

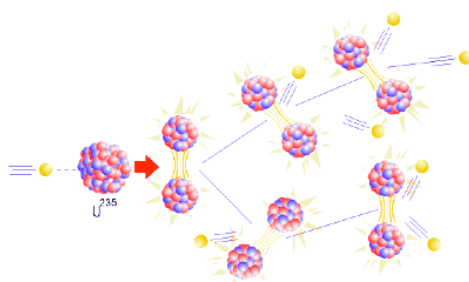
Energia Nuclear. A utilização da energia nuclear vem crescendo a cada dia. A geração núcleo elétrica é uma das alternativas menos poluentes; permite a obtenção de muita energia em um espaço físico relativamente pequeno e a instalação de usinas perto dos centros consumidores, reduzindo o custo de distribuição de energia. Outras fontes de energia, como solar ou eólica, são de exploração cara e capacidade limitada, ainda sem utilização em escala industrial. Os recursos hidráulicos também apresentam limitações, além de provocar grandes impactos ambientais. Por isso, a energia nuclear torna-se mais uma opção para atender com eficácia as necessidades energéticas do mundo moderno.

Energia: alguns aspectos relevantes relacionados a este conceito. **Energia:** corresponde à capacidade de um corpo ou sistema realizar trabalho. Modalidades de energia: a) Energia cinética: associada ao movimento dos corpos; b) Energia potencial: armazenada em um corpo material ou em uma posição no espaço, podendo ser convertida em outras formas de energia a partir de uma modificação do estado de um corpo ou de um sistema (exemplos: energia potencial gravitacional, energia química, energia dos combustíveis, energia armazenada em átomos); c) Energia luminosa e energia térmica (luz e calor). d) Energia magnética. **Matéria e Energia:** sabemos que quanto maior a quantidade de matéria de um corpo ou sistema, maior a energia inercial armazenada neste corpo ou sistema. **Conversão de Energia:** um exemplo clássico de conversão de uma forma de energia em outra é o nosso corpo, em que a energia liberada por reações químicas é transformada em outras formas de energia que possibilitam a existência da vida, a nossa locomoção, os nossos movimentos e assim por diante. Outro exemplo clássico é o da conversão, em energia elétrica, da energia de movimento de correntes de água. O dispositivo de conversão consiste em uma turbina acoplada a um gerador, contendo um eixo, dotado de pás, que podem ser acionadas por água corrente; o eixo entra então em rotação e move a parte interna do gerador, fazendo aparecer, graças ao fenômeno da indução eletromagnética, uma corrente elétrica no sistema. No caso em que as pás forem movidas pela passagem de vapor, obtido por meio do aquecimento da água, tem-se, então, uma usina termoelétrica. O calor, por sua vez, pode ser gerado pela queima de óleo combustível, carvão ou gás. **Estrutura da Matéria:** o átomo é constituído por um núcleo, onde está concentrada a maior parte de sua massa, composto por prótons e nêutrons e minúsculas partículas que giram ao seu redor, os elétrons. O átomo possui grandes espaços vazios, que podem ser atravessados por partículas menores que ele. **Energia nuclear:** os prótons são submetidos, no núcleo, à força de repulsão de Coulomb, e a forças de repulsão e de atração de origem nuclear. Os nêutrons por sua vez estão submetidos somente a forças de atração e de repulsão de origem nuclear. A energia que mantém os prótons e os nêutrons ligados ao núcleo é a energia nuclear e é denominada de energia de ligação nuclear. **Utilização da energia nuclear:** uma forma de liberação de energia nuclear para sua utilização baseia-se na partição o núcleo em porções menores por meio do impacto com nêutrons incidentes. Chegamos assim ao conceito de fissão nuclear.

Fissão Nuclear. Fissão nuclear é a denominação utilizada para um tipo de reação no qual um átomo é partido, sendo produzidos, neste processo, nêutrons livres e núcleos mais leves, e eventualmente fótons de altas energias (radiação gama). A fissão de núcleos pesados se realiza por meio da cessão de energia, sendo portanto um processo endotérmico. A fissão pode gerar grandes quantidades de energia que aparecem como radiação eletromagnética e energia cinética dos fragmentos da reação. Fissão nuclear é uma forma de transmutação, na medida em que os fragmentos resultantes não

correspondem aos elementos atômicos originais. Em suma: a energia que o núcleo do átomo possui, mantendo prótons e nêutrons ligados, denomina-se energia nuclear; quando um nêutron atinge o núcleo de um átomo de urânio-235, divide-o e ocorre a emissão de 2 a 3 nêutrons; parte da energia que ligava os prótons e os nêutrons é liberada em forma de calor; este processo é denominado fissão nuclear.

Reação em Cadeia. Em cada reação de fissão nuclear resultam, além de núcleos menores, dois a três nêutrons, como consequência da absorção do nêutron que causou a fissão. Torna-se, então, possível que esses nêutrons atinjam outros núcleos (por exemplo, urânio-235), liberando calor. Tal processo é denominado de reação de fissão nuclear em cadeia ou, simplesmente, reação em cadeia.



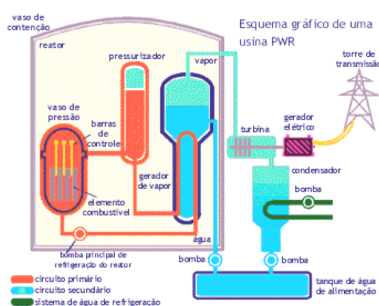
Para suspender ou minimizar a reação em cadeia, teríamos que "apreender" os nêutrons liberados, impedindo os choques sucessivos¹.

O reator nuclear. De uma forma simplificada, um reator nuclear é um equipamento onde se processa uma reação de fissão nuclear, assim como um reator químico é um equipamento onde se processa uma reação química. Um reator nuclear é uma espécie de central térmica, onde a fonte de calor é o urânio-235, em vez de óleo combustível ou de carvão. É, portanto, uma central térmica nuclear. A grande vantagem de uma central térmica nuclear é a enorme quantidade de energia que pode ser gerada, ou seja, a potência gerada, para comparativamente pouco material usado (o urânio). O combustível nuclear, o urânio-235, é chamado de combustível nuclear, porque pode substituir o óleo ou o carvão para gerar calor. Não há diferença entre a energia gerada por uma fonte convencional (hidroelétrica ou térmica) e a energia elétrica gerada por um reator nuclear².

¹ **Controle da Reação em Cadeia.** Nos reatores nucleares, a reação acontece dentro de varetas que compõem uma estrutura chamada elemento combustível. Dentro do elemento combustível há também barras de controle, geralmente feitas de cádmio, material que absorve nêutrons. Estas barras controlam o processo: quando as barras "entram totalmente" no elemento combustível, o reator pára; quando saem, ele é ativado. **Urânio-235 e Urânio-238.** O urânio-235 é um elemento químico que possui 92 prótons e 143 nêutrons no núcleo. Além do urânio-235, existe na natureza, em maior quantidade, átomos com 92 prótons e 146 nêutrons (número de massa igual a 238). São também átomos do elemento urânio, porque têm 92 prótons, ou seja, número atômico 92. Trata-se do urânio-238, que só tem possibilidade de sofrer fissão por nêutrons de elevada energia cinética (os chamados nêutrons rápidos). Já o urânio-235 pode ser fissionado por nêutrons de qualquer energia cinética, preferencialmente os de baixa energia, denominados nêutrons térmicos (ou lentos).

² **Reator nuclear e bomba atômica.** A bomba atômica é feita para ser explodir, de modo que a reação em cadeia deve ser rápida e a quantidade de urânio muito concentrado em urânio-235 (massa crítica: urânio enriquecido acima de 90%). Um reator nuclear, para gerar energia elétrica, é construído de forma a ser impossível explodir como uma bomba atômica. Primeiro, porque a concentração de urânio-235 deve ser muito baixa (cerca de 3,2%), não permitindo que a reação em cadeia se processe com rapidez suficiente para se transformar em explosão. Segundo, porque dentro do reator nuclear existem materiais absorvedores de nêutrons,

que controlam a reação em cadeia. **O reator nuclear existente em Angra.** O reator de Angra é conhecido como PWR (Pressurized Water Reactor, ou seja, reator a água pressurizada), porque contém água sob alta pressão. O urânio, enriquecido a cerca de 3,2% em urânio-235, é colocado, em forma de pastilhas de 1 cm de diâmetro, dentro de tubos (varetas) de 4m de comprimento, feitos de uma liga especial de zircônio, denominada zircalloy. **Varetas de combustível.** As varetas, contendo o urânio, conhecidas como varetas de combustível, são montadas em feixes, numa estrutura denominada de elemento combustível. As varetas são fechadas, com o objetivo de não deixar escapar o material nelas contido (o urânio e os elementos resultantes da fissão) e podem suportar altas temperaturas. Os elementos resultantes da fissão nuclear (produtos de fissão ou fragmentos da fissão) são radioativos, isto é, emitem radiações e, por isso, devem ficar retidos no interior do reator. **Barras de controle.** Na estrutura do elemento combustível existem tubos guias, por onde podem passar as barras de controle, geralmente feitas de cádmio, material que absorve nêutrons, com o objetivo de controlar a reação de fissão nuclear em cadeia. Quando as barras de controle estão totalmente para fora, o reator está trabalhando no máximo de sua capacidade de gerar energia térmica. Quando elas estão totalmente dentro da estrutura do elemento combustível, o reator está "parado" (não há reação de fissão em cadeia). Os elementos combustíveis são colocados dentro de um grande vaso de aço, com paredes, no caso de Angra 1, de cerca de 33 cm e, no caso de Angra 2, de 23,5 cm. **Vaso de pressão.** Esse enorme recipiente, denominado vaso de pressão do reator, é montado sobre uma estrutura de concreto, com cerca de 5 m de espessura na base. O vaso de pressão contém a água de refrigeração do núcleo do reator (os elementos combustíveis). Essa água fica circulando quente pelo gerador de vapor e não sai desse sistema, chamado de circuito primário. Angra 1 tem dois geradores de vapor; Angra 2, quatro. A água que circula no circuito primário é usada para aquecer uma outra corrente de água, que passa pelo gerador de vapor. A outra corrente de água, que passa pelo gerador de vapor para ser aquecida e transformada em vapor, passa também pela turbina, em forma de vapor, acionando-a. É, a seguir, condensada e bombeada de volta para o gerador de vapor, constituindo um outro sistema de refrigeração, independente do primeiro. O sistema de geração de vapor é chamado de circuito secundário. A independência entre o circuito primário e o circuito secundário tem o objetivo de evitar que, danificando-se uma ou mais varetas, o material radioativo (urânio e produtos de fissão) passe para o circuito secundário. É interessante mencionar que a própria água do circuito primário é radioativa. O vaso de pressão do reator e o gerador de vapor são instalados em uma grande "carcaça" de aço, com 3,8 cm de espessura em Angra 1. Esse envoltório, construído para manter contidos os gases ou vapores possíveis de serem liberados durante a operação do reator, é denominado contenção. No caso de Angra 1, a contenção tem a forma de um tubo (cilindro). Em Angra 2 é esférica. Um último envoltório, de concreto, revestindo a contenção, é o próprio edifício do reator. Tem cerca de 1 m de espessura em Angra 1. Veja abaixo uma representação da Usina Angra I. O vaso de pressão contém a água de refrigeração do núcleo do reator. Em suma: essa água circula quente por um gerador de vapor, em circuito fechado, chamado de circuito primário. A outra corrente de água que passa por esse gerador (circuito secundário) se transforma em vapor, acionando a turbina para a geração de eletricidade. Os dois circuitos não têm comunicação entre si.



Urânio enriquecido. A quantidade de urânio-235 na natureza é muito pequena: para cada 1.000 átomos de urânio, 7 são de urânio-235 e 993 são de urânio-238 (a quantidade dos demais isótopos é desprezível). Para ser possível a ocorrência de uma reação de fissão nuclear em cadeia, é necessário haver quantidade suficiente de urânio-235, que é fissionado por nêutrons de qualquer energia, como já foi dito. Nos reatores nucleares do tipo PWR, é necessário haver a proporção de 32 átomos de urânio-235 para 968 átomos de urânio-238, em cada grupo de 1.000 átomos de urânio, ou seja, 3,2% de urânio-235. O urânio encontrado na natureza precisa ser tratado industrialmente, com o objetivo de elevar a proporção (ou concentração) de urânio-235 para urânio-238, de 0,7% para 3,2%. Para isso deve, primeiramente, ser purificado e convertido em gás. **Enriquecimento de urânio.** O processo físico de retirada de urânio-238 do urânio natural, aumentando, em consequência, a concentração de urânio-235, é conhecido como enriquecimento de urânio. Se o grau de enriquecimento for muito alto (acima de 90%), isto é, se houver quase só urânio-235, pode ocorrer uma reação em cadeia

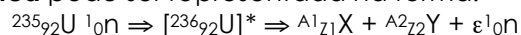
muito rápida, de difícil controle, mesmo para uma quantidade relativamente pequena de urânio, passando a constituir-se em uma explosão: é a "bomba atômica". Foram desenvolvidos vários processos de enriquecimento de urânio, entre eles o da difusão gasosa e da ultra-centrifugação (em escala industrial), o do jato centrífugo (em escala de demonstração industrial) e um processo a Laser (em fase de pesquisa). Por se tratarem de tecnologias sofisticadas, os países que as detêm oferecem empecilhos para que outras nações tenham acesso a elas.

A segurança dos reatores nucleares. Um reator nuclear não poder explodir como uma bomba atômica. Porém, isso não quer dizer que não seja possível ocorrer um acidente em uma central nuclear. Por esse motivo, a construção de uma usina nuclear envolve vários aspectos de segurança, desde a fase de projeto até a construção civil, montagem dos equipamentos e operação. **Acidente nuclear – definição. Filosofia de segurança em um reator nuclear.** Um acidente é considerado nuclear, quando envolve uma reação nuclear ou equipamento onde se processe uma reação nuclear. O perigo potencial na operação dos reatores nucleares é representado pela alta radioatividade dos produtos da fissão do urânio e sua liberação para o meio ambiente. A filosofia de segurança dos reatores nucleares é dirigida no sentido de que as usinas nucleares sejam projetadas, construídas e operadas com os mais elevados padrões de qualidade e que tenham condições de alta confiabilidade. **Sistemas ativos de segurança.** As barreiras físicas citadas constituem um sistema passivo de segurança, isto é, atuam, independentemente de qualquer ação. Para a operação do reator, sistemas de segurança são projetados para atuar, inclusive de forma redundante: na falha de algum deles, outro sistema, no mínimo, atuará, comandando, se for o caso, a parada do reator. **Projeto de uma usina nuclear.** Na fase de projeto, são imaginados diversos acidentes que poderiam ocorrer em um reator nuclear, assim como a forma de contorná-los, por ação humana ou, em última instância, por intervenção automática dos sistemas de segurança, projetados com essa finalidade. São, ainda, avaliadas as conseqüências em relação aos equipamentos, à estrutura interna do reator e, principalmente, em relação ao meio ambiente. Fenômenos da natureza, como tempestades, vendavais e terremotos, e outros fatores de risco, como queda de avião e sabotagem, são também levados em consideração no dimensionamento e no cálculo das estruturas. **Controle de qualidade.** Um rigoroso controle da qualidade garante que estruturas, sistemas e componentes, relacionados com a segurança, mantenham os padrões de qualidade especificados no projeto. Inspeções e auditorias são feitas continuamente durante o projeto e a construção e, posteriormente, durante a operação. **Operação.** A complexidade e as particularidades de uma usina nuclear exigem uma preparação adequada do pessoal que irá operá-la. Existe em Mambucaba, município de Angra dos Reis, um centro de treinamento para operadores de centrais nucleares, que é uma reprodução das salas de controle de reatores do tipo de Angra 1 e 2, capaz de simular todas as operações dessa usinas, inclusive a atuação dos sistemas de segurança. Para se ter uma idéia do padrão dos serviços prestados por esse centro, conhecido como simulador, deve-se ressaltar que nele foram e ainda são treinados operadores para reatores da Espanha, Argentina e da própria República Federal da Alemanha, responsável pelo projeto e montagem do Centro. Os instrutores são todos brasileiros que, periodicamente, fazem estágios em reatores alemães, para atualização de conhecimentos e introdução de novas experiências nos cursos ministrados.

Fiscalização e auditoria. Vazamentos em reatores nucleares. O projeto de uma usina nuclear é fiscalizado e analisado, passo a passo, por uma equipe diferente da que o elaborou: o Órgão Fiscalizador. Da mesma forma, a construção é fiscalizada e auditada por equipes do Órgão Fiscalizador que não foram envolvidas diretamente ou indiretamente na obra. É claro que existem vazamentos em reatores nucleares, como existem em outras usinas térmicas. O que não existe é vazamento de reatores nucleares. As águas de refrigeração dos circuitos primário e secundário circulam por meio de bombas rotativas em sistemas fechados. Em qualquer instalação industrial e também nos reatores nucleares, bombas de refrigeração são colocadas em diques, dotados de ralos, para recolher a água que possa vazar pelas "juntas". No caso de vazamento em reatores, a água recolhida vai para um tanque, onde é analisada e tratada, podendo até voltar para o circuito correspondente. Aí está a diferença: pode existir vazamentos, inclusive para dentro da contenção, ou seja, no Reator e não para o meio ambiente, isto é, do reator. Por esse motivo, os "vazamentos" em 1986 (de água) e em 1995 (falhas em varetas), ocorreram ambos dentro da instalação, e não causaram maior preocupação por parte dos operadores de Angra 1. No segundo caso, a Usina operou ainda por cerca de três meses, sob controle, até a parada prevista para manutenção. Não houve parada de emergência. Em resumo e comparando com um fato do dia a dia: é como se uma torneira de uma pia em um apartamento estivesse com defeito, pingando ou deixando escorrer água (vazando). Existiria um vazamento no apartamento ou até no edifício mas não se deveria dizer que teria havido um vazamento do edifício.

Acidente Nuclear em Three Miles Island. Duzentos e quarenta e dois reatores nucleares do tipo Angra (PWR) já foram construídos e estão em operação, ocorrendo em um deles um acidente nuclear grave, imaginado em projeto, sem conseqüências para o meio ambiente. Foi o acidente de Three Miles Island (TMI), nos Estados Unidos. Nesse acidente, vazaram água e vapor do circuito primário, mas ambos ficaram retidos na contenção.

Uma reação de fissão típica pode ser representada na forma:



sendo $A_1 + A_2 + \varepsilon = 236$, $Z_1 + Z_2 = 92$ e sendo ε um inteiro (ou 2, ou 3; seu valor médio é da ordem de 2,44). As razões das massas dos fragmentos, M_1/M_2 , é aproximadamente igual a 3/2. Os dois fragmentos de decaimento, acima, usualmente tem uma razão n/p aproximadamente igual a do núcleo original. Assim, correspondem a núcleos que são ricos em nêutrons e favoráveis ao decaimento beta. Assim, deverá ocorrer vários decaimentos beta antes que os núcleos residuais atinjam uma situação de estabilidade. Uma reação de fissão libera aproximadamente 200 MeV de energia; aproximadamente 170 MeV de energia cinética dos fragmentos; aproximadamente 5 MeV é a energia combinada dos nêutrons emergentes; aproximadamente 15 MeV de raios beta menos e raios gama; aproximadamente 10 MeV de energia dos neutrinos liberados no decaimento beta.

Fusão nuclear. Reação em que dois núcleos leves ($A < 20$) combinam-se formando um núcleo mais pesado, sendo que, neste processo, energia nuclear é também liberada. Por exemplos: ${}^1_1\text{H} + {}^1_0\text{n} \Rightarrow {}^2_1\text{H}$; $Q = 2,23 \text{ MeV}$; ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \Rightarrow {}^4_2\text{He}$; $Q = 23,8 \text{ MeV}$.

Problemas.

1. Qual é a energia cinética de um nêutron térmico de 300 K?
2. Na média, nêutrons perdem metade de sua energia em colisões frontais com prótons quase-livres. Quantas colisões, em média, são necessárias para reduzir a energia de 2 MeV de um nêutron para uma energia térmica de 0,04 eV?
3. Determine a energia cinética total final no processo de foto-fissão do ${}^{235}_{92}\text{U}$ por um raio gama de 6 MeV, com o decaimento do urânio em ${}^{90}_{36}\text{Kr}$, ${}^{142}_{56}\text{Ba}$ e três nêutrons.
4. Estime a energia Coulombiana de repulsão para os núcleos ${}^{143}_{56}\text{Ba}$ e ${}^{90}_{36}\text{Kr}$ assim que são formados no processo de fusão do Urânio 235 na colisão com um nêutron térmico.
5. Qual é a energia emitida se dois núcleos de deutério se fundirem em uma partícula alfa.
6. Calcule o valor de Q para a reação ${}^3_1\text{H}(d,n){}^4_2\text{He}$.
7. Calcule a energia liberada no processo ${}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He} \Rightarrow {}^8_4\text{Be} \Rightarrow {}^{12}_6\text{C}$.

Com a perda da água que fazia a refrigeração dos elementos combustíveis, estes **esquentaram demais** e fundiram parcialmente, mas permaneceram confinados no Vaso de Pressão do Reator. Houve evacuação parcial (desnecessária) da Cidade. O Governador recomendou a saída de mulheres e crianças, que retornaram às suas casas no dia seguinte. Ao contrário do esperado, muitas pessoas quiseram **ir ver o acidente de perto**, sendo contidas por tropas militares e pela polícia. Embora o Reator Angra 1 seja do mesmo tipo do de TMI, ele não corre o risco de sofrer um acidente semelhante, porque já foram tomadas as medidas preventivas que impedem a repetição das falhas humanas causadoras daquele acidente. O mesmo acidente não poderia ocorrer em Angra 2, porque o projeto já prevê essas falhas e os meios de evitar que elas aconteçam.