

Parte III

Fontes não-renováveis



8

Energia Nuclear

O ciclo do combustível nuclear

O valor do minério urânio está na característica do átomo que o compõe: o átomo de urânio (U), primeiro elemento químico da natureza em que se descobriu a capacidade de radiação (ou emissão e propagação da energia de um ponto a outro). Essa radiação, se descontrolada, pode provocar os acidentes nucleares. Se bem utilizada, é aplicada em atividades importantes e até mesmo vitais, como a medicina.

A maior aplicação do átomo de urânio é em usinas térmicas para a geração de energia elétrica – as chamadas usinas termonucleares. De uma maneira muito simplificada, neste caso o núcleo do átomo é submetido a um processo de fissão (divisão) para gerar a energia. Se a energia é liberada lentamente, manifesta-se sob a forma de calor. Se é liberada rapidamente, manifesta-se como luz. Nas usinas termonucleares ela é liberada lentamente e aquece a água existente no interior dos reatores a fim de produzir o vapor que movimenta as turbinas.

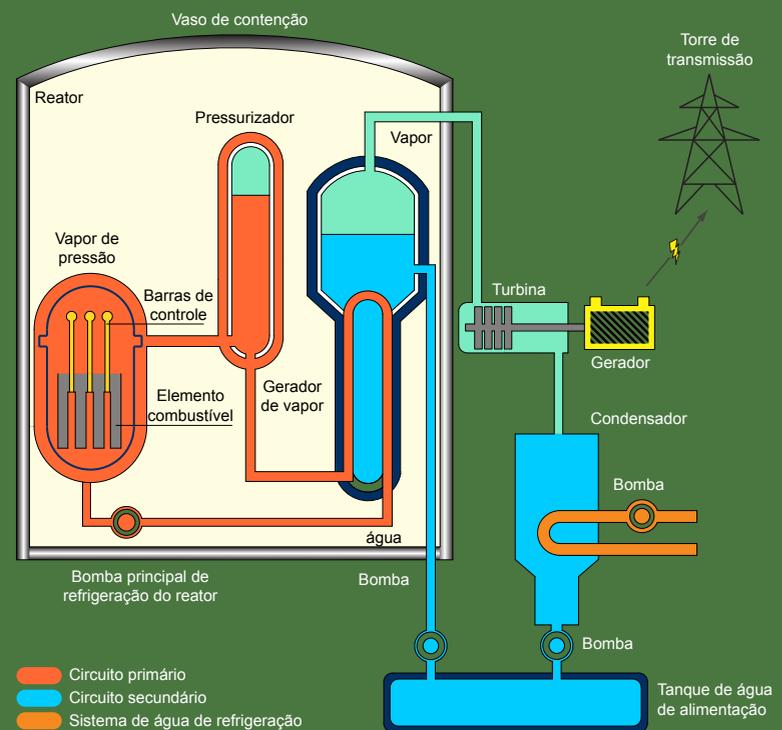
As usinas termonucleares são dotadas de uma estrutura chamada vaso de pressão, que contém a água de refrigeração do núcleo do reator (onde fica o combustível nuclear). Essa água, altamente radioativa, circula quente por um gerador de vapor, em circuito fechado, chamado de circuito primário. Esse circuito primário aquece uma outra corrente de água que passa pelo gerador (circuito secundário) e se transforma em vapor, acionando a turbina para a geração de energia elétrica. Os dois circuitos não têm comunicação entre si.

Pesquisadores buscam obter energia também a partir da fusão do núcleo de vários átomos. Até agora, porém, essa tecnologia não é usada em escala comercial.

O urânio extraído não chega à usina em estado puro. Pelo contrário: passa por um processo bastante complexo de processamento que, em resumo, pode ser dividido em três etapas principais. A primeira delas é a mineração e beneficiamento, na qual o minério é extraído da natureza e enviado a uma unidade de beneficiamento, onde é purificado e concentrado, dando origem a uma espécie de sal de cor amarela, conhecido como *yellowcake* e cuja fórmula química é U_3O_8 .

A segunda etapa é a conversão. Nela, o *yellowcake* é dissolvido, purificado e convertido para o estado gasoso (gás UF_6). A terceira fase, de enriquecimento, caracteriza-se pelo aumento da concentração de átomos de urânio 235, dos naturais 0,7% para algo como 4%. O urânio 235 é o combustível das usinas nucleares. Para obter um quilo de produto são necessários cerca de oito quilos de *yellowcake*.

O processo completo de utilização do urânio, também chamado “ciclo do combustível nuclear”, abrange, ainda, a destinação do material utilizado. Há dois ciclos básicos: um aberto e um fechado. O primeiro envolve a deposição final do combustível utilizado. No segundo, o urânio residual e o plutônio produzidos voltam a ser utilizados na geração de energia, como óxido misto (MOx). Explicações detalhadas de todo o ciclo do urânio podem ser encontradas no site da World Nuclear Association (www.world-nuclear.org) ou no site da Indústrias Nucleares do Brasil (www.inb.gov.br).



Perfil esquemático de uma usina nuclear



Energia Nuclear

8.1 INFORMAÇÕES GERAIS

A energia nuclear, produzida a partir do átomo de urânio, voltou à agenda internacional da produção de eletricidade como alternativa importante aos combustíveis fósseis. Conhecida desde a década de 40, nos últimos anos passou a ser considerada uma fonte limpa, uma vez que sua operação acarreta a emissão de baixos volumes de gás carbônico (CO₂), principal responsável pelo efeito estufa e, em consequência, pelo aquecimento global. Além da característica ambiental, contribui para a tendência à expansão a

existência de abundantes reservas de urânio no planeta – o que, a médio e longo prazos, garante a segurança no suprimento.

Em 2006, a energia nuclear ocupou o penúltimo lugar entre as principais formas para produção de energia elétrica do mundo, segundo a International Energy Agency (IEA). Como mostra o Gráfico 8.1 abaixo, foi superada por hidreletricidade, gás natural e carvão e superou apenas o petróleo.

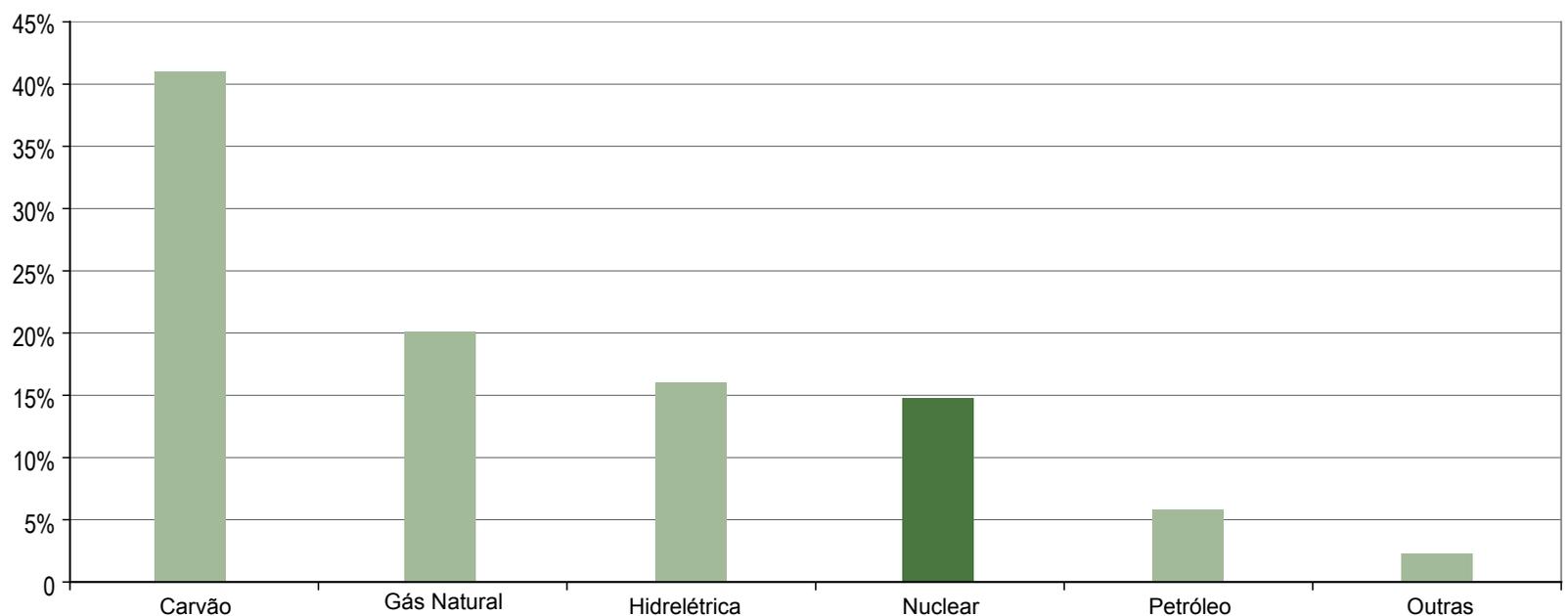


Gráfico 8.1 Geração de energia elétrica por tipo de combustível (2006).

Fonte: IEA, 2008.

Ainda assim, as usinas nucleares têm participação importante na matriz da energia elétrica. De acordo com as últimas estatísticas da IEA, em 2006 responderam por 14,8% da produção total, conforme destacado na Tabela 8.1 a seguir. Como a energia nuclear é usada quase que exclusivamente para a

produção de energia elétrica, sua participação no *ranking* global de fontes de energia primária (que também considera outros usos da energia) é menor: 6,2% ou 727,94 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep), segundo a IEA (Tabela 8.2 e Gráfico 8.2 a seguir).

País	%	TWh*
Carvão	41,0	7.761,3
Petróleo	5,8	1.097,94
Gás Natural	20,1	3.804,93
Nuclear	14,8	2.801,64
Hidrelétrica	16,0	3.028,8
Outras	2,3	435,39
Total	100,0	18.930

(*) Um terawatt-hora equivale a um milhão de gigawatts-hora.
Fonte: IEA, 2008.

País	%	Mtep*
Carvão	26,0	3.052,66
Petróleo	34,4	4.038,90
Gás Natural	20,5	2.406,91
Nuclear	6,2	727,94
Hidrelétrica	2,2	258,30
Outras	10,7	1.256,29
Total	100,0	11.741,00

(*) Cada Mtep é aproximadamente igual a 12 terawatts-hora. Considerando que o rendimento de uma usina térmica é da ordem de 30%, são necessárias três vezes mais combustível para produzir a mesma energia gerada por uma hidrelétrica.
Fonte: Adaptado de IEA, 2008.

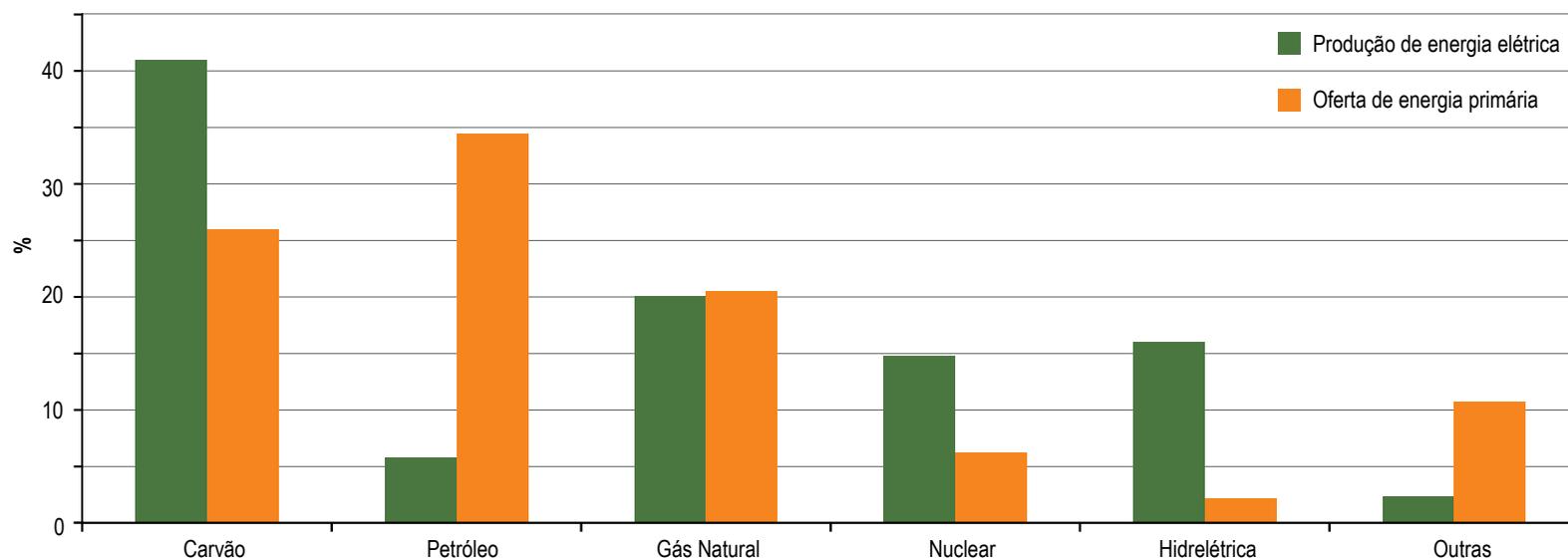


Gráfico 8.2 Produção de energia elétrica e oferta de energia primária no mundo.

Fonte: Adaptado de IEA, 2008.

O urânio figura como fonte primária da matriz energética mundial desde meados dos anos 60. Entre este período e o final dos anos 70, o mercado das usinas nucleares viveu um vigoroso ciclo de crescimento. A interrupção ocorreu em função de elementos negativos que coincidiram no tempo: a ocorrência de dois acidentes (Three Mille Island e Chernobyl) e os elevados investimentos necessários à instalação de uma central. Durante

quase trinta anos, os novos investimentos foram praticamente paralisados e a produção de energia nuclear sofreu forte oposição, principalmente por parte dos ambientalistas.

Além da ocorrência dos acidentes, outro fator que motivou a oposição às nucleares foi o fato de que o processo de fissão do átomo de urânio é o mesmo que dá origem à bomba

atômica. Assim, o país que domina a tecnologia de processamento e transformação do minério pode utilizá-la tanto para a produção de energia elétrica quanto para fins bélicos.

Nos últimos anos, porém, essa oposição tornou-se mais moderada. Lado a lado com os riscos, passaram a ser enumerados os pontos favoráveis à instalação de novas centrais. Entre eles, a disponibilidade de combustível (urânio) e a baixa emissão de dióxido de carbono (CO₂) ou qualquer outro gás que contribua para o efeito estufa – o que transforma a energia nuclear em energia limpa. Além disso, investimentos em desenvolvimento tecnológico buscam aumentar a segurança das unidades, embora ainda não exista uma solução definitiva para os rejeitos produzidos – o elemento mais perigoso do processo nuclear.

Finalmente, no âmbito da geopolítica internacional, países como a Rússia, após o final da Guerra Fria, comprometeram-se formalmente a desativar os artefatos bélicos e a utilizar o urânio decorrente dessa iniciativa na produção de energia elétrica. Além disso, a Agência Internacional de Energia

Atômica (AIEA, organização autônoma constituída em 1957 no âmbito das Nações Unidas) ampliou a sua esfera de atuação. Inicialmente se propunha a garantir o uso pacífico da energia nuclear e contribuir com as pesquisas científicas. Atualmente, com 137 países-membros, passou a inspecionar e investigar suspeitas de violações do Tratado de Não-Proliferação Nuclear das Nações Unidas.

O futuro da energia nuclear é difuso. A IEA projeta quatro cenários até 2025 (Gráfico 8.3 abaixo): referência, forte recuperação, fraca recuperação e Tratado de Kyoto. No mais otimista, de forte recuperação, a potência instalada passaria dos 361,2 GW (gigawatts) existentes no início dos anos 2000 para 570,1 GW. No nuclear fraco, o mais pessimista, recuaria para 296,8 GW. Conforme registra o estudo sobre geração termonuclear, do Plano Nacional de Energia 2030 produzido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a configuração de qualquer um desses cenários dependerá de vários fatores. Entre eles: competitividade do custo de geração, disponibilidade de urânio, segurança no fornecimento de outros combustíveis e aceitação pela sociedade da segurança das unidades nucleares.

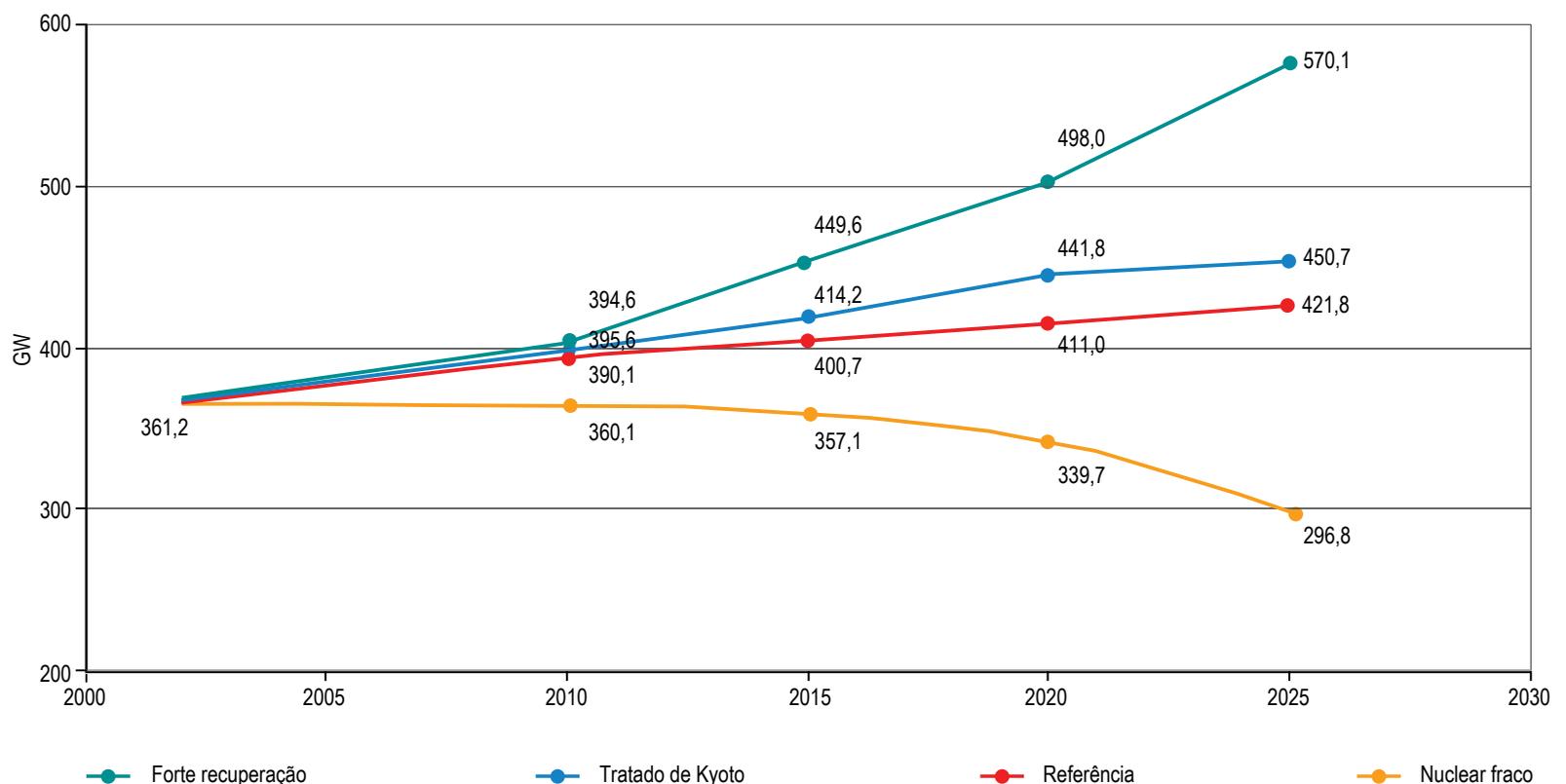


Gráfico 8.3 Cenários IEA para energia nuclear no mundo.

Fonte: EPE, 2006.

8.2 RESERVAS, PRODUÇÃO E CONSUMO NO MUNDO

A matéria-prima para a produção da energia nuclear é o minério de urânio, um metal pouco menos duro que o aço, encontrado em estado natural nas rochas da crosta terrestre. Desse minério é extraído o átomo de urânio utilizado na geração nuclear. Como mostra a Tabela 8.3 abaixo, em 2007 essas reservas totalizaram 4,6 milhões de toneladas distribuídas por 14 países, com destaque para a Austrália, Cazaquistão e Canadá que, juntos, respondem por mais de 50% do volume total.

No Brasil, apenas 25% do território foi prospectado em busca do minério. Ainda assim, o país ocupa o 7º lugar do *ranking*, com 278,7 mil toneladas em reservas conhecidas e correspondentes a cerca de 6% do volume total mundial. As jazidas estão localizadas principalmente na Bahia, Ceará, Paraná e Minas Gerais, conforme informações da Indústrias Nucleares do Brasil (INB). A principal delas, em Caetité, Bahia, possui 100 mil toneladas, volume suficiente para abastecer o complexo nuclear de Angra I, II e III por 100 anos.

A distribuição mundial do consumo, porém, não acompanha a localização ou a capacidade das reservas, mas a disposição

País	tU
Austrália	1.143.000
Cazaquistão	816.099
Canadá	443.800
Estados Unidos	342.000
África do Sul	340.596
Namíbia	282.359
Brasil	278.700
Nigéria	225.459
Rússia	172.402
Ubequistão	89.836
Jordânia	78.975
Índia	64.840
Mongólia	61.950
China	59.723
Outros Países	227.588
Total	4.627.327

(*) tU: toneladas de urânio.
Fonte: WEC, 2008.

do país para investir na geração nuclear de energia elétrica. Segundo a International Energy Agency, os três maiores consumidores são Estados Unidos, França e Japão. Em 2007, eles foram também os maiores produtores, com participação de, respectivamente, 30,9%, 16% e 10,1% no *ranking* mundial, como mostra a Tabela 8.4 abaixo e a Figura 8.1 na página seguinte.

País	TWh	%
Estados Unidos	848,9	30,9
França	440,4	16,0
Japão	279,0	10,1
Rússia	159,8	5,8
Coréia do Sul	142,9	5,2
Alemanha	140,5	5,1
Canadá	93,3	3,4
Ucrânia	92,5	3,4
Suécia	67,4	2,5
China	62,9	2,3
Brasil	12,4	0,4
Total	2.748,9	100,0

Fonte: BP, 2008.

A extração do urânio não é a única forma para obtenção do combustível utilizado nas centrais nucleares. Existem também as fontes secundárias, compostas por: material obtido com a desativação de artefatos bélicos; estoques civis e militares; reprocessamento do urânio já utilizado e sobra do material usado no processo de enriquecimento. Em 2006, segundo a IEA, o urânio extraído das reservas respondeu por 54% da energia nuclear produzida no mundo. O restante veio de fontes secundárias.

O urânio é comercializado sob a forma de *yellowcake* (espécie de sal amarelo, o U_3O_8), gás UF_6 e urânio 235 (sob a forma de barras), produtos derivados das três principais etapas de processamento do material bruto (ver Box 8). Seu comércio é rigidamente controlado tanto pelos governos nacionais quanto pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), uma vez que se trata de material radioativo.

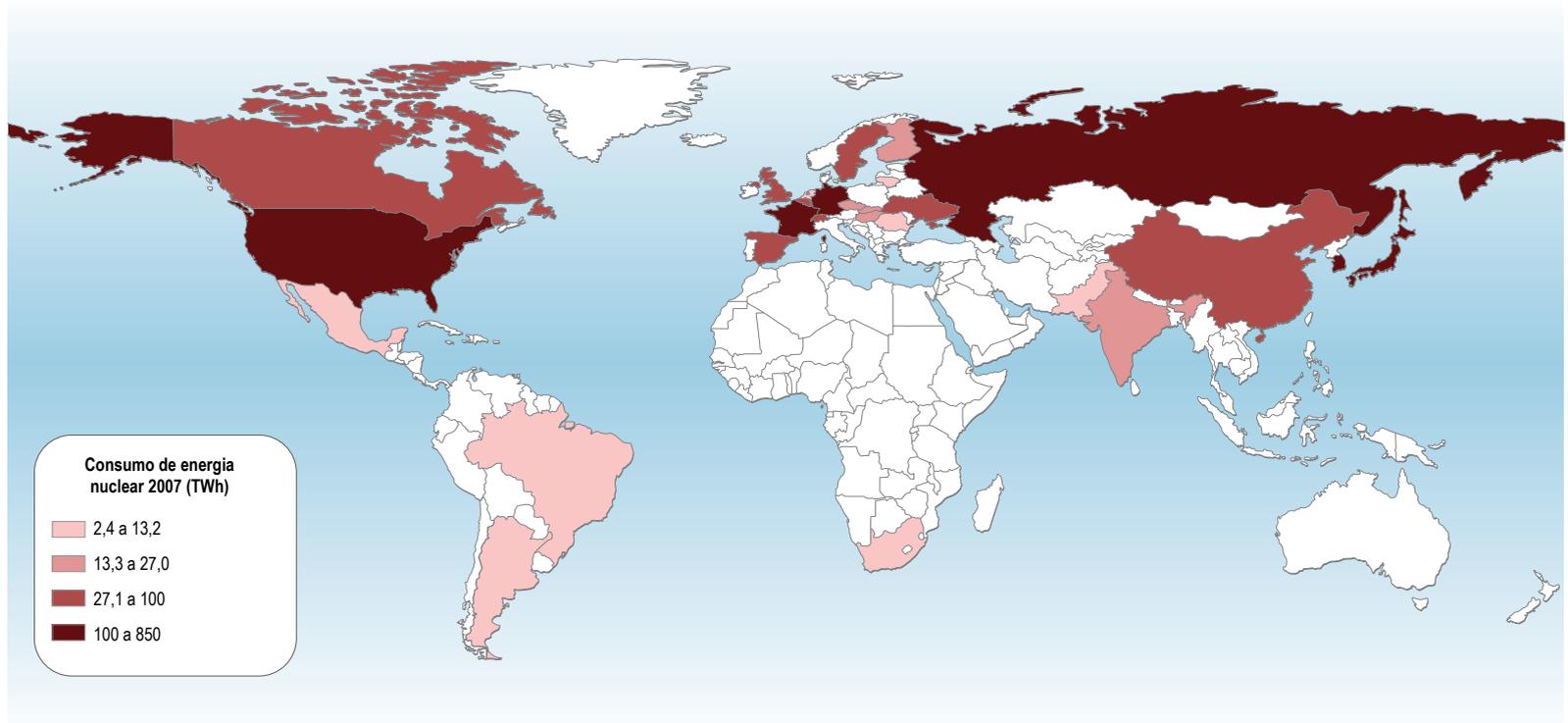


Figura 8.1 Consumo de energia nuclear no mundo em 2007.

Fonte: BP, 2008.

O comportamento dos preços reflete a relação oferta/consumo, como demonstra o Gráfico 8.4 a seguir, referente ao *yellowcake*. Os preços subiram de maneira acentuada durante a fase de expansão da construção de usinas nucleares, recuaram bruscamente

na década de 80 e se mantiveram em baixa durante quase 20 anos, para registrar ligeira recuperação após o ano 2000 – período em que se nota um aumento no número de unidades instaladas e de MWh (megawatts-hora) produzidos.

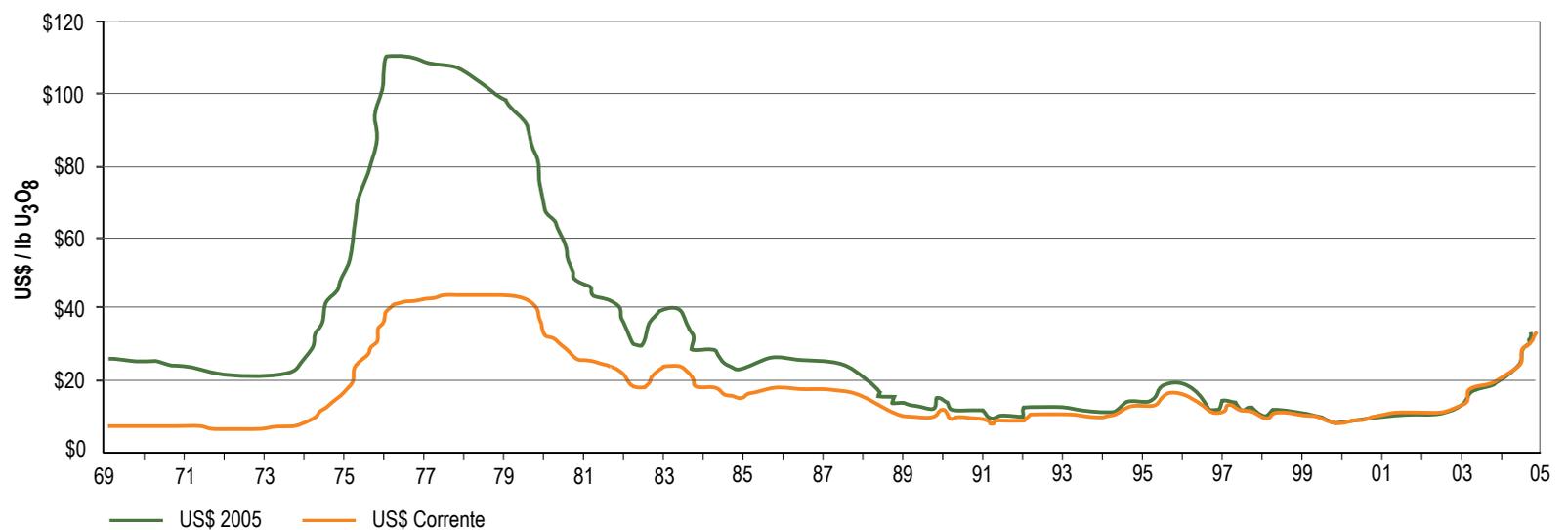


Gráfico 8.4 Evolução histórica do preço¹ do óxido de urânio (U₃O₈).

¹ Preço da libra (453,59237 gramas) de óxido de urânio em dólares.
Fonte: EPE, 2006.

Projeções da AIEA indicam que os estoques de urânio resultante da conversão de armas atômicas devem acabar entre 2020 e 2030, o que poderá implicar em aumento dos preços. Outro fator de alta poderá ser a entrada em operação de novos geradores, com licenciamento em curso nos Estados Unidos, que expandirá o consumo.

A tendência, no entanto, poderá ser atenuada por outras variáveis, como a configuração do cenário de fraca recuperação da IEA (ver Tópico 8.1), a exploração de novas reservas ou o aumento da eficiência das usinas (produção de maior quantidade de energia com a mesma quantidade de combustível) proporcionada por investimentos em tecnologia realizados atualmente.

No Brasil, apenas a Indústrias Nucleares Brasileiras (INB) é autorizada pelo Governo Federal a extrair e processar o urânio e demais minerais radioativos. A companhia é vinculada à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), uma autarquia federal subordinada ao Ministério da Ciência e Tecnologia e constituída para, em nome da União, exercer o monopólio da mineração de elementos radioativos e da produção e comércio de materiais nucleares.

A INB também domina a tecnologia dos três principais ciclos de processamento do átomo de urânio. No entanto, o enriquecimento ainda é realizado em países como Holanda e Alemanha. Ao chegar ao Brasil em contêineres, o urânio 235 é enviado à Fábrica de Combustível Nuclear (FCN), em Resende (RJ), e, em seguida, às usinas nucleares Angra I e Angra II, em Angra dos Reis (RJ). O projeto de expansão das linhas de enriquecimento de urânio da INB está em andamento e tem conclusão da primeira fase prevista para 2009. Nesse ano, a capacidade instalada da companhia deverá suprir 60% do combustível consumido em Angra I e II.

8.3 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL E NO MUNDO

A geração nuclear de energia elétrica vive um novo ciclo de expansão. Além de novas unidades em construção, aumenta o número de países que buscam aderir a essa tecnologia ou expandir o parque já instalado.

Em 2007, um total de 439 reatores nucleares, distribuídos por 31 países, estava em operação em todo o mundo, segundo dados da AIEA reproduzidos no trabalho Panorama da Energia Nuclear da Eletronuclear, empresa de economia mista subsidiária da Eletrobrás e responsável pela construção de usinas e geração de energia nuclear no Brasil. Os Estados Unidos concentravam o maior número de unidades (104), mas foi a França, com 59 reatores, que demonstrou maior dependência da produção nuclear: 76,85% da energia total produzida, conforme mostram a Tabela 8.5 e o Gráfico 8.5 a seguir.

Tabela 8.5 - Os dez países com maior número de centrais nucleares e potência instalada em 2007

	País	Unidades	MW
1ª	Estados Unidos	104	100.582
2ª	França	59	63.260
2ª	Japão	55	47.587
4ª	Rússia	31	21.743
5ª	Alemanha	17	20.470
6ª	Coréia	20	17.451
7ª	Ucrânia	15	13.107
8ª	Canadá	18	12.621
9ª	Reino Unido	19	10.222
10ª	Suécia	10	9.014
23ª	Brasil	2	2.007
	Total	439	372.100

Fonte: AIEA (Adaptado), 2008.

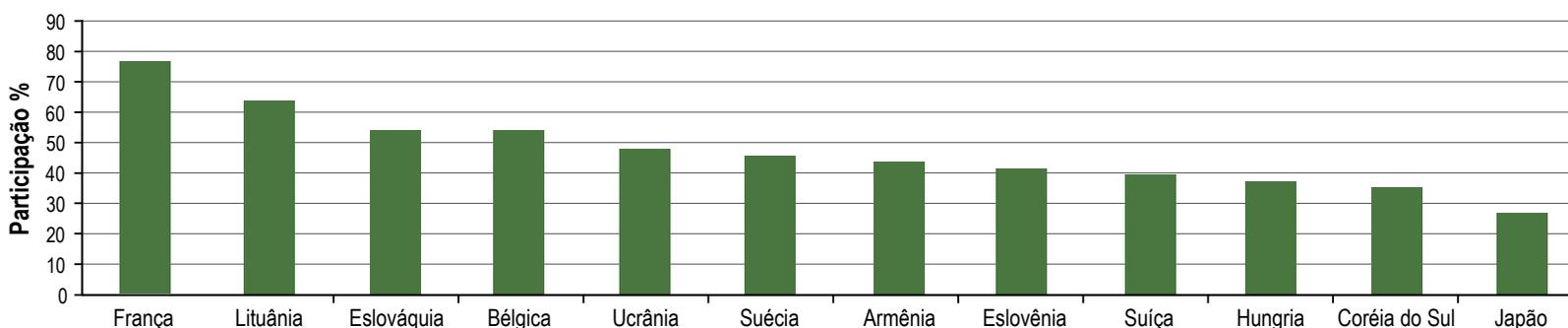


Gráfico 8.5 - Participação da energia nuclear na energia total produzida.

Fonte: AIEA, 2008.

No mesmo período, também, um total de 37 reatores encontravam-se em construção em 14 países (Tabela 8.6 abaixo), enquanto as obras de seis usinas tinham início na Coreia do Sul, Rússia, França e China. Além disso, três usinas entraram em operação na Índia, China e Romênia. Os Estados Unidos reativaram outras duas unidades, paralisadas há vários anos.

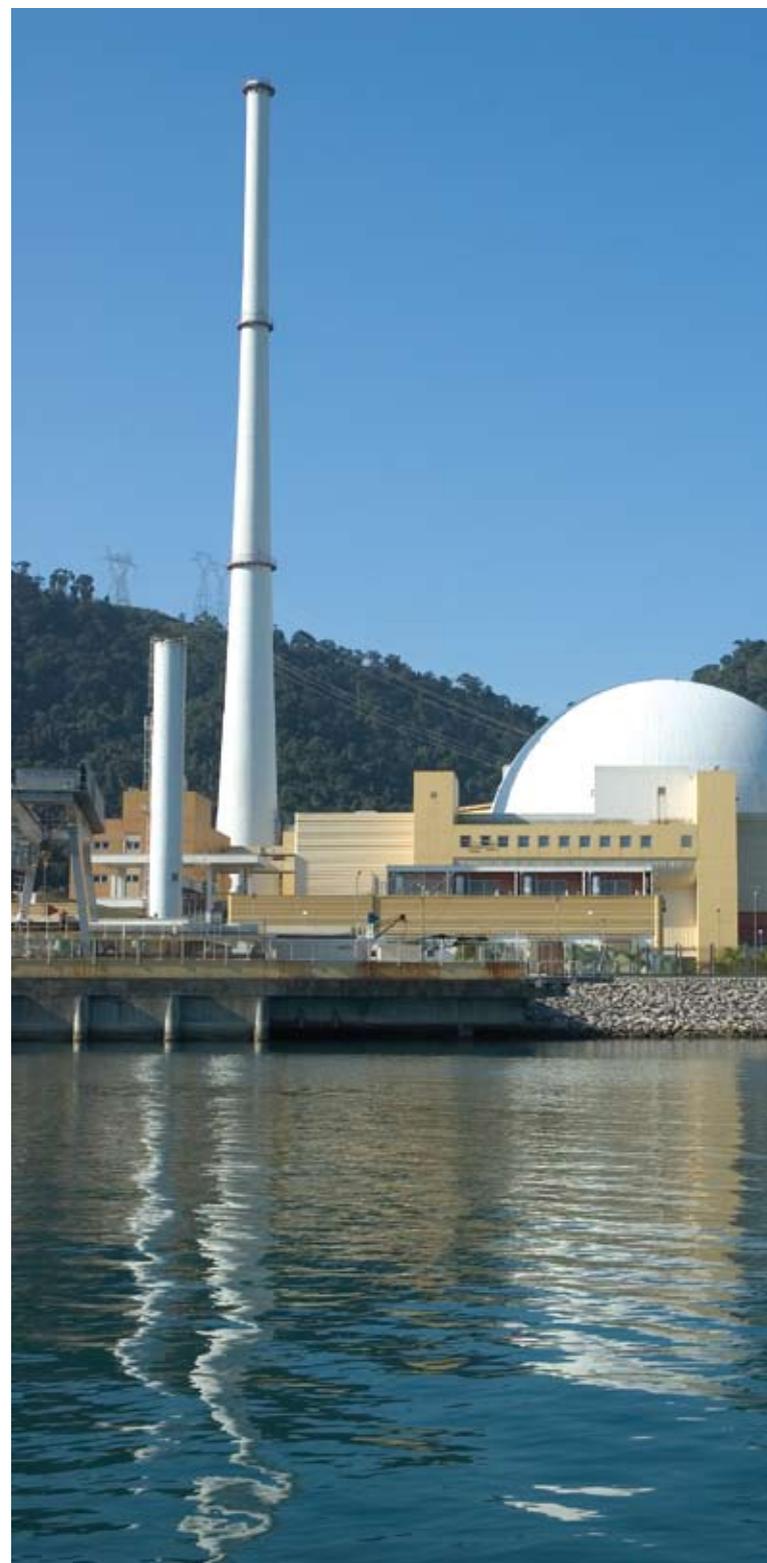
Tabela 8.6 - Energia nuclear: unidades e potência em construção (2007)		
País	Unidades	MW
Argentina	1	692
Bulgária	2	1.906
China	6	5.220
Finlândia	1	1.600
França	1	1.600
Índia	6	2.910
Irã	1	915
Japão	2	2.191
Coreia	4	3.840
Paquistão	1	300
Rússia	7	4.724
Taiwan	2	2.600
Ucrânia	2	1.900
Estados Unidos	1	1.165
Total	37	31.563

Fonte: AIEA, 2008.

Esse fenômeno é resultado da conjunção de diversas variáveis. Algumas são de ordem tecnológica, como as pesquisas para aumentar a segurança das instalações, eficiência e vida útil das unidades (cujo padrão é de 30 anos). Estes avanços reduzem o risco de acidentes nucleares e aumentam a viabilidade econômica do empreendimento.

O principal fator de impulso à tendência tem, porém, caráter ambiental. Trata-se da necessidade de diversificação da matriz energética. A energia nuclear vem sendo apontada como uma alternativa para expansão e diversificação dessa matriz, de forma a atender ao consumo crescente de energia, poupar os combustíveis fósseis e enfrentar o aquecimento global. Isto porque, de um lado, as reservas de urânio existentes no planeta são abundantes. De outro, porque o nível de emissão de CO₂ (dióxido de carbono ou gás carbônico)

ou qualquer outro gás que contribua para o efeito estufa é muito baixo em toda a cadeia produtiva da energia nuclear (da extração do urânio à geração de energia elétrica).



Usina nuclear Angra II.

Fonte: Eletronuclear.



Sala de controle - Central de operação.

Fonte: Banco de imagens de Angra 2.

Brasil

No Brasil, a expansão do parque nuclear faz parte do Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica (2006/2015). O país apresenta duas vantagens competitivas nesse segmento: as boas reservas do mineral e o domínio da tecnologia de enriquecimento do urânio – que, no entanto, ainda não é aplicada em escala comercial.

A instalação de usinas nucleares em território nacional foi decidida no final da década de 60. Com elas, o Governo Federal pretendia adquirir conhecimento sobre a nova tecnologia que se expandia rapidamente pelo mundo e, ao mesmo tempo, resolver um problema localizado: a necessidade de complementação térmica para o suprimento de eletricidade ao Rio de Janeiro.

A construção de Angra I teve início em 1972, com tecnologia da norte-americana Westinghouse adquirida em sistema *turn key* (sem transferência tecnológica). Três anos depois, em 1975, o país assinou com a República Federal da Alemanha o Acordo de Cooperação para o Uso Pacífico da Energia Nuclear. Em julho do mesmo ano, adquiriu as usinas de Angra II e Angra III da empresa Kraftwerk Union A.G. – KWU, subsidiária da Siemens, também alemã. O contrato previa transferência parcial de tecnologia.

Angra I, com potência instalada de 657 MW, entrou em operação comercial em 1985. Angra II, com potência instalada de 1.350 MW, em 2000. A construção de Angra III, também com 1.350 MW, por uma série de razões foi paralisada durante muitos anos. A construção foi inserida no Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica (2006/2015) e, em julho de 2008, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais (Ibama) expediu licença prévia autorizando a retomada das obras. Em setembro de 2008, o ministro de Minas e Energia, Edison Lobão, anunciou a intenção do governo de construir uma usina nuclear por ano ao longo dos próximos 50 anos, o que resultaria em uma capacidade instalada total de 60 mil MW.

A operação de Angra III está prevista para ter início em 2014. Com isto, a participação da capacidade nuclear instalada no Brasil deve passar de 1,98% (2,007 GW) para 2,5% (3,357 GW) da capacidade instalada total, considerando que esta última terá um crescimento anual de 4% passando de 103 GW (2008) para 130 GW em 2014.

Em 2007, Angra I e Angra II responderam por 2,5% da produção total de energia elétrica no país, que foi de 12,3 terawatts-hora (TWh).

8.4 IMPACTOS AMBIENTAIS E DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO

Das formas de produção de eletricidade, a usina nuclear é uma das menos agressivas ao meio ambiente. Ainda assim, a possibilidade de a unidade provocar grande impacto socioambiental é um dos aspectos mais controversos de sua construção e operação. Isto porque toda a cadeia produtiva do urânio – da extração à destinação dos dejetos derivados da operação da usina – é permeada pela radioatividade.

Durante a fase de extração e processamento do minério e de operação da usina, os níveis de radioatividade são permanentemente monitorados e controlados, de forma a não superar os limites previstos pelos órgãos reguladores. No entanto, ainda não se conseguiu encontrar uma solução definitiva para os dejetos radioativos que, lado a lado com o risco de acidentes nas usinas, se constituem nos elementos mais perigosos do processo de produção da energia nuclear.

Estes dejetos são classificados de baixa, média e alta atividade. Para os dois primeiros, há o processamento e armazenagem. Segundo o Plano Nacional de Energia 2030, no Brasil os dejetos de alta atividade ficam, temporariamente, estocados em piscinas de resfriamento cheias de água. Depois, parte deles é misturada

a outros materiais e solidificada, resultando em barras de vidro, também classificadas como de alta radioatividade. A vitrificação facilita o transporte e a estocagem, mas apenas diminui – não extingue – os impactos potenciais sobre o meio ambiente.

Alternativas para depósito desses dejetos estão em estudo no exterior. Uma das mais aceitas, atualmente, é o armazenamento em uma estrutura geológica estável. Os Estados Unidos têm um projeto pioneiro nesta opção. Além disso, ganha espaço no mercado mundial a preferência pela adoção do ciclo aberto do urânio em detrimento do fechado que, ao reprocessar o material, produz novos dejetos radioativos. Finalmente, a evolução tecnológica das máquinas também aponta para a redução no volume de dejetos de alta atividade produzido: seja porque embutem ganhos de eficiência (exigindo menor volume de combustível para a produção da mesma qualidade de energia), seja porque conseguem reduzir o tempo de decaimento (redução da radioatividade) dos dejetos.

Outra alternativa é um projeto inédito de armazenamento desses dejetos em cápsulas de aço, sugestão apresentada pela Eletronuclear quando obteve a licença prévia para a retomada



Central nuclear.

Fonte: Eletronuclear.

das obras de Angra III. O destino dos dejetos era uma das condicionantes do licenciamento ambiental. Segundo a Eletronuclear, essas cápsulas garantiriam a segurança dos dejetos por 500 anos.

A tecnologia hoje existente apenas atenua, mas não acaba com os riscos de acidentes ambientais provocados pelas usinas nucleares. De qualquer maneira, o aumento da segurança dessas instalações é uma das principais vertentes das pesquisas tecnológicas realizadas nos últimos anos.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) – disponível em www.aneel.gov.br

BP Global – disponível em www.bp.com

Eletronuclear – disponível em www.eletronuclear.gov.br

Empresa de Pesquisa Energética (EPE) – disponível em www.epe.gov.br

Indústrias Nucleares do Brasil (INB) – disponível em www.inb.com.br

International Energy Agency (IEA) – disponível em www.iea.org

World Energy Council (WEC) – disponível em www.worldenergy.org