

Energia nuclear em um cenário de trinta anos

*CARLOS FEU ALVIM, FRIDA EIDELMAN,
OLGA MAFRA e OMAR CAMPOS FERREIRA*

Introdução

UMA ANÁLISE do futuro da energia nuclear no horizonte de trinta anos deve comportar ao menos os seguintes aspectos: demanda de energia elétrica, custos comparativos, ambiental, tecnológico e estratégico (incluindo reservas nacionais e não-proliferação).

A abrangência dos aspectos tratados exige um tratamento conciso e o suporte de trabalhos anteriores, como é feito neste artigo.

Demanda de energia elétrica

A aplicação pacífica que justifica um programa nuclear no Brasil é, no horizonte estudado, a geração de energia elétrica. A participação da energia nuclear nessa geração depende da demanda energética que, por sua vez, é função do crescimento econômico e das alternativas disponíveis para geração.

O fracasso na estimativa do crescimento econômico foi o ponto fraco dos planejamentos energéticos nas décadas de 1970 a 1990. As sucessivas superestimativas do crescimento econômico e da demanda de eletricidade a ele associada provocaram uma descrença nas ameaças de escassez no suprimento de eletricidade. Isso foi uma das causas do relaxamento no cumprimento dos planos energéticos, o que levou ao desabastecimento em 2001, que ficou conhecido como “apagão”.

As dificuldades de crescimento motivaram parte da equipe da OSCIP (Organização Social Civil de Interesse Público) Economia e Energia (e&e) a estudar as limitações ao crescimento brasileiro com a identificação de seu principal entrave: a perda de produtividade de capital nas décadas de 1970 e 1980 que limitou o crescimento futuro do país. Essas dificuldades foram acentuadas, a partir de 1994, com as altas taxas de juros usadas para controle da inflação que reduziram a taxa de poupança interna sem que houvesse a esperada compensação de entrada de poupança externa. O resultado foi a queda da taxa de investimento e de sua capacidade de gerar o desejável crescimento econômico em virtude da perda de produtividade de capital.

O planejamento energético que havia sido praticamente abandonado na década de 1990 foi retomado no primeiro mandato do presidente Lula com premissas básicas de crescimento inferiores às do desejo governamental. A hipótese

básica adotada no Plano 2030 de crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) é de 4,0% ao ano (período de 2005 a 2025), o que corresponde a um crescimento do PIB *per capita* de 3,2%.

Com projeções de PIB mais ou menos coincidentes, foram examinadas três avaliações da demanda de energia elétrica: a da e&e (Alvim et al., 2007), as apresentadas pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) no “Plano Nacional 2020 – Estratégia de Expansão da Oferta”, e os resultados do estudo “Agenda Elétrica Brasileira” publicado sob os auspícios da WWF (Worldwide Fund for Nature) – Brasil (Agenda Elétrica Sustentável 2020).

Descreve-se a seguir a metodologia adotada e comparam-se os resultados alcançados.

Metodologia utilizada e comparação de resultados

A metodologia aqui adotada pela e&e para a projeção energética é análoga à que vem possibilitando com bastante sucesso a previsão do crescimento brasileiro nos últimos dez anos. São suas características genéricas:

1. Estudo de variáveis energéticas e econômicas (e relações entre elas) que apresentam um comportamento estável e previsível no período histórico em que os dados estão disponíveis e estabelecimento do melhor ajuste para descrever o futuro por meio de curvas que, geralmente, conduzem à estabilização do seu valor máximo.
2. Uso de dados de países mais desenvolvidos e do potencial hidráulico brasileiro para a escolha de valores de referência ou de saturação, quando for o caso.
3. Busca do melhor ajuste para os dados históricos do país com o valor de referência considerado.

Note-se que a aplicação pura e simples do melhor ajuste em 1. geraria valores determinísticos. O objetivo da metodologia e dos programas de computador a ela associados é, ao contrário, possibilitar a formação de consenso sobre o cenário mais provável, mas sem a rigidez de relações preestabelecidas. O PIB utilizado nas projeções surge da aplicação do modelo macroeconômico semi-empírico *projetar_e* cujos resultados são automaticamente refletidos na demanda energética.

Em seguida, o PIB é correlacionado com a demanda de energia equivalente, sendo que a eficiência energética em cada setor é usada para o estabelecimento de equivalência com um combustível de referência. A projeção de energia baseia-se na razão energia equivalente/produto (EEq/PIB) que apresenta um comportamento previsível nos 35 anos para os quais se dispõem de dados do Balanço Energético e das Contas Nacionais.¹ Como pode ser observado na Figura 1, a razão EEq/PIB vem subindo lentamente ao longo dos anos, mas apresenta uma tendência de saturação ao longo do tempo.

O melhor ajuste dos dados passados leva ao valor de 0,513 kep (quilograma equivalente petróleo)/US\$ 2003 para 2030, enquanto o valor adotado conduz a

0,491 kep/US\$ 2003, ou seja, 4,3% mais baixo. Note-se que o programa limita os graus de liberdade do ajuste ao comparar a projeção com o comportamento histórico e ao sugerir limites estabelecidos pela experiência de outros países. Como resultado, os valores estabelecidos pelos grupos de consenso não costumam divergir muito da tendência histórica.

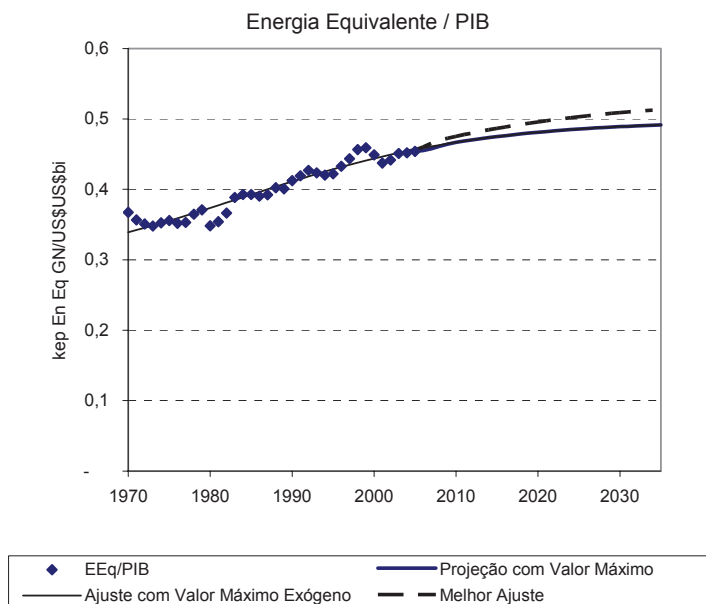


Figura 1 – Ilustração da metodologia de projeção da demanda em energia equivalente em função do PIB (US\$ 2003) com hipótese de melhor ajuste ou impondo limite de países menos intensivos em energia (países da Europa Ocidental e Japão).

Em seguida, o programa usado projeta a participação da energia elétrica na total (expressa em energia equivalente). O resultado pode ser visto na Figura 2.

Um inconveniente de trabalhar apenas com o melhor ajuste é que circunstâncias (como a ocorrência do “apagão”) podem alterar a tendência de curto (e às vezes de médio) prazo, fazendo que o melhor ajuste mude com a introdução de novos anos na série. No caso mostrado na Figura 2, pode-se observar que, após um transitório, por volta do ano 2000, o comportamento da curva quase voltou ao valor anterior.

A aplicação dessa metodologia, adotando as hipóteses do crescimento do PIB assinaladas, resulta nas projeções da e&c mostradas na Tabela 1, onde estão incluídos ainda os resultados da EPE e do WWF, como também uma revisão do estudo da e&c, que supõe uma evolução da razão energia elétrica/PIB coerente com as hipóteses de conservação de energia adotadas pela EPE.

Uma forma complementar de testar a coerência das projeções é o estudo da intensidade energética por de PIB em função do PIB *per capita* expresso em Paridade de Poder de Compra (PPC). A EIA/DOE (Energy Information

Administration) dos Estados Unidos fornece em seu portal os dados de intensidade energética de consumo de energia primária e elétrica para praticamente a totalidade dos países ou outro tipo de unidade geográfica. O ajuste foi feito para cerca de duzentos países e unidades geográficas registrados pela Organização das Nações Unidas (ONU) e mostra uma boa correlação. Quando o conjunto é limitado aos países com mais de dez milhões de habitantes, o ajuste torna-se melhor, como pode ser observado na Figura 3. A reta de ajuste mantém praticamente a mesma inclinação.

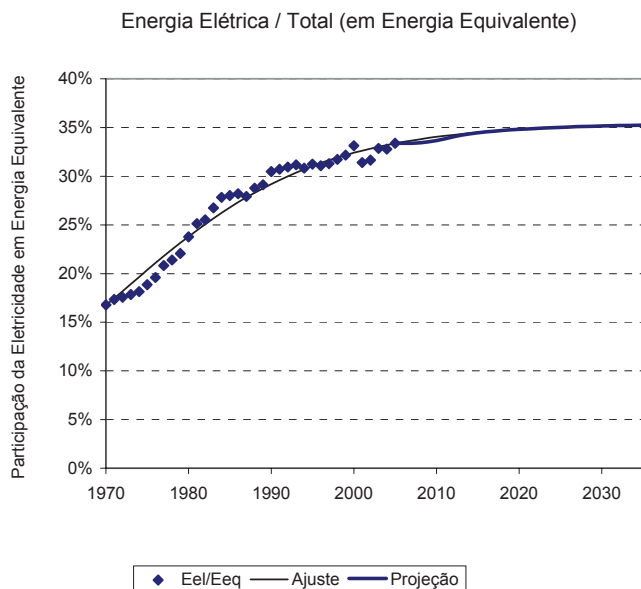


Figura 2 – Projeção da participação da energia elétrica na energia equivalente.

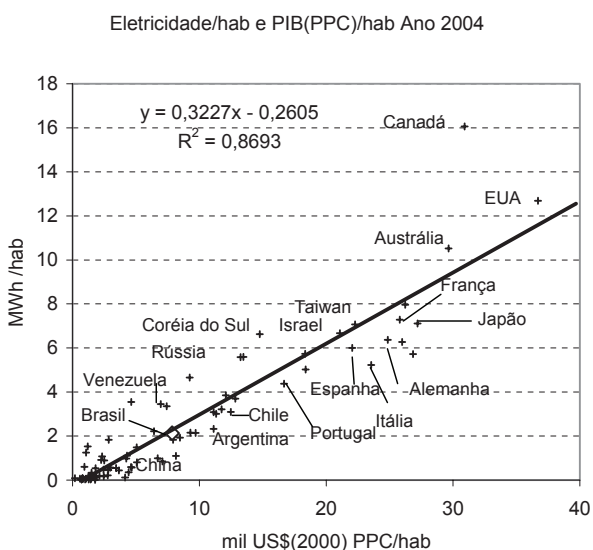


Figura 3 – Energia elétrica/PIB para países com população superior a dez milhões de habitantes, com indicação de alguns países.

Tabela 1
 Comparação de resultados e&e (originais e revistos), EPE e WWF

		2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035
PIB e&e	(2000=100)	100	111	129	158	200	256	335	444
PIB EPE	(2000=100)	100	111	137	168	195	239	303	
Eletric e&e ¹	TWh*	332	375	451	576	743	966	1.280	1.710
Eletric e&e ^r	TWh	332	375	441	544	695	900	1.188	1.582
Eletric EPE	TWh	321	388	471	575	703	859	1.046	
Eletric. WWF	TWh		388			500			
Taxas de Crescimento		2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035
		2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
PIB e&e	% ano	2,2%	3,0%	4,2%	4,7%	5,1%	5,6%	4,0%	4,5%
PIB EPE	% ano	2,2%	4,2%	4,2%	3,0%	4,2%	4,9%	3,8%	4,1%
Eletric e&e ¹	% ano	2,5%	3,7%	5,0%	5,2%	5,4%	5,8%	4,7%	5,0%
Eletric e&e ^r	% ano	2,5%	3,3%	4,3%	5,0%	5,3%	5,7%	4,2%	4,7%
Eletr. EPE	% ano	3,8%	4,0%	4,1%	4,1%	4,1%	4,0%	4,0%	
Eletric. WWF	% ano							1,7%	

e&e¹ – Valores originais; e&e^r Valores revistos; * TWh – Terawatt hora.

Deve-se notar que, para cada país, a curva energia/habitante e PIB/habitante é apenas uma representação (em escala diferente) da curva energia X PIB. Ao representar vários países, no entanto, tem-se a vantagem de poder comparar os dados de países em diferentes estágios de crescimento econômico, considerando-se o estágio de cada um.

O comportamento da razão energia/habitante, na medida em que varia o PIB/habitante, também pode ser observado para um país ou conjunto de países. Esse comportamento para o conjunto de países não variou muito entre os anos de 1990 a 2004. O comportamento dinâmico das duas variáveis de intensidade estudadas (eletricidade por habitante e por PIB) pode ser colocado em um gráfico. Também foram representados os dados projetados.² Os valores extrapolados para o Brasil continuariam abaixo da tendência mundial em 2004 (que coincide com a de 1990).³ Na Figura 4 estão representadas as duas escalas PIB real (em US\$ de 2000) e em poder de compra.⁴

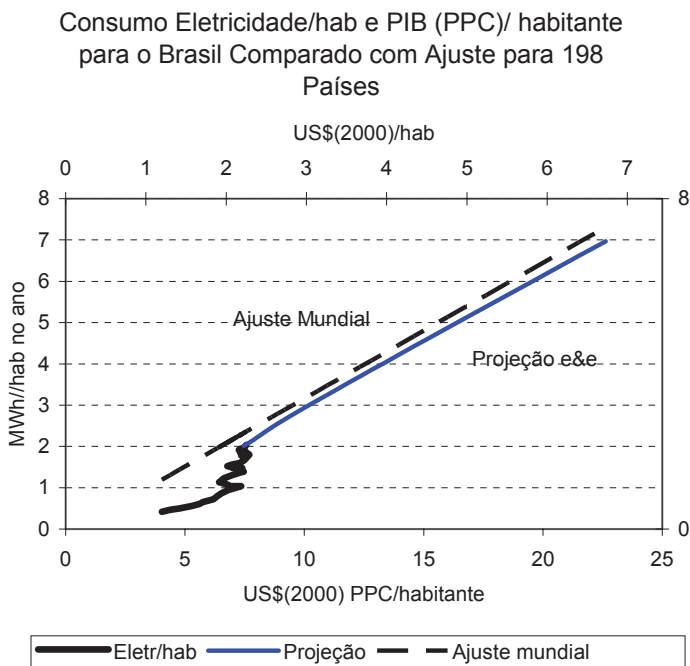


Figura 4 – Evolução da razão energia elétrica/habitante e PIB/habitante das projeções da e&e. Os valores correspondentes aos valores reais do PIB expressos em dólares do ano 2000 são apenas boas aproximações.

O comportamento do valor do consumo de energia elétrica/PIB (expresso em PPC) em função do PIB/habitante é mostrado na Figura 5 para as projeções e&e, EPE e para o estudo da WWF.

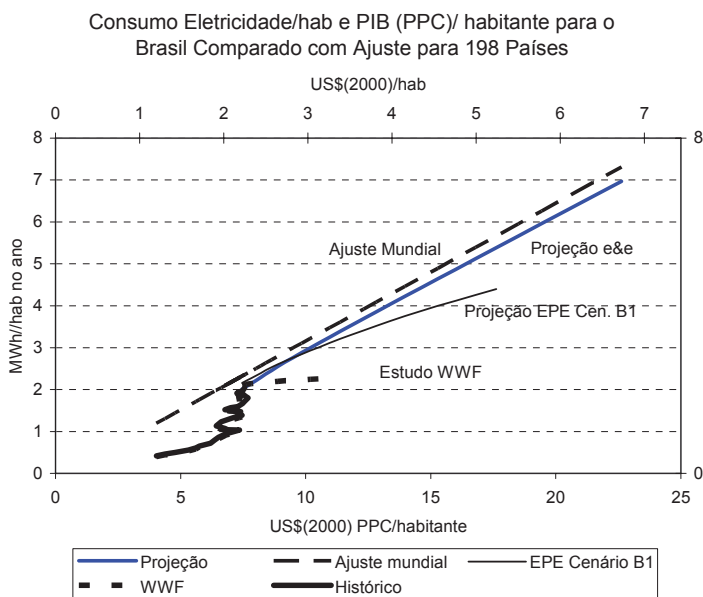


Figura 5 – Projeções de energia elétrica/habitante, comparadas com a tendência mundial.

O estudo patrocinado pela WWF, que contou com a participação de várias conceituadas entidades ligadas à conservação de energia ou a energias alternativas, apresenta resultados bastante discrepantes dos dois outros aqui abordados, tendo sido gerada alguma polêmica entre os autores dos estudos da EPE e da WWF.

Deve-se assinalar que os horizontes de projeção são diferentes: no presente estudo é 2035; no da EPE, 2030; e no da WWF, 2020. A projeção da e&e já é inferior à do atual padrão mundial e se afasta gradualmente dela; a da EPE afasta-se um pouco mais desse padrão, enquanto a da WWF diverge completamente dele ao supor um importante incremento do PIB/habitante, mantendo praticamente constante o consumo *per capita* de eletricidade.

Também é interessante comparar o comportamento da variável energia elétrica/produto projetada nos referidos estudos, o que é apresentado na Figura 6.

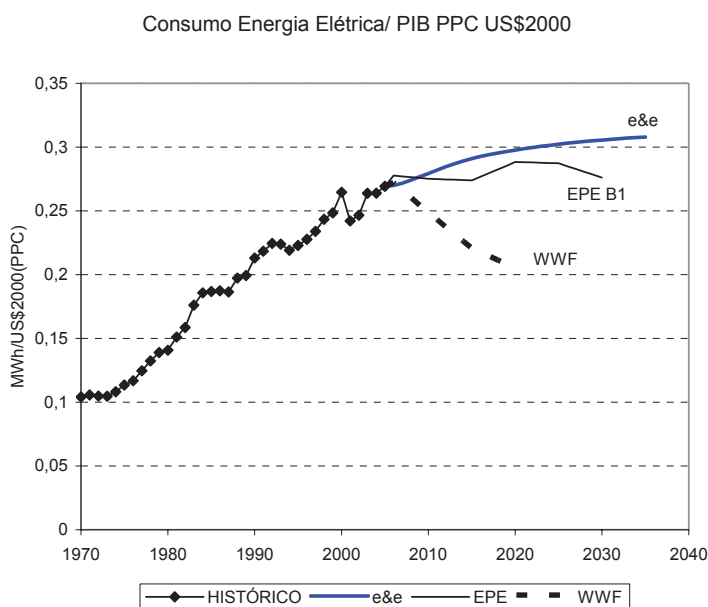


Figura 6 – Consumo energia elétrica/PIB nos três estudos considerados.

A comparação mostra que a projeção da EPE fundamentalmente mantém a razão energia elétrica/PIB observada nos últimos anos da série, enquanto a da e&e admite a continuação de um moderado aumento da intensidade do uso da energia elétrica com tendência a saturação após 2035. O valor da WWF é, em 2020, inferior em 14% ao valor verificado por ocasião do “apagão” de 2001.

Deve-se notar que o Brasil acostumou-se a admitir um crescimento do consumo da eletricidade maior que o do PIB nos últimos quarenta anos. A provável trajetória dessa razão será que ela tenda para um valor constante no período estudado.⁵ A tendência mundial atualmente observada é de uma queda muito lenta nessa razão, como se pode observar na Figura 7, na qual, também

usando o conjunto de dados da EIA/DOE, mostra-se a evolução da intensidade elétrica na economia para as diversas regiões do globo.

A Figura 7 mostra uma lenta convergência das diversas regiões para o mesmo valor médio. A América do Norte e a Eurásia vêm reduzindo sua intensidade elétrica, enquanto a América do Sul e a Central (incluindo o Brasil) aumentaram essa intensidade, e o Oriente Médio já ultrapassou a média mundial, não se enquadrando na esperada convergência. África, Ásia e Oceania têm mantido suas intensidades, e a da Europa caiu ligeiramente acompanhando a média mundial. O comportamento verificado reforça a hipótese de que a intensidade energética tende a se manter aproximadamente constante ao longo dos próximos anos.⁶

Cabe ainda lembrar que, no âmbito mundial, as soluções para a escassez de combustíveis líquidos têm como um dos principais vetores a energia elétrica. Isso pode realimentar o crescimento da demanda de eletricidade.

Para um crescimento econômico da ordem de 4% ao ano, a demanda de energia elétrica em 2035 deverá se situar entre 1.600 a 1.700 TWh (terawatt hora). É nessa perspectiva de demanda que será feita a análise do papel da energia nuclear neste trabalho.

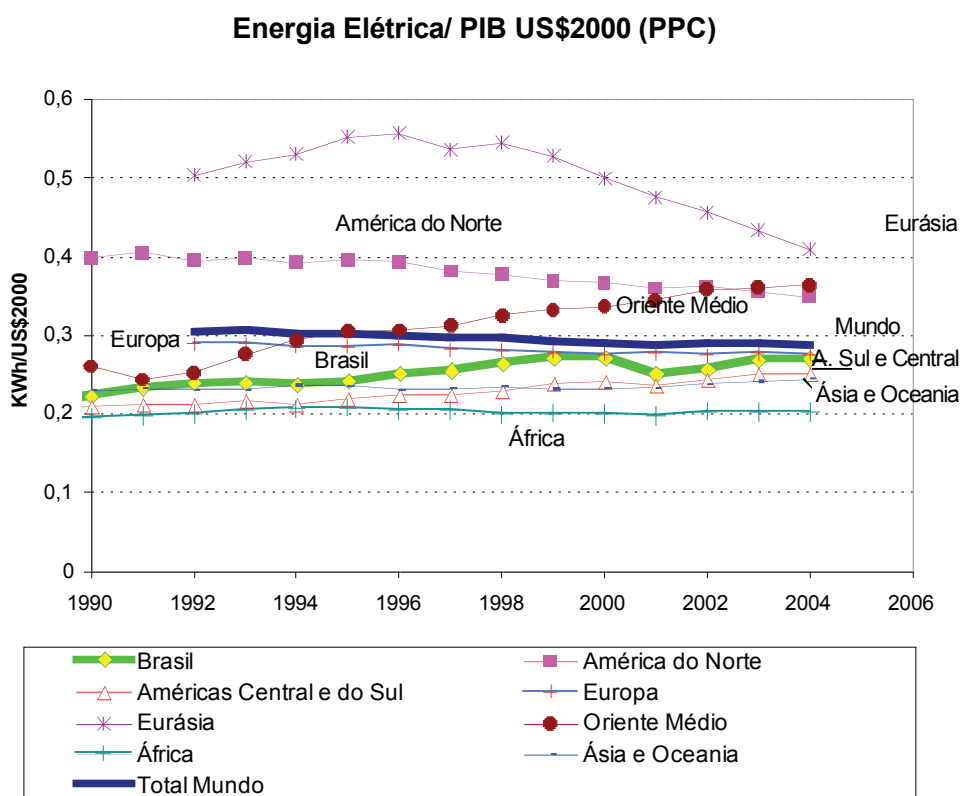


Figura 7 – Razão energia elétrica/PIB para as diversas regiões, a do Brasil que é praticamente constante ao longo do período e para o mundo (levemente decrescente).

Custos comparativos da energia elétrica gerada

Vários estudos de custos comparativos foram realizados no mundo em virtude da recente crise de petróleo e em consideração ao efeito estufa. O mais significativo deles talvez seja o da Agência Internacional de Energia (IEA na sigla em inglês) (Projected Costs of Generating Electricity – Update 2005). A metodologia usada nesta avaliação é uma simplificação da adotada naquele estudo e permite facilmente avaliar mudanças nos parâmetros de custo.

Nas usinas térmicas convencionais, o combustível é o principal componente no custo de geração. Já nas nucleares, a maior parte dos custos é fixa. Para a expansão do parque de produção (ou reposição de usinas a serem desativadas) interessa a comparação do custo de produção em usinas a serem construídas. O estudo da IEA considerou usinas reais recentemente construídas.

Aos resultados considerados (de usinas típicas) foram acrescentados os custos correspondentes à emissão de gás carbônico que ainda não é considerado em termos comerciais nos Estados Unidos, já que aquele país não ratificou o Protocolo de Kyoto. Várias medidas de captura de carbono emitido vêm sendo estudadas nos Estados Unidos, e certamente esse será um parâmetro importante na decisão sobre as escolhas de energéticos para geração de eletricidade nos próximos anos. Os custos para captura de gás carbônico são atualmente estimados como superiores aos US\$ 100/t de carvão. O valor considerado (US\$30 / tCO₂ [tonelada de dióxido de carbono]), apenas a título de ilustração, corresponde ao custo avaliado da compra de crédito de carbono no âmbito do referido Protocolo que é o valor mínimo atualmente em consideração. A Tabela 2 apresenta os custos comparativos mencionados para os diferentes energéticos.

Os resultados são também mostrados na Figura 8 onde podem ser comparados os custos fixos (incluído o de operação e manutenção) e os devidos aos combustíveis. O valor indicado para o custo da emissão de CO₂ também é representado.

Dentro das premissas dessa comparação, o custo da geração nuclear é competitivo com o custo da geração a partir dos derivados de petróleo e com o gás natural (GN), mas a geração a carvão (majoritária) nos Estados Unidos segue sendo mais barata que a nuclear. A opção nuclear passa a ser competitiva economicamente mesmo quando se considera um custo, ainda que modesto, para a supressão das emissões de CO₂. A análise de custo mostrada pode ser tomada como uma aproximação da presente situação européia. Deve-se assinalar que a desativação de grande parte da geração a carvão na Europa Ocidental ocorreu por outras razões ambientais previamente ao levantamento dos problemas com o efeito estufa e, em países como o Reino Unido, também por razões trabalhistas.

Uma análise semelhante para o Brasil está em curso e apresenta a peculiaridade de grande parte da geração ser de origem hídrica. As centrais térmicas que se instalarem terão obrigatoriamente de exercer um papel de regulação, visto a capacidade de armazenamento de água que fornecia a auto-regulação do sistema

hídrico ter decaído paulatinamente (Alvim et al., 2005). Diferentes fatores de capacidade média são esperados para as usinas térmicas, e no ano de 2005, por exemplo, o fator de capacidade das térmicas convencionais foi de 31%. Se forem excluídas as usinas do sistema isolado, o fator de capacidade foi apenas de 21%.

Tabela 2 – Custos comparativos de geração nos Estados Unidos

Dados de entrada	Símbolo	Unidade	Óleo Comb.	GN	Carvão	Nuclear	Diesel
Vida útil	T	Ano	25	40	40	40	20
Tempo de construção e instalação	t	Ano	3	3	4	6	2
Investimento	I	US\$/kW (kilowatt)	1340	609	1366	1894	1000
Custo de descomissionamento	CD	US\$/kW	0	0	0	269	0
Fator de capacidade médio	FCM	adimens.	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Taxa de juro	j	ano ⁻¹	10%	10%	10%	10%	10%
Taxa de retorno do fundo de descomissionamento	r	ano ⁻¹	0	0	0	2%	0
Eficiência de conversão	η	adimens.	0,41	0,54	0,46	0,33	0,4
Preço do combustível	PC	US\$/MWh _{th}	25,67	24,44	4,98	1,35	28,24
Custo anual de operação & manutenção	CAOM	US\$/kW.a	26	26	50	63	26
Valor do gás carbônico emitido considerando 30US\$/tCO ₂	30	tCO ₂ /MWh	0,276	0,200	0,337	0,000	0,264
Custos por MWh (megawatt hora)							
Custo carbono emitido	CCE	US\$/MWh _{el.}	20,2	11,1	22,0	0,0	19,8
Custo fixo de geração	CFG	US\$/MWh _{el.}	26,9	13,5	30,2	45,0	21,3
Custo de combustível	CC	US\$/MWh _{el.}	62,6	45,3	10,8	4,1	70,6
Custo total de geração	CTG	US\$/MWh _{el.}	89,6	58,8	41,1	49,1	91,9
Custo total com emissão de CO ₂	CT	US\$/MWh _{el.}	109,7	69,9	63,0	49,1	111,7

Custo de Geração nos EUA em 2006 (usinas novas)

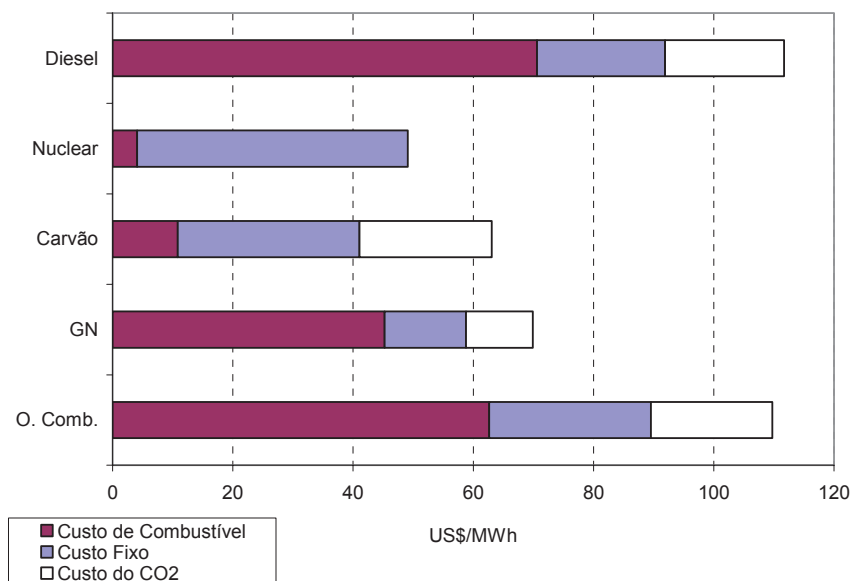


Figura 8 – Custos comparados da geração de energia elétrica em usinas novas e preços de combustíveis vigentes nos Estados Unidos em 2005.

As usinas nucleares e as de carvão devem destinar-se à faixa de complementação térmica de maior fator de capacidade, já que são usinas onde predomina o custo fixo. Outras usinas complementarão o quadro de geração brasileiro com menor fator de capacidade. O Brasil tem um considerável potencial de geração com biomassa, particularmente com bagaço de cana. Esse energético está disponível durante a estação seca quando existe déficit hídrico nas usinas onde não existe armazenagem suficiente.

Em uma análise preliminar, a energia hídrica ainda leva vantagem do ponto de vista de custo de geração sobre as demais. No entanto, as dificuldades impostas pelos entraves ambientais limitam o potencial a ser utilizado. A localização da demanda futura, por sua vez, estará concentrada em regiões como Sudeste e Nordeste, onde o potencial hidráulico (se fosse completamente explorado) estaria esgotado em breve.

As grandes usinas planejadas encontram-se principalmente na região Amazônica onde as dificuldades ambientais são ainda maiores. O que parece provável é que, por suas vantagens econômicas, ainda será instalada uma capacidade considerável de geração hídrica naquela região. Foram incluídas no Plano de Aceleração do Crescimento (PAC) as usinas de Belo Monte e as do Rio Madeira. Para tornar os projetos aceitáveis pela sociedade, as áreas inundadas (e a capacidade de armazenamento) foram consideravelmente reduzidas nos dois projetos. No caso do Rio Madeira, houve ainda a necessidade de evitar que o reservatório incluísse o território boliviano, o que tornaria a realização do empreendimento ainda mais complexa.

Ou seja, ainda que os preços estimados de geração sejam inferiores, as incertezas ambientais e de custo não permitem esperar uma instalação de capacidade hídrica superior a 180 GW (gigawatt) no ano de 2035, de um total estimado de 260 GW. Essa é a trajetória limite que supera, inclusive, as projeções do Plano 2030 como mostrado na Figura 9.

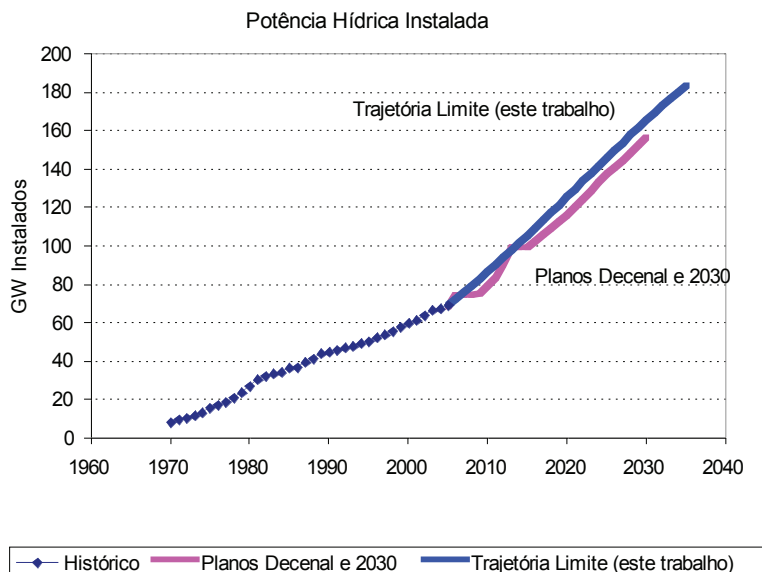


Figura 9 – Potência hídrica instalada nos cenários de referência dos planos 2025 e 2030 e trajetória limite considerada neste trabalho.

Não foi considerada nessa trajetória limite a evolução dos custos da energia gerada. Na Figura 10, são mostradas duas estimativas de evolução do custo do MWh gerado a partir de hidrelétricas brasileiras que, embora bastante diferentes, coincidem em um limite econômico da ordem de 150 GW instalados, em que o custo da geração hidrelétrica superaria 55 US\$/MWh.

Considerando 12% de perdas técnicas, o limite de 150 GW corresponde a cerca de 720 TWh de energia gerada ou a um consumo final de 640 TWh. Ou seja, para uma demanda global entre 1.600 TWh a 1.700 TWh em 2035 haveria cerca de 1.000 TWh de origem térmica. As térmicas não teriam mais o papel complementar que hoje exercem, e pode-se esperar que tenha crescido o fator de capacidade médio. Supondo-se que ele atinja 70%, o potencial térmico instalado seria de cerca de 170 GW. Se for considerado que 30% desse potencial térmico fosse nuclear, isso corresponde a um potencial de 52 GW instalados ou a cerca de quarenta reatores do tipo Angra 3.

No planejamento oficial (Plano 2030) o potencial instalado nuclear em 2030 é de 7,2 GW, que abrangeria mais quatro unidades de 1 GW além de Angra 3. A extrapolação do plano 2030 para 2035 faz prever um total de 10 GW nucleares em 2035.

Avaliação do Custo do MWh Gerado a Partir de Dados de Investimento

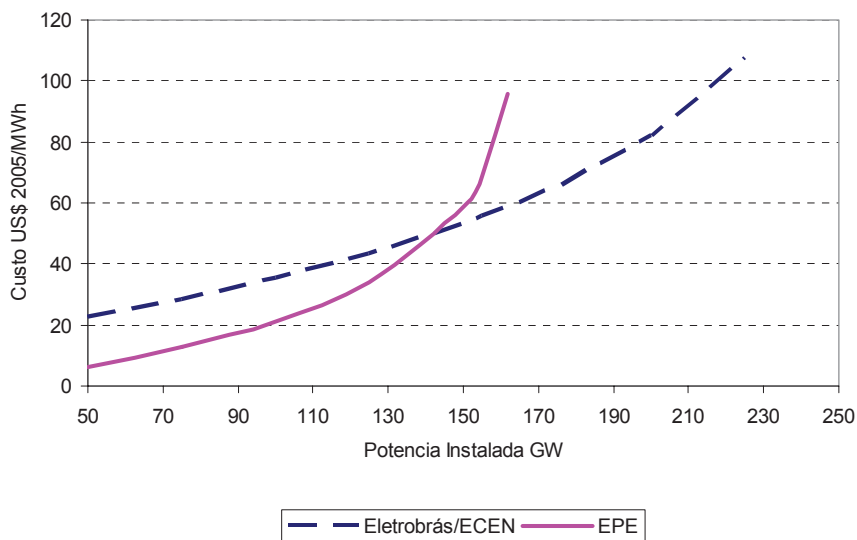


Figura 10 – Avaliação do custo da energia gerada a partir de dados de investimento Eletrobrás atualizado e EPE para usinas viáveis do ponto de vista social e ambiental. Cálculo do custo de geração dos autores.

O principal problema relativo ao plano 2030 parece se situar na demanda de gás natural que atingiria cerca de 26 bilhões de metros cúbicos ao ano naquele ano, que é cerca de 6% da reserva brasileira atual (incluindo as inferidas). Como a geração de eletricidade é apenas um dos usos para o GN (cerca de 20% nos Estados Unidos e no Brasil), o consumo de GN em 2030 seria cerca de 30% da reserva atual em um só ano. O Brasil possui apenas 0,2% (BP Statistical Review of World Energy, June 2005) das reservas mundiais conhecidas de gás natural e 0,9% das de petróleo. Ou seja, a opção de produção de energia elétrica a partir do gás natural implica fazê-lo a partir da importação de gás dos vizinhos (América do Sul e Central têm 8,5% das reservas mundiais). Esse problema será brevemente discutido na análise estratégica.

No que concerne ao custo da geração a partir do gás natural, ele é no Brasil inferior ao da geração a partir da energia nuclear. O preço médio da tonelada equivalente de petróleo do GN no Brasil foi, em 2005, metade do do óleo combustível (BEN/MME – Balanço Energético Nacional/ Ministério de Minas e Energia, 2006). O esperado é que ela custasse um pouco mais que a desse óleo, tendo em vista as características superiores do GN, incluindo as ambientais.

Da análise de custos da geração nuclear nos Estados Unidos, infere-se que a energia nuclear tende a ser competitiva com a gerada a partir do GN se os preços do petróleo (que servem de referência para o gás) se mantiverem em um patamar superior a US\$ 40/ barril. Na medida em que os preços brasileiros se aproximem dos internacionais, o quadro daqui deve refletir o internacional.

Do ponto de vista de custo, dentro das hipóteses de evolução de preços mencionadas, a geração nuclear tende a ser competitiva com as outras energias comerciais no horizonte estudado.

O aspecto ambiental

As objeções ambientais à energia nuclear diminuíram de intensidade nos últimos anos. Pode-se dizer que elas foram, em parte, compensadas negativamente por maiores preocupações com a proliferação que serão tratadas mais adiante.

A razão principal da atenuação da oposição à energia nuclear está relacionada à percepção de que a questão dos resíduos de longa duração não se restringe às usinas nucleares, mas atinge o conjunto das energias térmicas quando se inclui a emissão dos gases formadores do efeito estufa. Como se sabe, a geração nuclear não provoca emissões diretas desses gases.

Para se ter uma idéia da massa e volume envolvidos nos rejeitos de uma usina nuclear e de uma térmica convencional, tem-se que: a operação de uma usina nuclear de 1,3 GW durante um ano (80% de fator de capacidade) se faz com a reposição de 54 t de combustível (urânio enriquecido) que é um terço de sua carga total, e o volume dessa terça parte é cerca de 50 m³. A geração de igual quantidade de eletricidade (cerca de 9 TWh) produziria cerca de dois a três milhões de toneladas/ano de CO₂ (usina de GN ou carvão), despejando um volume aproximado de 1 a 1,5 bilhão de metros cúbicos na atmosfera. Ou seja, existe uma relação de cerca de cinquenta mil entre as massas de rejeitos de uma usina térmica e uma nuclear.

Os riscos ambientais da energia nuclear podem ser esquematizados em quatro aspectos:

1. Riscos na operação normal da usina.
2. Riscos em caso de acidente.
3. Riscos no ciclo do combustível (produção da mina ao combustível).
4. Riscos no armazenamento dos rejeitos.

No primeiro aspecto, a operação normal de uma central nuclear do tipo PWR (Pressurized Water Reactor) adotado no Brasil (centrais atuais e programadas) pode ser considerada como relativamente limpa em relação aos demais tipos de usinas de geração térmica, não existindo objeções relevantes da população local às centrais instaladas no Brasil e no mundo.

A principal preocupação das populações vizinhas e das análises ambientais relaciona-se com possíveis acidentes por falhas nas usinas e, ultimamente, no caso de atos terroristas.

No que concerne aos reatores do tipo PWR, não foi registrado no seu funcionamento nenhum acidente com danos ambientais significativos. O mais grave deles, o de Three Mile Island, não teve conseqüências diretas ambientais, mas levou ao aperfeiçoamento dos reatores atuais e a consideráveis modificações

que estão sendo incorporadas na próxima geração de reatores. A perspectiva atual (International Energy Outlook, 2006) é de que haja um crescimento da geração nuclear no mundo de 31% entre 2003 e 2030, e que essa tendência pode ainda superar o valor projetado no caso de preços superiores de combustíveis e de incremento da aplicação do Protocolo de Kyoto.

As oportunidades maiores de risco de contaminação estão no ciclo de combustível, sendo as mais graves de acidentes do tipo criticalidade acidental como o ocorrido na fábrica de combustíveis em Tokaymura, em 1999, no Japão. Esses acidentes são mais comuns em plantas militares ou que operam em enriquecimentos muito acima dos reatores do tipo PWR e resultam geralmente da quebra de procedimentos de segurança. São normalmente acidentes de curtíssima duração (a expansão térmica geralmente paralisa a reação), que afetam os operadores diretos. O acidente de Tokaymura foi uma exceção, tendo durado algumas horas. O ambiente próximo à fábrica foi afetado por radiações (gama e nêutrons), mas a contaminação externa não foi grave. Um acidente de conseqüências muito graves pode advir da dispersão acidental ou provocada de plutônio oriundo das usinas de reprocessamento. Esses dois tipos de acidente têm pouquíssima possibilidade de ocorrer no Brasil, já que os enriquecimentos usados no Brasil (instalações comerciais) são relativamente baixos (4%) e o reprocessamento de combustíveis não existe nem está nos planos para as próximas décadas no Brasil.

Deve-se lembrar de que, como em toda atividade, esse tipo de acidente deve ser comparado aos acidentes nos demais ciclos de combustíveis. Os mais conhecidos são os relacionados à mineração do carvão e os de incêndios em instalações petrolíferas e no transporte de combustíveis líquidos ou gasosos.

No Brasil, o tipo de dispersão de radiação que mais merece preocupação se relaciona com as atividades de mineração (não obrigatoriamente ligadas ao ciclo nuclear); os afluentes podem gerar disseminação da radioatividade natural contida nos minérios, facilitada pelo ataque químico na extração de urânio ou de outros materiais.

Existe, no Brasil, além da insuficiência de recursos financeiros e humanos para o licenciamento e fiscalização da atividade, um problema de incompatibilidade de interesses em que o mesmo organismo regulatório nuclear (Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN) tem responsabilidades na gestão das Indústrias Nucleares Brasileiras (INB). Essa anomalia, reconhecida pelos próprios dirigentes atuais da CNEN, persiste não obstante as diversas recomendações nacionais e internacionais sobre o assunto.

Quanto aos rejeitos de baixa e média atividades, atualmente armazenados no próprio local da Usina de Angra, uma solução definitiva deverá ser alcançada preliminarmente à expansão do Programa Nuclear. A solução do problema não apresenta dificuldades tecnológicas, sendo uma questão de decisão política e de aceitação pública.

Existe, finalmente, o problema maior do repositório definitivo dos rejeitos de média e alta atividades (fundamentalmente combustíveis irradiados) cuja solução técnica parece ser a disposição subterrânea em local com condições geológicas naturais adequadas ao repositório definitivo, mas guardando para as gerações futuras (e atuais) a possibilidade de uma eventual intervenção. Essa deve ser a estratégia a ser implementada no repositório de Yucca Mountain nos Estados Unidos.

Sempre é bom lembrar que um repositório definitivo para os rejeitos nucleares deve ser capaz de conter rejeitos radioativos por muitos milhares de anos. Esse é um problema em relação ao qual a humanidade não tem experiência (supera a existência da atividade humana dita civilizada) e cuja solução está baseada no comportamento geológico passado.

Sobre esse aspecto, a linha de reatores adotada pelo Brasil e predominante no mundo gera um volume menor de rejeitos sólidos que a sua concorrente mais próximo, a dos reatores de urânio natural/água pesada (Pressurized Heavy Water Reactor – PHWR). O reprocessamento desses combustíveis com o aproveitamento do plutônio pela irradiação de óxidos mistos (plutônio e urânio) já é feito em vários países desenvolvidos e reduz consideravelmente o volume de alta atividade a ser armazenado (produtos resultantes da divisão do núcleo de urânio na fissão⁷ e o plutônio residual). No Brasil não existe decisão sobre a adoção da via de reprocessamento, o que induz que o armazenamento do combustível seja feito sem modificação de seu estado físico ou químico.

Pode-se dizer, portanto, que não existe ainda solução para os rejeitos nucleares (sólidos, de pequeno volume e altamente tóxicos com duração de milhares de anos) e para os rejeitos das demais usinas térmicas (gasosos, de enorme volume e duração de centenas de anos). No Brasil, mais atenção deveria ser dada à dispersão radioativa na atividade de mineração e é inadiável a desvinculação da CNEN de atividades industriais do ciclo de combustível.

O aspecto tecnológico

O Brasil é um dos poucos países que dominam o ciclo de combustíveis nucleares que compreende mineração, concentração, purificação do urânio na forma de U_3O_8 (triurânio octaóxido [*yellow cake*]), sua conversão em hexafluoreto, seu enriquecimento, a reconversão em óxido (UO_2 [dióxido de urânio]), fabricação de pastilhas e montagem do elemento combustível. Para a etapa de conversão não existe unidade comercial, e a capacidade da unidade de enriquecimento em construção na INB (já em operação) leva a que grande parte do enriquecimento de urânio seja realizado no exterior.

O desenvolvimento dessa tecnologia do ciclo, realizada em grande parte em instalações da Marinha e da CNEN, mas com o apoio de muitas unidades industriais do sistema produtivo brasileiro, já teve considerável impacto tecnológico na indústria nacional.

Existe no mundo crescente restrição de transferência de tecnologia diretamente relacionada ao ciclo nuclear ou de uso dito dual. A disponibilidade dessas tecnologias tem que ser alcançada internamente, até para que sejam abertas as portas da importação. Como boa parte das tecnologias envolvidas é de uso dual, a eventual recusa de desenvolvimento na área nuclear resulta na renúncia à atuação do país em várias áreas de alta rentabilidade no setor industrial.

Na experiência prática dos países, o acesso a essas tecnologias não se dá pela renúncia às atividades nucleares (como querem fazer crer os países mais adiantados), mas pela capacitação interna e, em menor grau, pela transparência do programa nuclear nacional.

Existe no país capacidade para a fabricação dos elementos pesados do reator e de trocadores de calor. A maioria dos elementos de controle é ainda importada. A divisão da geração⁸ em turbinas de menor porte pode propiciar a fabricação no país desses componentes nas próximas décadas. O projeto das próximas usinas ainda deverá ser externo, mas com nível crescente de nacionalização.

A fabricação de componentes elementos de reatores envolve importante capacitação tecnológica nas áreas de materiais, engenharia mecânica e civil. A construção do reator incrementa a capacitação no gerenciamento e na aplicação de procedimentos de garantia da qualidade.

O desenvolvimento tecnológico associado ao setor nuclear ainda encerra avanços importantes para o país em algumas áreas específicas. Existe crescente restrição ao acesso dessas tecnologias que prejudica o desenvolvimento em outras áreas. O acesso a essas tecnologias se dá pela capacitação própria que surge das necessidades criadas na área nuclear.

O aspecto estratégico

No aspecto estratégico, podem ser destacados dois pontos: o primeiro relativo à disponibilidade de reservas energéticas nacionais e à perspectiva de dependência energética; o segundo se relaciona com a política de não-proliferação de armas nucleares e das tecnologias a elas associadas.

Quanto ao primeiro ponto, as reservas e os recursos energéticos brasileiros são publicados anualmente no Balanço Energético Nacional (BEN) pela EPE/MME e, ao final de 2005, apresentavam o quadro apresentado na Tabela 3 onde foram incluídos os valores de R/P (reserva/produção) e R/C (reserva/consumo).

Dos combustíveis não-renováveis, o carvão mineral é o que apresenta maior valor de reservas e a maior razão reserva/produção e reserva/consumo. Essas razões foram tomadas a partir do consumo de carvão vapor e não incluem o carvão metalúrgico, de que o Brasil é quase inteiramente dependente de importações (10,4 milhões de tep (tonelada equivalente petróleo) em 2005). A energia nuclear (urânio) vem em seguida, mesmo adotando-se o critério do não-aproveitamento das energias residuais do urânio e plutônio nos combustíveis irradiados. Quanto ao gás natural, o Brasil já é dependente de abastecimento externo e é o

energético não-renovável com menor razão reserva/consumo. A geração elétrica térmica preferencialmente com gás natural, como prevista no Plano 2030, deverá continuar sendo feita em grande parte com gás importado de nossos vizinhos.

Tabela 3
Reservas medidas/indicadas em valores absolutos e relativos à produção e ao consumo em 2005

	Reservas	Produção	Consumo(1)	R/P	R/C	Consumo(2) na geração de eletricidade
	10 ⁶ tep	10 ⁶ tep/ ano	10 ⁶ tep/ano	anos	anos	
Petróleo	1668	84,3	87,7	20	19	3%
Gás natural (3)	304	14,8	22,7	21	13	18%
Carvão mineral (4)	2.756	2,3	2,3	1174	1204	83%
Energia nuclear	1.236	1,3	2,5	944	498	100%

Fonte: BEN/EPE/MME Reservas em 31.12.2005 medidas/ indicadas/ considerando perdas na mineração e beneficiamento no caso do carvão mineral e urânio.

(1) Inclui transformação; (2) No caso do petróleo, geração elétrica a partir dos derivados; (3) A produção do GN exclui reinjeção, o consumo inclui perdas; (4) Considerado como carvão vapor.

Na Tabela 4 está indicada a geração de energia elétrica possível a partir da reserva mostrada na tabela anterior. Na última coluna, indicam-se os totais correspondentes às reservas totais que incluem as inferidas e estimadas. Nessa tabela, procura-se discriminar a parte das reservas que seriam destinadas à geração, colocando-se limites tentativos para a utilização de cada fonte baseando-se no percentual de uso em 2005 (foi suposto um aumento da participação do GN na geração).

Da Tabela 4 infere-se que, do ponto de vista de maior independência energética, as gerações a carvão e a nuclear são as mais indicadas dentre os combustíveis não-renováveis. O carvão nacional, que contém um grande volume de cinzas, só se presta à geração na boca da mina, restringindo-se, portanto, às usinas localizadas na Região Sul. Fica evidente, ainda, quando se incorporam as reservas inferidas e estimadas, que a opção pela geração térmica a partir do GN no plano 2030 é uma opção estratégica de aproveitar os recursos naturais de nossos vizinhos em relação aos quais o Brasil está em posição privilegiada ante a concorrência com outros países que demandam o GN. A tabela leva em conta que para o GN existem outras demandas, e que ele deveria ser preferentemente usado na co-geração (de eletricidade e calor) em vez da geração exclusiva de eletricidade.

Tabela 4 – Geração de energia elétrica a partir das reservas existentes no Brasil

	Reservas medidas/ indicadas	Para Uso na Geração Elétrica	Reservas Utilizáveis na Geração	Eficiência na Geração de Eletricidade	Geração Reservas medidas/ indicadas		Geração incluindo Reservas inferidas/ estimadas
					10 ⁶ tep	TWh	
	10 ⁶ tep		10 ⁶ tep		10 ⁶ tep	TWh	TWh
Petróleo	1.668	5%	83	0,38	32	368	505
Gás natural	304	30%	91	0,41	37	435	645
Carvão mineral	2.756	85%	2.343	0,29	679	7900	25303
Energia nuclear	1.236	100%	1.236	0,34	420	4888	8519

Da análise das reservas, fica claro que o carvão vapor e o nuclear são opções importantes dentro da geração. Não constam da tabela as reservas renováveis, mas também será importante a produção a partir da biomassa, principalmente da oriunda do aproveitamento do bagaço.

Na hipótese (máxima) de participação da energia nuclear com 52 GW instalados em 2035, a geração nuclear seria de cerca de 350 TWh (fator de capacidade de cerca de 80%) que a reserva total permite manter por 23 anos. Na hipótese mais provável de uma potência instalada de 10 GW e geração de 70 TWh, a reserva estimada daria para 110 anos.

Quanto ao segundo ponto dessa análise estratégica, deve-se considerar que o assunto da proliferação nuclear sofreu evoluções importantes nos últimos anos:

- Índia e Paquistão declararam e demonstraram capacidade de explodir artefatos nucleares bélicos.
- A Coréia do Norte confessou atividades nucleares para usos bélicos.
- O Irã tem seu programa nuclear, alegadamente para fins pacíficos, contestado.
- O risco de proliferação nuclear e de outras armas de destruição de massa foi usado pelos Estados Unidos e pela Grã-Bretanha como pretexto para a invasão do Iraque, não obstante os resultados negativos das inspeções da ONU.
- As grandes potências nucleares não só abandonaram praticamente a política de desarmamento anteriormente anunciada, mas também retomaram projetos antigos como o “Guerra nas Estrelas”.
- Finalmente, uma nova doutrina nos Estados Unidos prevê a utilização de armamentos nucleares específicos contra países não nuclearmente armados. Essa doutrina e a utilização da força contra o Iraque desconsiderando as conclusões dos inspetores da ONU (da Agência Internacional

“O comportamento verificado reforça a hipótese de que a intensidade energética tende a se manter aproximadamente constante ao longo dos próximos anos.”

“Dentro das premissas dessa comparação, o custo da geração nuclear é competitivo com o custo da geração a partir dos derivados de petróleo e com o gás natural (GN), mas a geração a carvão (majoritária) nos Estados Unidos segue sendo mais barata que a nuclear.”

de Energia Atômica – AIEA) para os assuntos nucleares enfraqueceram os melhores argumentos sobre a inutilidade prática de novos países buscarem acesso aos armamentos nucleares.

Nesse quadro, não chegou a ser surpresa o completo fracasso da Conferência da ONU de Revisão do Tratado de Não-Proliferação Nuclear, o TNP, realizada em maio de 2005.

No que concerne ao Brasil, que chegou a ser apontado como preocupação na área de salvaguardas e “bola da vez” na pressão internacional pela adesão ao Protocolo Adicional de fortalecimento das salvaguardas da AIEA, a situação também evoluiu:

- Foi resolvida com a AIEA a questão do método de inspeção na Usina de Enriquecimento de Rezende sem que fossem revelados os detalhes técnicos que o Brasil queria proteger (uma câmara permite ver o topo das centrífugas).
- A política de preservação da tecnologia de enriquecimento no Brasil se revelou e tem sido reconhecida como eficaz para a não-proliferação, não tendo sido registrada fuga de informações ou participação de técnicos brasileiros em projetos não pacíficos no exterior.

A atual crise de preços de petróleo e os problemas de aquecimento global associados ao efeito estufa levaram vários países a reconsiderarem o incremento da participação da energia nuclear em sua matriz energética nas próximas décadas. Países que mantiveram seus programas nucleares de geração, como a China e o Japão, já anunciaram a intenção de intensificar seus programas. A maioria dos países optou pela extensão da vida dos reatores existentes. No Brasil, parece decidida a retomada da construção de Angra 3, e o Plano 2030 inclui quatro centrais nucleares adicionais.

Isso vai tornar inevitável voltar a discutir a adesão do Brasil (provavelmente em conjunto com a Argentina) ao modelo de Protocolo Adicional que a AIEA

“Os riscos ambientais da energia nuclear podem ser esquematizados em quatro aspectos: 1. Riscos na operação normal da usina; 2. Riscos em caso de acidente; 3. Riscos no ciclo do combustível (produção da mina ao combustível); 4. Riscos no armazenamento dos rejeitos.”

“Sempre é bom lembrar que um repositório definitivo para os rejeitos nucleares deve ser capaz de conter rejeitos radioativos por muitos milhares de anos. Esse é um problema em relação ao qual a humanidade não tem experiência (supera a existência da atividade humana dita civilizada) e cuja solução está baseada no comportamento geológico passado.”

aprovou para fortalecer as salvaguardas nucleares. Esse protocolo já foi assinado praticamente por todos os países onde a energia nuclear tem papel relevante, e não parece possível o Brasil adiar indefinidamente sua decisão sobre a adesão (ou não) a esse Protocolo. Seria desejável que fosse encontrada uma saída menos intrusiva na possível aplicação do Protocolo Adicional no Brasil.

As reservas de urânio e o domínio do ciclo de combustível colocam, portanto, o Brasil em posição privilegiada para o uso da energia nuclear. A tendência mundial na área da não-proliferação é que essa opção se feche para países que não forem capazes de dominar a tecnologia nos próximos anos.

Conclusões

A demanda energética projetada para os próximos trinta anos, mesmo para crescimentos abaixo dos desejados e considerando algum esforço de redução da intensidade energética, mostra a necessidade de adicionar energia térmica à geração elétrica, hoje predominantemente hídrica. A energia nuclear deve ter participação nessa geração.

As projeções muito otimistas sobre a redução da intensidade do uso da energia elétrica não parecem realizáveis no prazo considerado.

Os custos da geração nuclear devem permanecer competitivos, em um cenário mundial com o petróleo a preços superiores a US\$ 40 o barril. No Brasil eles também devem se tornar competitivos no decorrer do período estudado.

No aspecto ambiental, a energia nuclear passou a ser favorecida com a pressão crescente para a redução das emissões de gases formadores do efeito estufa. A armazenagem de grandes quantidades de gás carbônico introduziu o problema de armazenar rejeitos de longa duração, antes exclusivo da nuclear,

“Pode-se dizer, portanto, que não existe ainda solução para os rejeitos nucleares (sólidos, de pequeno volume e altamente tóxicos com duração de milhares de anos) e para os rejeitos das demais usinas térmicas (gasosos, de enorme volume e duração de centenas de anos).”

“Quanto ao segundo ponto dessa análise estratégica, deve-se considerar que o assunto da proliferação nuclear sofreu evoluções importantes nos últimos anos: • Índia e Paquistão declararam e demonstraram capacidade de explodir artefatos nucleares bélicos. • A Coreia do Norte confessou atividades nucleares para usos bélicos. • O Irã tem seu programa nuclear, alegadamente para fins pacíficos, contestado.”

para as outras fontes energéticas. A massa de rejeitos apresenta um fator de cinquenta mil em relação à dos nucleares.

A linha de reatores adotada no Brasil e a limitada utilização da energia nuclear prevista fazem que a solução do problema dos rejeitos de longa duração possa ser adiada. O repositório para os rejeitos de média e curta duração deverá ser definido nos próximos anos. Também a questão da desvinculação da CNEN das atividades industriais do ciclo de combustíveis deverá ser resolvida. Especial cuidado deve ser dirigido aos impactos ambientais nas atividades de mineração, mesmo nas de materiais não-nucleares.

O desenvolvimento da tecnologia nuclear já trouxe ganhos importantes para o país que têm influência sobre outras áreas de atividade industrial. A manutenção da atividade impulsiona, por sua vez, o desenvolvimento próprio de tecnologias que sofrem restrições na importação de técnicas e equipamentos necessários a outros setores.

No aspecto estratégico, o país dispõe de reservas de urânio e tecnologia de produção de combustível que tornam menos vulnerável seu suprimento de energia elétrica, que deve passar a depender mais fortemente de gás natural importado. As políticas de não-proliferação de armas nucleares tornaram enormemente restritivo o desenvolvimento ou a importação da tecnologia relacionada ao ciclo de combustível. O Brasil está em posição privilegiada no desenvolvimento e manejo responsável dessa tecnologia e precisa mantê-la ativa, já que certamente a energia nuclear faz parte de seu futuro energético.

Notas

- 1 Essa análise pode ser setorial ou global, como foi feita neste trabalho, por razões de simplicidade.
- 2 Os valores do PIB em PPC para o período 1980 a 2004, para o qual se dispõe de avaliação, têm praticamente o mesmo comportamento relativo dos valores anuais do PIB em termos reais. Isso permite fazer uma extensão do conceito de paridade de poder de compra para o período de 1970 a 1979 e para a projeção dos anos seguintes.
- 3 A disparidade entre taxas de câmbio em relação à paridade do poder de compra é uma realidade que persiste em vários países, não obstante a maior abertura econômica nos últimos tempos. É de se esperar, no entanto, que, não sendo revertido o processo de internacionalização da economia, essa diferença venha a desaparecer. Em qualquer caso, no entanto, é o valor real do PIB que deve ser observado.
- 4 A correspondência das duas escalas não é exata, mas a aproximação entre os valores lidos na escala superior e os observados é bastante boa.
- 5 No ano de 2005, por exemplo, o consumo da eletricidade cresceu mais que o PIB (para surpresa do planejamento oficial).
- 6 Note-se que a mudança apontada pelo estudo da WWF corresponde a alcançar, em quinze anos, o nível energia elétrica/produto (em paridade de poder de compra) da África. Os mais otimistas poderiam dizer que o Brasil chegaria ao nível da Itália, que também apresenta uma baixa relação energia elétrica/produto. Certamente esse caminho não será possível com o país continuando a se especializar em *commodities*. Em todo caso, não parece possível uma mudança tão radical na economia de energia elétrica no prazo considerado, como a sugerida pela WWF.
- 7 Para os produtos de fissão, existe ainda a alternativa de irradiação em aceleradores que reduziriam a atividade residual.
- 8 Em usinas do tipo Angra 2 feita em uma única turbina.

Referências bibliográficas

AGENDA Elétrica Sustentável 2020. Disponível em: <http://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/meio_ambiente_brasil/clima/mudancas_climaticas_resultados/asust/index.cfm>.

ALVIM, C. F. et al. Comparação de resultados de projeções de demanda de energia elétrica no Brasil. *Revista Economia e Energia*, n.59, 2007. Disponível em: <<http://ecen.com/eee59>>.

_____. Um porto de destino para o sistema elétrico brasileiro. *Revista Economia e Energia*, n.49. 2005. Disponível em: <<http://ecen.com/eee49>> e <http://www.oecd.org/LongAbstract/0,2546,en_2649_201185_34597223_119699_1_1_1,00.html>.

BALANÇO Energético Nacional. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>.

INTERNATIONAL Energy Outlook, 2006. Disponível em: <<http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/highlights.html>>

PLANO NACIONAL 2020, Expansão da Oferta. Disponível em: <<http://www.epe.gov/list/estudos>>.

RESUMO – A perspectiva da Energia Nuclear no Brasil é analisada sob os aspectos demanda, custos, ambiental, tecnológico e estratégico. A demanda energética projetada, mesmo para crescimentos abaixo dos desejados e considerando algum esforço de redução da intensidade energética, mostra a necessidade de adicionar energia térmica à geração elétrica, hoje predominantemente hídrica. A energia nuclear deve ter participação nessa geração por motivos econômicos, ambientais, tecnológicos e estratégicos.

ABSTRACT – The perspectives of nuclear energy in Brazil is analyzed regarding demand, costs, environmental, technological and strategic aspects. The projected energy demand, even for a growth rate below the desired one and considering some efforts relative to energy intensity reduction, shows the need of adding thermal energy to electricity generation, now predominantly hydraulic. Nuclear energy should have a share in this generation due to economical, environmental, technological and strategic reasons.

Carlos Feu Alvim é doutor em Ciências Físicas e editor da revista *Economia e Energia*. Foi secretário e secretário adjunto da Agência Brasileiro-Argentina de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares 1992-2001 (ABACC). @ – cfeu@ecen.com

Frida Eidelman é mestre em Engenharia Nuclear e diretora superintendente da OSCIP Economia e Energia. @ – frida@ecen.com

Olga Mafra é doutora em Física e membro da OSCIP Economia e Energia. Foi professora nos cursos de pós-graduação do IME e IPEN. @ – olga@ecen.com

Omar Campos Ferreira é engenheiro civil, nuclear e membro da OSCIP Economia e Energia. Foi diretor do Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CDTN) e professor da UFMG. @ – omar@ecen.com

Recebido em 6.2.2007 e aceito em 12.2.2007.

O arquivo disponível sofreu correções conforme ERRATA publicada no Volume 21 Número 60 da revista.