Reatores Nucleares - Conceitos

Observa-se na mídia, em decorrência do acidente nas usinas nucleares do Japão, um grande interesse sobre os reatores nucleares, o acompanhamento das causas do acidente, sua evolução e as ações tomadas. Isso exige um esclarecimento de técnicos do setor sobre os fenômenos envolvidos e a engenharia associada a um reator nuclear. Este texto não se direciona a uma discussão maior sobre as vantagens e desvantagens da energia nuclear na geração de energia elétrica ou sua adoção, ou não, por países que dependem dessa fonte de forma massiva ou complementar, mas apenas como uma contribuição para um melhor entendimento dos fatos técnicos que estão ocorrendo.

A utilização da energia proveniente de reações que ocorrem no átomo, tanto no seu núcleo (prótons e nêutrons) como na camada orbital (elétrons), está no dia a dia das pessoas. Reações químicas ocorrem nas camadas orbitais do átomo, e possuem uma escala energética unitária de limitada monta. Já as reações que ocorrem no núcleo do átomo, reações nucleares, têm sua escala unitária de energia chegando a valores um milhão de vezes superiores às reações químicas, como a fissão do urânio, ou a fusão de núcleos de hidrogênio, que é ainda mais energética que a fissão do núcleo de urânio. Em consonância com a diferença energética entre as reações químicas e nucleares estão os volumes associados ao processo de geração de energia e aos resíduos gerados. Um grama de urânio equivale, energeticamente, a milhões de gramas na combustão de gás, óleo ou carvão. O rejeito nuclear gerado deve permanecer nesse pequeno volume, enquanto que os rejeitos da combustão ocuparão grandes volumes (atmosfera). O desafio da engenharia nuclear é lidar de forma segura e sustentável com a grande energia específica gerada e a grande concentração específica dos resíduos existentes no reator nuclear.

Nuclídeos são átomos caracterizados pela quantidade, no núcleo, de prótons (número atômico), de prótons e nêutrons (número de massa), e por seu estado de energia. Os nuclídeos podem ser estáveis ou instáveis, e neste caso emitem energia na busca do estado estável. A liberação de energia, denominada radioatividade, ocorre tanto pela emissão de partículas (alfa, beta, prótons, nêutrons) como por emissão de radiação eletromagnética (radiação gama). A radioatividade tem característica única para cada nuclídeo, ou seja, tipo de radiação e espectro de energia da radiação emitida, e uma constante característica para a probabilidade do decaimento radioativo por unidade de tempo. Definem-se atividade como o número de decaimentos radioativos por unidade de tempo, e meia vida como o tempo necessário para que o decaimento radioativo leve a concentração de um nuclídeo para a metade da concentração inicial (ex: iodo-131 tem meia vida de 8,02 dias; césio-137 tem meia vida de 30,17 anos). Quanto maior a concentração de um nuclídeo radioativo, maior é a sua atividade, e quanto maior a meia vida, maior é o tempo que haverá radiação sendo emitida. São conhecidos mais de 1500 nuclídeos, sendo que 325 existem na natureza, dos quais 284 são estáveis, e nenhum nuclídeo acima do número de massa 209 é estável. A radioatividade está presente na natureza, e a utilização de reatores nucleares, por princípio, não deve contribuir de forma significativa para a exposição da população à radiação. A dose média anual recebida pela população mundial, por radiação no meio ambiente, é de 2,4 milisievert, sendo

que 55% dessa dose provem do radônio e 26% de outras fontes naturais. As doses efetivas provenientes de usinas nucleares devem ser inferiores a 1 milisievert por ano para o indivíduo do público ao redor da instalação.

Um elemento radioativo pode ser obtido artificialmente através de reações nucleares em aceleradores de partículas ou em reatores nucleares. O reator nuclear é o "equipamento" ou sistema onde se realizam as reações nucleares de forma controlada. Os nêutrons comandam o funcionamento do reator e as principais reações nucleares com nêutrons são:

- Reação de absorção: o nêutron é agregado ao núcleo do átomo, tornando o novo núcleo instável (radioisótopo), emitindo radioatividade para buscar a estabilidade. Esta é a forma de produzir radioisótopos específicos para diversas aplicações (medicina, indústria, meio ambiente, etc.), e alguns materiais, que possuem nuclídeos com esta característica de reação nuclear de forma mais acentuada, são utilizados para controle do reator. (ex: boro, cadmio, prata, índio, háfnio, etc.)
- Reação de espalhamento: o nêutron transfere parte de sua energia cinética para o núcleo alvo. Neste tipo de reação o nêutron tem a sua energia diminuída, e os materiais que possuem nuclídeos com estas características de reação são utilizados como moderadores, refletores e blindagem no reator. (ex: hidrogênio, deutério, berílio, carbono)
- Reação de fissão, o nêutron desestabiliza o núcleo alvo, e este se parte (fissiona), formando dois novos núcleos, emitindo nêutrons e radiação. O urânio-235, nuclídeo encontrado na natureza, possui alta probabilidade de fissionar na reação nuclear com nêutrons. O urânio-238 e tório-232, também encontrados na natureza, possuem baixa probabilidade de reação de fissão com nêutrons, mas possuem alta probabilidade de se transformarem em nuclídeos físseis através da absorção de nêutrons. Desta forma são produzidos, artificialmente no reator, o plutônio-239 e urânio-233 que são nuclídeos que possuem maior probabilidade de fissão pela reação nuclear com nêutrons do que o urânio-235. A energia liberada na fissão do núcleo do átomo é da ordem de 200 milhões de eletronvolts, dos quais 84% são devidos à energia cinética dos produtos de fissão gerados, 7% devido ao decaimento radioativo desses produtos de fissão e o restante devido à emissão de radiação gama e nêutrons.

O fato de haver produção de nêutrons na fissão faz com que exista no reator uma reação em cadeia. Portanto, no reator nuclear o que se controla é a quantidade disponível de nêutrons para manter a reação em cadeia. No reator, a relação numérica entre a quantidade de nêutrons que são produzidos no processo de fissão e a quantidade de nêutrons que são absorvidos ou escapam do reator é o fator a ser controlado. Quando este fator é igual a 1 o reator está crítico; menor que 1 subcrítico; e maior que 1 supercrítico. As barras de controle do reator modulam suas posições relativas no núcleo para controlarem esse fator e, consequentemente, a potência do reator. Os materiais, que constituem o reator, são arranjados em geometria e quantidades determinadas (arranjo crítico). As seguintes funções são executadas, pelos diversos materiais, no processo das reações nucleares com nêutrons: *combustível nuclear* (contém o material que sofre fissão e gera energia), *moderador* (material que diminui a energia dos nêutrons produzidos na fissão e possibilita

a reação em cadeia), *absorvedor* (material absorvedor de nêutrons que controla a reação em cadeia, com funções de controle e segurança do reator), *refrigerante* (material que retira o calor gerado no combustível), *refletor* (material colocado ao redor do núcleo do reator para minimizar fuga de nêutrons e melhorar o processo da reação em cadeia), *blindagem* (material disposto ao redor do reator para blindagem biológica à radiação emitida) e *estruturas* (todos os materiais estruturais que formam o reator, e seus componentes, para as funções listadas).

A classificação dos tipos de reatores pode ser estabelecida pela sua aplicação. Destacam-se aqui três categorias principais:

- Reatores de pesquisa. Principalmente usados como fonte de nêutrons para "gerar conhecimento". Servem para teste de materiais sob as condições de alto campo de radiação, produção de radioisótopos (para aplicação na medicina, na indústria, na agricultura, meio ambiente), fornecimento de feixe de nêutrons para pesquisas básicas e aplicadas, e também para ensino e treinamento de pessoal qualificado da área nuclear. No mundo foram construídos 660 reatores de pesquisa, dos quais 242 ainda estão em operação, 172 descomissionados, 246 em estado de desligamento, 7 em construção e mais 6 em planejamento.
- Reatores para propulsão naval. São reatores compactos para geração de vapor ou energia elétrica destinados a propulsão de submarinos e navios de guerra. Foram construídos mais de 300 no mundo.
- Reatores para geração de energia elétrica, ou usinas nucleares. São reatores nucleares de grande porte. São responsáveis por mais de 16% da energia elétrica gerada no mundo, num total de 442 usinas em 30 países.

No Brasil existem quatro reatores de pesquisa em operação e um em planejamento, um reator de propulsão em desenvolvimento, duas usinas nucleares em operação e uma terceira em construção.

Os reatores de potência para geração de energia elétrica são classificados em várias categorias, podendo-se destacar duas principais: a primeira que utiliza água comum como moderador e refrigerante (LWR – Light Water Reactor), e a segunda que utiliza água pesada (HWR – Heavy Water Reactor). Reatores à água comum são a maioria e utilizam urânio enriquecido como combustível ($<$ 4% em peso de U-235), e os reatores à água pesada utilizam urânio natural. O objetivo principal das usinas nucleares é gerar vapor para movimentar uma turbina e produzir eletricidade num gerador elétrico. Para operarem com uma eficiência térmica adequada devem ter temperaturas altas na água de resfriamento do combustível. Para tal, precisam ter sistemas pressurizados e combustíveis nucleares estruturalmente estáveis a altas temperaturas. Os sistemas tipo PWR (Pressurized Water Reactor) e BWR (Boiling Water Reactor) são os utilizados nas usinas tipo LWR. No sistema PWR a água (moderador, refrigerante e refletor) deve permanecer líquida até em torno de 330 ^{o}C, necessitando de alta pressão no sistema primário (150 bar). O vapor para movimentar a turbina é obtido num sistema secundário com menor pressão que o sistema primário. No sistema BWR há a ebulição da água ao longo da sua passagem no reator, o que permite menor pressão no sistema de água do reator comparado ao PWR, e o vapor produzido, em alguns projetos, é utilizado

diretamente para movimentar a turbina. As usinas nucleares do Brasil, Angra I, Angra II e Angra III são do tipo PWR, as usinas de Fukushima-Daiichi no Japão são do tipo BWR.

Nos reatores LWR o combustível nuclear é formado por pastilhas cilíndricas sinterizadas de dióxido de urânio. Seu desempenho sob irradiação no reator é bastante estável, podendo atingir altas queimas de urânio (energia específica gerada) no reator. As pastilhas combustíveis são encapsuladas num tubo metálico de uma liga de zircônio que possui alto desempenho térmico e mecânico sob irradiação no ambiente do reator. Denomina-se vareta combustível o conjunto das pastilhas encapsuladas. A vareta combustível tem 1 cm de diâmetro e comprimento superior a 3 metros. Define-se como elemento combustível o componente do reator que contem as varetas combustíveis num arranjo geométrico e estrutural bem definido. O núcleo do reator é constituído por um conjunto de elementos combustíveis. Os elementos combustíveis, após seu uso no reator, são estocados em piscinas, e classificados como resíduo radioativo de alta atividade.

Também podem existir combustíveis que utilizam pastilhas sinterizadas de óxido misto de urânio e plutônio (MOX) ao invés de pastilhas de óxido de urânio somente. Esta prática é realizada em alguns países em que há plantas de reprocessamento do combustível nuclear irradiado, onde é separado o plutônio. O reator Fukushima Daiichi-3 no Japão possui este tipo de combustível no seu núcleo.

Todos os sistemas da usina são projetados para atender aos objetivos específicos de desempenho na produção de energia elétrica. No entanto, o objetivo fundamental de segurança no projeto do reator é garantir que as taxas de dose por exposição à radiação, tanto para os trabalhadores quanto para o público, para todas as condições operacionais e acidentes postulados, permaneçam abaixo dos limites estabelecidos por normas.

As funções de segurança fundamentais para o projeto do reator podem ser definidas como:

- Controlar a reatividade neutrônica (variação da população de nêutrons) garantindo o controle da potência do reator e assegurando o desligamento seguro do reator, mantendo-o nessa condição pelo tempo que for necessário;
- Manter o resfriamento adequado do elemento combustível;
- Manter o confinamento de todo o material radioativo.

Deve ser assegurado, em projeto, que as funções fundamentais sejam comprovadamente executadas em todas as condições operacionais normais e antecipadas, e em acidentes postulados, bem como para eventos externos acidentais ou provocados por fenômenos naturais.

No primeiro item, controle do reator, são impostos critérios de coeficientes de reatividade negativos (aumento de temperatura ou potência tendem a desligar o reator), e manutenção da geometria do elemento combustível para garantir a inserção dos materiais absorvedores que controlam o reator. Redundância, falha segura e princípios independentes de funcionamento devem ser utilizados no projeto dos sistemas e componentes que fazem o controle do reator. Quando do armazenamento dos combustíveis irradiados em piscina, deve ser garantido que o

arranjo geométrico não leve a uma configuração crítica, ou seja, não deve permitir a sustentação da reação nuclear em cadeia.

No segundo item, garantia do resfriamento do elemento combustível, as condições de refrigeração devem ser mantidas através de sistemas apropriados para todas as condições operacionais e acidentes postulados. Estes sistemas podem ser de ação ativa ou passiva. Redundância e defesa em profundidade são características necessárias ao projeto. No caso dos sistemas de segurança de resfriamento de emergência, os sistemas passivos são mais apropriados que sistemas ativos.

No terceiro item devem ser projetadas várias barreiras sucessivas que não permitam o escape de produtos radioativos ao meio ambiente. São barreiras efetivas a matriz do combustível, o revestimento da vareta combustível, o vaso de pressão do reator e o sistema primário, a contenção metálica ao redor do sistema primário e o prédio da contenção. A função das barreiras sucessivas é garantir que o meio ambiente não receba produtos radioativos produzidos no reator.

Especial atenção deve ser dada aos produtos radioativos formados na fissão (ex: iodo-131, césio-137, molibdênio-99, zircônio-95, entre outros). Esses nuclídeos produzem energia, no seu processo de decaimento radioativo, equivalente a 7% da potência existente no reator no instante imediato ao seu desligamento (diminuição da população de nêutrons e inibição da reação nuclear em cadeia e consequente inibição das fissões para produção de energia), decaindo para 1% após 3 horas do desligamento e 0,1% após 3 meses de decaimento. Este é um ponto muito importante para a engenharia dos sistemas de segurança do reator como verificado no acidente no Japão (Unidade Fukushima-Daiichi 1 – 1380 MW de potência térmica, no instante imediato ao desligamento cai para 97 MW de potência, uma hora depois 14 MW, três meses depois será 1,4 MW de potência a ser dissipada). Mesmo depois de desligado o reator, os combustíveis nucleares continuam produzindo energia que deve ser dissipada, caso contrário haverá aumento de temperatura nos materiais e possível fusão, perdendo-se a contenção do combustível e dos produtos de fissão radioativos.

Para produção de energia elétrica, pode-se classificar a evolução dos reatores nucleares como: geração I, os primeiros reatores projetados até o início da década de 70; geração II, os reatores projetados na década de 70 e 80; e geração III e III+, os reatores que foram projetados na última década. Reatores de geração IV são previstos para 2040 em diante. O reator Fukushima-Daiichi 1 é de geração I, e as unidades 2 a 6 são de geração II.

O acidente no Japão mostrou que o projeto respondeu conforme planejado ao terremoto. Houve desligamento do reator e atuação do sistema de resfriamento de calor residual. A energia externa da usina foi interrompida com o terremoto, mas a alimentação com gerador diesel de emergência operou normalmente. No entanto, com o tsunami houve perda completa da energia elétrica de emergência e a função de segurança de manter os elementos combustíveis refrigerados não ocorreu a contento. Neste caso, o calor a ser retirado dos combustíveis é o calor de decaimento dos produtos de fissão radioativos. Em decorrência da falta de refrigeração a pressão aumentou no vaso do reator, houve aumento da temperatura nas varetas combustíveis, e possível fusão parcial

dos combustíveis, aumentando a oxidação do material do revestimento das varetas combustíveis. Como consequência há maior produção de hidrogênio, que foi drenado para as barreiras sucessivas de contenção, o que ocasionou a explosão na última barreira que era o prédio do reator. Em todas as unidades, os combustíveis armazenados na piscina de estocagem, recém-descarregados do reator, também não puderam ser devidamente refrigerados, pois o sistema de remoção de calor destas piscinas não estava funcionando. Em algumas dessas unidades pode ter havido também exposição ao ar de parte dos combustíveis armazenados. O procedimento adotado pela empresa japonesa que opera a usina foi de injetar água do mar tanto na contenção primária do reator como na piscina de armazenamento para tentar refrigerar o reator e os combustíveis. Também foi injetado ácido bórico (boro é absorvedor de nêutrons) para garantir que o reator permanecesse subcrítico.

Toda essa sequência de eventos levou a liberação de produtos radioativos para fora da usina, necessitando ser acionado o plano de emergência e evacuação da população para garantir que as doses absorvidas pelo indivíduo do público fossem mantidas dentro de níveis aceitáveis. Os elementos radioativos liberados do combustível são primeiramente os gasosos e voláteis e aqueles que possuem migração química da matriz do combustível nuclear para o refrigerante (água). Nesta categoria estão os produtos de fissão xenônio, criptônio, iodo e césio. Os nuclídeos iodo-131 (meia-vida 8,02 anos), césio-137 (meia-vida 30,17 anos) e césio-134 (meia-vida 2,06 anos) são os que têm maior liberação e serão verificados no meio ambiente nesta primeira etapa do acidente.

Observando as funções de segurança, o foco dos projetos de reatores avançados (geração III+) é garantir a substituição de sistemas de segurança ativos que dependem de partes móveis ou ação do homem (ex. acionamento de bombas) por sistemas de segurança passivos ou inerentes que independem desses fatores para exercer sua função (ex. circulação natural, ação da gravidade, etc.). Os aspectos de robustez das barreiras de contenção sucessivas são também levados em conta. Existem dois tipos de projeto de reatores avançados do tipo LWR: ALWR evolucionários e ALWR passivos. Os ALWR evolucionários ainda possuem sistemas ativos, mas simplificados e bem desenvolvidos. Os ALWR passivos possuem sistemas passivos de segurança sem acionamento elétrico e que garantem em qualquer condição de acidente a função de segurança de desligamento e refrigeração dos combustíveis. Nesses projetos avançados é exigida, através de análise probabilística de risco, a demonstração de que a probabilidade de ocorrência de um acidente severo (fusão parcial do núcleo) é muito baixa e que, na sua existência, as doses fora da usina estejam abaixo de limites regulatórios estabelecidos. As usinas com sistemas passivos, e garantia de baixa probabilidade de ocorrência de acidentes severos, devem dominar o cenário futuro na geração nucleoelétrica.

Certamente a análise técnica mais detalhada da evolução do acidente do Japão levará a ações de melhoria de segurança nas usinas em operação no mundo. As vulnerabilidades das usinas nucleares a eventos naturais, de magnitude superior a que foram originalmente projetadas, devem ser analisadas e consideradas. O acidente do Japão mostrou que o terremoto ocorrido foi maior que o previsto em projeto (8.9 contra 8.2 - na escala Richter), bem como um tsunami com onda muito

superior a que se imaginava existir. As usinas hoje em operação, e em construção, deverão rever sua atuação para eventos naturais, ou outros eventos provocados pelo homem, que possam levar à perda completa, e por longo período, de energia elétrica necessária às funções de segurança da usina. Certamente os órgãos nacionais de licenciamento nuclear e as agências internacionais exigirão medidas adicionais dos governos e das operadoras das usinas nucleares no sentido de mitigar possíveis ocorrências como as observadas no Japão.

Jose Augusto Perrotta
Engenheiro Civil, Mestre em Engenharia Nuclear, Doutor em Tecnologia Nuclear.
Diretor de Projetos do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN-CNEN/SP.