



Apostila educativa

Energia Nuclear

Por
ELIEZER DE MOURA CARDOSO
Colaboradores:
Ismar Pinto Alves
José Mendonça de Lima
Pedro Paulo de Lima e Silva
Claudio Braz
Sonia Pestana

Comissão Nacional de Energia Nuclear
Rua General Severiano, 90 - Botafogo - Rio de Janeiro - RJ - CEP 22290-901
www.cnen.gov.br



Energia Nuclear

ÍNDICE

ENERGIA, 4

Matéria e Energia, 5

Uso da Energia, 6

Conversão de Energia, 6

Conversão para Energia Elétrica, 7

ESTRUTURA DA MATÉRIA, 8

Estrutura do Núcleo, 9

O Átomo, 9

A ENERGIA NUCLEAR, 10

Utilização da Energia Nuclear, 10

Fissão Nuclear, 11

Reação em Cadeia, 11

Isótopos, 12

Enriquecimento de Urânio, 13

Urânio Enriquecido, 13

Controle da Reação de Fissão Nuclear em Cadeia, 14

O REATOR NUCLEAR, 15

Reator Nuclear e Bomba Atômica, 16

O Combustível Nuclear, 16

Varetas de Combustível, 17

O Reator Nuclear existente em Angra, 17

Barras de Controle, 18

Vaso de Pressão, 18

Circuito Secundário, 19

Circuito Primário, 19

Independência entre os sistemas de refrigeração, 20

A Contenção, 20

Edifício do Reator, 21

A SEGURANÇA DOS REATORES NUCLEARES, 22

Acidente Nuclear - definição, 22

Filosofia de Segurança, 22

Sistemas Ativos de Segurança, 22

Projeto de uma Usina Nuclear, 23

Controle de Qualidade, 23

Operação, 23

Vazamentos em Reatores Nucleares, 24

Fiscalização e Auditoria, 24

Acidente Nuclear em Three Miles Island, 25

O Reator Nuclear de Chernobyl, 26

O Acidente de Chernobyl, 27

ENERGIA

De um modo geral, a energia pode ser definida como **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, devido à luz e ao calor que emite constantemente.

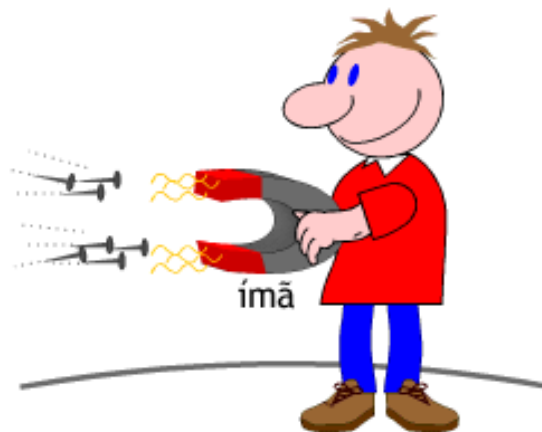
Formas de Energia

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) Outras formas de energia, como a **energia magnética** (ímã). Esta só pode ser percebida por meio de sua atração sobre alguns materiais, como o ferro.

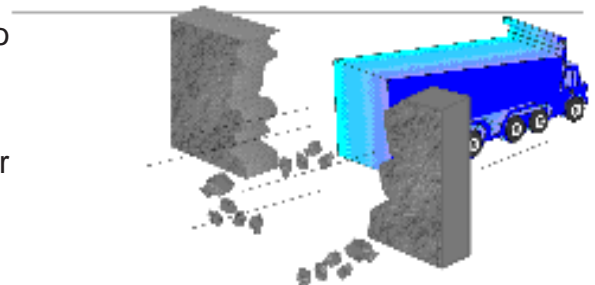


Matéria e Energia

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 humanidade tem procurado usar a energia que a cerca e a energia do próprio corpo, para obter maior conforto, melhores condições de vida, maior facilidade de trabalho, etc. Para a fabricação de um carro, de um caminhão, de uma geladeira ou de uma bicicleta, é preciso ter disponível muita energia elétrica, térmica e mecânica.

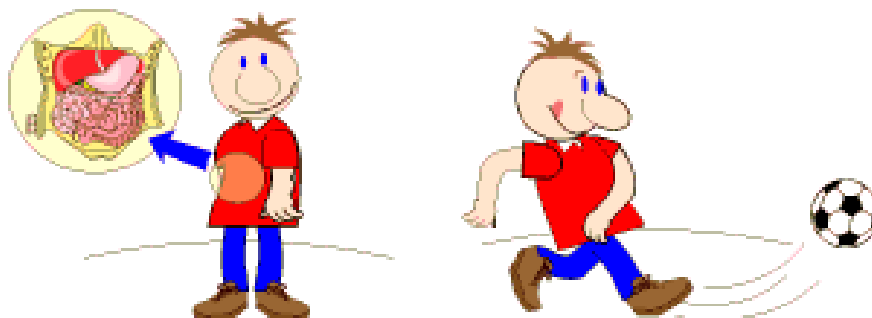
A **energia elétrica** é muito importante para as indústrias, porque torna possível a iluminação dos locais de trabalho, o acionamento de motores, equipamentos e instrumentos de medição.

Para todas as pessoas, entre outras aplicações, serve para iluminar as ruas e as casas, para fazer funcionar os aparelhos de televisão, os eletrodomésticos e os elevadores.

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**.



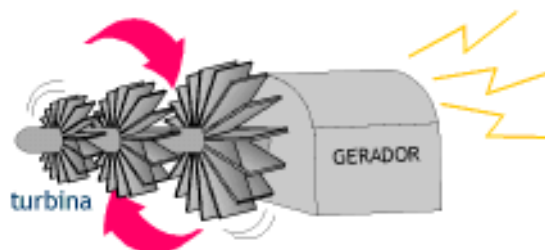
Quando suamos, estamos eliminando o excesso de energia recebida pelo nosso corpo (exposição ao Sol, por exemplo) ou gerado por uma taxa anormal de reações químicas dentro dele, para que sua temperatura permaneça em um valor constante de 36,5 °C. Esse calor é o resultado da transformação da **energia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



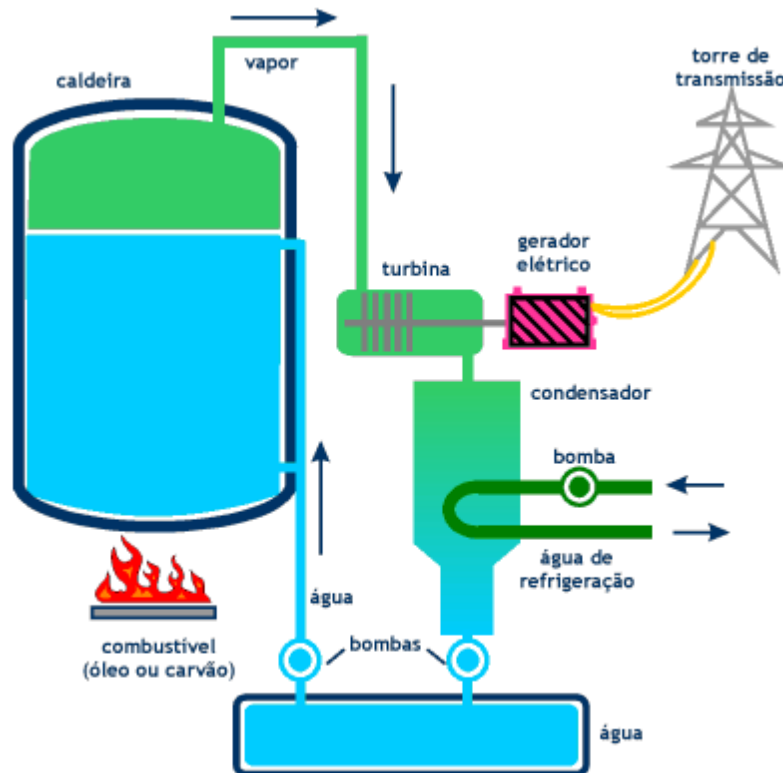
Conversão para Energia Elétrica

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.



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 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 numa forma semelhante à do Sistema Solar.

Existe um **núcleo**, onde fica concentrada a massa do átomo, equivalente ao Sol, e minúsculas partículas que giram em seu redor, denominadas **elétrons**, correspondentes aos planetas. Os elétrons são partículas de carga negativa e massa muito pequena.

O átomo possui também, como o Sistema Solar, grandes espaços vazios, que podem ser atravessados por partículas menores que ele.



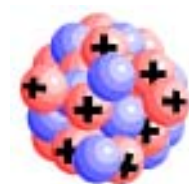
A comparação com o sistema solar, embora sirva para dar uma idéia visual da estrutura do átomo, destacando os “grandes espaços vazios”, não exprime a realidade.

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

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

Prótons e nêutrons são mantidos juntos no núcleo por forças, até o momento, não totalmente identificadas.



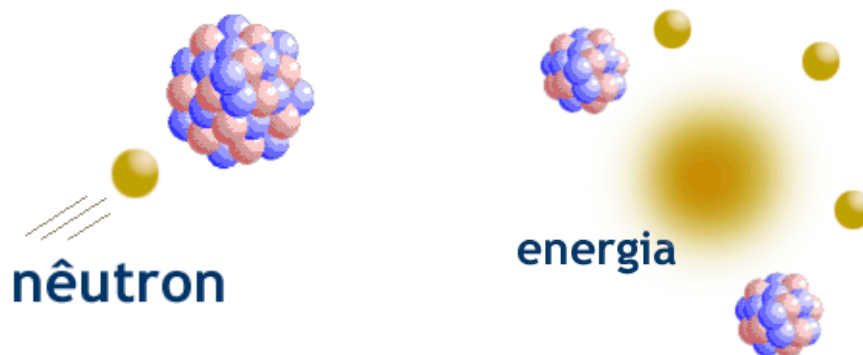
A ENERGIA NUCLEAR

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 uma energia nos núcleos dos átomos com mais de uma partícula para manter essa estrutura.

A energia que mantém os prótons e nêutrons juntos no núcleo é a **ENERGIA NUCLEAR**, isto é a energia de ligação dos nucleons (partículas do núcleo).

Utilização 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).

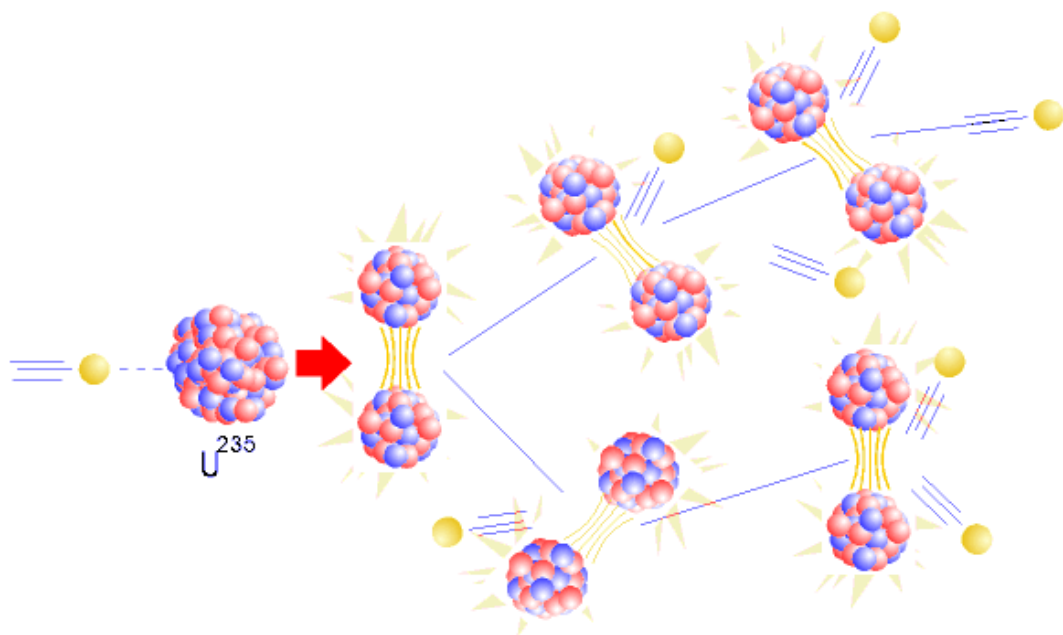


Fissão Nuclear

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**.



Urânio-235 e Urânio-238

O urânio-235 é um elemento químico que possui 92 prótons e 143 nêutrons no núcleo. Sua massa é, portanto, $92 + 143 = 235$.

Além do urânio-235, existem na natureza, em maior quantidade, átomos com 92 prótons e 146 nêutrons (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 **nêutrons “rápidos”**).

Já o urânio-235 pode ser fissionado por nêutrons de qualquer energia cinética, preferencialmente os de baixa energia, denominados **nêutrons térmicos** (“lentos”).

Isótopos

São átomos de um mesmo elemento químico que possuem massas diferentes.

Urânio-235 e urânio-238 são **isótopos** de urânio.

Muitos outros elementos apresentam essa característica, como, por exemplo, o **Hidrogênio**, que tem três isótopos: **Hidrogênio**, **Deutério** e **Trítio**.



Hidrogênio
1 próton



Deutério
1 próton
1 nêutron



Trítio
1 próton
2 nêutrons

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 **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, os países que as detêm oferecem empecilhos para que outras nações tenham acesso a elas.

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.

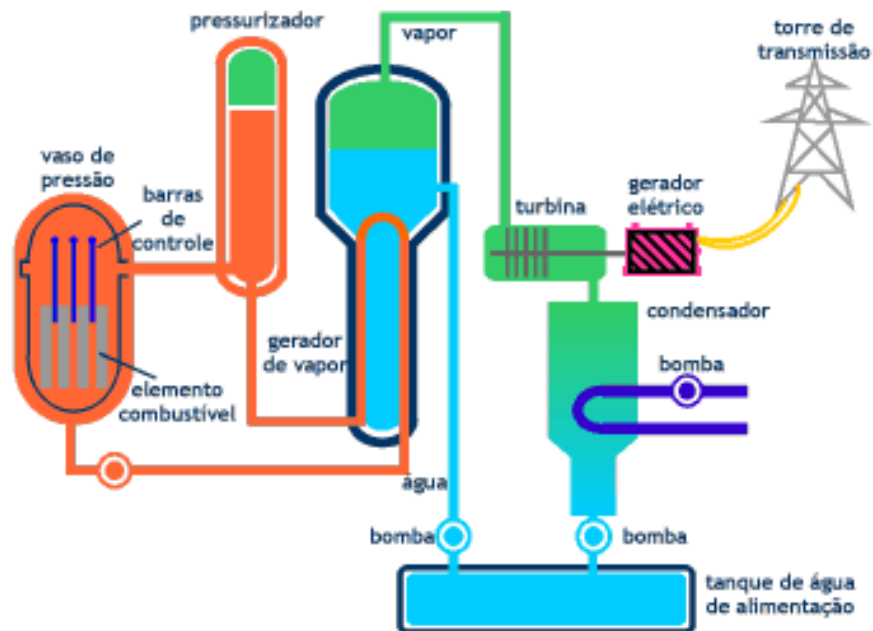


A grande aplicação do controle da reação de fissão nuclear em cadeia é nos **Reatores Nucleares**, para geração de energia elétrica.

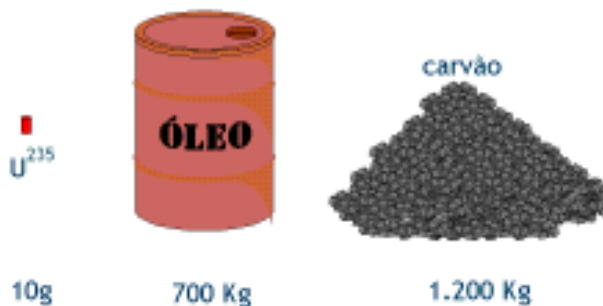
O REATOR NUCLEAR

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 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**.



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).



O Combustível Nuclear

O urânio-235, por analogia, 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 Nuclear.

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.

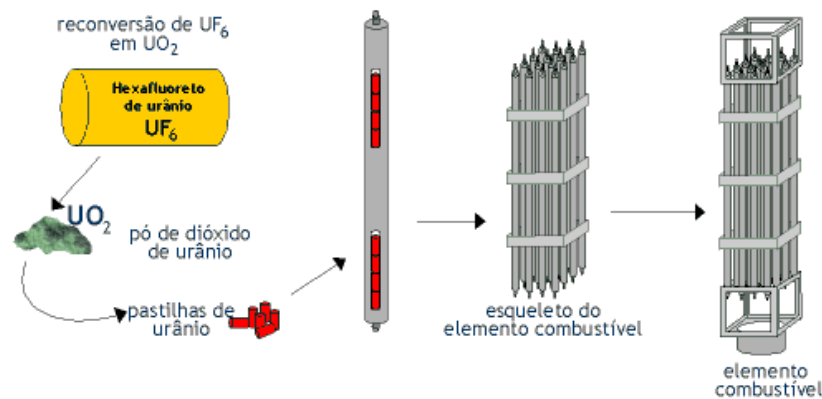
O Reator Nuclear existente em Angra

Um reator nuclear do tipo do que foi construído (**Angra 1**) e do que está em fase de construção (**Angra 2**) é conhecido como **PWR (Pressurized Water Reactor = 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 **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.

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

Barras de Controle

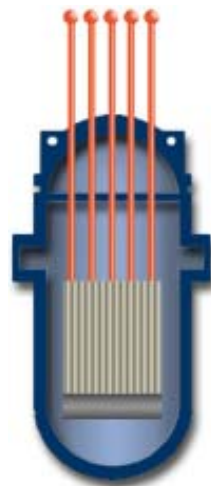
Na estrutura do Elemento Combustível existem tubos guias, por onde podem passar as **Barras de Controle**, geralmente feitas de cádmio, material que absorve nêutrons, com o objetivo de controlar a reação de fissão nuclear em cadeia.

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).

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.

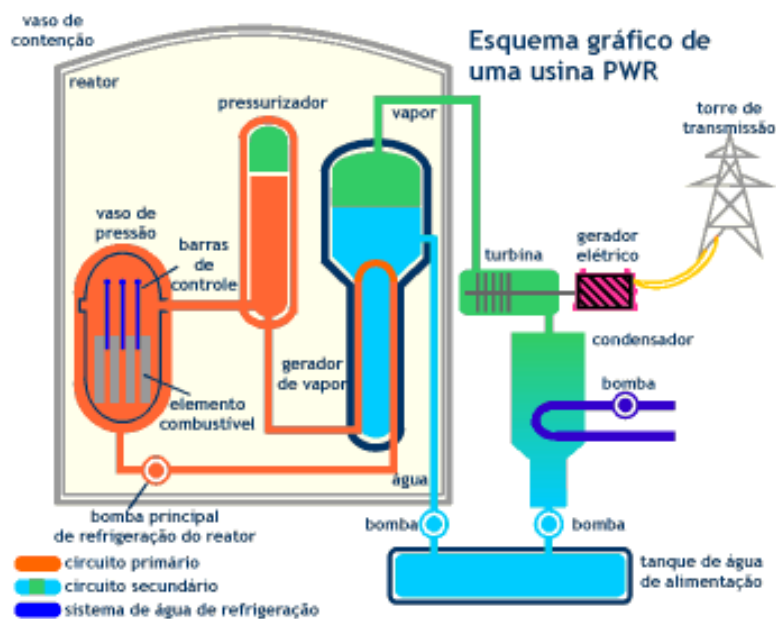
O Vaso de Pressão do Reator é a segunda barreira física que serve para impedir a saída de material radioativo para o meio ambiente.

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

Angra 1 tem dois Geradores de Vapor; Angra 2 terá 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

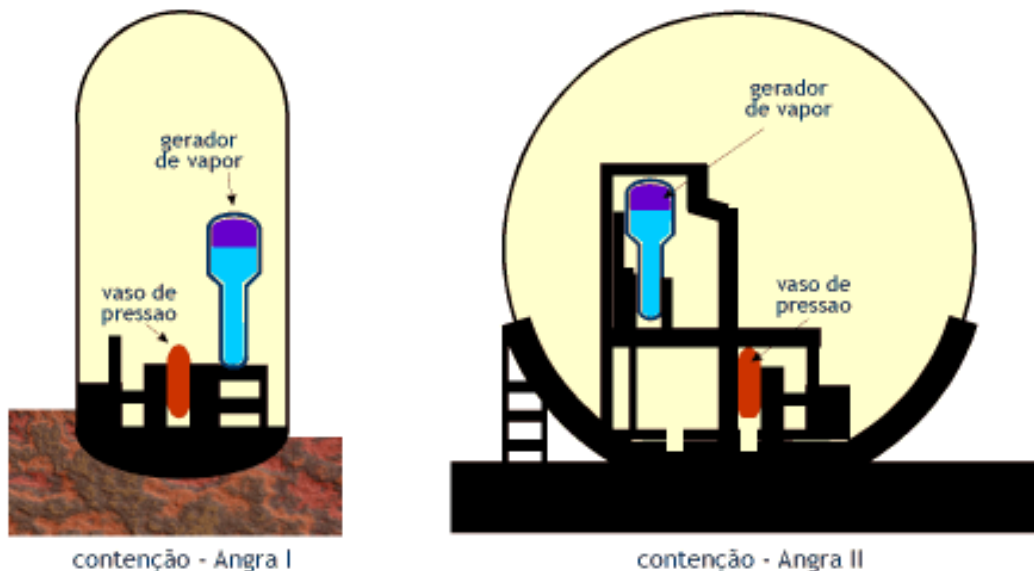
A independência entre o Circuito Primário e o Circuito Secundário tem o objetivo de evitar que, danificando-se uma ou mais varetas, o material radioativo (urânio e produtos de fissão) passe para o Circuito Secundário. É interessante mencionar que a própria água do Circuito Primário é radioativa.

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**.

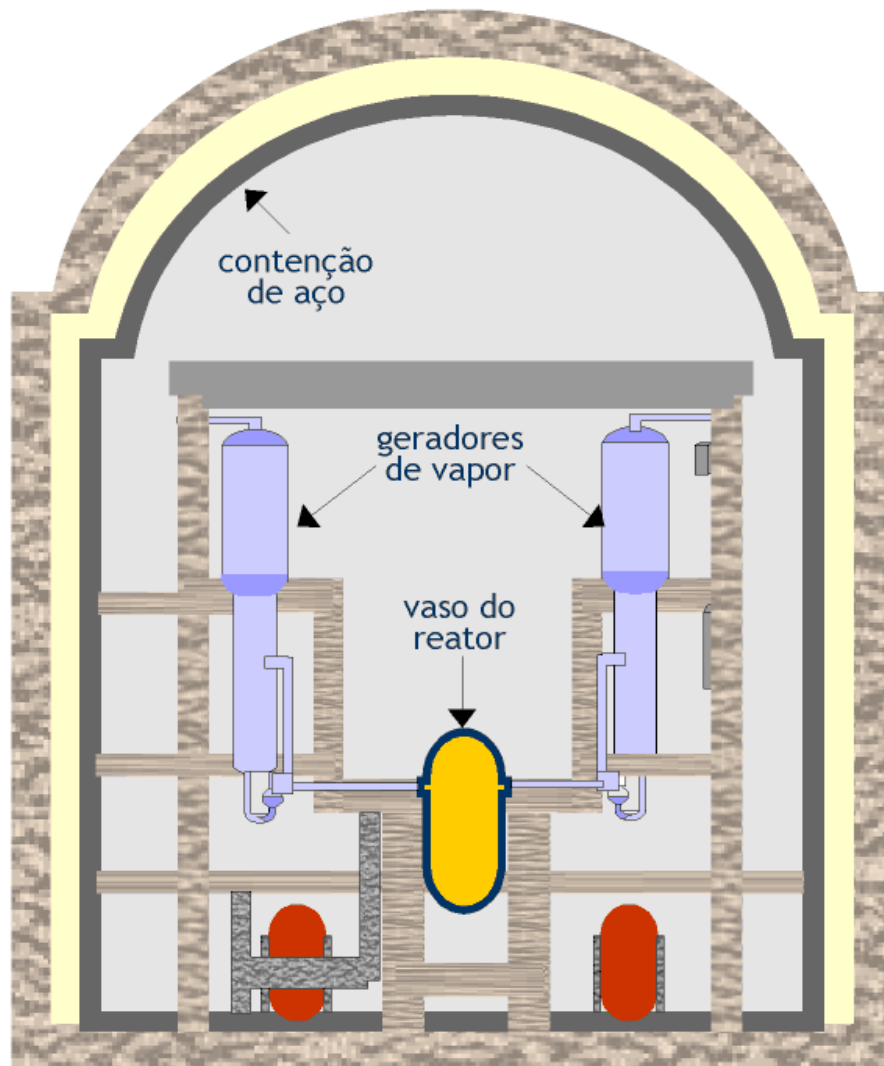
No caso de Angra 1, a **Contenção** tem a forma de um tubo (cilindro). Em Angra 2 é esférica.



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).

A SEGURANÇA DOS REATORES NUCLEARES

Apesar de um Reator Nuclear não poder explodir como uma bomba atômica, 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

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

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 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

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.

Vazamentos em Reatores Nucleares

É claro que existem vazamentos **em** Reatores Nucleares, como existem em outras usinas térmicas. O que **não existe** é vazamento **de** Reatores Nucleares, como muitas vezes se faz crer pela mídia.

As águas de refrigeração do Circuitos Primário e Secundário circulam por meio de **bombas rotativas** (para “ puxar” a água) em sistemas fechados.

Em qualquer instalação industrial e também nos Reatores Nucleares, bombas de refrigeração são colocadas em diques, como um “box” de banheiro, 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: podem 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” ocorridos em 1986 (de água) e em 1995 (falhas em varetas), ambos dentro da instalação, 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. 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.

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

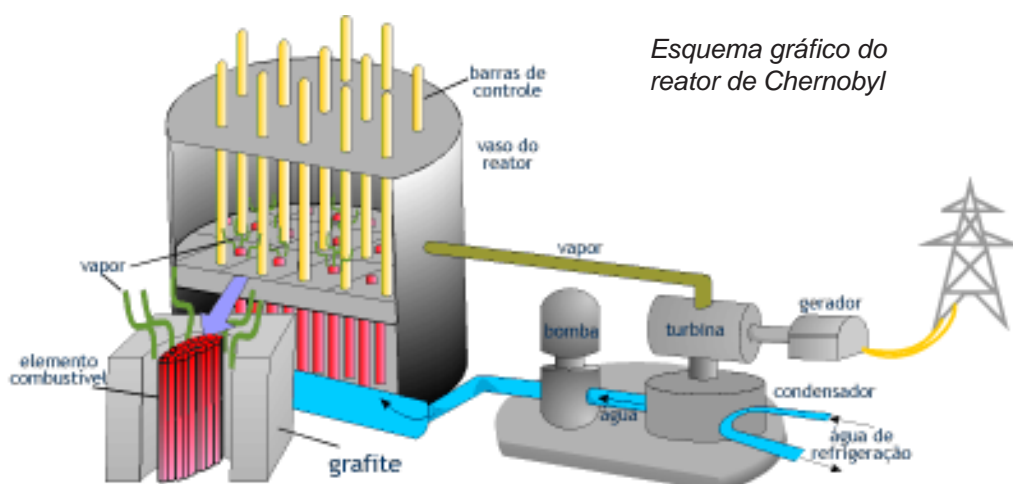
O Reator de Chernobyl é de um tipo diferente dos de Angra.

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, 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. Por isso, o Edifício do Reator também tem proporções grandes. Ele funciona como contenção única, mas não é lacrado. A parte superior do compartimento do Vaso do Reator é uma tampa de concreto.

Esse Reator permite que o **Sistema de Segurança** (desligamento automático) possa ser bloqueado e o Reator passe 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 parando para manutenção periódica anual.

Estavam sendo feitos testes na parte elétrica com o Reator quase parando, isto é, funcionando à baixa potência. Para que isso fosse possível, era preciso desligar o Sistema Automático de Segurança, caso contrário, o Reator poderia parar automaticamente durante os testes, o que eles não desejavam.

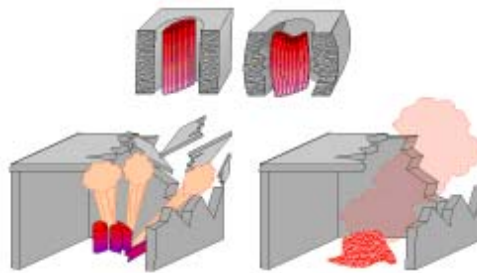
Os reatores deste tipo não podem permanecer muito tempo com potência baixa, porque isso representa riscos muito altos. Ainda assim, a operação continuou desta forma.

Os operadores da Sala de Controle do Reator, que não são treinados segundo as normas internacionais de segurança, não obedeceram aos cuidados mínimos, e assim, acabaram perdendo o controle da operação.

A temperatura aumentou rapidamente e a água que circulava nos tubos foi total e rapidamente transformada em vapor, de forma explosiva. Houve, portanto, uma **explosão de vapor**, que arrebentou os tubos, os elementos combustíveis e os blocos de grafite.

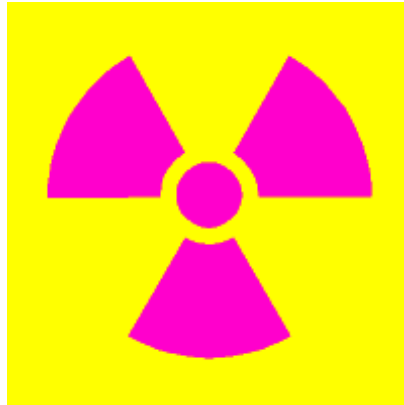
A explosão foi tão violenta que deslocou a **tampa de concreto** e destruiu o teto do prédio, que não foi previsto para agüentar tal impacto, deixando o Reator aberto para o meio ambiente.

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.



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

- **O Sistema Automático de Segurança não pode ser bloqueado para permitir a realização de testes.**
- Os Reatores PWR usam água que, diferentemente do grafite, não entra em combustão quando aquecida.
- **Os Reatores PWR possuem uma Contenção de Aço e uma Contenção de Concreto** em volta da Contenção de Aço.
- O Vaso de Pressão do Reator PWR é muito mais resistente.
- O Edifício do Reator (ou Contenção de Concreto) é uma estrutura de segurança, construída para suportar impactos, e não simplesmente um prédio industrial convencional, como o de Chernobyl.



Símbolo da presença de radiação*.
Deve ser respeitado, e não temido.

** Trata-se da presença de radiação acima dos valores encontrados no meio ambiente, uma vez que a radiação está presente em qualquer lugar do planeta.*