

A energia nuclear



Toda tecnologia avançada pode ser usada para fins pacíficos ou bélicos. Isso ocorre com a eletrônica, a nanotecnologia, a biologia, a engenharia genética e também com a energia nuclear. Os conhecimentos podem ser aplicados – e são – na guerra, mas também podem contribuir para melhorar a qualidade de vida da população. A energia nuclear – conhecida pelas bombas lançadas em 1945 sobre as cidades japonesas de Hiroshima e Nagasaki, bem como pelos acidentes ocorridos com reatores nos Estados Unidos e na Ucrânia – ganhou um estigma que até hoje prejudica uma discussão ponderada sobre os riscos e benefícios advindos dessa tecnologia. No entanto, inúmeras atividades presentes em nosso dia-a-dia empregam, direta ou indiretamente e de modo seguro, as radiações nucleares. Por exemplo, as técnicas nucleares têm sido anualmente responsáveis pela cura ou prevenção do câncer em milhões de pessoas. A energia elétrica produzida em reatores gera quase 20% desse tipo de energia no mundo e é uma das áreas que mais se preocupam com a segurança, o que levou, nos últimos anos, vários países a optar por essa tecnologia. A energia nuclear também tem sido amplamente empregada no ambiente, na indústria e na pesquisa.

Odair Dias Gonçalves e Ivan Pedro Salati de Almeida
Comissão Nacional de Energia Nuclear (RN)

e seus usos na sociedade

Todos os materiais são formados por um número limitado de átomos, que, por sua vez, são caracterizados pela carga elétrica de seu núcleo e simbolizados pela letra Z. Em física, a descrição adequada do átomo para a compreensão de um determinado fenômeno depende do contexto considerado. Para os objetivos deste artigo, restritos às aplicações da energia nuclear, podemos considerar o núcleo como composto de prótons, com carga elétrica positiva, e nêutrons, sem carga. Ambos são denominados genericamente núcleons. A letra Z que caracteriza cada um dos átomos, naturais ou artificiais, representa o número de prótons no núcleo.

A maior parte da massa do átomo está concentrada em seu núcleo, que é muito pequeno (10^{-12} cm a 10^{-13} cm). Prótons e nêutrons têm massa aproximadamente igual, da ordem de $1,67 \times 10^{-24}$ gramas, e são caracterizados por parâmetros específicos (números quânticos) definidos pela mecânica quântica, teoria que lida com os fenômenos na escala atômica e molecular.

Os prótons, por terem a mesma carga, se repelem fortemente devido à força eletrostática. Isso tenderia a fazer com que essas partículas se afastassem umas das outras, o que inviabilizaria o modelo. Mas, como os núcleos existem, podemos concluir que deve existir uma força de natureza diferente da força eletromagnética ou da força gravitacional – e muito mais intensa que estas – que mantém os núcleos coesos.

Quanto maior a energia de ligação média (soma de todos os valores das energias de ligação dividida pelo número de partículas), maior a força de coesão do núcleo. Este artigo irá tratar da energia nuclear, que está relacionada a essa força, bem como de seus usos na sociedade.

Tipos de radiação

Na natureza, existem 92 elementos. Cada elemento pode ter quantidades diferentes de nêutrons. Os núcleos com mesmo número de prótons, mas que diferem no número de nêutrons, são denominados isótopos de um mesmo elemento. Para determinadas combinações de nêutrons e prótons, o núcleo é estável – nesse caso, são denominados isótopos estáveis. Para outras combinações, o núcleo é instável (isótopos radioativos ou radioisótopos) e emitirá energia na forma de ondas eletromagnéticas ou de partículas, até atingir a estabilidade.

Dá-se o nome genérico de radiação nuclear à energia emitida pelo núcleo. As principais formas de radiação são: i) emissão de nêutrons; ii) radiações gama, ou seja, radiação eletromagnética, da mesma natureza que a luz visível, as microondas ou os raios X, porém mais energética; iii) radiação alfa (núcleos de hélio, formados por dois prótons e dois nêutrons); iv) radiação beta (elétrons ou suas antipartículas, os pósitrons, cuja carga elétrica é positiva).

Nas ciências nucleares, a unidade de energia geralmente utilizada é o elétron-volt (eV). As energias emitidas pelo núcleo são acima de 10 mil eV, valor que é cerca de bilhões de vezes menor que o das energias com que lidamos no dia-a-dia. Esse valor se torna significativo quando lembramos que em cerca de 10^{23} átomos. Uma bomba como a de Hiroshima contém apenas 20 kg de matéria-prima, aproximadamente.

A liberação de energia do núcleo se dá através de dois processos principais: decaimento radioativo (também chamado desintegração) e fissão. ▶

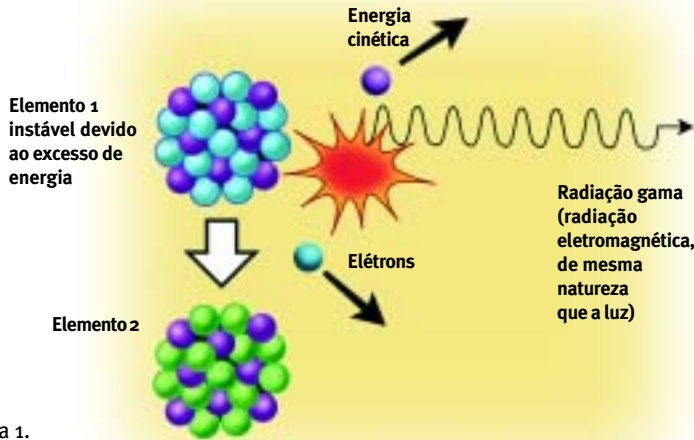


Figura 1. Processo de desintegração nuclear

Decaimento nuclear

O decaimento radioativo ocorre segundo as leis da probabilidade. O processo é complexo e explicá-lo aqui fugiria ao escopo deste artigo. Assim, basta saber que nele o núcleo se transforma no de um outro elemento ao ter sua carga elétrica mudada pela emissão de radiação, mudando o número de prótons e/ou nêutrons (figura 1).

O decaimento pode ocorrer sucessivamente, causando uma cadeia de desintegrações, até que resulte um elemento estável. O tempo que um certo número de núcleos de um radioisótopo leva para que metade de sua população decaia para outro elemento por desintegração é denominado meia-vida do radioisótopo.

A radiação emitida no decaimento é composta de partículas e/ou radiação gama e é característica

do decaimento. Assim, os radioisótopos podem ser caracterizados pelas emissões produzidas no decaimento, que servem como uma ‘assinatura’ para cada um deles.

A desintegração pelo decaimento pode ocorrer espontaneamente ou ser provocada pela instabilidade criada em núcleos estáveis, pelo bombardeio com partículas ou com radiação eletromagnética.

Na natureza, os elementos apresentam-se geralmente como uma mistura de diferentes isótopos, estáveis ou radioativos. Por exemplo, o urânio, que tem 92 prótons ($Z = 92$), é encontrado como uma mistura de 99,3% de urânio-238 (^{238}U , com 146 nêutrons) e 0,7% de urânio-235 (^{235}U , 143 nêutrons), além de frações muito pequenas de outros isótopos – o número que segue o nome do elemento químico ou antecede sua sigla é o chamado número de massa (A), ou seja, a soma de seus prótons e nêutrons.

Cada isótopo instável tem sua meia-vida característica. A meia-vida do ^{238}U é de $4,47 \times 10^9$ anos, o que significa que são necessários 4,47 bilhões de anos para reduzir à metade sua quantidade inicial. Ao decair, o ^{238}U produz outro elemento instável, o tório-234, cuja meia-vida é de 24,1 dias. Este, por sua vez, também decai, produzindo outro isótopo instável (protactínio-234) e assim por diante, até que a estabilidade seja alcançada com a formação do chumbo com 206 núcleons (^{206}Pb).

Fissão nuclear

Na fissão nuclear, a energia é liberada pela divisão do núcleo normalmente em dois pedaços menores e de massas comparáveis – para núcleos pesados, existe a fissão em mais de dois pedaços, mas é muito rara, uma em 1 milhão para urânio. Pela lei de conservação de energia, a soma das energias dos novos núcleos mais a energia liberada para o ambiente em forma de energia cinética dos produtos de fissão e dos nêutrons liberados deve ser igual à energia total do núcleo original.

A fissão do núcleo raramente ocorre de forma espontânea na natureza, mas pode ser induzida se bombardearmos núcleos pesados com um nêutron, que, ao ser absorvido, torna o núcleo instável.

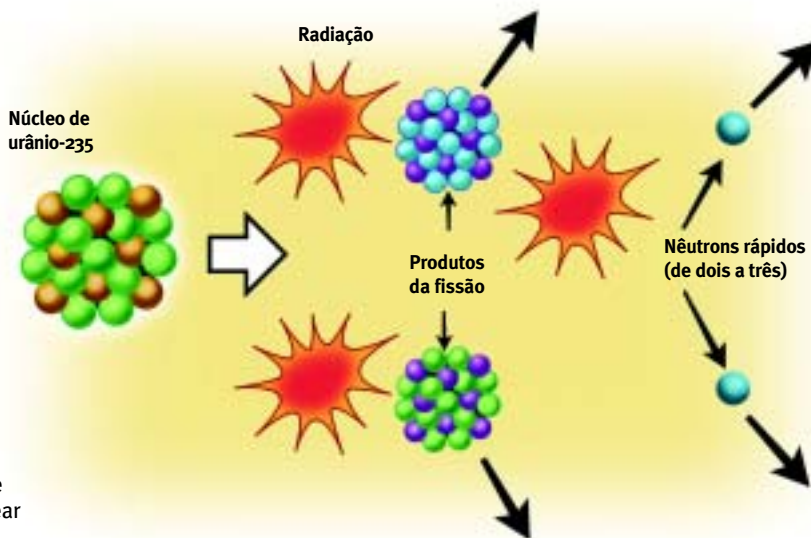


Figura 2. Processo de fissão nuclear

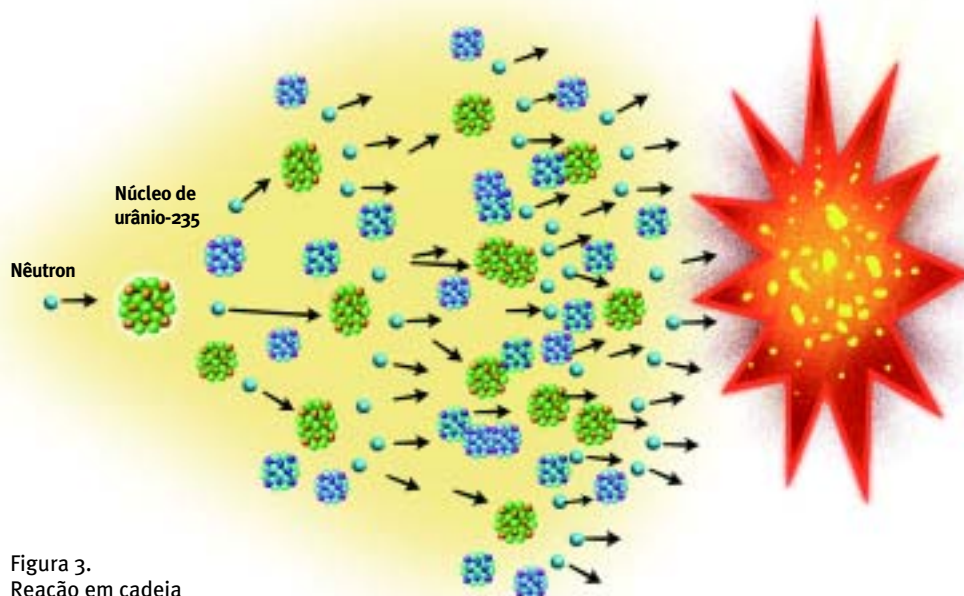


Figura 3. Reação em cadeia

Alguns eventos importantes no uso da energia nuclear

- 1896** Descoberta a radioatividade
- 1898** Isolados o polônio e o rádio. Descoberta a radiação gama
- 1902** Confirmada a desintegração radioativa espontânea
- 1910 a 1920** Uso ingênuo de materiais radioativos na medicina e indústria
- 1911** Concebida a idéia de usar traçadores radioativos
- 1926** Uso de radiação para o tratamento de câncer
- 1934** Primeiro radionuclídeo artificial. Primeira fissão do urânio com nêutrons
- 1936** Uso em terapia de radioisótopos produzidos em ciclotron
- 1939** Carta de Einstein sobre a possibilidade de os alemães construírem a bomba atômica
- 1941** Início do programa nuclear norte-americano
- 1942** Início da construção de um reator nos Estados Unidos
- 1945** Lançamento das bombas atômicas sobre Hiroshima e Nagasaki



O ^{235}U , por exemplo, ao ser bombardeado com um nêutron, fissiona em dois pedaços menores, emitindo normalmente dois ou três nêutrons (figura 2). Se houver outros núcleos de ^{235}U próximos, eles têm uma certa chance de ser atingidos pelos nêutrons produzidos na fissão. Se houver um grande número disponível de núcleos de urânio-235, a probabilidade de ocorrerem novas fissões será alta, gerando novos nêutrons, que irão gerar novas fissões. Esse processo sucessivo é chamado reação em cadeia (figura 3).

Controlando-se o número de nêutrons produzidos e a quantidade de ^{235}U , pode-se controlar a taxa de fissão ao longo do tempo. Essa reação em cadeia, denominada controlada, é o processo utilizado em um reator nuclear. Já em uma bomba atômica, as fissões ocorrem todas em um intervalo de tempo muito curto, gerando uma enorme quantidade de energia e provocando a explosão.

O que torna o urânio conveniente para uso como combustível é a grande quantidade de energia liberada por esse elemento ao se fissionar.

Na medicina nuclear, os radiofármacos são injetados no paciente, concentrando-se no local a ser examinado e emitindo radiação, que, por sua vez, é detectada no exterior do corpo por um detector apropriado, que pode transformar essa informação em imagens, permitindo ao médico observar o funcionamento daqueles órgãos.

Os radiofármacos são utilizados no diagnóstico de diversas patologias (figura 4). Têm meia-vida curta – da ordem de dias ou horas – e, em um curto período de tempo, diminuem sua atividade para níveis desprezíveis, minimizando a possibilidade de dano ao paciente.

O principal material empregado em medicina nuclear é o tecnécio-99m, que tem meia-vida de seis horas, ou seja, a cada seis horas a radiação emitida cai pela metade. Outros radiofármacos são o tálio-201 (meia-vida de três dias), gálio-67 (meia-vida de três dias), iodo-131 (meia-vida de oito dias) e flúor-18 (meia-vida de duas horas).

Uma técnica nova e importante na medicina nuclear é a PET (sigla, em inglês, para tomografia por emissão de pósitrons ▶

Na saúde

Uma ferramenta importante no tratamento e diagnóstico de doenças são os radiofármacos, que são obtidos a partir de radioisótopos produzidos em reatores nucleares ou em aceleradores de partículas. Esses radioisótopos são, em geral, associados a substâncias químicas (fármacos) que se associam a órgãos ou tecidos específicos do corpo humano.

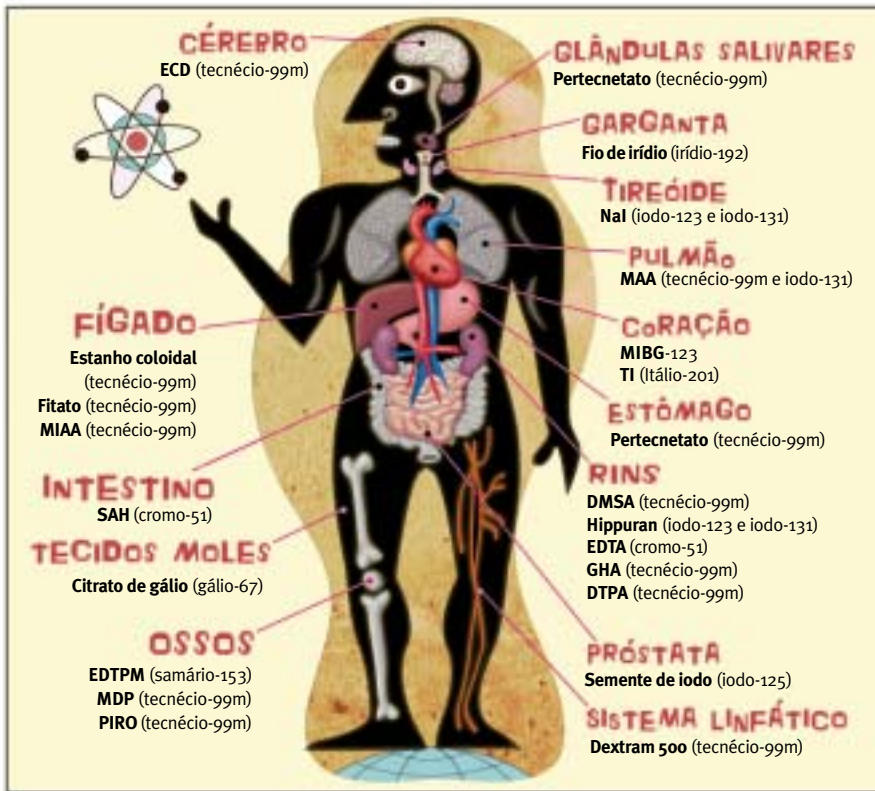


Figura 4. Radiofármacos produzidos pela CNEN. Entre parênteses, está o nome do radioisótopo em cada radiofármaco

que irão interagir com o tecido.

Outra forma de aplicação consiste em se colocar pequenas fontes em contato direto com a área do tecido a ser irradiada (braquiterapia). Essas fontes podem ser aplicadas por um determinado período de tempo e depois retiradas – como é feito, por exemplo, em tratamentos de câncer de útero – ou ser implantadas no corpo do paciente, como no tratamento de câncer de próstata.

Outro uso da radiação em medicina é a irradiação de sangue com raios gama. Esse método é usado no sangue a ser ministrado em pacientes que têm deficiência imunológica. Entre outras coisas, o tratamento com a radiação diminui a quantidade de linfócitos T (células de defesa) no san-

e elétrons), que utiliza radioisótopos de meia-vida muito curta e que têm como característica o decaimento com a liberação de pósitrons, sendo considerada por muitos especialistas a melhor e mais precisa forma de radiodiagnóstico por imagem disponível hoje. Esses radioisótopos são produzidos em aceleradores de partículas específicos (ciclotrons), sendo o principal produto o flúor-18, injetado no sangue do paciente na forma de fluorodeoxiglicose (FDG).

O Brasil produz esses radioisótopos no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Ipen), em São Paulo, e no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), no Rio de Janeiro, ambos da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Devido à meia-vida muito curta, os radiofármacos para PET devem ser produzidos próximos ao local de uso.

As radiações nucleares são utilizadas também em diversas terapias, principalmente no tratamento de câncer. Nesse caso, a irradiação das células cancerosas tem o objetivo de matá-las e impedir sua multiplicação. Uma das formas de aplicação da radiação consiste em se colocar uma fonte externa ao paciente, a uma certa distância do tumor a ser tratado (teleterapia). Tradicionalmente, utiliza-se uma fonte de cobalto-60 nesse tratamento, mas esse processo vem sendo substituído por aceleradores lineares, que produzem feixes de elétrons que, ao incidir em um alvo, geram fótons,

o que reduz em muito no paciente o risco de rejeição do órgão ou do tecido transplantados.

Usos na indústria

A indústria é uma das maiores usuárias das técnicas nucleares no Brasil, respondendo por cerca de 30% das licenças para utilização de fontes radioativas. Elas são empregadas principalmente para a melhoria da qualidade dos processos nos mais diversos setores industriais. As principais aplicações são na medição de espessuras e de vazões de líquidos, bem como no controle da qualidade de junções de peças metálicas.

As fontes mais utilizadas são o cobalto-60, o irídio-192, o cézio-137 e o amerício-241. A facilidade de penetração da radiação em diversos materiais, bem como a variação de sua atenuação com a densidade do meio que atravessa, tornam seu uso conveniente em medidores de nível, espessura e umidade. Na indústria de papel, esses medidores são utilizados para garantir que todas as folhas tenham a mesma espessura (padrão de gramatura), para atender às exigências de qualidade do mercado mundial, enquanto, na indústria de bebidas, a radiação é usada para controle de enchiamento de vasilhames.

Outro uso importante das radiações nucleares está na aplicação de traçadores radioativos. Nesse método, uma substância com material radioativo é injetada em um meio, e é feito um acompanhamento de seu comportamento nos processos que se deseja observar. Traçadores radioativos também têm sido cada vez mais utilizados para detectar problemas de vazamentos e mau funcionamento em grandes plantas da indústria química, permitindo economia de tempo e de dinheiro.

Na exploração de petróleo, fontes de nêutrons são utilizadas em processos para determinar o perfil do solo, enquanto outras podem auxiliar a distinguir, nesse processo, a quantidade de água, gás e óleo existentes no material extraído, facilitando e barateando o processo de exploração.

Cada vez mais utilizados, os irradiadores industriais são instalações com compartimentos onde o material a ser tratado é exposto à radiação que irá matar bactérias e microrganismos, podendo ser usado como um processo de esterilização. Existem no mundo hoje cerca de 160 irradiadores industriais funcionando, sendo seis no Brasil. Essas instalações são utilizadas para irradiar e esterilizar materiais cirúrgicos, remédios, alimentos, materiais de valor histórico etc.

O cobalto-60 é o material mais utilizado como fonte de radiação. A exposição à radiação gama não contamina os materiais irradiados nem os transforma em materiais radioativos. Portanto, ao cessar o processo, não existe mais radiação nos materiais. Leva grande vantagem sobre substâncias químicas que são, às vezes, usadas para o mesmo fim e que deixam resíduos tóxicos. Também leva vantagem sobre a esterilização com calor – na qual os materiais são submetidos a altas temperaturas –, uma vez que a técnica permite a irradiação de materiais plásticos, como seringas e fios cirúrgicos, sem afetar sua integridade.

Nos alimentos para consumo humano, a radiação gama elimina microrganismos patogênicos, como a *Salmonella typhimurium*. A irradiação de frutas, além de suprimir infestações indesejadas, eleva a vida útil do produto e aumenta o tempo para seu consumo, ao contrário da desinfecção com calor, que acelera o processo de amadurecimento.

Outra aplicação na agroindústria é o uso da técnica de ‘macho estéril’ para o combate a pragas na lavoura. Nessa técnica, são produzidos machos esterilizados da praga a ser combatida e que depois são soltos na região infestada, diminuindo a população ao afetar sua capacidade de reprodução. Esse processo é usado por países como Estados Unidos, México, Guatemala e Argentina no combate à mosca-da-fruta (*Ceratitis capitata*).

No Brasil, está em implantação um projeto semelhante no Nordeste, na região de produção de mangas e uvas, com patrocínio de prefeituras, governos estadual e federal, contando com auxílio da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA).

Na pesquisa e no ambiente

A utilização de radioisótopos na pesquisa permite obter dados que seriam inviáveis por outros processos. Um grande número de processos físicos e biológicos investigativos emprega material radioativo. Na alimentação animal, por exemplo, é possível verificar e acompanhar o metabolismo de rações e outros alimentos utilizando radioisótopos que emitem radiação ao longo do processo metabólico.

Na pesquisa de plantas, os radioisótopos permitem verificar a absorção de nutrientes e o efeito de microrganismos, enquanto, no estudo de solos, possibilita observar os processos de infiltração de água no solo (lixiviação), bem como o processo de filtração (percolação), possibilitando a verificação da qualidade do terreno estudado e das formas de melhorar sua produtividade.

Vale comentar, ainda que brevemente, mais três aplicações de técnicas nucleares no meio ambiente: i) a análise por irradiação com nêutrons, que permite medir quantidades extremamente pequenas de poluentes; ii) o uso de traçadores radioativos para mapear a origem de vazões da água e de contaminantes, o que possibilita obter, entre outras características, o tempo de recarga de aquíferos, facilitando seu manejo e uso racional; iii) a esterilização de lixo e dejetos orgânicos, de forma a garantir que

- 1949** União Soviética explode sua primeira bomba nuclear
- 1951** Criação do Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq), motivada pela era nuclear
- 1952** Estados Unidos explodem a primeira bomba de hidrogênio
- 1952** Criação do Instituto de Pesquisas Radioativas (IPR), mais tarde Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN), em Belo Horizonte
- 1953** União Soviética explode sua bomba de hidrogênio
- 1954** Estados Unidos dificultam entrega de três ultracentrífugas compradas pelo Brasil da Alemanha
- 1955** Início do abastecimento urbano de energia elétrica de origem nuclear
- 1956** Instalado o primeiro reator de pesquisa do hemisfério Sul, no Instituto de Energia Atômica (SP). Criação da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN)
- 1957** Criada a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA)
- 1962** Criação do Instituto de Engenharia Nuclear, no Rio de Janeiro (RJ)
- 1963** Início da produção rotineira de radioisótopos e radiofármacos no Brasil



JEN

não contenham microrganismos nocivos, é particularmente útil no tratamento de esgotos ou de lixo hospitalar.

Geração de energia

Uma das principais utilizações da energia nuclear é a geração de energia elétrica. Usinas nucleares são usinas térmicas que usam o calor produzido na fissão para movimentar vapor de água, que, por sua vez, movimenta as turbinas em que se produz a eletricidade. Em um reator de potência do tipo PWR (termo, em inglês, para reator a água pressurizada), como os reatores utilizados no Brasil, o combustível é o urânio enriquecido cerca de 3,5%. Isso significa que o urânio encontrado na natureza, que contém apenas 0,7% do isótopo ^{235}U , deve ser processado ('enriquecido') para que essa proporção chegue a 3,5% (figura 5). Em reatores de pesquisa ou de propulsão – estes últimos usados como fonte de energia de motores em submarinos e navios –, o enriquecimento pode variar bastante. Para a confecção de bombas nucleares, é necessário um enriquecimento superior a 90%.

O processo completo de obtenção do combustível nuclear é conhecido como ciclo do combustível e compreende diversas etapas: i) extração do minério do solo; ii) beneficiamento para separar o urânio de outros minérios; iii) conversão em gás do produto do beneficiamento, o chamado *yellow cake* (ou 'bolo amarelo'); iv) enriquecimento do gás, no qual a proporção de ^{235}U é aumentada até o nível desejado; v) reconversão do gás de urânio enriquecido para o estado de pó; vi) fabricação de pastilhas a partir da compactação do pó; vii) e finalmente a montagem dos elementos combustíveis, quando se colocam as pastilhas em cilindros me-

tálicos que irão formar os elementos combustíveis do núcleo do reator.

Atualmente, no mundo, estão em operação 440 reatores nucleares voltados para a geração de energia em 31 países. Outros 33 estão em construção. Cerca de 17% da geração elétrica mundial é de origem nuclear, a mesma proporção do uso de energia hidroelétrica e de energia produzida por gás. Alguns países desenvolvidos têm seu abastecimento de energia elétrica com um alto percentual de geração nuclear. Entre eles, a França tem 78%, a Bélgica 57%, o Japão 39%, a Coreia do Sul 39%, a Alemanha 30%, a Suécia 46%, a Suíça 40%. Somente nos Estados Unidos, os 104 reatores em funcionamento, que geram 20% da eletricidade daquele país, produzem mais eletricidade que todo o sistema brasileiro de geração elétrica. Além desses reatores, funcionam mais 284 reatores de pesquisa em 56 países, sem contar um número estimado de 220 reatores de propulsão em navios e submarinos.

Confiança e resíduos

A confiança na utilização de energia nuclear para geração de energia elétrica sofreu bastante em anos recentes devido a dois acidentes. O primeiro foi o de Three Mile Island (Estados Unidos), que, apesar de não ter tido conseqüências radiológicas significativas, levou os países ocidentais a fazer uma revisão das medidas de segurança nas usinas nucleares em funcionamento, aumentando o rigor do licenciamento nuclear. O segundo foi o de Chernobyl.

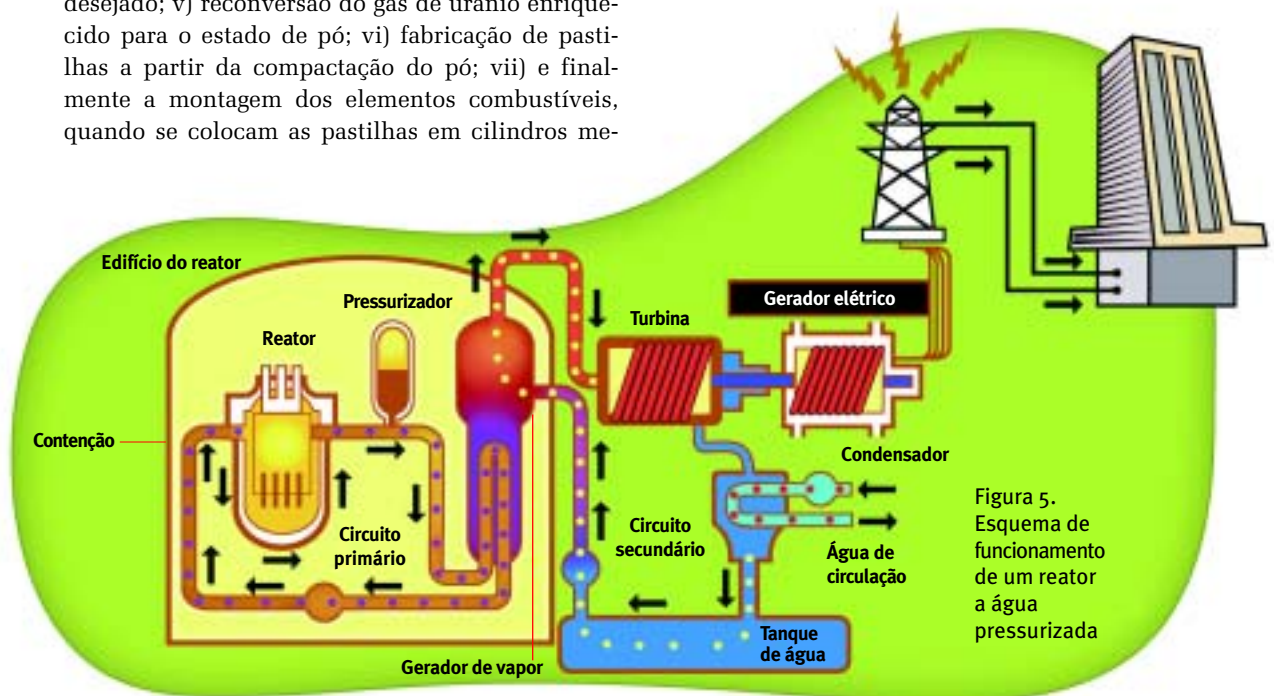


Figura 5. Esquema de funcionamento de um reator a água pressurizada

byl (Ucrânia), que lançou na atmosfera grande quantidade de material radioativo.

Enquanto Three Mile Island fez com que se aumentassem os custos das usinas nucleares em funcionamento – devido à exigência de investimentos adicionais nos sistemas de segurança, causando atraso no licenciamento dos projetos em andamento –, Chernobyl aumentou a desconfiança em relação às centrais nucleares. Não foi devidamente considerado e divulgado, entretanto, o fato de aquela usina ter projeto e dispositivos de segurança totalmente diferentes dos reatores ocidentais.

Em parte em função desses fatores, os países ocidentais passaram algum tempo para voltar a investir em centrais nucleares. A exceção foi a França, que reafirmou sua opção pela energia nuclear, tornando-se o grande exportador de energia elétrica da Europa. Mesmo sem novas usinas, entretanto, a geração nuclear elétrica aumentou, graças à maior eficiência das usinas.

Nos Estados Unidos, as empresas nucleares passaram a modernizar suas usinas e, através da troca de alguns equipamentos, estão prorrogando a vida útil dos reatores por até mais 20 anos. Já se submetem a esse processo e conseguiram aprovação 32 usinas nucleares. Estão sendo analisadas mais 16, e cerca de 30 outras já manifestaram seu interesse pela prorrogação. A previsão é de que, nos próximos anos, cerca de 80% das usinas nucleares norte-americanas tenham sua vida útil prolongada.

Na Ásia, não houve paralisação na construção de usinas nucleares. No Ocidente, outros países estão revendo sua posição. O que se observa é uma grande mudança, com vários países voltando a considerar a energia nuclear como opção viável, principalmente após a verificação do efeito crítico dos poluentes emitidos por outras formas de geração de energia elétrica. A Finlândia está começando a construir o que seria a primeira usina na Europa ocidental fora da França em muitos anos. A Suécia e a Suíça se recusaram a rejeitar a opção nuclear, deixando em aberto essa possibilidade. A Alemanha e a Itália, apesar de terem feito no passado uma opção por deixar de utilizar a energia nuclear na geração elétrica, hoje utilizam energia de origem nuclear importada da França. A Itália, em particular, já está reavaliando a questão.

Vale ressaltar que, entre as formas de geração de energia, a nuclear é uma das que produzem menor volume de rejeitos e a que tem maior cuidado com o acondicionamento e guarda deles. A dificuldade com essas ações é que os rejeitos radioativos podem durar até milhares de anos e, por isso, devem ficar isolados e protegidos.

O maior volume dos rejeitos corresponde àqueles de baixa e média atividade, que são os produ-

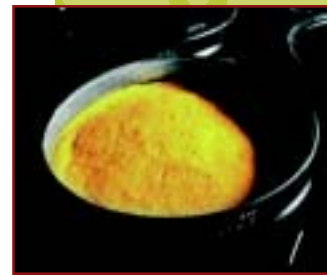
zidos pelas áreas médica e industrial. Os rejeitos de alta atividade, provenientes dos combustíveis já utilizados das usinas nucleares, são armazenados nas próprias usinas, que contam com local adequado para armazenar todo o volume produzido em sua vida útil, até que surja solução definitiva para o problema.

Milhões de dólares vêm sendo gastos na busca de uma solução – de preferência, que torne o resíduo não radioativo e inócuo. Em todo o mundo, os depósitos de rejeitos radioativos têm que ser gerenciados e administrados pelo país, sendo controlados pelas respectivas agências reguladoras de atividades nucleares, segundo normas nacionais e internacionais, de modo a garantir a segurança dos mesmos.

Energia nuclear no país

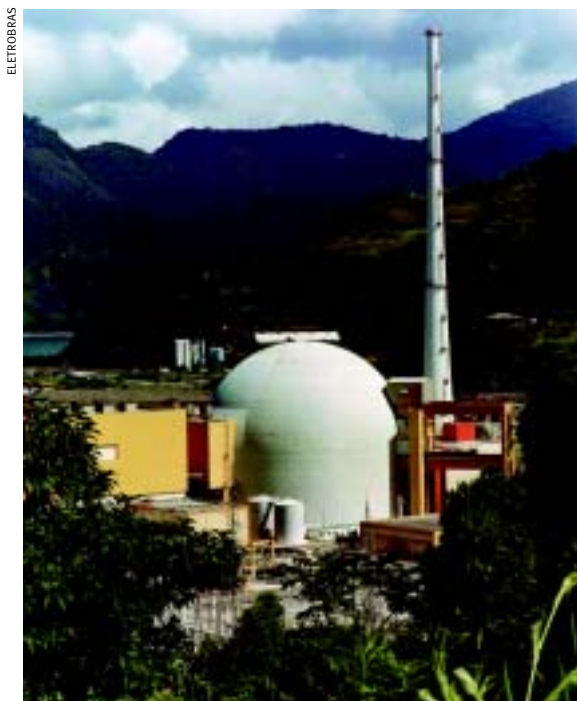
O Brasil tem um programa amplo de uso de energia nuclear para fins pacíficos. Cerca de 3 mil instalações estão em funcionamento, utilizando material ou fontes radioativas para inúmeras aplicações na indústria, saúde e pesquisa. No ano passado, o número de pacientes utilizando radiofármacos foi superior a 2,3 milhões, em mais de 300 hospitais e clínicas em todo o país, com um crescimento anual da ordem de 10% nos últimos 10 anos.

Novos ciclotrons, que permitem a produção de radioisótopos para o uso de técnicas nucleares avançadas, foram instalados em São Paulo e no Rio de Janeiro – a CNEN irá instalar, nos próximos anos, ciclotrons em Belo Horizonte e Recife, para tornar disponível essa tecnologia à população dessas regiões. ▶



- 1967** Brasil assina Tratado para a Proscrição de Armas Nucleares na América Latina e Caribe
- 1968** Estabelecido pela AIEA o Tratado de Não-proliferação
- 1972** Assinado com os Estados Unidos acordo para a construção de Angra 1
- 1981** Autorizado funcionamento provisório de Angra 1
- 1982** Brasil passa a produzir bolo amarelo (*yellow cake*)
- 1984** Angra 1 entra em operação comercial
- 1987** Brasil inicia produção de urânio enriquecido. Acidente em Goiânia com césio-137
- 1988** Inaugurado o reator MB/01 concebido e construído no Brasil
- 1991** Brasil e Argentina assinam acordo para uso pacífico da energia nuclear
- 1994** Entra em vigor o Tratado para a Proscrição de Armas Nucleares na América Latina e Caribe
- 1995** Brasil passa a produzir o radiofármaco tálcio-201
- 2000** Início de operação de Angra 2
- 2004** Entra em operação a usina de enriquecimento nuclear em Resende (RJ)

As reservas brasileiras de urânio – 300 mil toneladas – são suficientes para manter em funcionamento 10 reatores equivalentes aos existentes (Angra 1 e Angra 2, na foto) por 100 anos



SUGESTÕES PARA LEITURA

MARTINS, J. B. A. *história do átomo – de Demócrito aos quarks* (Ciência Moderna, Rio de Janeiro, 2001).

CAULLIRAUX, H. *Hiroshima 45, o grande golpe: da concepção do átomo à tragédia de Hiroshima* (Lucerna, Rio de Janeiro, 2005).

NA INTERNET
<http://www.cnem.gov.br> (apostilas e informações gerais)

<http://www.iaea.org> (estatísticas, história e dados completos sobre a área nuclear, em inglês)

<http://www.inb.gov.br> (ciclo do combustível)

<http://www.uic.com.au/nip22.htm> (informações sobre o acidente em Chernobyl, em inglês)

<http://www.world-nuclear.org> (informações sobre a área nuclear, em inglês)

A produção de radioisótopos por reatores também tem aumentado, graças à modernização dos equipamentos e da melhoria dos métodos de produção. Novas técnicas de combate ao câncer, com maior eficácia e menos efeitos colaterais, têm surgido, fazendo aumentar a procura pelos radiofármacos, de forma que a demanda sempre supera a produção brasileira.

O uso de técnicas com materiais radioativos na indústria tem aumentado com a modernização dos equipamentos importados e com a sofisticação das técnicas de controle de processos e de qualidade. A demanda por controle de qualidade leva a indústria a utilizar cada vez mais os processos de análise não destrutiva com radiações.

Na área de geração de energia, o Brasil é um dos poucos países do mundo a dominar todo o processo de fabricação de combustível para usinas nucleares. O processo de enriquecimento isotópico do urânio por ultracentrifugação, peça estratégica dentro do chamado ciclo do combustível nuclear, é totalmente de domínio brasileiro.

Hoje, o combustível utilizado nos reatores de pesquisa brasileiros pode ser totalmente produzido no país. Entretanto, comercialmente ainda fazemos a conversão e o enriquecimento no exterior. As reservas brasileiras de urânio já confirmadas são de 300 mil toneladas e estão entre as seis maiores do mundo. Em termos energéticos, mesmo com apenas uma terça parte do país prospectado, essas reservas são da mesma ordem de grandeza daquelas atualmente existentes em petróleo e seriam suficientes para manter em funcionamento

10 reatores equivalentes aos existentes – Angra 1 e Angra 2 – por cerca de 100 anos. O funcionamento dessas duas usinas foi importante no período de falta de energia no Brasil.

O Ministério da Ciência e Tecnologia coordenou um grupo de trabalho encarregado de rever o programa nuclear e formular planos de médio prazo. O grupo apresentou um plano realista para ser executado em 18 anos e que objetiva o fortalecimento de todas as atividades, inclusive a aquisição de novos reatores para chegar em 2022 com, pelo menos, a mesma participação nuclear (4%) na matriz energética brasileira. A proposta encontra-se em análise na presidência da República.

A segurança

A geração de eletricidade por reatores nucleares é uma das áreas tecnológicas que mais se preocupam com a segurança. Prova dessa segurança é que, entre todos os reatores em funcionamento, o único acidente com vítimas foi o de Chernobyl, onde as condições de segurança eram notadamente insipientes.

A segurança nuclear é constantemente aperfeiçoada, sendo fruto de um esforço internacional, com projetos e sistemas cada vez mais seguros e confiáveis, procurando reduzir as possibilidades de falhas e acidentes com conseqüências. Os novos aperfeiçoamentos são introduzidos nos reatores mais antigos, atualizando sempre a condição de segurança. A garantia de que as experiências e novas exigências sejam estendidas a todos os países é dada pelos acordos internacionais, geridos pela AIEA. Outros acordos, destacando-se o Tratado de Não-proliferação (TNP), garantem um amplo controle que inibe a proliferação das armas nucleares e que busca a redução dos arsenais existentes.

No Brasil, esse controle é responsabilidade da CNEN, que licencia e inspeciona as instalações que utilizam material nuclear em todas as áreas, inclusive instalações médicas e industriais, para garantir que esse uso seja feito dentro das mais modernas normas de segurança. Além disso, a CNEN credencia os profissionais responsáveis pela segurança, que, por lei, devem ter um vínculo formal ou fazer parte do corpo de funcionários da instalação.

Como já mencionado, toda tecnologia carrega algum risco, e acidentes podem acontecer, mas cabe à humanidade criar condições para que as vantagens superem de forma ampla e compensadora os riscos existentes. Isso é o que tem sido feito com a energia nuclear, cada vez mais segura e cada vez mais presente e indispensável em nosso cotidiano. ■