

PROGRAMA DE INFORMAÇÃO CNEN

MÓDULO INFORMAÇÃO TÉCNICA

APRESENTAÇÃO

O Programa de Informação CNEN - PIC, em seu Módulo I - Informação Técnica, visa apresentar informações básicas sobre a energia nuclear e das radiações, de forma simples e objetiva.

Idealizado pelo Eng. Eliezer de Moura Cardoso, atualmente servidor aposentado pela CNEN, foi realizado pela primeira vez em 1992 e novamente em 1998, em ambas as oportunidades com grande sucesso e aceitação por parte dos servidores da CNEN. A sigla PIC por ele proposta tornou-se conhecida e divulgada na Instituição.

Devido à admissão de novos servidores e levando em consideração que, por fatores diversos, vários servidores antigos não tiveram a oportunidade de participar das edições anteriores, a Coordenação Geral de Recursos Humanos - CGRH convidou o Eng. Eliezer para coordenar mais um PIC, incluindo a preparação da apostila correspondente e a apresentação ao público alvo. Este Módulo deverá ser apresentado periodicamente, visando uma reciclagem de conhecimentos.

O presente trabalho, apostila do Módulo I do PIC, aborda, de forma simples e com linguagem acessível a pessoas que não atuam em áreas técnicas, os conceitos de energia, energia nuclear, radioatividade, segurança nuclear, radioproteção, bem como mostra as aplicações da energia nuclear e das radiações em benefício da sociedade.

A CGRH pretende, com a realização do PIC em seus dois módulos, estar contribuindo para um melhor conhecimento das atribuições da CNEN, de sua atuação e de sua responsabilidade perante a sociedade.

COORDENAÇÃO GERAL DE RECURSOS HUMANOS
DIRETORIA DE GESTÃO INSTITUCIONAL

ENERGIA

De um modo geral, a energia pode ser definida como a **capacidade de realizar trabalho** ou como o resultado da realização de um trabalho.

Na prática, a energia é melhor “sentida” do que definida.

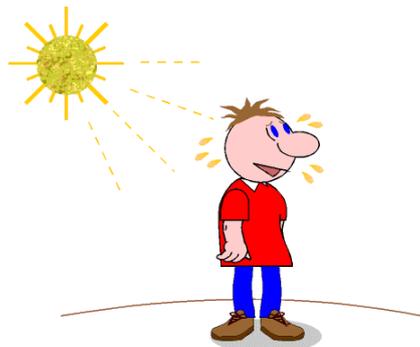
Quando se olha para o Sol, tem-se a sensação de que ele é dotado de muita energia, devida à luz e ao calor que emite constantemente.

FORMAS DE ENERGIA

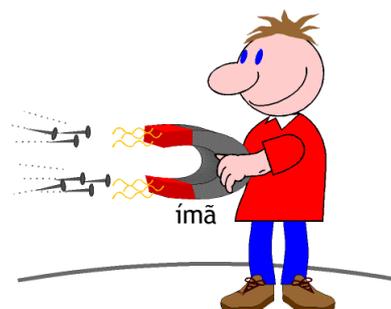
Existem várias formas ou modalidades de energia:

- a) **Energia Cinética**: associada ao movimento dos corpos.
- b) **Energia Potencial**: armazenada num corpo material ou numa posição no espaço e que pode ser convertida em energia “sensível” a partir de uma modificação de seu estado, podendo ser citadas, por exemplo, a **Energia Potencial Gravitacional**, **Energia Química**, **Energia de Combustíveis** e a **energia existente nos átomos**.

- c) Luz e Calor são duas outras modalidades de energia: **Energia Luminosa** e **Energia Térmica**, fáceis de serem “sentidas”.

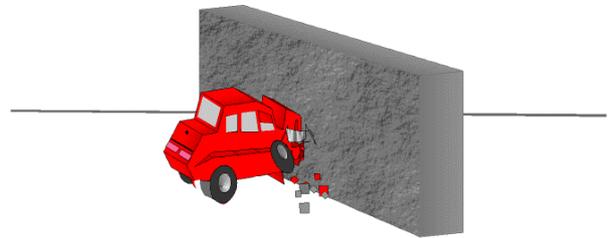


- d) **Energia Magnética** (ímã): só pode ser percebida por meio de sua atração sobre alguns materiais, como o ferro.

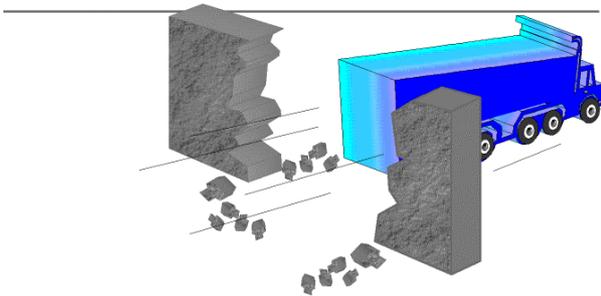


MATÉRIA E ENERGIA

Se um carro, a uma velocidade de 30 km/h, bater em um muro, vai ficar todo amassado e quase nada vai acontecer com o muro.



Se um caminhão carregado, também a 30 km/h, bater no mesmo muro, vai “arrebentá-lo” e o caminhão quase nada sofrerá.



Isso significa que, quanto maior a massa, maior a energia associada ao movimento.

USO DA ENERGIA

A **energia elétrica** é muito importante para as indústrias, porque torna possível a iluminação dos locais de trabalho, o acionamento de motores, equipamentos e instrumentos de medição.

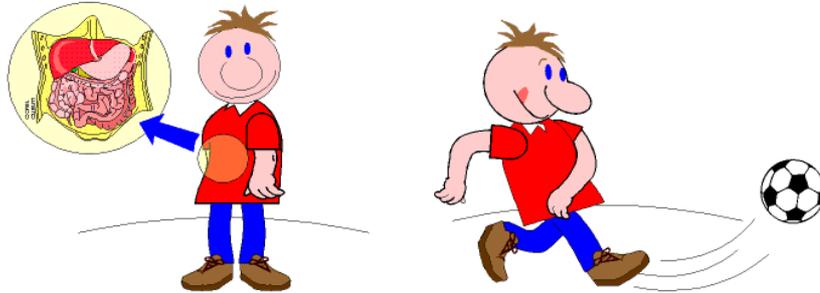
Para todas as pessoas, entre outras aplicações, a energia elétrica serve para iluminar as ruas e as casas, para fazer funcionar os aparelhos de televisão, os eletrodomésticos e os elevadores dos edifícios. Sem energia elétrica seria muito incômodo construir e habitar edifícios de mais de três andares.

Por todos esses motivos, é interessante converter outras formas de energia em energia elétrica.

CONVERSÃO DE ENERGIA

Um bom exemplo de conversão de uma forma de energia em outra é o nosso corpo. A energia liberada pelas reações químicas que ocorrem nos diversos órgãos (estômago, intestinos, fígado, músculos, sangue etc.) é convertida em ações ou movimentos (andar, correr, trabalhar etc.).

Nesses casos, a **energia química** é convertida em **energia cinética**.



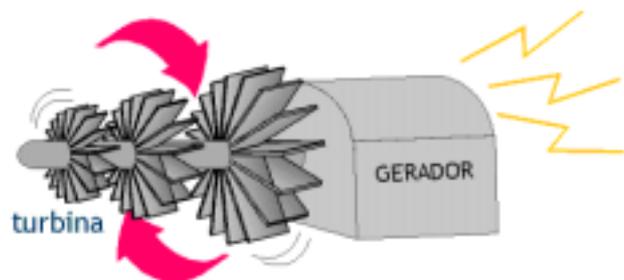
Quando suamos, estamos eliminando o excesso de energia recebida pelo nosso corpo (exposição ao Sol, por exemplo) ou gerado por uma taxa anormal de reações químicas dentro dele, para que sua temperatura permaneça em um valor constante de 36,5 °C. Esse calor é o resultado da transformação da energia química em energia térmica.



CONVERSÃO PARA ENERGIA ELÉTRICA

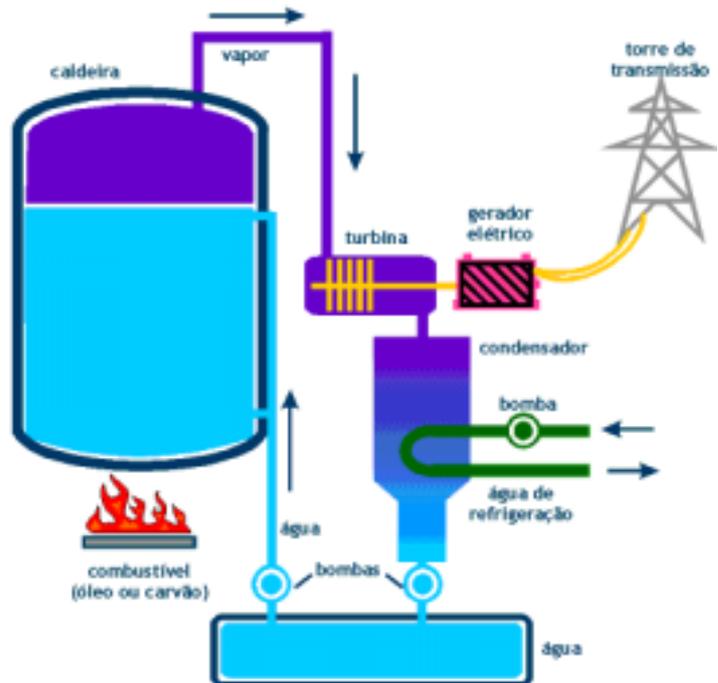
Numa **Usina Hidroelétrica**, converte-se em **eletricidade** a energia de movimento de correntes de água. O dispositivo de conversão é formado por uma **turbina** acoplada a um **gerador**.

Uma turbina para geração de energia elétrica é constituída de um eixo, dotado de pás. Estas podem ser acionadas por água corrente e, então, o seu eixo entra em rotação e move a parte interna do gerador, fazendo aparecer, por um fenômeno denominado indução eletromagnética, uma corrente elétrica nos fios de sua parte externa.



CENTRAL TÉRMICA

Se as pás forem movidas por passagem de vapor, obtido por aquecimento de água como se fosse uma grande chaleira, tem-se, então, uma Usina Termelétrica. O calor pode ser gerado pela queima de óleo combustível, carvão ou gás.



ESTRUTURA DA MATÉRIA

O ferro é um material, ou melhor, um elemento químico bastante conhecido e fácil de ser encontrado.

Se triturarmos uma barra de ferro, obteremos pedaços cada vez menores, até atingirmos um tamanho mínimo, que ainda apresentará as propriedades químicas do ferro. Essa menor estrutura, que apresenta ainda as propriedades de um elemento químico, é denominada **ÁTOMO**, que em grego significa *indivisível*.

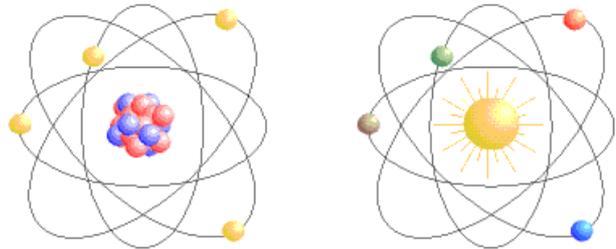
O ÁTOMO

Por muito tempo, pensou-se que o átomo, na forma acima definida, seria a menor porção da matéria e teria uma estrutura compacta. Atualmente, sabemos que o átomo é constituído por partículas menores (sub-atômicas), distribuídas de uma forma que lembra o Sistema Solar.

Existe um **Núcleo**, onde fica concentrada a massa do átomo e minúsculas partículas que giram em seu redor, denominadas **elétrons**. Os elétrons são partículas de carga negativa e massa muito pequena.

A comparação com o sistema solar, embora sirva para dar uma idéia visual da estrutura do átomo, destacando os "grandes espaços vazios", não exprime a realidade.

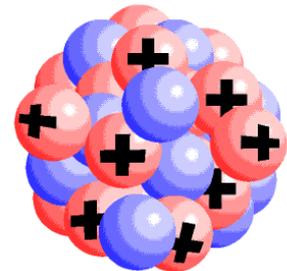
No sistema solar, os planetas se distribuem quase todos num mesmo plano de rotação ao redor do Sol. No átomo, os elétrons se distribuem em vários planos em torno do núcleo. Não é possível determinar simultaneamente a posição de um elétron e sua velocidade num dado instante.



ESTRUTURA DO NÚCLEO E ENERGIA NUCLEAR

O **Núcleo** do átomo é constituído de partículas de carga positiva, chamadas **prótons**, e de partículas de mesmo tamanho mas sem carga, denominadas **nêutrons**.

Os prótons têm a tendência de se repelirem, porque têm a mesma carga (positiva). Como eles estão juntos no núcleo, comprova-se a existência de energia nos núcleos dos átomos com mais de uma partícula: a energia de ligação dos nucleons ou **energia nuclear**.



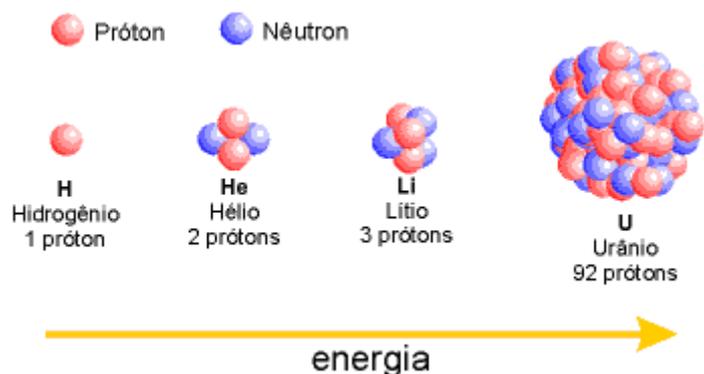
Denomina-se **nuclídeo** qualquer configuração nuclear, mesmo que transitória.

Num átomo neutro o número de prótons é igual ao número de elétrons.

O número de prótons (ou **número atômico**) identifica um elemento químico, comandando seu comportamento em relação aos outros elementos.

ELEMENTOS QUÍMICOS NATURAIS

O elemento natural mais simples, o hidrogênio, possui apenas um próton; um dos mais complexos, o urânio, tem 92 prótons, sendo o elemento químico natural mais pesado.



OS ISÓTOPOS

O número de nêutrons no núcleo pode ser variável, pois eles não têm carga elétrica. Com isso, um mesmo elemento químico pode ter massas diferentes. Átomos de um mesmo elemento químico com massas diferentes são denominados **isótopos**.

O hidrogênio tem 3 isótopos: o hidrogênio, o deutério e o trítio.



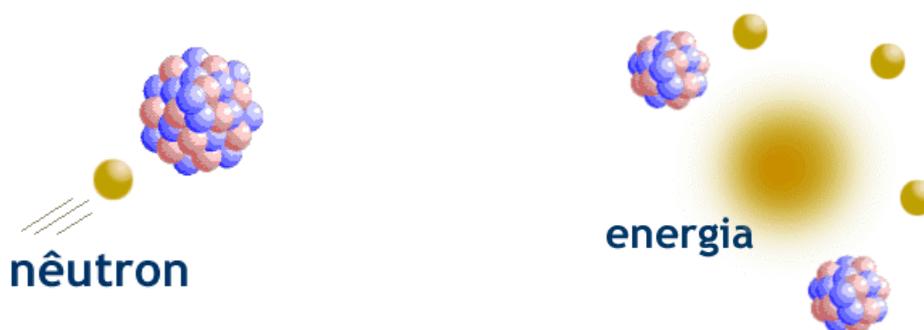
O urânio, que possui 92 prótons no núcleo, existe na natureza na forma de 3 isótopos:

- **U-234**, com 142 nêutrons (em quantidade desprezível);
- **U-235**, com 143 nêutrons (0,7%);
- **U-238**, com 146 nêutrons no núcleo (99,3%).

LIBERAÇÃO DA ENERGIA NUCLEAR

Uma vez constatada a existência da energia nuclear, restava descobrir como utilizá-la.

A forma imaginada para liberar a energia nuclear baseou-se na possibilidade de partir-se ou dividir-se o núcleo de um átomo “pesado”, isto é, com muitos prótons e nêutrons, em dois núcleos menores, através do impacto de um nêutron. A energia que mantinha juntos esses núcleos menores, antes constituindo um só núcleo maior, seria liberada, na maior parte, em forma de calor (energia térmica).

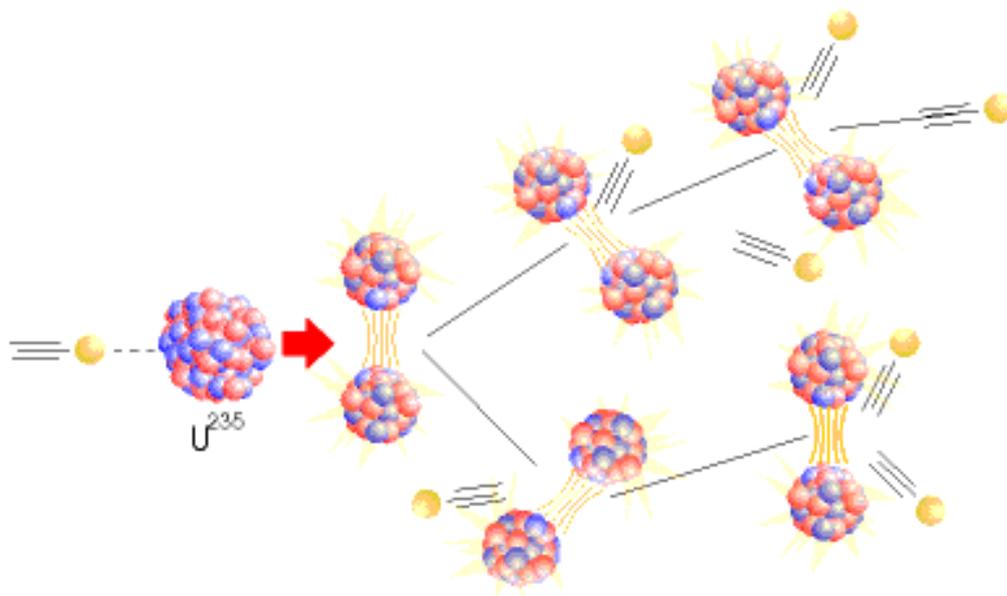


FISSÃO NUCLEAR

A divisão do núcleo de um átomo pesado, por exemplo, do **urânio-235**, em dois menores, quando atingido por um nêutron, é denominada **Fissão Nuclear**. Seria como jogar uma bolinha de vidro (um nêutron) contra várias outras agrupadas (o núcleo).

REAÇÃO EM CADEIA

Na realidade, em cada reação de fissão nuclear resultam, além dos 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 de urânio-235, sucessivamente, liberando muito calor. Tal processo é denominado **Reação de Fissão Nuclear em Cadeia** ou, simplesmente, **Reação em Cadeia**.



CONTROLE DA REAÇÃO DE FISSÃO NUCLEAR EM CADEIA

Descoberta a grande fonte de energia no núcleo dos átomos e a forma de aproveitá-la, restava saber como controlar a reação em cadeia, que normalmente não pararia, até consumir quase todo o **material físsil** (= **que sofre fissão nuclear**), no caso o urânio-235.

Como já foi visto, a fissão de cada átomo de urânio-235 resulta em 2 átomos menores e 2 a 3 nêutrons, que irão fissionar outros tantos núcleos de urânio-235. A forma de controlar a reação em cadeia consiste na eliminação do agente causador da fissão: o nêutron. Não havendo nêutrons disponíveis, não pode haver reação de fissão em cadeia.

Alguns elementos químicos, como o **boro**, na forma de **ácido bórico** ou de metal, e o **cádmio**, em barras metálicas, têm a propriedade de absorver nêutrons, porque seus núcleos podem conter ainda um número de nêutrons superior ao existente em seu estado natural, resultando na formação de isótopos de boro e de cádmio.

A grande aplicação do controle da reação de fissão nuclear em cadeia é nos **Reatores Nucleares**, para geração de energia elétrica.

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, preferencialmente os de baixa energia, denominados **nêutrons térmicos** (“lentos”).

Nos **Reatores Nucleares do tipo PWR (como os de ANGRA)**, é necessário haver a proporção de cerca de 32 átomos de urânio-235 para 968 átomos de urânio-238, em cada grupo de 1.000 átomos de urânio, ou seja, cerca 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 cerca de 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 **Ultracentrifugação** (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 e estratégicas, os países que as detêm oferecem empecilhos para que outras nações tenham acesso a elas.

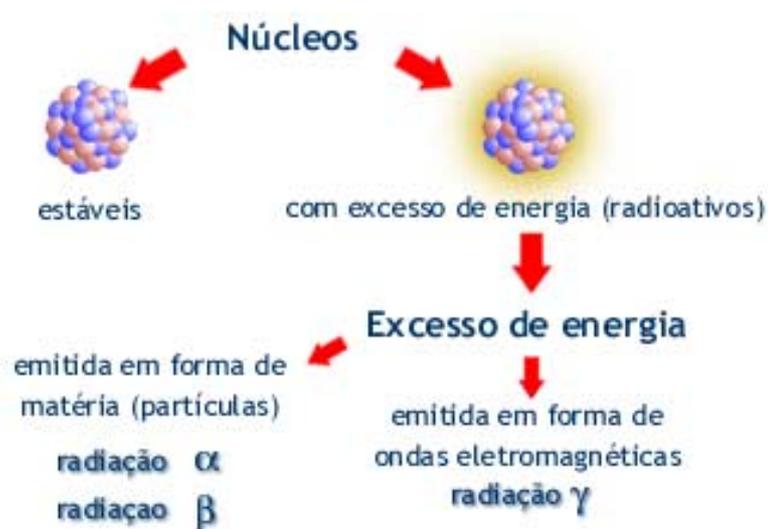
RADIOATIVIDADE

O esquecimento de uma rocha de urânio sobre um filme fotográfico virgem levou à descoberta de um fenômeno interessante: o filme foi velado (marcado) por “alguma coisa” que saía da rocha, na época denominada raios ou **radiações**.

Outros elementos pesados, com massas próximas à do urânio, como o **rádio** e o **polônio**, também tinham a mesma propriedade.

O fenômeno foi denominado **radioatividade** e os elementos que apresentavam essa propriedade foram chamados de **elementos radioativos**.

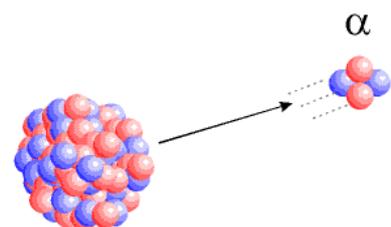
Comprovou-se que um núcleo muito energético, por ter excesso de partículas ou de carga, tende a estabilizar-se, emitindo algumas partículas.



PARTÍCULA ALFA OU RADIAÇÃO ALFA

Um dos processos de estabilização de um núcleo com excesso de energia é o da emissão de um grupo de partículas, constituídas por dois prótons e dois nêutrons, e da energia a elas associada. São as **radiações alfa** ou **partículas alfa**, na realidade núcleos de hélio (He), um gás chamado “nobre”, por não reagir quimicamente com os demais elementos.

As partículas α possuem carga +2.

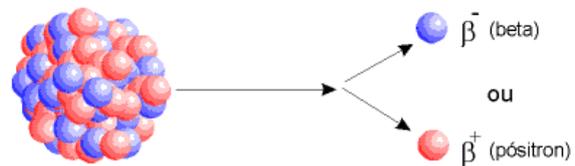


PARTÍCULA BETA OU RADIAÇÃO BETA

Outra forma de estabilização, quando existe no núcleo um excesso de nêutrons em relação a prótons, é através da emissão de uma partícula negativa, um elétron, com carga -1, resultante da conversão de um nêutron em um próton. É a **partícula beta negativa** ou, simplesmente, **partícula beta**.

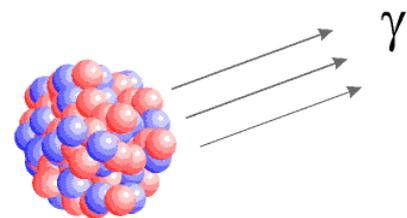
No caso de existir excesso de cargas positivas (prótons), é emitida uma **partícula beta positiva**, chamada **pósitron**, resultante da conversão de um próton em um nêutron.

Portanto, a radiação beta é constituída de partículas emitidas por um núcleo, quando da transformação de nêutrons em prótons (partículas beta) ou de prótons em nêutrons (pósitrons).



RADIAÇÃO GAMA

Geralmente, após a emissão de uma partícula alfa (α) ou beta (β), o núcleo resultante desse processo, ainda com excesso de energia, procura estabilizar-se, emitindo esse excesso em forma de onda eletromagnética, da mesma natureza da luz, sem carga elétrica, denominada radiação gama.

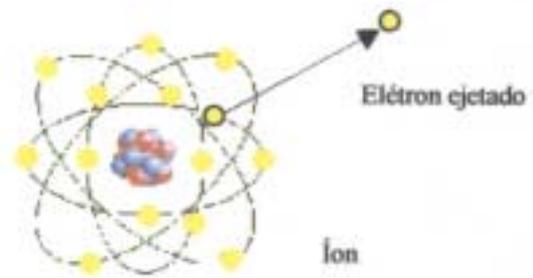


RADIAÇÃO

É a propagação de energia, na forma de **ondas eletromagnéticas** ou de **partículas**.

A onda eletromagnética é uma forma de energia, constituída por campos elétricos e campos magnéticos, variáveis e oscilando em planos perpendiculares entre si, capaz de propagar-se no espaço. No vácuo, sua velocidade de propagação é de 300.000 km/s.

Considera-se **radiação ionizante** qualquer partícula ou radiação eletromagnética que, ao interagir com a matéria, "arranca" elétrons dos átomos ou de moléculas, transformando-os em íons, direta ou indiretamente. Assim, as partículas alfa, as partículas beta e a radiação gama, emitidas por fontes radioativas, bem como os raios X, emitidos pelos respectivos aparelhos, são radiações ionizantes.



DECAIMENTO RADIOATIVO

Como foi visto, um núcleo com excesso de energia tende a estabilizar-se, emitindo partículas alfa ou beta.

Em cada emissão de uma dessas partículas, há uma variação do número de prótons no núcleo, isto é, o elemento se **transforma** ou se **transmuta** em outro, de comportamento químico diferente.

Essa transmutação também é conhecida como **desintegração radioativa**, designação não muito adequada, porque dá a idéia de desagregação total do átomo e não apenas da perda de sua integridade. Um termo mais apropriado é **decaimento radioativo**, que sugere a diminuição gradual de massa e atividade.

ATIVIDADE DE UMA AMOSTRA

Os núcleos instáveis de uma mesma espécie (mesmo elemento químico) e de massas diferentes, denominados **radioisótopos**, não realizam todas as mudanças ao mesmo tempo.

As emissões de radiação são feitas de modo imprevisível e não se pode adivinhar o momento em que um determinado núcleo irá emitir radiação.

Entretanto, para a grande quantidade de átomos existente em uma amostra de material radioativo é razoável esperar-se um certo número de emissões ou transformações em cada segundo. Essa "taxa" de transformações é denominada **atividade** da amostra.

UNIDADE DE ATIVIDADE

A atividade de uma amostra com átomos radioativos (ou fonte radioativa) é medida em:

Bq (Becquerel) = uma desintegração por segundo
Ci (Curie) = $3,7 \times 10^{10}$ Bq

MEIA-VIDA

Cada elemento radioativo, seja natural ou obtido artificialmente, se transmuta (se desintegra ou decai) a uma velocidade que lhe é característica.

Para se acompanhar a duração (ou a “vida”) de um elemento radioativo foi preciso estabelecer uma forma de comparação.

Por exemplo, quanto tempo leva para um elemento radioativo ter sua atividade reduzida à metade da atividade inicial ? Esse tempo foi denominado **meia-vida** do elemento.

Meia-vida, portanto, é o tempo necessário para a atividade de um elemento radioativo ser reduzida à metade da atividade inicial.

Isso significa que, para cada meia-vida que passa, a atividade vai sendo reduzida à metade da anterior, até atingir um valor insignificante, que não permite mais distinguir suas radiações das do meio ambiente. Dependendo do valor inicial, em muitas fontes radioativas utilizadas em laboratórios de análise e pesquisa, após 10 (dez) meias-vidas, atinge-se esse nível. Entretanto, não se pode confiar totalmente nessa “receita”, pois, em várias fontes usadas na indústria e na medicina, mesmo após 10 meias-vidas, a atividade dessas fontes ainda é alta.

UM EXEMPLO “DOMÉSTICO”

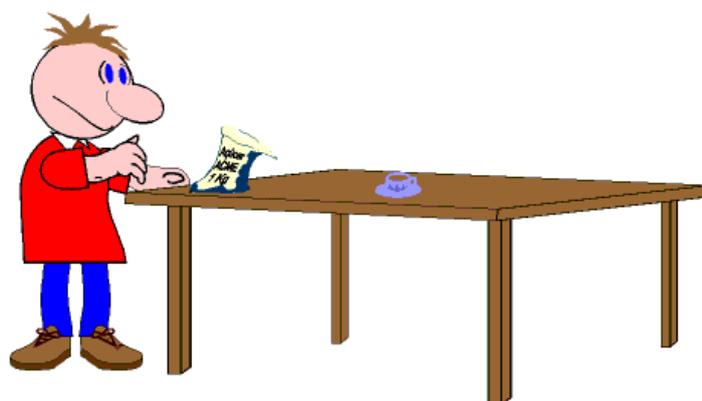
Um exemplo “caseiro” pode apresentar, de forma simples, o conceito de meia-vida: uma família de 4 pessoas tinha 4 kg de açúcar para seu consumo normal. Logicamente, a função do açúcar é adoçar o café, o refresco, bolos e sucos. Adoçar é a atividade do açúcar, assim como a emissão de radiação é a atividade dos elementos radioativos.

Por haver falta de açúcar no supermercado, foi preciso fazer um racionamento, até a situação ser normalizada, da seguinte forma: na primeira semana, foram consumidos 2 kg, metade da quantidade inicial, e “conseguiu-se” fazer dois bolos, um pudim, refrescos, sucos, além de adoçar o café da manhã. Na segunda semana, foi consumido 1 kg, metade da quantidade anterior e $\frac{1}{4}$ da inicial. Aí, já não deu para fazer os bolos.



Na terceira semana, só foi possível adoçar os refrescos, sucos e café, com os 500 gramas então existentes.

Procedendo da mesma forma, na décima semana restaram cerca de 4g de açúcar, que não dariam para adoçar um cafezinho. Essa quantidade de açúcar não faria mais o efeito de adoçar e nem seria percebida.

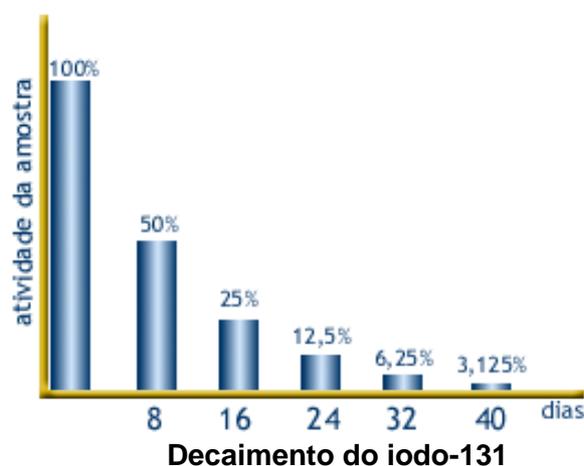


No exemplo citado, a meia-vida do açúcar é de uma semana e, decorridas 10 semanas, praticamente não haveria mais açúcar, ou melhor, a atividade adoçante do açúcar não seria notada. No entanto, se, ao invés de 4 kg, a família tivesse feito um estoque de 200 kg, após 10 meias-vidas, ainda restaria uma quantidade considerável de açúcar.

Se o racionamento fosse de sal, a meia-vida do sal seria maior, por que a quantidade de sal que se usa na cozinha é muito menor do que a de açúcar. De fato, leva-se muito mais tempo para gastar 4 kg de sal do que 4kg de açúcar, para uma mesma quantidade de pessoas (consumidores).

UM EXEMPLO PRÁTICO

Vejamos o caso do iodo-131, utilizado em Medicina Nuclear para exames de tireóide, que possui a meia-vida de oito dias. Isso significa que, decorridos 8 dias, a atividade ingerida pelo paciente será reduzida à metade. Passados mais 8 dias, cairá à metade desse valor, ou seja, $\frac{1}{4}$ da atividade inicial e assim sucessivamente. Após 80 dias (10 meias-vidas), atingirá um valor cerca de 1000 vezes menor.



Entretanto, se fosse necessário aplicar-se uma quantidade maior de iodo-131 no paciente, não se poderia esperar por 10 meias-vidas (80 dias), para que a atividade na tireóide tivesse um valor desprezível. Isso inviabilizaria os diagnósticos que utilizam material radioativo, já que o paciente seria uma fonte radioativa ambulante e não poderia ficar confinado durante todo esse período.

Para felicidade nossa, o organismo humano elimina rápida e naturalmente, via fezes, urina e suor, muitas das substâncias ingeridas. Dessa forma, após algumas horas, o paciente poderá ir para casa, sem causar problemas para si e para seus familiares. Assim, ele fica liberado mas o iodo-131 continua seu decaimento normal na urina armazenada no depósito de rejeito hospitalar, até que possa ser liberado para o esgoto comum.

RADIAÇÃO NATURAL - SÉRIES RADIOATIVAS NATURAIS

Na natureza existem elementos radioativos que realizam transmutações ou “desintegrações” sucessivas, até que o núcleo atinja uma configuração estável. Isso significa que, após um decaimento radioativo, o núcleo não possui, ainda, uma organização interna estável e, assim, ele executa outra transmutação para melhorá-la e, ainda não conseguindo, prossegue, até atingir a configuração de equilíbrio.

Em cada decaimento, os núcleos emitem radiações dos tipos alfa, beta e/ou gama e cada um deles é mais “organizado” que o núcleo anterior. Essas seqüências de núcleos são denominadas

SÉRIES RADIOATIVAS OU FAMÍLIAS RADIOATIVAS NATURAIS

No estudo da radioatividade, constatou-se que existem apenas 3 séries ou famílias radioativas naturais, conhecidas como

Série do Urânio, Série do Actínio e Série do Tório.

A Série do Actínio, na realidade, inicia-se com o urânio-235 e tem esse nome, porque se pensava que ela começava pelo actínio-227.

As três séries naturais terminam em isótopos estáveis do chumbo, respectivamente,

chumbo-206, chumbo-207 e chumbo-208.

Alguns elementos radioativos têm meia-vida muito longa, como, por exemplo, os elementos iniciais de cada série radioativa natural (urânio-235, urânio-238 e tório-232).

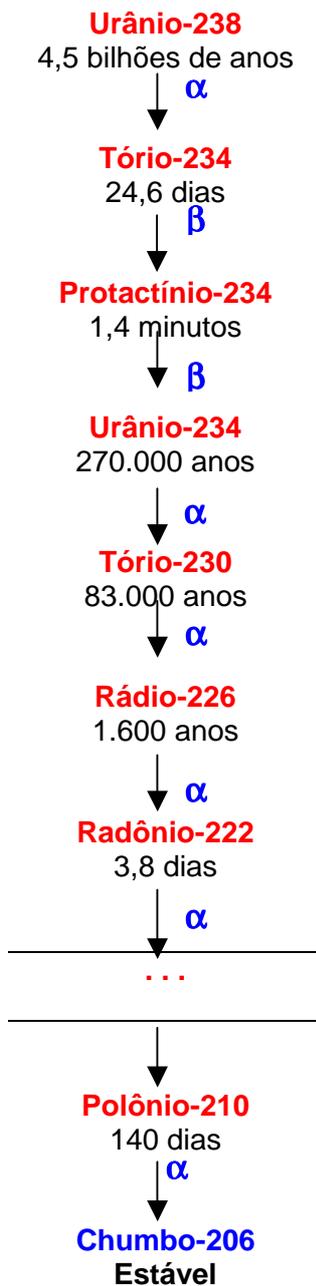
Devido a isso, é possível explicar, porque há uma porcentagem tão baixa de urânio-235 em relação à de urânio-238. Como a meia-vida do **urânio-235** é de **713 milhões** de anos e a do **urânio-238** é de **4,5 bilhões de anos**, o urânio-235 decai muito mais rapidamente e, portanto, é muito mais “consumido” que o urânio-238.

Com o desenvolvimento de reatores nucleares e máquinas aceleradoras de partículas, muitos radioisótopos puderam ser produzidos, utilizando-se isótopos estáveis como matéria prima. Com isso, surgiram as **Séries Radioativas Artificiais**, algumas de curta duração.

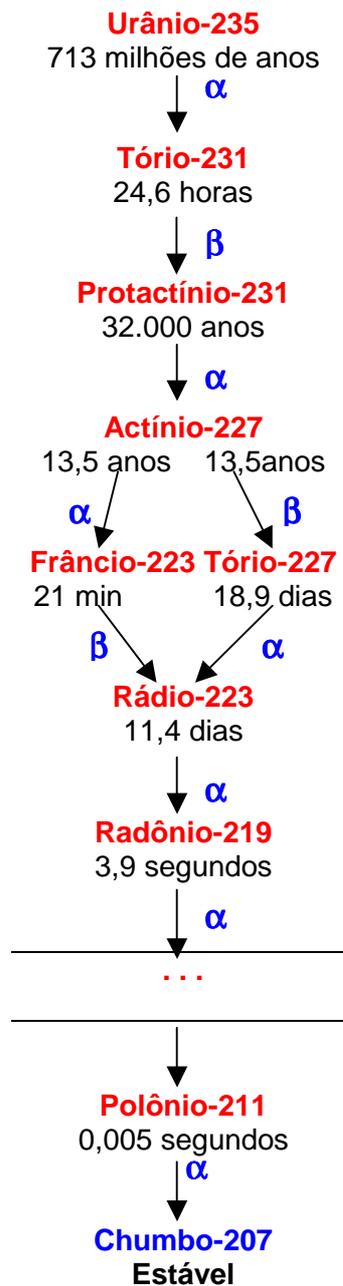
Os principais elementos das séries acima mencionadas são apresentados no quadro a seguir.

SÉRIES RADIOATIVAS NATURAIS

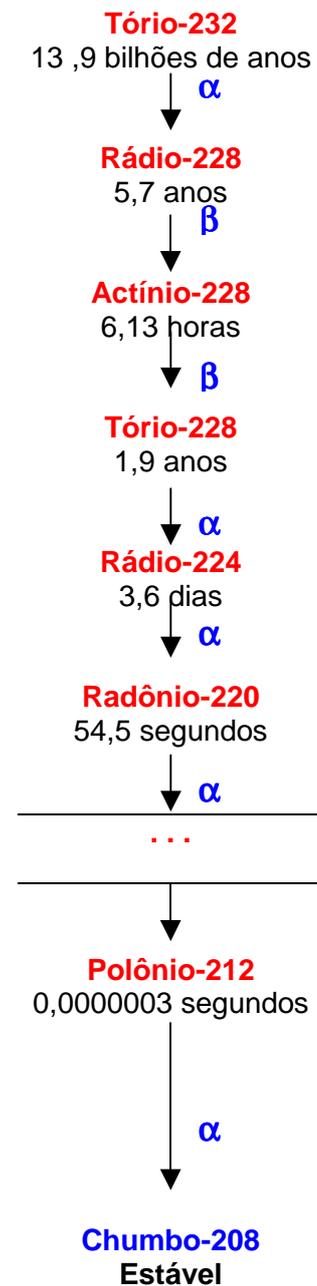
SÉRIE DO URÂNIO



SÉRIE DO ACTÍNIO



SÉRIE DO TÓRIO

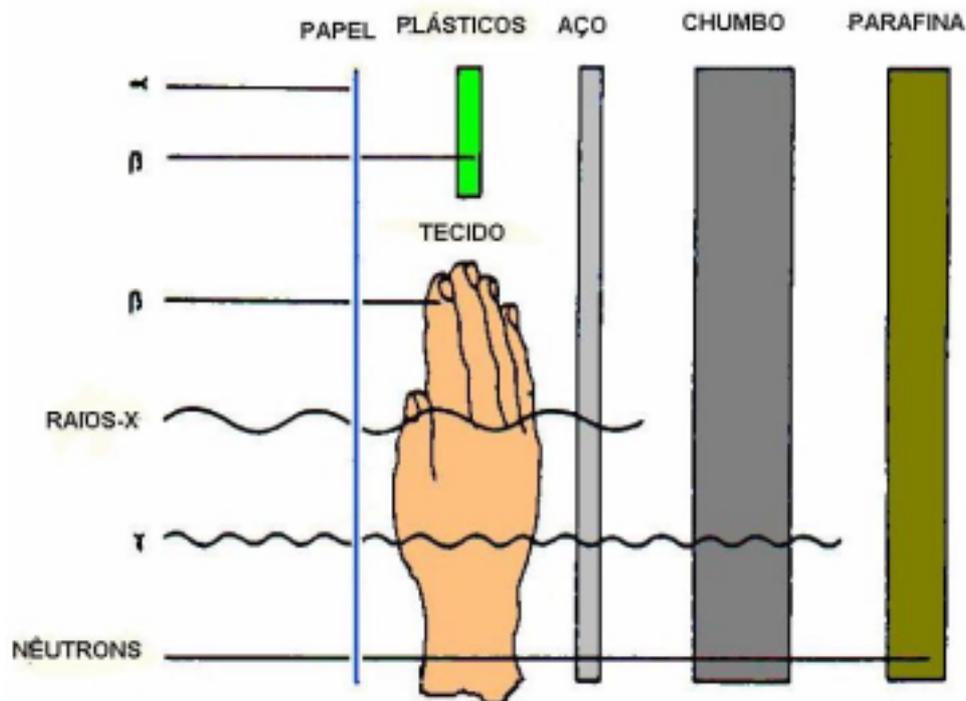


PENETRAÇÃO DAS RADIAÇÕES NA MATÉRIA

As partículas alfa são as radiações mais ionizantes por terem carga +2, mas, exatamente por esse motivo, além de ter maior massa, sua penetração na matéria é pequena, não conseguindo atravessar uma simples folha de papel e percorrendo poucos centímetros no ar.

Dependendo de sua energia, a maioria das partículas beta, que são elétrons de origem nuclear, podem percorrer até poucos metros no ar e têm um poder ionizante bem menor do que as partículas alfa.

Embora a radiação gama e os raios-x sejam as radiações mais penetrantes, seu poder de ionização é baixo em relação às partículas alfa e beta.



Os nêutrons se comportam de uma forma mais complexa ao atravessar a matéria, não interagindo por força coulombiana (das cargas elétricas), característica das outras radiações.

Os nêutrons de grande energia (nêutrons rápidos) atravessam materiais mais densos sem perder muita energia. Contudo, os átomos pequenos, por exemplo, os átomos de hidrogênio, são capazes de causar grande redução de energia desses nêutrons. Em compensação, quando os nêutrons perdem bastante energia transformam-se em nêutrons térmicos, que podem ser capturados por um núcleo, alterando a estrutura desse núcleo e tornando-o radioativo, capaz de emitir radiação gama de alta energia.

REJEITOS RADIOATIVOS - O LIXO ATÔMICO

Os materiais radioativos produzidos em Instalações Nucleares (Reatores Nucleares, Usinas de Beneficiamento de Minério de Urânio e Tório, Unidades do Ciclo do Combustível Nuclear), Laboratórios e Hospitais, nas formas sólida, líquida ou gasosa, que não têm mais utilidade, não podem ser simplesmente “jogados fora” ou “no lixo”, por causa das radiações que emitem.

Esses materiais, que não são reutilizados em virtude dos riscos que apresentam, são “rejeitados”, até pelo lixo e, por isso, chamados de **Rejeitos Radioativos**.

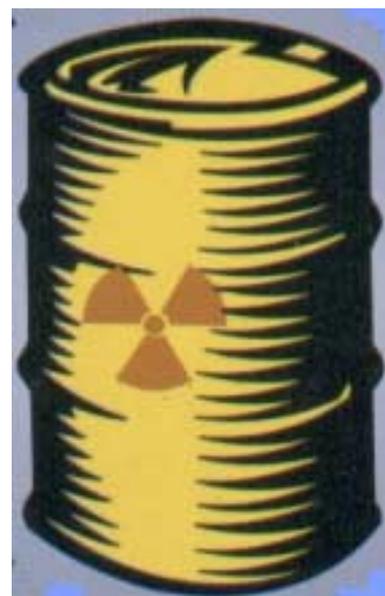
Na realidade, a expressão “lixo atômico” seria uma redundância ou um "pleonasma técnico" , porque qualquer lixo é formado por átomos e, portanto, é **atômico**. Ele passa a ter essa denominação popular, quando é radioativo.

TRATAMENTO DOS REJEITOS RADIOATIVOS

Os rejeitos radioativos precisam ser tratados, antes de serem liberados para o meio ambiente, se for o caso. Eles podem ser liberados quando o nível de radiação é igual ao do meio ambiente e quando não apresentam toxidez química.

Rejeitos sólidos, líquidos ou gasosos podem ser classificados, quanto à atividade, em rejeitos de **baixa, média e alta atividade**.

Rejeitos sólidos de baixa atividade, como partes de maquinária contaminadas, luvas usadas, sapatilhas e aventais contaminados, são colocados em sacos plásticos e guardados em tambores ou caixas de aço, após classificação e respectiva identificação.



Os produtos de fissão, resultantes do combustível nos reatores nucleares, sofrem tratamento especial em **Usinas de Reprocessamento**, onde são separados e comercializados, para uso nas diversas áreas de aplicação de radioisótopos. Os materiais radioativos restantes, que não têm justificativa técnica e/ou econômica para serem utilizados, sofrem tratamento químico especial e são vitrificados, guardados em sistemas de contenção e armazenados em **Depósitos de Rejeitos Radioativos**.

Dependendo da meia-vida, alguns rejeitos podem permanecer radioativos por dezenas, centenas ou até milhares de anos. Os rejeitos com meias-vidas superiores a 30 anos são considerados rejeitos de meia-vida longa.

Os rejeitos de meia-vida curta são armazenados em locais apropriados (preparados), até sua atividade atingir um valor semelhante ao do meio ambiente, podendo, então, ser liberados. Esse critério de liberação leva em conta somente atividade do rejeito. É evidente que materiais de atividade ao nível ambiental mas que apresentam toxidez química para o ser humano ou que são prejudiciais ao ecossistema não podem ser liberados sem um tratamento químico adequado.

DEPOSIÇÃO DOS REJEITOS RADIOATIVOS DO ACIDENTE DE GOIÂNIA

Após o acidente radioativo de Goiânia, ocorrido em 1987 com uma fonte de césio-137, a CNEN estabeleceu uma série de procedimentos para a construção de dois depósitos com a finalidade de abrigar, de forma segura e definitiva, os rejeitos radioativos decorrentes desse acidente

O primeiro, denominado Contêiner de Grande Porte (CGP), foi construído em 1995, dentro dos padrões internacionais de segurança, para os rejeitos menos ativos.

O segundo depósito, visando os rejeitos de mais alta atividade, concluído em 1997, será mantido sob controle institucional da CNEN por 50 anos, coberto por um programa de monitoração ambiental, de forma a assegurar que não haja impacto radiológico no presente e no futuro.



SEGURANÇA NUCLEAR

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.

Um reator nuclear do tipo **Angra 1** e **Angra 2** é conhecido como **PWR (Pressurized Water Reactor = Reator a Água Pressurizada)**, porque opera com água sob alta pressão.

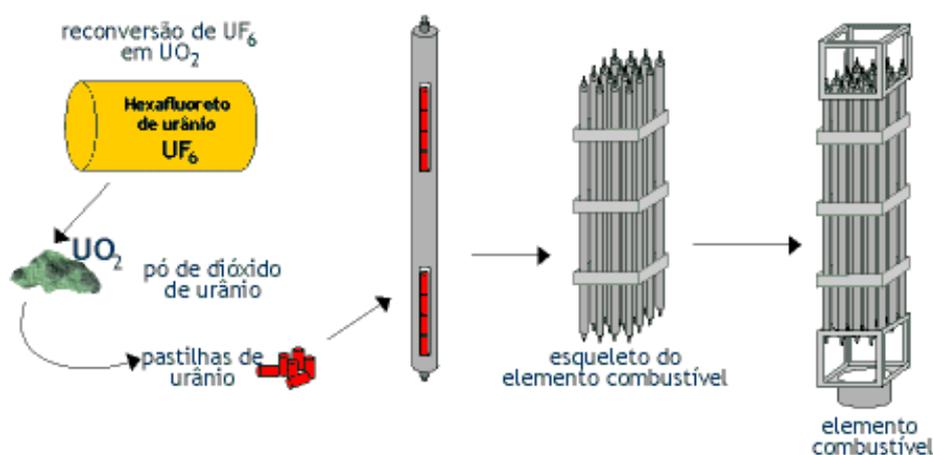
O urânio, enriquecido a cerca de 3,2% em urânio-235, é colocado, em forma de pastilhas de 1 cm de diâmetro, dentro de tubos (“**varetas**”) de 4m de comprimento, feitos de uma liga especial de zircônio, denominada “**zircalloy**”.

VARETAS DE COMBUSTÍVEL

As varetas, contendo o urânio, conhecidas como **Varetas de Combustível**, são montadas em feixes, numa estrutura denominada **ELEMENTO COMBUSTÍVEL**.

O urânio-235, por analogia, é chamado de **combustível nuclear**, porque pode substituir o óleo ou o carvão, para gerar calor.

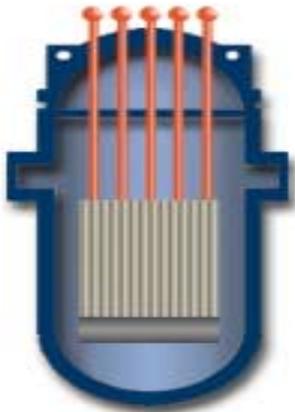
As varetas são fechadas, com o objetivo de não deixar escapar o material nelas contido (o urânio e os elementos resultantes da fissão) e podem suportar altas temperaturas.



A Vareta de Combustível é a primeira barreira que serve para impedir a saída de material radioativo para o meio ambiente.

VASO DE PRESSÃO

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.



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.

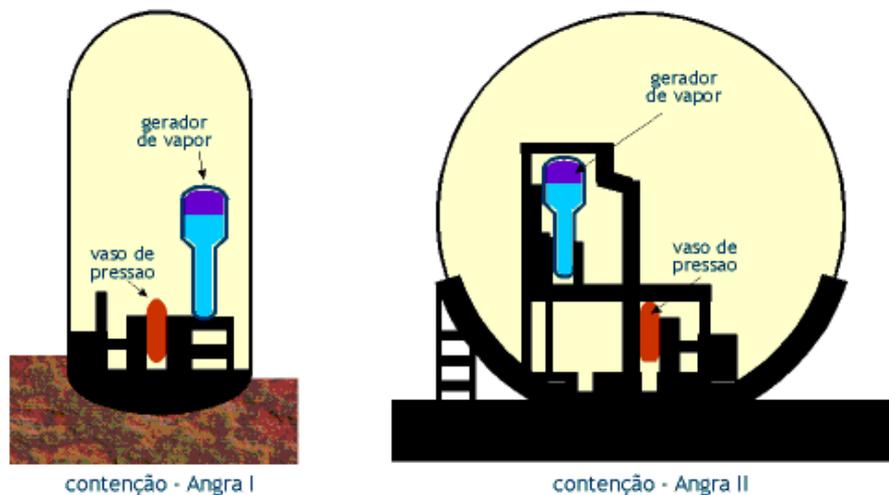
O Vaso de Pressão do Reator é a segunda barreira física que serve para impedir a saída de material radioativo para o meio ambiente.

A CONTENÇÃO

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**.

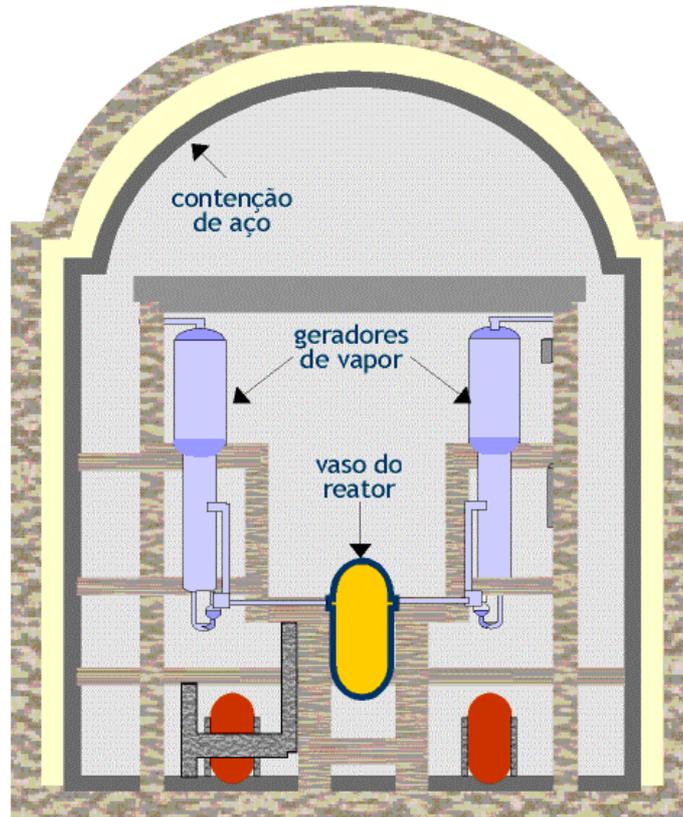
No caso de Angra 1, a **Contenção** tem a forma de um tubo (cilindro). Em Angra 2 é esférica.



A Contenção é a terceira barreira que serve para impedir a saída de material radioativo para o meio ambiente.

EDIFÍCIO DO REATOR

Um último envoltório, de concreto, revestindo a Contenção, é o próprio **Edifício do Reator**. Tem cerca de 1 m de espessura em Angra 1.



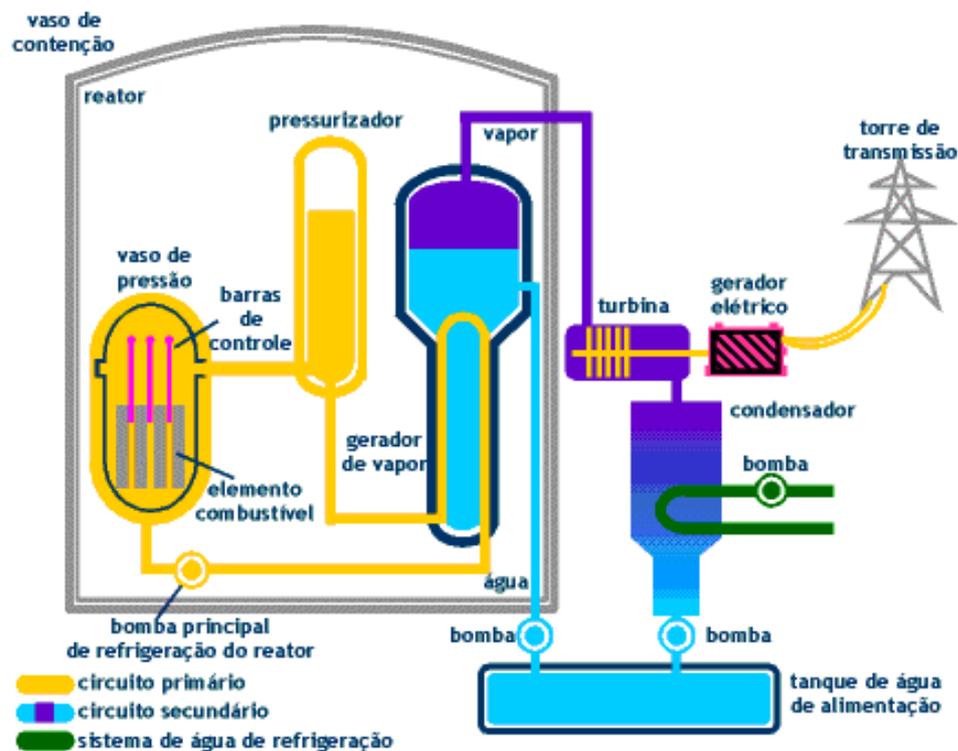
O Edifício do Reator, construído em concreto e envolvendo a Contenção de aço, é a quarta barreira física que serve para impedir a saída de material radioativo para o meio ambiente e, além disso, protege contra impactos externos (queda de aviões e explosões).

CIRCUITO PRIMÁRIO

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**, em circuito fechado, isto é, não sai desse Sistema, chamado de **Circuito Primário**.

Angra 1 tem dois Geradores de Vapor; Angra 2 tem quatro.

A água que circula no Circuito Primário é usada para aquecer uma outra corrente de água, que passa pelo Gerador de Vapor.



CIRCUITO SECUNDÁRIO

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**.

INDEPENDÊNCIA ENTRE OS SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

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.

FILOSOFIA DE SEGURANÇA

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 Ativos 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.

SEGURANÇA NO 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.

SEGURANÇA NA OPERAÇÃO DE REATORES NUCLEARES

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 brasi-

leiros que, periodicamente, fazem estágios em Reatores alemães, para atualização de conhecimentos e introdução de novas experiências nos cursos ministrados.

REATOR NUCLEAR E BOMBA ATÔMICA

- A bomba (“atômica”) é feita para ser possível explodir, ou seja, a reação em cadeia deve ser rápida e a quantidade de urânio, muito concentrado em urânio-235 (quer dizer, urânio enriquecido acima de 90%) deve ser suficiente para a ocorrência rápida da reação. Além disso, toda a massa de urânio deve ficar junta, caso contrário não ocorrerá a reação em cadeia de forma explosiva.
- 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 é 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 e até acabam com a reação em cadeia, como, por exemplo, na “parada” do Reator.

ACIDENTE NUCLEAR

Um acidente é considerado nuclear, quando envolve uma reação nuclear ou equipamento onde se processe uma reação nuclear.

Um acidente com uma fonte radioativa, como o do céscio-137, é um acidente radioativo.

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, sem conseqüências para os trabalhadores e o meio ambiente. Foi o acidente de **Three Miles Island (TMI)**, nos Estados Unidos.

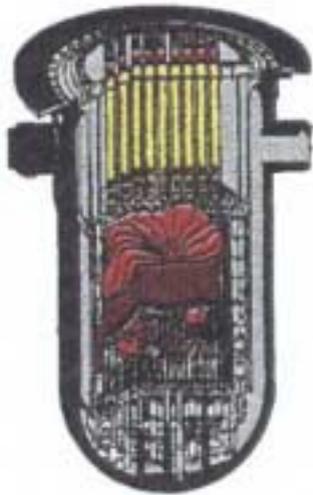
ACIDENTE NUCLEAR EM THREE MILES ISLAND

Nesse acidente, vazaram água e vapor do Circuito Primário, mas ambos ficaram retidos na Contenção. 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 (constatada, posteriormente, 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 mais 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.



A figura mostra como ficou o Vaso de Pressão de Three Miles Island após o acidente, podendo-se notar os elementos combustíveis e as barras de controle fundidos e que o Vaso não sofreu danos.

O REATOR NUCLEAR DE CHERNOBYL

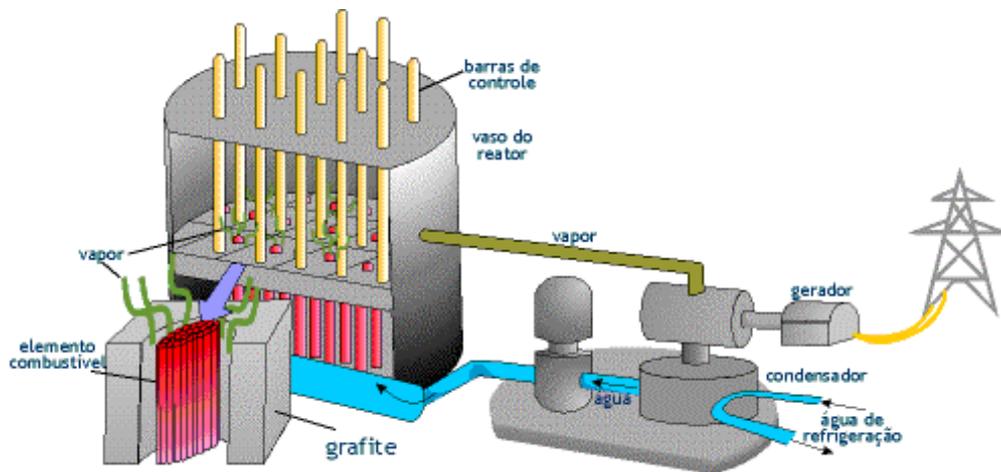
O Reator de Chernobyl é de um tipo diferente dos de Angra.

A maior diferença é devida ao fato de que esse Reator tem **grafite** no núcleo e não possui Contenção de aço.

O combustível é o urânio-235 e o controle da reação de fissão nuclear em cadeia é feita da mesma forma: por meio de barras de controle absorvedoras de nêutrons.

As varetas de combustível são colocadas dentro de blocos de grafite (que “pega fogo”, quando aquecido), por onde passam os tubos da água de refrigeração, que vai produzir o vapor para acionar a turbina.

A água passa entre as varetas de combustível, onde é gerado o vapor, não havendo necessidade de um gerador de vapor com essa finalidade, como em Angra 1.



As dimensões do Vaso do Reator são muito maiores, por causa da montagem dos blocos de grafite, e isso torna impraticável a construção de uma contenção de aço, como em Angra.

O Reator de Chernobyl não tem Contenção de aço.

Como o Vaso é bem maior, o Edifício do Reator também é bem maior e funciona como contenção única mas não é lacrado. A parte superior o compartimento do Vaso do Reator é uma enorme “tampa” de concreto, de 1.000 toneladas, que pode ser deslocada.

Apesar de operacionalmente seguro, esse Reator permite que o **Sistema de Segurança Automático**, isto é, o desligamento automático, possa ser bloqueado e o Reator passa a ser operado manualmente, não desligando automaticamente, em caso de perigo ou de **falha humana**.

Até aqui, já deu para se notar a diferença, em termos de Segurança Ativa e Barreiras Passivas, entre o Reator do tipo Chernobyl e o Reator do tipo Angra.

O ACIDENTE DE CHERNOBYL

O Reator estava em procedimento de parada (desligamento) para manutenção periódica anual.

O Setor de Engenharia Elétrica da Central queria fazer testes, na parte elétrica, com o Reator quase parando, isto é, funcionando a pequena potência. Para fazer esses testes, era preciso desligar o Sistema Automático de Segurança, caso contrário o Reator pararia automaticamente para qualquer mudança que levasse a uma situação crítica de perigo.

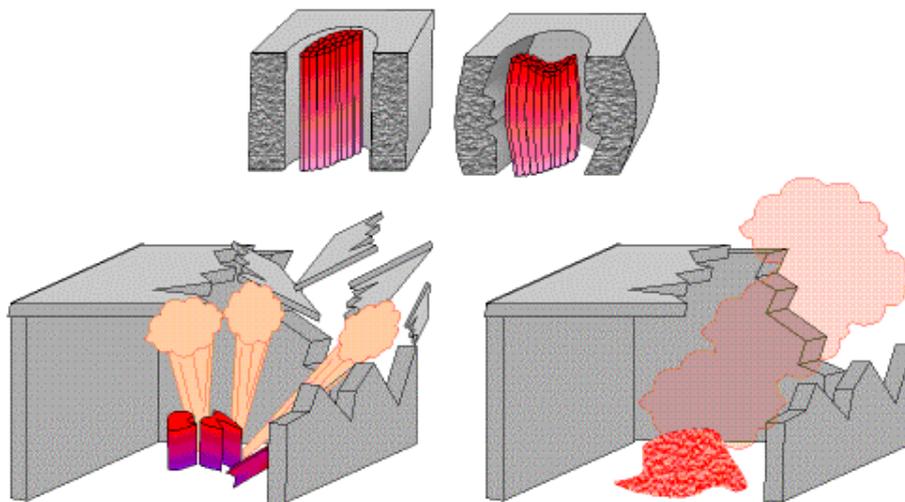
Os engenheiros eletricitas que conduziam os testes na turbina não tinham controle sobre a operação do Reator. Os operadores da Sala de Controle do Reator perderam o

controle da operação, em face das experiências que estavam sendo conduzidas pelos engenheiros eletricitistas.

A temperatura aumentou rapidamente e não houve água de refrigeração suficiente para resfriar os elementos combustíveis. A água que circulava nos tubos foi total e rapidamente transformada em vapor, de forma explosiva. Houve, portanto, uma **explosão de vapor**, que “arreventou” os tubos, os elementos combustíveis e os blocos de grafite.

A explosão foi tão violenta que deslocou a **tampa de concreto** e destruiu o teto do prédio, que não foi previsto para agüentar tal impacto, deixando o Reator “aberto” para o meio ambiente.

Como o grafite aquecido entra em combustão espontânea, seguiu-se um grande incêndio, arremessando para fora grande parte do material radioativo que estava nos elementos combustíveis, danificados na explosão de vapor.



COMPARAÇÃO COM OS REATORES PWR DE ANGRA

Em resumo, é **ABSOLUTAMENTE IMPOSSÍVEL** ocorrer um acidente dessa natureza em Reatores do tipo PWR (Angra), porque:

- **Sistema Automático de Segurança não pode ser bloqueado** para permitir a realização de “testes”.
- Os Reatores PWR não usam grafite.
- Reator PWR, por ser de menor tamanho, permite a construção da Contenção de Aço.
- O Vaso de Pressão do Reator PWR é muito mais robusto.

- Edifício do Reator (ou Contenção de Concreto) é uma estrutura de segurança e não simplesmente um prédio industrial convencional, como o de Chernobyl.

RADIOPROTEÇÃO (PROTEÇÃO RADIOLÓGICA)

A Proteção Radiológica ou Radioproteção tem como objetivos evitar ou reduzir os efeitos maléficos das radiações sobre o ser humano, sejam elas de origem natural ou de fontes produzidas artificialmente.

Esses objetivos podem ser atingidos, aplicando-se os chamados três Princípios Básicos de Radioproteção, prescritos nas Diretrizes Básicas de Radioproteção da CNEN:

PRINCÍPIO DA JUSTIFICAÇÃO

Qualquer atividade envolvendo radiação ou exposição a radiações deve ser justificada em relação a possíveis alternativas e produzir um benefício positivo para a Sociedade.

Isso significa que, no caso de se obter o mesmo resultado com o uso de um material radioativo e de um material não radioativo, deve ser empregado este último.

PRINCÍPIO DA OTIMIZAÇÃO

Uma vez justificado o uso de material radioativo ou de fontes radioativas, aplica-se o princípio da radioproteção ocupacional:

O projeto de instalações que processem ou utilizem materiais radioativos ou fontes radioativas, o planejamento do uso desses materiais ou fontes, bem como a respectiva operação, devem garantir que as exposições às radiações sejam tão baixas quanto razoavelmente exeqüíveis.

O Princípio da Otimização é também conhecido como Princípio ALARA, em inglês **As Low As Reasonably Achievable** (tão baixa quanto razoavelmente exeqüível).

PRINCÍPIO DA LIMITAÇÃO DA DOSE INDIVIDUAL

As doses (quantidades de radiação) individuais de trabalhadores que utilizam materiais radioativos e de indivíduos do público não devem exceder os limites anuais estabelecidos na Norma CNEN-NE-3.01 - Diretrizes Básicas de Radioproteção.

GRANDEZAS E UNIDADES RADIOLÓGICAS

- **Exposição X (raios-X ou gama):** quantidade de radiação absorvida pelo ar ou carga de ions transferida para o ar ou, ainda, pares iônicos produzidos no ar.

Unidade: **R** (Roentgen - lê-se "rêntguen")

- **Dose Absorvida (D)** (qualquer radiação ionizante e qualquer material): quantidade de radiação (ou energia) por unidade de massa.

Unidades:

- Gy** (Gray) - é a unidade adotada oficialmente
- rad** - unidade antiga

- **Dose Equivalente (H)** : dose absorvida por um órgão do corpo humano, levando em consideração os efeitos biológicos produzidos, pela inclusão do "fator de qualidade" **Q** (**Q** = 1, para raios-X, γ e β). **H = D . Q**

Unidades: sendo **Q** um número adimensional, a unidade não se altera em termos de grandeza mas recebe um nome específico para distingui-la da dose absorvida.

- Sv** (Sievert) - é a unidade adotada oficialmente
- rem** (roentgen equivalent man) - unidade antiga
1 rem = 0,01 Sv ou 1 Sv = 100 rem
- Como o **Sv** e o **rem** expressam valores grandes em termos de Radioproteção, são usados os seus submúltiplos **mSv** e **mrem**, respectivamente.

LIMITES RADIOLÓGICOS

Em primeiro lugar, deve-se ressaltar que nenhum trabalhador deve ser exposto à radiação sem que seja necessário, sem ter conhecimento dos riscos radiológicos decorrentes desse tipo de trabalho e sem que esteja treinado para o desempenho seguro de suas funções.

Outros profissionais que possam vir a ser envolvidos em trabalhos com radiação também estão enquadrados nas determinações do parágrafo anterior.

São considerados indivíduos do público qualquer membro da população não exposto ocupacionalmente à radiação.

Limites Primários Anuais de Dose Equivalente (Equivalente de Dose)

Dose Equivalente	Trabalhador	Público
Efetiva	50 mSv (*)	1 mSv
Para órgão/tecido	500 mSv	1 mSv/w _T (**)
Para extremidades (***)	500 mSv	50 mSv

(*) A dose média limite deve ser de 20 mSv/ano em um período de 5 anos, sendo aceitável até 50 mSv em um único ano.

(**) w_T é um fator de ponderação ou de peso para o tecido (T) ou órgão.

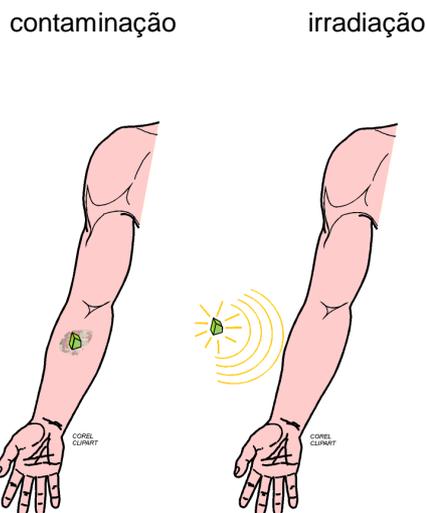
(***) São consideradas extremidades: mãos, antebraços, pés e tornozelos.

EXPOSIÇÃO E CONTAMINAÇÃO

Em virtude das dúvidas correntemente existentes, torna-se necessário esclarecer a diferença entre irradiação e contaminação.

Uma **contaminação, radioativa ou não**, caracteriza-se pela **presença indesejável** de um material em determinado local, onde não deveria estar.

A **irradiação** é a exposição de um objeto ou de um corpo à radiação, sem que haja contato direto com a fonte de radiação.



Irradiar, portanto, não significa contaminar. Contaminar com material radioativo, no entanto, implica em irradiar o local, onde esse material estiver.

Irradiação não contamina, mas contaminação irradia.

Por outro lado, a descontaminação radiológica consiste em retirar o contaminante (material indesejável) da região onde se localizou. A partir do momento da remoção do contaminante radioativo, não há mais irradiação no local.

Outro esclarecimento importante: a irradiação por fontes de césio-137, cobalto-60 e similares (emissores alfa, beta e gama), usadas na medicina e na indústria **não torna** os objetos ou o corpo humano radioativos. Isso só é possível em reatores nucleares e aceleradores de partículas.

EFEITOS DAS RADIAÇÕES NO SER HUMANO

Como já foi mencionado, as partículas alfa e beta são facilmente bloqueadas e causam danos apenas na pele ou internamente, em razão da ingestão do radionuclídeo que as emite. Por esse motivo, a preocupação maior é devida às radiações eletromagnéticas (radiação gama e raios-x).

Os efeitos biológicos, quando ocorrem, são precedidos de efeitos físicos e químicos.

a) Efeitos Físicos

- Absorção de energia
- Excitação
- Ionização: produção de íons e radicais livres
- Quebra de ligações químicas

b) Efeitos Químicos

- Mobilização e neutralização dos íons e radicais livres
- Restauração do equilíbrio químico
- Formação de novas substâncias

c) Efeitos Biológicos

- Armazenamento de informações
- Aberração cromossomial
- Alteração de metabolismo local
- Restauração de danos
- Morte celular

Os efeitos das radiações podem ser, ainda, considerados:

Efeitos Estocásticos

A probabilidade de ocorrência do dano é proporcional à dose recebida, mesmo que a dose seja pequena e abaixo dos limites de radioproteção. O dano devido a esses efeitos, no caso o câncer, pode levar até 40 anos para ser detectado.

Efeitos Determinísticos

São produzidos por doses elevadas, onde a gravidade do dano aumenta com a dose recebida. O dano não é provável; é previsível.

Efeitos Somáticos

Causam dano nas células do corpo.

Efeitos Imediatos

Ocorrem em poucas horas até algumas semanas após a exposição.

Efeitos Retardados ou Tardios

Aparecem depois de alguns anos, por exemplo, o câncer.

Em relação a efeitos de radiações ionizantes cabem algumas observações interessantes e importantes:

- 1) **A exposição a uma fonte de radiação não significa a "quase certeza de se ter um câncer" e sim a probabilidade de um dano que, na maioria dos casos, é corrigido naturalmente pelo organismo.**
- 2) **Um dano biológico produzido em uma pessoa não passa para outra, ou seja, "é uma doença que não pega".**
- 3) **A mesma dose que causou um efeito biológico em uma pessoa pode até não causar dano algum em outra.**

COMO SE PROTEGER DAS RADIAÇÕES - DOSIMETRIA

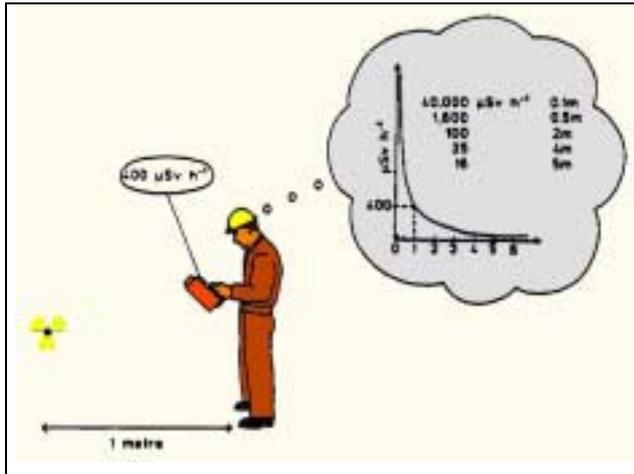
As radiações externas (radiações provenientes de fontes fora do corpo humano) podem ser controladas pelas variáveis **tempo, distância e blindagem**.

- a) **tempo** - a dose absorvida por uma pessoa é diretamente proporcional ao tempo em que ela permanece exposta à radiação. Qualquer trabalho em uma área controlada deve ser cuidadosamente programado realizado no menor tempo possível.
- b) **distância** - para as fontes radioativas normalmente usadas na indústria (fontes "pontuais") pode-se considerar a dose de radiação é inversamente proporcional ao quadrado da distância, isto é, decresce com o quadrado da distância da fonte à pessoa. É chamada lei do inverso do quadrado e pode ser escrita da forma:

$$D_1/D_2 = (r_2)^2/(r_1)^2$$

onde D_1 = taxa de dose à distância r_1 da fonte

D_2 = taxa de dose à distância r_2 da fonte



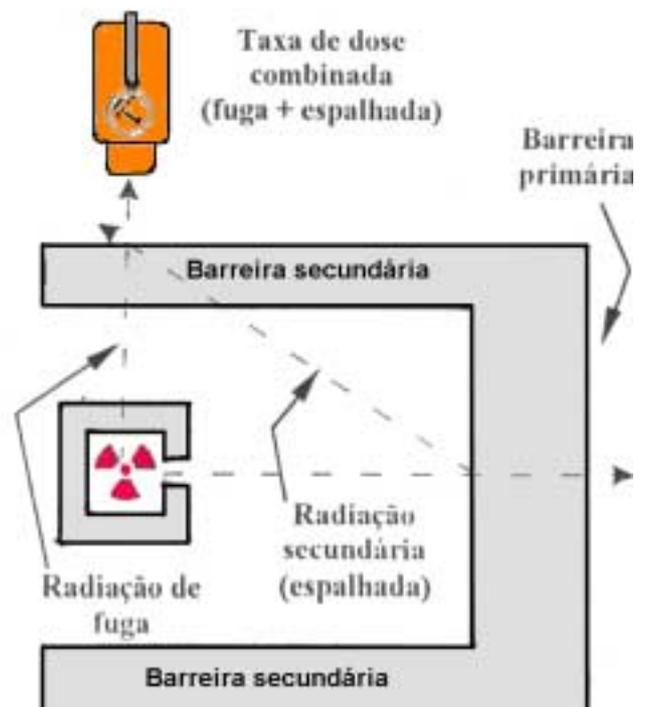
Isso significa que, se a dose medida a 1 m for 400 µSv/h, a dose esperada a:

- 2 m será 100 µSv/h
- 5 m será 16 µSv/h
- 10 m será 4 µSv/h

c) **blindagem** - é o modo mais seguro de proteção contra as radiações ionizantes, uma vez que os dois métodos anteriores dependem de um controle administrativo contínuo dos trabalhadores.

Barreira primária ou blindagem primária é uma blindagem suficiente para reduzir, a um nível aceitável, as taxas de equivalente de dose transmitidas a áreas acessíveis. Pode ser feita com espessuras variadas de um mesmo material ou de materiais diferentes.

Além das barreiras primárias, barreiras secundárias são necessárias para prover uma blindagem eficiente contra radiações secundárias, que são aquelas que sofrem desvios ("espalhamento") do feixe primário (feixe útil) ou que passam através das blindagens das fontes ou dos equipamentos



emissores de radiação (radiações de "fuga").

MONITORAÇÃO / MONITORAMENTO

Monitoramento Radiológico - medição de grandezas relativas à Radioproteção, para fins de avaliação e controle das condições radiológicas de locais onde existe ou se pressupõe a existência de radiação.

Monitoramento de área - avaliação e controle das condições radiológicas das áreas de uma instalação industrial, incluindo medição de grandezas relativas a:

- a) campos externos de radiação;
- b) contaminação de superfícies;
- c) contaminação do ar.

Monitoramento individual - monitoramento de pessoas com dispositivos individuais (dosímetros) colocados sobre o corpo.

DETECTORES DE RADIAÇÕES

São dispositivos (aparelhos) capazes de indicar a presença de radiação, convertendo a energia da radiação em um sinal elétrico, luz ou reação química. A utilização de um detector depende do tipo da radiação presente: um detector muito eficiente para radiação gama é inadequado para partículas alfa.

Monitores de radiação são detectores construídos e adaptados para um determinado tipo de radiação.

Dosímetros são monitores que medem uma grandeza radiológica com resultados relacionados ao corpo humano inteiro ou a um órgão ou tecido.

Detector/Contador Geiger-Müller (GM)

É um dos dispositivos mais antigos para detectar e medir radiação, desenvolvido por Geiger e Müller em 1928 e muito usado ainda atualmente por sua simplicidade, baixo custo e facilidade de operação.

Os detectores GM podem ser usados para medir grandezas como dose e exposição, através



GM-MIR, produzido no IEN

de artifícios de instrumentação e metrologia. Para a taxa de exposição a escala é normalmente calibrada para a energia do ^{60}Co .

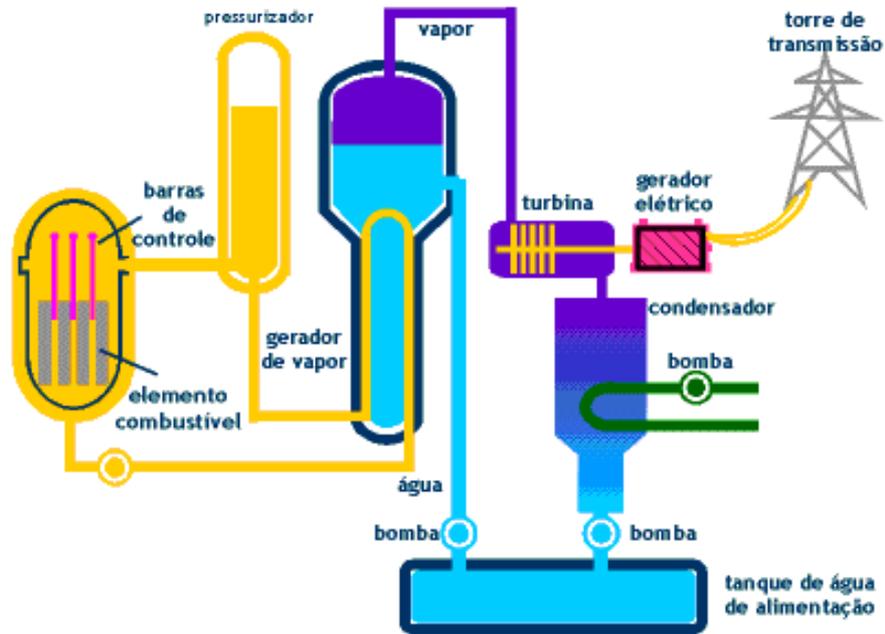
AS APLICAÇÕES DA ENERGIA NUCLEAR E DAS RADIAÇÕES

Infelizmente são pouco divulgados os grandes benefícios da energia nuclear. A cada dia, novas técnicas nucleares são desenvolvidas nos diversos campos da atividade humana, possibilitando a execução de tarefas impossíveis de serem realizadas pelos meios convencionais.

A aplicação de maior vulto é a conversão da energia nuclear para energia elétrica, o que se obtém nos reatores nucleares de potência, como os de Angra, já mencionados.

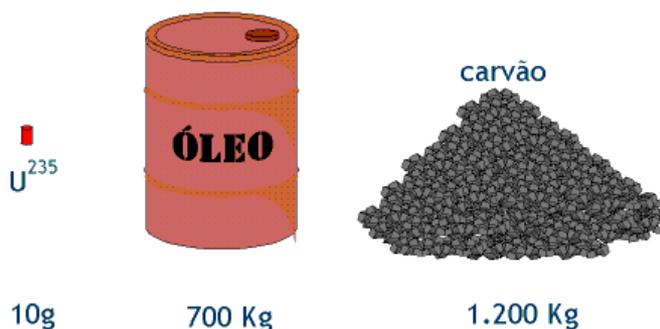
De uma forma simplificada, um **Reator Nuclear** é um equipamento onde se processa uma reação de fissão nuclear, assim como um reator químico é um equipamento onde se processa uma reação química.

Um Reator Nuclear para gerar energia elétrica é, na verdade, uma **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**.



Não há diferença entre a energia gerada por uma fonte convencional (hidroelétrica ou térmica) e a energia elétrica gerada por um Reator 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 pouco material usado (o urânio).



Comparação entre as quantidades de diferentes combustíveis, em massa, para a geração da mesma quantidade de energia.

A medicina, a indústria, particularmente a farmacêutica, e a agricultura são as áreas mais beneficiadas pela energia das radiações.

Os isótopos radioativos ou **radioisótopos**, devido à propriedade de emitirem radiações, têm vários usos. As radiações podem até atravessar a matéria ou serem absorvidas por ela, o que possibilita múltiplas aplicações. Mesmo em quantidades cuja massa não pode ser determinada pelos métodos químicos, a radiação por eles emitida pode ser detectada.

Pela absorção da energia das radiações (em forma de calor) células ou pequenos organismos podem ser destruídos. Essa propriedade, que normalmente é altamente inconveniente para os seres vivos, pode ser usada em seu benefício, quando empregada para destruir células ou microorganismos nocivos.

A propriedade de penetração das radiações possibilita identificar a presença de um radioisótopo em determinado local.

TRAÇADORES RADIOATIVOS

As radiações emitidas por radioisótopos podem atravessar a matéria e, dependendo da energia que possuam, são detectadas (“percebidas”) onde estiverem, através de aparelhos apropriados, denominados **detectores de radiação**. Dessa forma, o deslocamento de um radioisótopo pode ser acompanhado e seu percurso ou “caminho” ser “traçado” num mapa do local. Por esse motivo, recebe o nome de **traçador radioativo**.

Traçadores Radioativos - *Radioisótopos que, usados em “pequeníssimas” quantidades, podem ser “acompanhados”* por detectores de radiação.

A MEDICINA NUCLEAR

A **Medicina Nuclear** é a área da medicina onde são utilizados os radioisótopos, tanto em diagnósticos como em terapias.

Radioisótopos administrados a pacientes passam a emitir suas radiações do lugar (no caso, órgão) onde têm preferência em ficar.

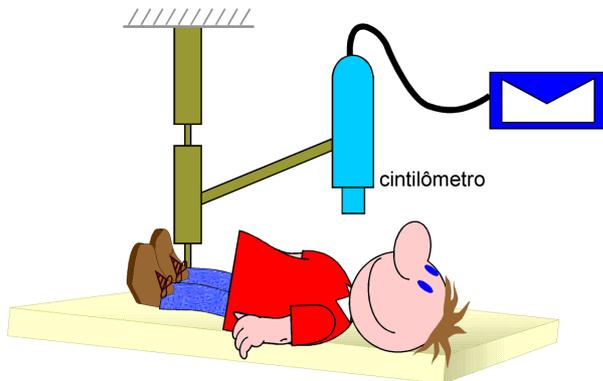
Um exemplo prático bem conhecido é o uso do **iodo-131 (I-131)**, que emite partícula beta, radiação gama e tem meia-vida de oito dias.

O elemento iodo, radioativo ou não, é absorvido pelo organismo humano preferencialmente pela glândula tireóide, onde se concentra. O funcionamento da tireóide influi muito no comportamento das pessoas e depende de como o iodo é por ela absorvido.

O fato de ser radioativo não tem qualquer influência no comportamento de um elemento químico em relação aos demais elementos.

Para diagnóstico de tireóide, o paciente ingere uma solução de iodo-131, que vai ser absorvido pela glândula. “Passando” um detector pela frente do pescoço do paciente, pode-se

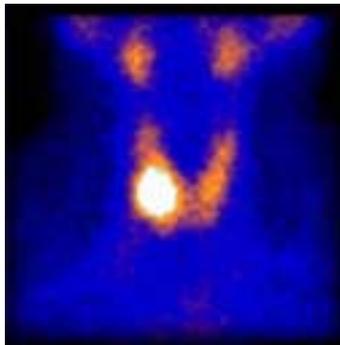
observar se o iodo foi muito ou pouco absorvido em relação ao normal (padrão) e como se distribui na glândula.



O detector é associado a um mecanismo que permite obter um “desenho” ou mapeamento, em preto e branco ou colorido, da tireóide.

Um diagnóstico, no caso um radiodiagnóstico, é feito por comparação com um mapa padrão de uma tireóide normal.

A mesma técnica é usada para mapeamento de fígado e de pulmão.



Exemplo de radiodiagnóstico da tireóide, utilizando-se o Iodo-131.

A área mais brilhante indica maior concentração do radioisótopo.

OS RADIOISÓTOPOS NA MEDICINA

Os radiofármacos usados em medicina no Brasil são, em grande parte, produzidos pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/CNEN, em São Paulo.



Gerador de Tecnécio (IPEN/CNEN)

O tecnécio-99 (Tc-99m) é utilizado, para obtenção de mapeamentos (cintilografia) de diversos órgãos:

- cintilografia renal, cerebral, hepato-biliar (fígado), pulmonar e óssea;
- diagnóstico do infarto agudo do miocárdio e em estudos circulatórios;
- cintilografia de placenta.

Outro radioisótopo, o samário-153 (Sm-153), é aplicado (injetado) em pacientes com metástase óssea, como paliativo para a dor.

Esses produtos são distribuídos semanalmente pelo IPEN para os usuários.

A RADIOTERAPIA

A radioterapia teve origem na aplicação do elemento **rádio** pelo casal Curie, para destruir células cancerosas, e foi inicialmente conhecida como “Curieterapia”. Posteriormente, outros radioisótopos passaram a ser usados, apresentando um maior rendimento.

O iodo-131 também pode ser usado em terapia para eliminar lesões, identificadas nos radiodiagnósticos da tireóide, aplicando-se, no caso, uma dose maior do que a usada nos diagnósticos.

O iodo radioativo apresenta as características ideais para aplicação em Medicina, tanto em diagnóstico como em terapia:

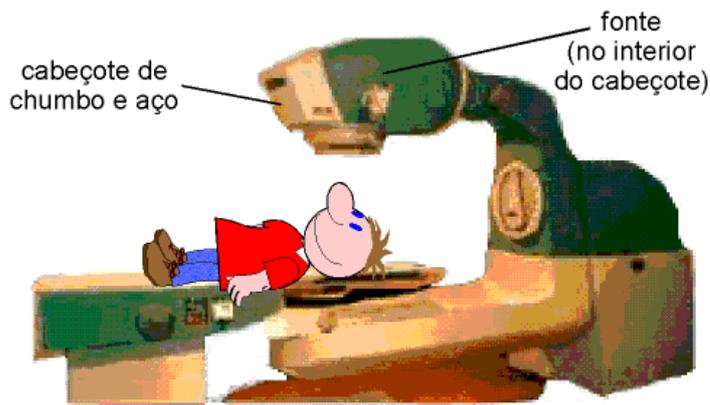
- tem meia-vida curta;
- é absorvido preferencialmente por um órgão (a tireóide);
- é eliminado rapidamente do organismo;
- a energia da radiação gama é baixa.

Fontes radiativas (= fontes de radiação) de céσιο-137 e cobalto-60 são usadas para destruir células de tumores, uma vez que estas são mais sensíveis à radiação do que os tecidos normais (sãos).

Radioterapia = tratamento com fontes de radiação.

Um dos aparelhos de radioterapia mais conhecidos é a **Bomba de Cobalto**, usada no tratamento contra o câncer, e que nada tem de “bomba” (não explode). Trata-se de uma fonte radiativa de cobalto-60 (Co-60), encapsulada ou “**selada**” (hermeticamente fechada) e blindada, para impedir a passagem de radiação. Até bem pouco tempo, para este fim, eram utilizadas fontes de céσιο-137, que foram substituídas pelas de cobalto-60, que, entre outras razões técnicas, apresentam maior rendimento terapêutico.

No momento da utilização, a fonte



é deslocada de sua posição “segura”, dentro do cabeçote de proteção (feito de chumbo e aço inoxidável), para a frente de um orifício, que permite a passagem de um feixe de radiação, concentrado sobre a região a ser “tratada” ou irradiada.

Após o uso, a fonte é recolhida para a posição de origem (“segura”).

Deve ficar bem claro que

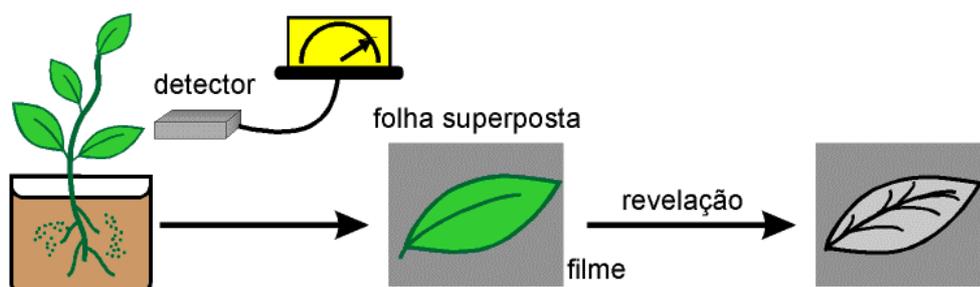
um objeto ou o próprio corpo, quando irradiado (exposto à radiação) por uma fonte radiativa, NÃO FICA RADIOATIVO.

Não se deve confundir o efeito (construtivo ou destrutivo) da radiação com o fato de tornar radioativo um material, só possível por outros processos (em Reatores Nucleares ou aceleradores de partículas).

APLICAÇÕES NA AGRICULTURA

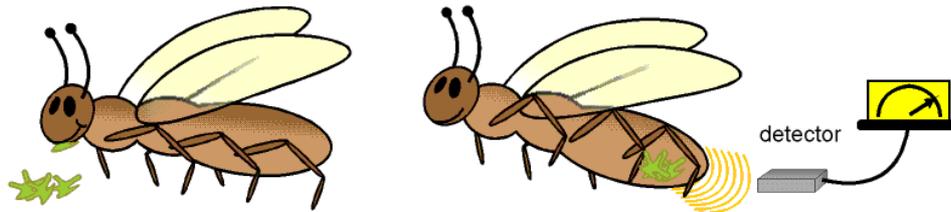
É possível acompanhar, com o uso de traçadores radioativos, o metabolismo das plantas, verificando o que elas precisam para crescer, o que é absorvido pelas raízes e pelas folhas e onde um determinado elemento químico fica retido.

Uma planta que absorveu um traçador radioativo pode, também, ser “radiografada”, permitindo localizar o radioisótopo. Para isso, basta colocar um filme, semelhante ao usado em radiografias e abreugrafias, sobre a região da planta durante alguns dias e revelá-lo. Obtém-se o que se chama de **auto-radiografia** da planta.

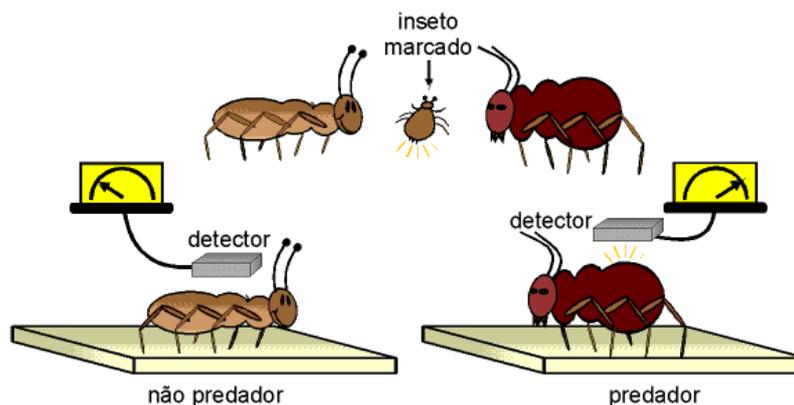


A técnica do uso de traçadores radioativos também possibilita o estudo do comportamento de insetos, como abelhas e formigas.

Ao ingerirem radioisótopos, os insetos ficam **marcados**, porque passam a “emitir radiação”, e seu “raio de ação” pode ser acompanhado. No caso de formigas, descobre-se onde fica o formigueiro e, no caso de abelhas, até as flores de sua preferência.



A “marcação” de insetos com radioisótopos também é muito útil para eliminação de pragas, identificando qual predador se alimenta de determinado inseto indesejável. Neste caso o predador é usado em vez de inseticidas nocivos à saúde.



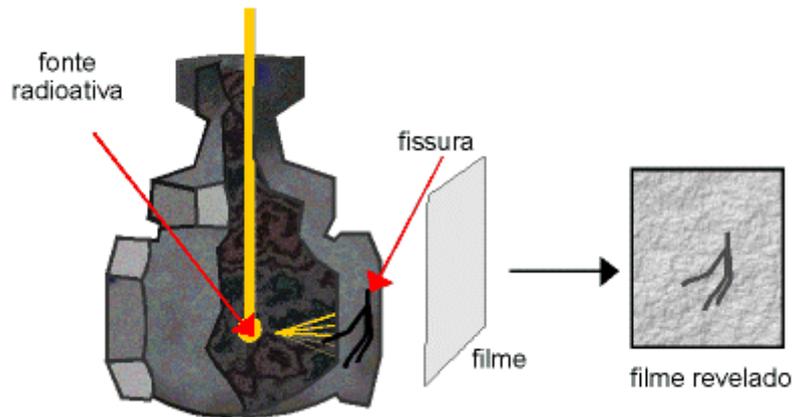
APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA

A aplicação de radioisótopos mais conhecida na indústria é a radiografia de peças metálicas ou gamagrafia industrial.

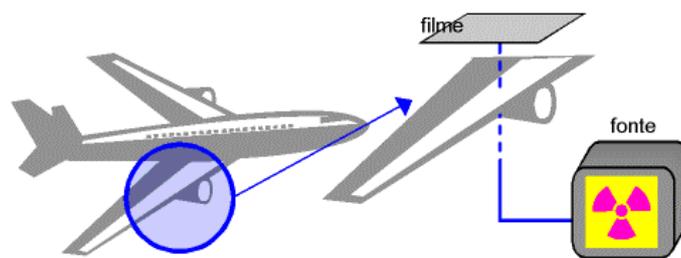
Gamagrafia

Impressão de radiação gama em filme fotográfico.

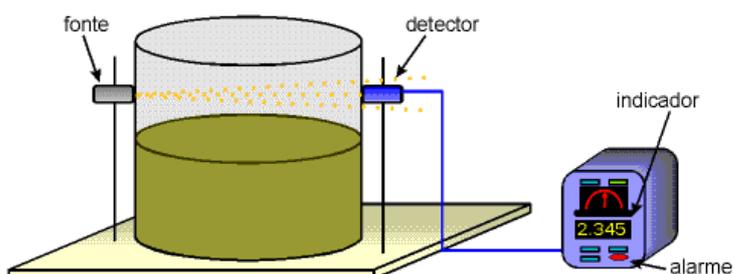
Os fabricantes de válvulas usam a gamagrafia, na área de Controle da Qualidade, para verificar se há defeitos ou rachaduras no corpo das peças.



As empresas de aviação fazem inspeções freqüentes nos aviões, para verificar se há “fadiga” nas partes metálicas e soldas essenciais sujeitas a maior esforço (por exemplo, nas asas e nas turbinas) usando a gamagrafia.



Para ter-se indicação de nível de um líquido em um tanque, coloca-se uma fonte radiativa em um dos lados e, no lado oposto, um detector ligado a um dispositivo (aparelho) de indicação ou de medição.



Quando o líquido alcança a altura da fonte, a maior parte da radiação emitida pela fonte é absorvida por ele e deixa de chegar ao detector, significando que o líquido atingiu aquele nível.

O mesmo artifício serve para indicar um nível mínimo de líquido desejado em um tanque. Nesse caso, a fonte e o detector devem ser colocados na posição adequada e, quando o líquido atingir esse ponto, deixará de absorver a radiação, que chegará ao detector com maior intensidade. Em geral, acrescenta-se um sistema de alarme, para soar ao ser atingido esse nível. No caso de indicação de nível máximo ocorrerá o contrário, isto é, a radiação chegará ao detector com menor intensidade.

A Indústria Farmacêutica utiliza fontes radioativas de grande porte para esterilizar seringas, luvas cirúrgicas, gaze e material farmacêutico descartável, em geral. Seria praticamente impossível esterilizar, pelos métodos convencionais que necessitam de altas temperaturas, tais materiais, que se deformariam ou se danificariam de tal forma que não poderiam ser mais utilizados.



A PRESERVAÇÃO DE ALIMENTOS POR IRRADIAÇÃO

A preservação de alimentos por irradiação consiste em sua exposição, embalado ou não, à radiação ionizante (radiação gama, raios-x ou feixe de elétrons).

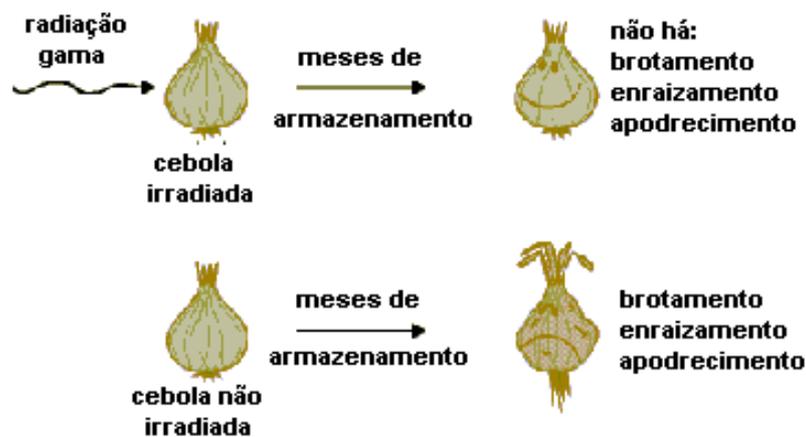
A tecnologia de preservação de alimentos por ionização em consequência de irradiação tem recebido uma crescente atenção de todo o mundo, junto com os métodos tradicionais de preservação de alimentos. As autoridades de vigilância sanitária e de segurança alimentar de 37 países, inclusive o Brasil, aprovaram a irradiação de vários tipos de alimentos, englobando especiarias, carne de frango, frutas e legumes.

O Brasil está tentando entrar na área de preservação de alimentos por irradiação (ionização). O desconhecimento do assunto leva à idéia errônea de que os alimentos "seriam contaminados pela irradiação" ou que ficariam radioativos, o que, em ambos os casos, se constitui num absurdo técnico e científico.

Deve-se salientar que a preservação de alimentos por irradiação não é um "milagre" e não pode transformar alimento deteriorado em alimento de alta qualidade nem substitui processos de higiene.

Além disso, esse tratamento pode não ser adequado para algum tipo de alimento, assim como outra técnica de preservação pode não ser adequada para algum tipo de alimento.

Duas grandes vantagens podem ser destacadas: não altera a qualidade do alimento e **não deixa resíduos tóxicos.**



O processo é realizado em uma instalação radiativa denominada Irradiador de Grande Porte, utilizando, na maioria dos casos, uma fonte de Co-60.

A vantagem do uso de uma fonte de Co-60 é devida à penetração da radiação gama, proporcionando maior versatilidade e maior amplitude de utilização do irradiador.

A Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) regulamentou, através da Resolução nº 21, de 26 de janeiro de 2001, a preservação de alimentos por irradiação, desde que sejam observadas as seguintes condições, em relação à dose de radiação:

- a) a dose mínima absorvida deve ser suficiente para alcançar a finalidade pretendida;
- b) a dose máxima absorvida deve ser inferior àquela que comprometeria as propriedades funcionais e/ou os atributos sensoriais do alimento.