e aéreos, o gás natural não substitui inteiramente os combustíveis derivados de petróleo, porém apresenta a vantagem de ser extraído sob sua própria pressão, e facilmente transportado em gasodutos ligando os campos de gás às instalações de estocagem, que por sua vez são conectadas aos consumidores, por meio de redes de distribuição subterrâneas.

* * *

Em 2.005 o carvão, o petróleo e o gás natural responderam, respectivamente, por cerca de 25%, 34% e 21% da energia consumida no mundo, em usinas termelétricas instaladas em diversos países industrializados e como combustível automotivo e industrial (IEA, 2006).

Além disso, o petróleo e o gás natural constituem matéria prima para inúmeros produtos fundamentais, destacando-se as matérias plásticas. No caso do gás natural, este é matéria prima para cerca de 80% da produção mundial de fertilizantes nitrogenados.

O carvão é empregado principalmente na geração termelétrica, de modo que sua substituição é problemática em países que não disponham de alternativas ambientalmente mais limpas. O Brasil, que até o presente aproveitou apenas 28% de seu potencial hidrelétrico, está em posição privilegiada para, desde já, ir adotando políticas destinadas a reduzir gradativamente a participação do carvão em sua matriz energética. Segundo o Balanço Energético Nacional 2007/2006, essa participação é atualmente de 1,7%.

Sem petróleo e gás serão inúteis as modernas tecnologias agrícolas, industriais e de transportes, de modo que a produção da economia poderá ficar insuficiente para sustentar os mais de 200 milhões de habitantes que o país deverá ter, quando a oferta daqueles combustíveis estiver escasseando. E seria ilusório esperar que, se forem mantidas as atuais tendências, os processos produtivos possam ser modificados somente pela ação das forças do mercado.

Programas destinados a adaptar as tecnologias e sistemas agrícolas, industriais e de transporte ao cenário de escassez de combustíveis fósseis deveriam começar a ser planejados e implantados o mais cedo possível, em cooperação do Estado com o setor privado, visando à gradual introdução dessas tecnologias e implantação desses sistemas, antes que sobrevenha um colapso de abastecimento.

Duração das reservas de combustíveis fósseis

Demonstraremos em primeiro lugar que, se o crescimento exponencial prosseguir como tem ocorrido, a quantidade consumida durante um período de duplicação do consumo será igual ao total consumido em *todo* o tempo precedente.

De fato, se o crescimento foi exponencial, a quantidade (Q_1) consumida até a data t_1 foi:

$$Q_1 = \int_{-\infty}^{t_1} A_0 e^{rt} dt = \frac{A_0}{r} e^{rt_1}$$

onde r = taxa de crescimento do consumo; A_0 = consumo atual e t = tempo decorrido.

Se o crescimento exponencial prosseguir, a quantidade (Q_2) que será consumida no período de duplicação, de t_1 a t_2 , será:

$$Q_2 = \int_{t_1}^{t_2} A_0 e^{rt} dt = \frac{A_0}{r} (e^{rt_2} - e^{rt_1})$$

Como, por hipótese, o intervalo $[t_2 - t_1]$ é um período de duplicação do consumo, tem-se $e^{rt_2} = 2e^{rt_1}$, portanto,

$$Q_2 = \frac{A_0}{r} (2e^{rt_1} - e^{rt_1}) = \frac{A_0}{r} e^{rt_1} = Q_1$$

isto é, o consumo no período de duplicação será igual ao total já consumido.

Seja agora R_t o volume total; Q_C a quantidade já consumida; A_0 o consumo atual, ou seja, a partir do presente ($t = 0$); e r a taxa anual de crescimento do consumo.

Evidentemente, o volume final, remanescente (R_f), será igual ao total que existia, menos o que já foi consumido, ou seja,

$$R_t - Q_c = R_f = \int_0^t A_0 e^{rt} dt = \frac{A_0}{r} (e^{rt} - e^0) = \frac{A_0}{r} (e^{rt} - 1)$$

Resolvendo para t (tempo em que as reservas remanescentes serão consumidas), obtém-se:

$$e^{rt} = \frac{R_f r}{A_0} + 1 \Rightarrow t = \frac{1}{r} \ln \left[\frac{R_f r}{A_0} + 1 \right]$$

Cabe enfatizar que o modelo de crescimento exponencial oferece apenas uma indicação aproximada do prazo de duração das reservas, até porque não se pode afirmar que a taxa média de crescimento da produção se comportará de forma previsível.

Essa taxa depende, entre outros fatores, do crescimento da demanda, de melhorias da produtividade e da eficiência dos sistemas e equipamentos que operam com o petróleo, da elasticidade-preço da demanda *etc.*

Assim, a efetiva duração das reservas poderá estender-se por alguns anos, na medida em que a produção passe por oscilações provocadas pelas crescentes dificuldades na exploração, que se refletirão sobre os preços e sobre o consumo.

Repetimos, portanto, que a estimativa esboçada a seguir é apenas indicativa. Seu único objetivo foi o de delimitar um prazo para o planejamento e execução de medidas destinadas a converter o atual modelo energético insustentável, num modelo sustentável.

Aliás, as conclusões a que chegamos não se modificam, caso as reservas de combustíveis fósseis durem mais uma ou duas décadas.

Previsões mais acuradas podem ser feitas por meio de conhecidos modelos desenvolvidos, por exemplo, pelo geólogo americano M. King Hubbert, em 1956, e pelo engenheiro francês Jean Laherrère, em 1998, entre outros.

No entanto, modelos desse tipo são geralmente derivados de curvas logísticas, ajustadas por parâmetros de difícil avaliação, sobretudo nos dias atuais. E sua aplicação

conduziria a resultados que discrepariam dos aqui calculados em, no máximo, ± 10 a 15 anos, o que não altera as referidas conclusões.

Estimativa do prazo de duração das reservas brasileiras de petróleo

Segundo o Plano 2030, da EPE/Ministério de Minas e Energia, as reservas de petróleo comprovadas e medidas (R_f) são da ordem de $2,385 \times 10^9 \text{m}^3$. Por outro lado, de acordo com o Balanço Energético Nacional de 2007, ano base de 2006, em 2006 o consumo (A_0) foi de $101 \times 10^6 \text{m}^3$.

A taxa de crescimento do consumo de petróleo tem crescido em função do crescimento do PIB, porém, mediante aperfeiçoamentos tecnológicos, racionalização de modelos de transporte e substituições de parte dos combustíveis derivados de petróleo, por etanol e biodiesel – e também por força da elasticidade preço – é possível fazer com que essa taxa se estabilize em 3,0% ao ano, até 2030, mesmo com o PIB crescendo à taxa de 4,1% ao ano, indicada no Plano 2030.

Neste caso, as reservas durariam cerca de 17,8 anos, como mostra o cálculo abaixo:

$$t = \frac{1}{0,030} \ln \left[\frac{2,385 \times 10^9 \times 0,030}{101 \times 10^6} + 1 \right] = 17,8$$

Além das reservas confirmadas e medidas, a EPE estima que há “reservas adicionais não descobertas”, num volume da ordem de $6,709 \times 10^9 \text{m}^3$.

Entretanto, o Marco Regulatório definido pela Lei nº 9478/97, regulamentada pelo Decreto nº 2705/98, limita em 40% o direito do Brasil sobre as novas reservas descobertas, de modo que – se elas forem integralmente confirmadas – poderiam ser usados adicionalmente $2,684 \times 10^9 \text{m}^3$ para consumo interno, portanto as reservas finais de petróleo seriam de $5,069 \times 10^9 \text{m}^3$. Fazendo novamente o cálculo, vemos que, neste caso, a sua duração seria de 30,6 anos.

Estimativa do prazo de duração das reservas brasileiras de gás natural

O plano 2.030 informa que as reservas de gás natural efetivamente medidas são de $326 \times 10^9 \text{m}^3$, e as reservas “adicionais não descobertas” são de $4.891 \times 10^9 \text{m}^3$.

Constata-se que, nos últimos anos, o consumo de gás natural tem crescido a uma taxa média da ordem de 5,5% ao ano. Em 2006 este consumo foi de $8,2 \times 10^6 \text{m}^3$.

Se, por meio de programas de conservação de energia – e, principalmente, pela racionalização do uso do gás em termelétricas – essa taxa ficar igual à taxa de crescimento prevista no Plano 2030 para o setor industrial (3,7% ao ano), a duração das reservas de gás natural seria de 24,5 anos, como está calculado abaixo.

$$t = \frac{1}{0,37} \ln \left[\frac{326 \times 10^9 \times 0,037}{8,2 \times 10^9} + 1 \right] = 24,5$$

Supondo agora que se confirmem as “reservas adicionais não descobertas”, que seriam de $4.891 \times 10^9 \text{m}^3$, as reservas finais a serem destinadas ao consumo interno seriam de $(326 + 0,4 \times 4.891) \times 10^9 = 2282 \times 10^9 \text{m}^3$, pois o Marco Regulatório limita em 40% a parte das novas reservas a ser destinada ao consumo interno.

Refazendo o cálculo vê-se que, nesta hipótese, a duração das reservas de gás natural seria de 65,5 anos.

Portanto, mesmo com as hipóteses otimistas a respeito das reservas “adicionais não descobertas” de petróleo e gás natural, sua duração fará com que a evolução da economia prevista no Plano 2030 se interrompa bruscamente em médio prazo, por força de dificuldades de suprimento de petróleo e gás natural.

Conclusões

- 1.** Existem modelos mais elaborados para se fazerem previsões da duração das reservas de combustíveis fósseis, entretanto sua aplicação não levaria a resultados que divergissem dos cálculos feitos acima, por prazos significativos.
- 2.** O uso de combustíveis fósseis implica emissões de CO₂ e outros gases de estufa, que vêm provocando sensíveis elevações na temperatura média da atmosfera, com conseqüências que podem comprometer seriamente a sustentabilidade e sobrevivência da espécie humana.
- 3.** É exíguo o prazo para que modifiquemos os padrões de consumo da sociedade e que nos antecipemos no desenvolvimento de tecnologias apropriadas a fontes renováveis de energia, para evitar que o declínio da oferta de combustíveis fósseis cause tragédias tais como fome, revoltas sangrentas e epidemias, disputas geopolíticas e guerras.
- 4.** Além de ser ambientalmente insustentável, o atual modelo energético brasileiro não toma em conta o caráter finito das reservas de combustíveis fósseis.

Referências

- Aleklett, K., “Oil: A Bumpy Road Ahead”, *World Watch Magazine*: Jan/Feb. 2006.
Campbell, C.J., *Oil Crisis*, Multi Science Publishing Company, 2005.
Carvalho, J.F., “Combustíveis fósseis e insustentabilidade”, *Ciência e Cultura*, setembro de 2008.
IEA, 2006, *World Energy Outlook*, 2006.