

e ganhos de eficiência, bem como de programas de conservação de energia e do próprio reflexo da elasticidade preço – a taxa de crescimento da produção se estabilize, de forma que seu valor médio, a partir de 2005, fique em torno dos 4,3% ao ano, constatados entre 2004 e 2005, como indica o Balanço Energético Nacional de 2.006, ano base 2005.

Admitamos, para terminar o cálculo, que os valores do volume efetivamente medido das reservas remanescentes e do consumo anual de gás sejam aqueles apresentados no referido Balanço Energético, a saber:

$$R_t - C = 306,4 \times 10^9 \text{ m}^3, e^{A_0} = 17,7 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{ano}.$$

Neste caso, o prazo de duração do volume remanescente das reservas brasileiras de gás natural deveria ser de 13 anos:

$$t = \frac{1}{0,043} \ln \left[\frac{306,4 \times 10^9 \times 0,043}{17,7 \times 10^9} + 1 \right] = 13 \text{ anos}$$

Suponhamos, por fim, que o consumo continue a crescer exponencialmente a uma taxa de 4,3% ao ano e que as novas descobertas da Petrobras na Plataforma Continental sejam suficientes para quadruplicar o volume das reservas remanescentes. Mesmo assim, sua duração iria para apenas 32 anos:

$$t = \frac{1}{0,043} \ln \left[\frac{1,225,6 \times 10^9 \times 0,043}{17,7 \times 10^9} + 1 \right] = 32 \text{ anos}$$

Como se vê, apesar das hipóteses otimistas, o prazo parece escasso para as evidentes modificações que se fazem necessárias.

O governo já deveria ter começado a estudar seriamente o assunto.

Joaquim Francisco de Carvalho é mestre em engenharia nuclear, foi diretor industrial da empresa Nuclebrás Engenharia (Nuclen, atual Eletronuclear) e pertence ao Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia da Universidade de São Paulo (PIPGE) da USP.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- Campbell, C. J. *Oil crisis*. Multi-Science Publishing, 2005.
 Kunstler, J.H. *La fin du pétrole*. Plon, 2005.
 Bourg, D. e Schlegel, J-L. *Le principe de précaution*. Seuil, 2000.
 EPE/MME. Balanço Energético Nacional 2006. Ano Base 2005.
 Dorf, R. *Energy, resources & policy*. Addison Wesley, 1978.

ASPECTOS TÉCNICOS, ECONÔMICOS E SOCIAIS DO USO PACÍFICO DA ENERGIA NUCLEAR

Pedro Carajilescov

João Manoel Losada Moreira

INTRODUÇÃO Projeções do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês), diante do crescimento populacional mundial, apontam a necessidade de se quintuplicar o fornecimento de energia no mundo até 2050. Essa demanda maior deverá ocorrer em países emergentes como o Brasil, China, Índia e outros da América do Sul, Ásia e África. Esse cenário, associado às preocupações com as mudanças climáticas e a escalada de preços de geração de outras tecnologias, provocou o ressurgimento de usinas nucleares para geração de potência.

Atualmente, existem no mundo 443 usinas nucleares, correspondendo a 370 GW(e) de potência nominal, que representam 17% da potência mundial instalada. No mundo, desde 1980, a produção nuclear de energia elétrica saltou de 0,7 milhão para 2,6 milhões de GWh por ano. No Brasil, com a entrada em operação da usina Angra 2, em 2000, essa produção está em torno de 14 mil GWh por ano (1). Excetuando os acidentes de Three Mile Island e Chernobyl, a partir de 1990, a geração nuclear tem ocorrido de forma eficiente e segura.

Com o mercado nuclear reaquecido, a European Commission, órgão da Comunidade Européia, divulgou, recentemente, o documento “The sustainable nuclear technology platform – a vision report” (2), objetivando garantir a liderança tecnológica européia nesse setor. Nos EUA, a Administração de Informações Sobre Energia (EIA), órgão do Departamento de Energia (DOE), vem promovendo a certificação ou pré-certificação de novos reatores comerciais (3) e, através do apoio e participação no Fórum Internacional da Quarta Geração (GIF), tem acompanhado o desenvolvimento de longo prazo da futura geração de reatores nucleares. No Brasil, além da decisão recente do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), referente à conclusão das obras da usina Angra 3, a retomada do programa nuclear, estagnado desde o início da década passada, deve ocorrer em futuro próximo.

A expansão do aproveitamento nuclear, tendo em vista a evolução tecnológica ocorrida nas últimas décadas, tem levado a uma reavaliação dos aspectos econômicos, tecnológicos, regulatórios e socioambientais deste setor, no Brasil e no mundo.

ASPECTOS TÉCNICOS

INÍCIO DA GERAÇÃO ELÉTRICA POR ENERGIA NUCLEAR

Após o final da Segunda Guerra Mundial, ocorreu um período de grande criatividade e ebulição no setor nuclear. Os mais diversos tipos de reatores nucleares foram concebidos, projetados e muitos foram, efetivamente, construídos, sendo que alguns operam até nossos dias. Todas as possíveis combinações de material físsil e fértil, de moderadores e de fluidos refrigerantes foram testadas, resultando em reatores que operaram sem maiores impactos ambientais e com segurança. Após algum tempo, a maioria das concepções originais foi abandonada, consolidando aquelas que permaneceram até hoje por razões técnicas e econômicas.

A era de geração elétrica através da energia nuclear começou quase simultaneamente na antiga União Soviética, na Inglaterra e nos EUA. A primeira usina nuclear civil a produzir eletricidade foi a usina de Obninsk, de 5 MW(e), na União Soviética, cuja operação ocorreu em 27 de julho de 1954. Tratava-se de um reator com combustível de baixo enriquecimento, moderado a grafite e água, circulando em tubos pressurizados, como refrigerante. A segunda foi a usina de Calder Hall, do tipo GCR (*gas cooled reactor*) ou Magnox (reator com combustível de urânio natural, revestido por uma liga de magnox, moderado a grafite e refrigerado por CO₂), na Inglaterra, de 50 MW(e), cuja operação teve início em 27 de agosto de 1956, sendo considerada a primeira usina nuclear comercial do mundo. Esta usina foi descomissionada em 31 de março de 2003, após aproximadamente 47 anos de operação. Nos EUA, através do programa “Atoms for Peace”, do presidente Eisenhower, a Divisão de Reactores Navais da antiga Comissão de Energia Atômica (AEC) deu início ao desenvolvimento da usina de Shippingport, uma usina do tipo PWR de 68 MW(e), que atingiu a criticalidade em 2 de dezembro de 1957, exatamente 15 anos após a criticalidade do primeiro reator nuclear, construído pela equipe de Enrico Fermi, sob o campo de futebol da Universidade de Chicago. Shippingport foi concebida com dois objetivos principais: demonstrar a produção de eletricidade e servir como um laboratório de desenvolvimento científico e tecnológico. Vinte anos após o início de operação, o núcleo do reator foi substituído e uma camada externa (*blanket*) de tório e U²³³ foi adicionada, tornando-se do tipo LWBR (reator regenerador – *breeder* – a água leve pressurizada). Essa usina continua operando até os dias de hoje. O segundo reator de potência americano foi a usina de Dresden, de 180 MW(e), financiada pela iniciativa privada e desenvolvida pela General Electric (GE), cuja operação teve início em 1960 e descomissionamento em 1978. Trata-se de um reator do tipo BWR (reator a água leve fervente). Essas usinas apresentadas se constituem naquilo que se convencionou chamar de “Geração I” dos reatores nucleares.

EVOLUÇÃO

Os protótipos acima, de baixa potência nominal, serviram de inspiração para as usinas comerciais projetadas a partir de meados da década de 1960 até o início da década de 1980, hoje consideradas como Geração II e que continuam em operação até nossos dias. As usinas da Geração II são, usualmente, de grande porte, isto é, potência nominal acima de 1000 MW(e), dotadas de diversos e redundantes sistemas de segurança e com desempenho operacional excepcional. Entre elas, se encontram os reatores PWR, desenvolvidos pela Westinghouse, Combustion Engineering, Babcock & Wilcox e Framatome, os reatores BWR da General Electric e os reatores da linha Candu (contração de Canadian Deuterium – reatores a água pesada e baixos enriquecimentos de urânio), desenvolvidos pelo Canadá. Os PWRs representam mais da metade dos reatores em operação no mundo. A partir dos acidentes de Three Mile Islands e Chernobyl, preocupações com as liberações radioativas deram origem ao desenvolvimento de usinas dotadas de sistemas passivos de segurança, que independem da ação do operador, além de simplificações do projeto, objetivando menores custos de capital e tempos mais curtos de construção. Essas considerações resultaram nos reatores da Geração III. A Westinghouse apresentou, inicialmente, a concepção do reator AP600 e, em seguida, o AP1000. Trata-se de reatores derivados do PWR anterior, dotado de inovativos sistemas passivos de segurança e com grandes simplificações de projeto, reduzindo, consideravel-

mente, o tempo e o custo da construção. Embora sejam reatores certificados pela Comissão Reguladora Nuclear (NRC) dos EUA, até o momento, nenhum reator desse tipo foi construído. Na linha dos PWRs, a empresa Areva NP – resultante da fusão da Framatome (FR) e da divisão nuclear da Siemens alemã – apresentou o EPR (Evolutionary PWR), no qual os sistemas e componentes foram simplificados, com enorme ênfase em segurança. Uma usina dessa natureza se encontra em construção na Finlândia, devendo operar em 2010. Os reatores do tipo BWR, usualmente associados à GE, deram origem aos reatores ABWR (Advanced BWR) e ESBWR (Economic Simplified BWR). São reatores similares, nos quais as usuais bombas de circulação do refrigerante dos projetos tradicionais foram substituídas por circulação natural. O ESBWR representa uma evolução dos modelos iniciais do ABWR e com potência nominal superior. No momento, existem 4 reatores ABWR, construídos pelo consórcio Toshiba & Hitachi, operando no Japão e outros em planejamento. Ainda, 2 ABWRs encontram-se em construção em Taiwan. Quanto ao ESBWR, embora diversas companhias de eletricidade americanas tenham demonstrado interesse na sua construção, o projeto ainda se encontra em fase de certificação pela NRC.

A partir de 2000, teve início a discussão quanto aos reatores do futuro ou reatores da Geração IV, considerando-se que os próximos reatores devem ser licenciados, construídos e operados, produzindo energia a preços competitivos (4). As novas concepções devem, ainda, considerar o uso ótimo dos recursos naturais, a segurança nuclear, a administração dos rejeitos radioativos, assim como as preocupações públicas quanto ao uso da energia nuclear. Em janeiro de 2000, o Departamento de Energia dos EUA, através do Office of Nuclear Energy, Science and Technology, reuniu um grupo de altos representantes de nove países, entre os quais o Brasil, para discutir a questão dos futuros reatores. Esse grupo deu origem ao Fórum Internacional da Quarta Geração, mediante acordo firmado em julho de 2001, com o objetivo de identificar as concepções de reatores que atendam os requisitos descritos acima, mapear áreas de interesses comuns, estabelecer colaborações e trocas de informações.

Em dezembro de 2002, o DOE publicou um relatório (5) selecionando seis reatores avançados a serem desenvolvidos até 2030. O relatório reconhece que os países participantes possuem interesses diversos, quanto à finalidade do reator, seja para a produção de eletricidade, hidrogênio, administração de actínidos ou para utilização em pequenas malhas de eletricidade. Dos reatores selecionados, com potência variando entre 150 e 1500 MW(e), três reatores são reatores rápidos (operam com nêutrons de altas energias), dois reatores são térmicos (nêutrons termalizados) e um, intermediário. Todos consideram a utilização de ciclo de combustível fechado, isto é, com o combustível irradiado sendo reprocessado para separação de seus componentes, e todos operam a temperaturas acima das temperaturas dos reatores atuais.

ASPECTOS ECONÔMICOS O custo de produção de energia, seja qual for a tecnologia envolvida, pode ser dividido em 3 componentes principais: custo de capital, custo de operação e manutenção e custo de combustível. O quadro 1 apresenta, de forma qualitativa, o custo de capital e de combustível relativo a diferentes fontes. Usinas nucleares e hidrelétricas exigem grandes investimentos em obras de engenharia civil e montagem eletromecânica complexas, resultando em custos de capital elevados. Nas usinas térmicas convencionais, a montagem eletromecânica é predominante por não exigirem obras complexas de engenharia civil.

Quadro 1 – Comparação de custos de geração de eletricidade.

Tipo de usina	Custo de capital	Custo de combustível
Nuclear	Alto	Baixo (10 a 15 %)
Hidrelétrica	Alto	-
Termoelétrica convencional (gás natural, carvão, etc)	Baixo	Alto (~ 60 %)

Observa-se que as usinas nucleares se caracterizaram pelos baixos custos de combustível comparado com outras usinas a combustíveis fósseis. Tipicamente, esses custos representam em torno de 10 a 15% do custo unitário de geração. Além disso, no Brasil, a existência de extensas reservas de urânio e a capacidade de fabricação de combustível garantem baixos custos e estabilidade de preço.

O quadro 1 mostra, também, que a estrutura de custo das usinas nucleares é mais semelhante com as usinas hidrelétricas do que com as usinas termelétricas convencionais. Esse fato explica porque, nas usinas nucleares instaladas no mundo, o fator de capacidade supera os 90%, isto é, elas operam na base do consumo, praticamente à potência nominal, durante mais de 90% do tempo, apenas sendo desligadas para as operações periódicas de recarga e manutenção. Os esforços de desenvolvimento dos reatores da Geração III se encontram focados na redução do custo de capital, procurando tornar os reatores nucleares mais econômicos e rápidos de serem instalados, sem descuido dos aspectos de segurança, e, por conseguinte, mais competitivos com as usinas térmicas convencionais. Por exemplo, Matzie (6) afirma que o custo de investimento do reator AP1000 poderá ficar entre 1000 a 1200 US\$/kW(e), custo este equivalente às térmicas convencionais.

IMPACTOS DE DIVERSAS FONTES DE ENERGIA Atualmente, preocupações com as questões ambientais permeiam todas as atividades humanas, refletidas na ampla legislação de proteção do meio ambiente existente no Brasil. O impacto ambiental e os rejeitos radioativos das usinas nucleares são questões de interesse público. Em relatório recente da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), são indicadas as principais ações a serem adotadas para aprimorar o gerenciamento de rejeitos radioativos no país (4). O quadro 2 apresenta, qualitativamente, os impactos socioambientais das principais fontes de energia.

As hidrelétricas não emitem resíduos poluidores, mas requerem a construção de grandes represas e, em muitos casos, a realocação de populações ribeirinhas. As áreas ocupadas, normalmente, causam impactos na fauna, flora e clima local e regional. Os reservatórios das hidrelétricas também emitem gás metano que contribui para o aquecimento global, e provocam a destruição de áreas de subsistência, tais como terras aráveis, pastos e florestas. Assim, pode-se considerar como um indicador de impacto ambiental de uma fonte energética é a área que ela requer para produzir a energia. Pode-se fazer uma comparação entre as áreas imobilizadas que diversas fontes de energia requerem para produzir a mesma quantidade de energia por unidade de tempo (1000 MW de potência). As fontes hidrelétrica, eólica e solar exigem grandes áreas para a produção de energia, 85 a 4200 km², 50 a 150 km² e 20 a 50 km², respectivamente. Usinas termelétricas baseadas em biomassa exigiriam 4000 a 6000 km² de área plantada para gerar a mesma

Quadro 2 – Impactos socioambientais das principais fontes de energia.

Fonte : Referências (7, 8 e 9).

Fonte	Impactos ambientais
Petróleo Carvão Gás natural	Poluição do ar Emissão de óxidos de enxofre (SOx, SO ₂) Emissão de óxidos de nitrogênio (NOx) Emissão de monóxido de carbono (CO) Emissão de matéria particulada suspensa (metais pesados) Ozônio Aquecimento global via efeito estufa Emissão de dióxido de carbono (CO ₂), emissão de metano (CH ₄) Chuva ácida Emissão de SO ₂ formando ácido sulfúrico na atmosfera Emissão de NOx formando ácido nítrico na atmosfera
Hidrelétrica	Formação de grandes represas Realocação das populações Aquecimento global via efeito estufa Emissão de CH ₄
Biomassa	Poluição do ar Emissão de CO Emissão de matéria particulada Emissão de CO ₂ Uso intensivo do solo e da água Diminuição da biodiversidade
Nuclear	Rejeitos de nível baixo e médio de radioatividade Rejeitos de nível alto de radioatividade que requerem armazenamento por milhares de anos Desativação das instalações nucleares após término da vida útil

potência. Por outro lado, usinas termelétricas fósseis (carvão, gás ou petróleo) e nucleares produzem energia a partir de fontes mais concentradas e exigem áreas muito menores, de 1 a 4 km², acrescidas das áreas de mineração e beneficiamento dos minérios combustíveis (7 e 10).

Os impactos sócio-ambientais das usinas nucleares são locais. Os rejeitos radioativos produzidos são acondicionados em tambores e depositados no sítio da usina. Os rejeitos radioativos de alta atividade são encaminhados para instalações especiais onde devem ficar estocados por centenas de anos. As preocupações em relação a esses rejeitos são, pois, de ordem temporal.

REJEITOS RADIOATIVOS Uma planta nuclear de 1000 MW gera, ao final de um ano, 30 toneladas de combustíveis nucleares irradiados, 350 toneladas de rejeitos radioativos de nível intermediário de radiação e 450 toneladas de rejeitos radioativos de baixo nível de radiação, mas não emite gases perigosos ou outros materiais poluidores. Os rejeitos radioativos de níveis baixo e intermediário têm tratamento e gerenciamento de baixo custo, pequena complexidade e pouca sofisticação tecnológica. Eles são compactados para diminuir o volume e armazenados em recipientes estanques. Esses números, embora elevados, representam apenas alguns milésimos da produção e liberação de rejeitos no planeta pelos vários setores industriais. A título de comparação, as atividades industriais nos Estados Unidos pro-

duzem, aproximadamente, 50 milhões de metros cúbicos de resíduos sólidos por ano. Para produzir 1000 MW de eletricidade, as usinas a carvão, petróleo e gás natural produzem cerca de 500 mil, 280 mil e 200 mil toneladas de resíduos sólidos, líquidos e gasosos por ano.

Os combustíveis nucleares irradiados são armazenados, inicialmente, na própria usina até que o calor residual decaia. Posteriormente, duas alternativas são possíveis: armazenamento final ou reciclagem. Na primeira opção, o combustível é confinado de forma apropriada para ser armazenado em depósitos subterrâneos por centenas de anos. No segundo caso, o combustível é reprocessado para a separação e reaproveitamento do urânio e plutônio presentes. Essa operação produz um resíduo líquido de alta atividade. Para uma usina de 1000 MW com reciclagem de combustível, o volume de resíduos de alta atividade produzido é de cerca de 10 m³ por ano, o qual pode ser vitrificado para se tornar sólido e ser armazenado por milhares de anos em formações geológicas subterrâneas apropriadas.

Existem depósitos finais licenciados para resíduos radioativos de baixa e média atividade e, para depósitos de alta atividade, existem várias propostas em estudo em vários países. As razões para a demora em relação aos depósitos de alta atividade são: a) a necessidade de se esperar de 2 a 4 décadas para o resfriamento dos elementos combustíveis irradiados, antes de serem encaminhados para a deposição final; b) a possibilidade de reciclagem dos combustíveis irradiados; c) a existência de diferentes alternativas para a deposição final dos resíduos radioativos e d) a existência de alternativas de ciclo do combustível, com reatores rápidos e reatores incineradores de resíduos, que podem promover a redução do tempo necessário de deposição final dos resíduos de alta atividade para cerca de 500 anos.

A título de comparação, o quadro 3 apresenta os tempos médios de degradação para o estado natural de alguns materiais presentes nos resíduos industriais e energéticos.

Vemos que o nylon, presente no nosso dia-a-dia requer de 30 a 40 anos para voltar ao estado natural e o CO₂ emitido para a atmosfera requer cerca de 50 a 200 anos para ser reabsorvido pelas plantas ou no oceano. Outros materiais, como sacos plásticos, pilhas e baterias e latas de alumínio, requerem de 100 a 500 anos para degradar até o estado natural, enquanto garrafas de vidro requerem um tempo ainda indeterminado. Alguns desses materiais são tóxicos ou causam importantes danos ao meio ambiente, como a emissão de CO₂. Para os resíduos apresentados no quadro 3, adotam-se duas alternativas para

Quadro 3 – Tempos de degradação por processos naturais no ambiente.

Fonte: Referências (7, 11 e 12).

Composto	Tempo para degradação
Nylon	30 a 40 anos
Co2 emitido pela combustão de combustíveis fósseis e biomassa	50 a 200 anos
Resíduos radioativos de baixa, média e alta atividade (incinerados)	20 a 500 anos
Latas de alumínio	100 a 500 anos
Tampas de garrafa	100 a 500 anos
Pilhas, baterias e metais pesados	100 a 500 anos
Copos e sacos plásticos	200 a 450 anos
Garrafas e frascos de vidro ou plástico	Indeterminado

a disposição dos resíduos: a dispersão no meio ambiente (altamente difundida) e o confinamento (10). Os resíduos radioativos estão no grupo dos que são confinados para a disposição final.

CONCLUSÕES O presente trabalho descreve o estágio atual de evolução da geração elétrica através de usinas nucleares, sob diversos pontos de vista, sejam eles econômico, socioambiental, de segurança, etc, comparando, quando possível, com outras formas de geração.

Pode-se observar que esse setor vem procurando, ao longo das últimas décadas, agir de forma responsável com relação à proteção do meio ambiente e à segurança das populações próximas de suas instalações. Além disso, existe uma clara preocupação ética do setor, evitando comprometer as condições de vida das gerações futuras, procurando soluções satisfatórias para o gerenciamento dos resíduos radioativos de longa vida média.

Certamente, a energia nuclear se constitui, hoje, em alternativa viável e segura para o atendimento do crescimento da demanda energética no mundo, com reduzido impacto ambiental.

Pedro Carajilescov é PhD em engenharia nuclear pelo MIT, professor titular e diretor do Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas da Universidade Federal do ABC (UFABC) e membro titular da Academia Nacional de Engenharia.
João Manoel Losada Moreira é PhD em engenharia nuclear pela University of Michigan, professor titular e coordenador do Programa de Pós-Graduação em Energia da UFABC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Energy Information Administration (EIA). *International energy outlook*, 2005.

Euratom. "The sustainable nuclear technology platform - a vision report". European Commission, Report EUR22842, 2007.

DOE. *New reactor designs*. Energy Information Administration, USA, 2006.

DOE. *A technology roadmap for Generation-IV nuclear energy systems*. GIF-002-00, U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, 2002.

Matzie, R.A. *The AP1000 reactor - Nuclear renaissance option*. Tulane Engineering Forum, USA, 2003.

Comissão Nacional de Energia Nuclear. "National report of Brazil for the joint convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management", 2006.

Goldemberg, J. *Energia, meio ambiente e desenvolvimento*. Editora USP, São Paulo, SP, 2001.

Belico dos Reis, L. e Silveira, S., *Energia elétrica para o desenvolvimento sustentável*. Editora USP, São Paulo, SP, 2000.

Udaeta, M. E. M.; Grimoni, J. A. B.; Galvão, L. C. R. *Iniciação a conceitos de sistemas energéticos para o desenvolvimento limpo*. Editora USP, São Paulo, SP, 2004.

Agência Internacional de Energia Atômica. "Nuclear power and sustainable development". International Atomic Energy Agency, AIEA, Vienna, 2006

Condé, H. "Introduction to ADS for waste incineration and energy production". In: *The Impact of nuclear science on life science*, 2001. Disponível em: <http://www.nupec.org/iai2001/report/A2.pdf>.

BIO. "Sem consciência e direito à cidadania". *Revista Brasileira de Saneamento e Meio Ambiente*, Ano IX, N.08, Outubro/Dezembro, 1998.