



UFRPE



PROFQUI

PROGRAMA DE MESTRADO  
PROFISSIONAL EM QUÍMICA  
EM REDE NACIONAL

# Aprendendo sobre Fissão Nuclear: Sua História e suas Aplicações

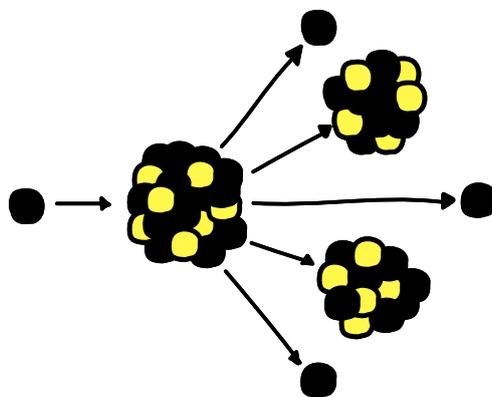


Maxwel da Silva Dias  
Lucas dos Santos Fernandes  
Angela Fernandes Campos

Serra Talhada/PE - 2023

# SUMÁRIO

<b>1. Introdução.....</b>	<b>02</b>
<b>2. O que é Fissão Nuclear?.....</b>	<b>03</b>
<b>3. Um pouco de História da Fissão Nuclear.....</b>	<b>04</b>
<b>4. Aplicações da Fissão Nuclear.....</b>	<b>11</b>
4.1. Bombas Nucleares.....	11
4.2. Energia Nuclear.....	12
4.3. Radiofármacos.....	15
<b>5. Considerações Finais.....</b>	<b>16</b>
<b>6. Para Entender Mais Sobre Fissão Nuclear.....</b>	<b>17</b>
<b>Referências.....</b>	<b>18</b>

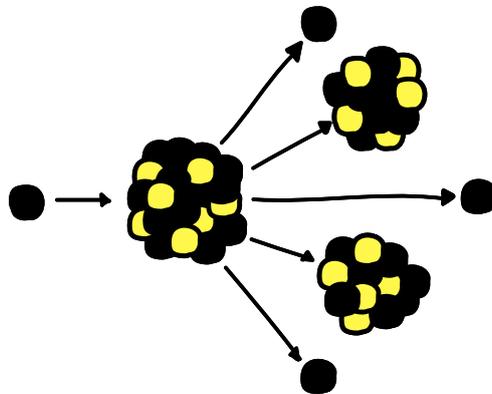


# 1. Introdução

A fissão nuclear pode ser definida como “Uma reação em cadeia em que núcleos grandes e instáveis são quebrados por projéteis - como o nêutron - produzindo núcleos menores e energia”. Em termos de comparação, 10g de urânio-235 liberam a mesma quantidade de energia que 25 toneladas de carvão mineral. Esse fenômeno pode ocorrer de forma espontânea ou induzida através do bombardeamento de núcleos atômicos.

Durante a fissão nuclear são liberados mais nêutrons, que por sua vez, atingem outros núcleos, provocando uma reação em cadeia. A energia da fissão nuclear pode ser utilizada, dentre outras finalidades, para a detonação de bombas atômicas, para a geração de energia elétrica e para a síntese de radiofármacos, medicamentos que contêm um isótopo de um elemento químico radioativo.

As pessoas geralmente têm medo da radioatividade por associá-la apenas a acidentes, tais como: Chernobyl - 1986, Goiânia - 1987, Fukushima - 2011. No entanto, a fissão nuclear é um fenômeno radioativo que apresenta diversas aplicações que contribuem para a qualidade de vida da sociedade.



## 2. O que é Fissão Nuclear?

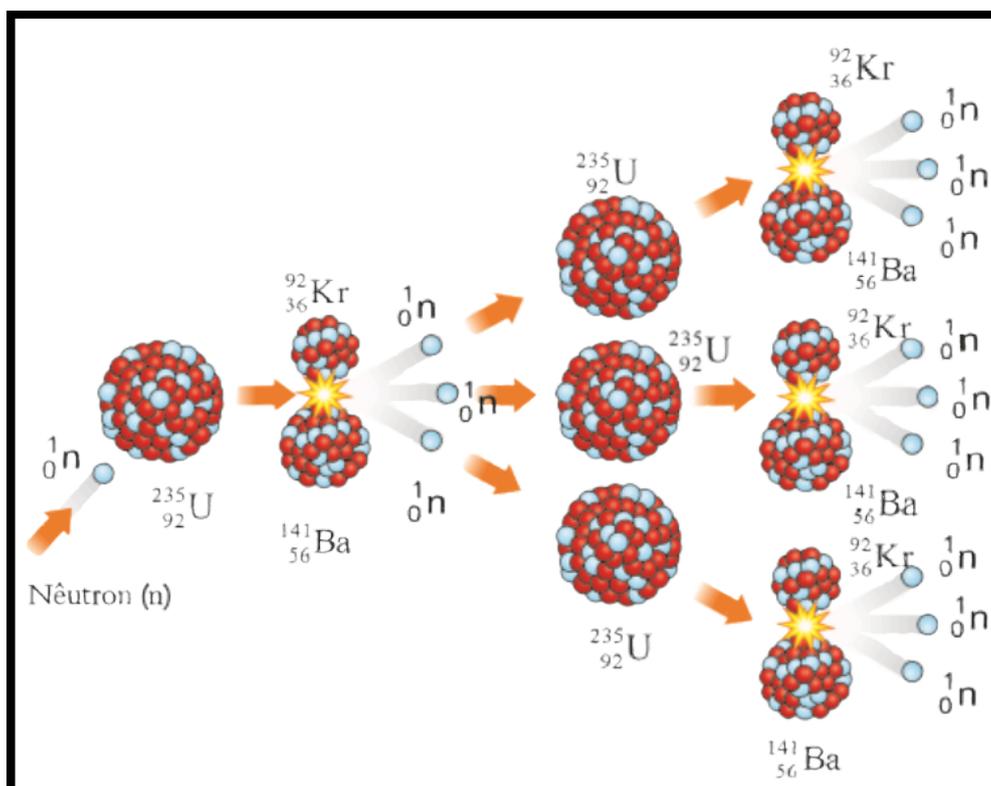
É o processo, espontâneo ou artificial, no qual ocorre a divisão de um núcleo atômico. A fissão nuclear ocorre geralmente quando um projétil (nêutron) atinge o núcleo atômico, que por sua vez se divide em fragmentos mais leves e libera energia. Enquanto que a energia liberada na fissão nuclear pode ser transformada em energia elétrica, os núcleos atômicos mais leves podem ser utilizados na síntese de radiofármacos.

O urânio-235 ( $Z = 92$ ), usado como combustível nuclear, quando atingido por um nêutron divide-se em núcleos atômicos mais leves, tais como criptônio-92 ( $Z = 36$ ) e bário-141 ( $Z = 56$ ) liberando 3 nêutrons e energia, conforme a equação:



Após iniciado, esse processo libera mais nêutrons que atingem outros núcleos gerando uma reação em cadeia que libera uma grande quantidade de energia.

**Figura 1:** Fissão nuclear, uma reação em cadeia.



### 3. Um pouco de História da Fissão Nuclear

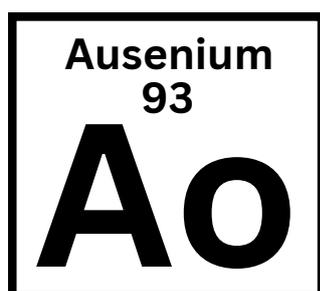
Em 1932, o físico britânico James Chadwick descobriu o nêutron, uma partícula atômica que não possui carga elétrica e apresenta massa semelhante ao próton. A partir de então, os grupos de pesquisa em radioatividade que utilizavam partículas alfa para bombardear núcleos atômicos passaram a utilizar nêutrons como projéteis. Essa ideia foi concebida pelo físico italiano Emilio Segrè (1905-1989), que fazia parte de um grupo de pesquisa em radioatividade liderado por Enrico Fermi na Universidade de Roma.

A partir de 1934, Fermi publicou diversos estudos envolvendo o bombardeamento de urânio ( $Z = 92$ ) com nêutrons desacelerados. Nesses experimentos, ele concluiu que o núcleo de urânio absorveu nêutrons e se transmutou em elementos mais pesados, que ele chamou de ausônio ( $Z = 93$ ) e hespério ( $Z = 94$ ).

**Figura 2:** James Chadwick (1891-1974).



**Figura 3:** Enrico Fermi (1901-1954).



Após as publicações de Fermi, a geoquímica alemã Ida Noddack, contestou a descoberta dos transurânicos e sugeriu que os italianos poderiam ter sintetizado elementos mais leves por meio da quebra do núcleo do urânio. Contudo, sua sugestão recebeu pouca importância.

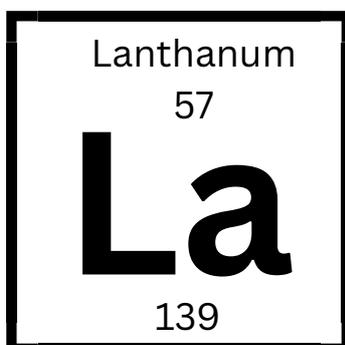
Na Alemanha, o grupo de pesquisa sobre radioatividade liderado pela física Lise Meitner e pelo químico Otto Hahn se propôs a investigar os transurânicos anunciados por Fermi. Empregando os mesmos métodos dos italianos Meitner e Hahn, não só confirmaram a descoberta dos transurânicos 93 e 94, como também anunciaram a descoberta dos elementos químicos de número atômico 95, 96 e 97.

Por sua vez, na França, Irène Joliot-Curie e Paul Savitch relataram a presença de um elemento químico semelhante ao lantânio entre os produtos da irradiação de núcleos de urânio com nêutrons. Eles acreditavam que se tratava de algum tipo de contaminação, pois não havia explicação para a síntese de um elemento de número atômico tão baixo ( $Z = 57$ ).

**Figura 4:** Ida Noddack (1896-1978).



**Figura 5:** Irène Joliot-Curie (1897-1956).



Ao analisarem todos os produtos do bombardeamento de urânio com nêutrons, como os franceses haviam feito, Hahn e Strassmann encontraram um elemento químico que eles acreditaram ser rádio ( $Z = 88$ ).

Nesse momento, Lise Meitner, de origem judia, já havia deixado a Alemanha e se refugiado na Suécia, fugindo da perseguição aos judeus promovida pelo governo nazista alemão. Após estabelecer-se em Estocolmo, Meitner e Hahn continuaram a colaboração científica por meio de cartas.

Em novembro de 1938, Hahn e Meitner realizaram um encontro secreto em Copenhague, onde discutiram a possível formação de rádio a partir do bombardeamento de urânio com nêutrons.

**Figura 6:** Otto Hahn (1879-1968).



**Figura 7:** Lise Meitner (1878-1968).



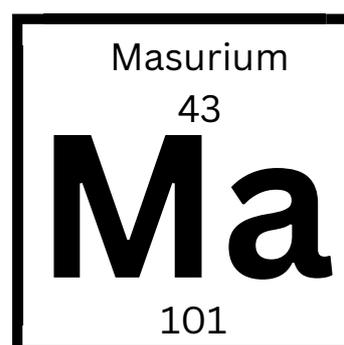
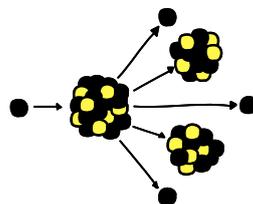
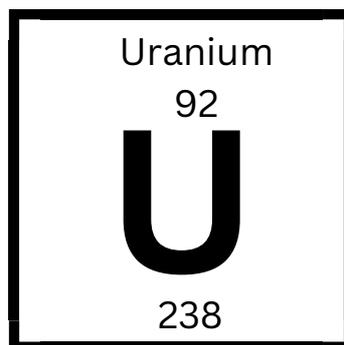
**Figura 8:** Fritz Strassmann (1902-1980).



Ao retornar à Alemanha, Hahn e Strassmann refizeram os experimentos e identificaram a presença de bário ( $Z = 56$ ) entre os produtos do bombardeamento de urânio com nêutrons.

Em dezembro, pouco antes do Natal, Hahn submeteu um artigo no qual relatou que o bombardeamento de urânio com nêutrons havia produzido bário. Em seguida, por meio de uma carta, Hahn solicitou a Meitner uma explicação para a formação de bário. Meitner respondeu que, embora o resultado não fosse impossível, até aquele momento, permanecia inexplicado.

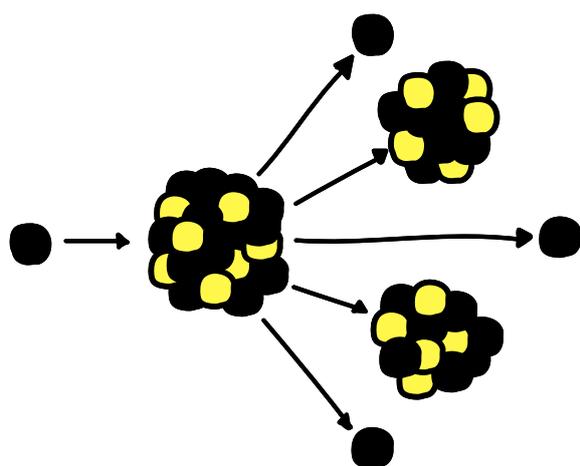
Após a resposta de Meitner, Hahn pediu ao editor da revista a inclusão de mais um parágrafo ao artigo: “A soma dos números de massa  $Ba + Ma$ , por exemplo,  $138 + 101$  dá  $239!$ ”. Nesse trecho, Hahn estabelece que a soma entre as massas do bário e do masúrio (atualmente chamado tecnécio) seria igual à massa do urânio mais um nêutron ( $238 + 1$ ). Dessa forma, pode-se interpretar que a divisão do núcleo de urânio em função da colisão com um nêutron poderia gerar bário e masúrio.



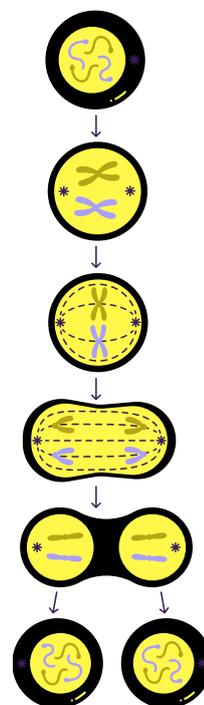
Algumas semanas após a publicação de Hahn e Strassmann, Meitner e o físico Otto Frisch, que era seu sobrinho, apresentaram uma explicação para a divisão do núcleo de urânio, comparando-o a uma gota de água que pode se fracionar através da quebra da tensão superficial. Posteriormente, Frisch nomeou esse fenômeno de fissão nuclear, em analogia à fissão celular.

Apesar das contribuições de Meitner, Strassmann e Frisch, o reconhecimento pela descoberta da fissão nuclear, pelo menos inicialmente, foi atribuído apenas a Hahn, que foi laureado individualmente com o Prêmio Nobel de Química em 1944.

**Figura 9:** Otto Frisch (1904-1979).



Fissão nuclear



Fissão celular

Com o reconhecimento da fissão nuclear, surgiram questionamentos em relação à existência dos transurânicos anunciados por Fermi e por Meitner e Hahn. Após explicarem a fissão, Meitner e Frisch anunciaram que a fissão nuclear do urânio produz elementos mais leves e, portanto, conhecidos.

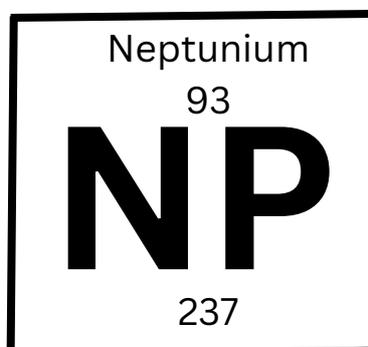
De fato, a primeira síntese bem-sucedida de um elemento transurânico ocorreu somente em 1940, quando os físicos americanos Edwin McMillan e Philip Abelson descobriram o neptúnio ( $Z = 93$ ) entre os produtos resultantes do bombardeamento de núcleos de urânio com nêutrons.

Enquanto desenvolvia as bases teóricas da fissão nuclear, Meitner estabeleceu uma relação entre a energia liberada e a equação de Einstein:  $E=mc^2$ . Foi nesse contexto que a relação entre energia e massa emergiu 34 anos após a sua concepção em 1905.

**Figura 10:** Edwin McMillan (1907-1991).



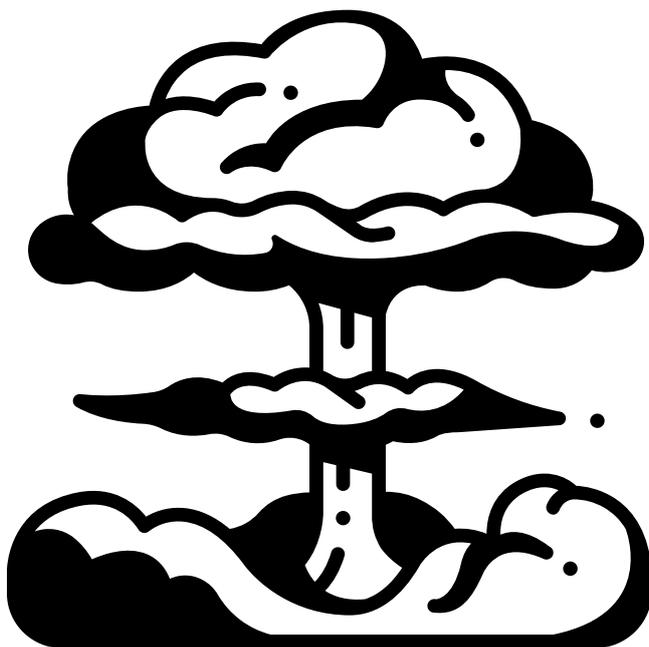
**Figura 11:** Philip Abelson (1913-2004).



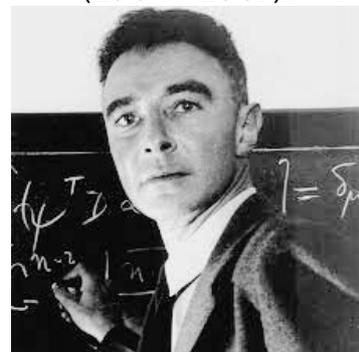
# 4. Aplicações da Fissão Nuclear

## 4. 1. Bombas Nucleares

Os primeiros dispositivos desenvolvidos utilizando o princípio da fissão nuclear, infelizmente, foram as bombas atômicas. Uma bomba atômica é um dispositivo programado para explodir e liberar energia, principalmente na forma de calor. Dessa forma, a reação de fissão nuclear em cadeia deve ocorrer de forma rápida. Para isso, é necessário obter a massa crítica concentrada de um radioisótopo físsil, como o urânio-235. Durante a segunda guerra mundial (1939-1945), o governo dos Estados Unidos criou o projeto Manhattan para o desenvolvimento de bombas atômicas de fissão nuclear. O físico americano Robert Oppenheimer foi creditado como pai da bomba atômica por ter liderado o Laboratório Nacional de Los Alamos, onde o projeto foi desenvolvido. Nesse contexto, duas bombas nucleares foram lançadas sobre o Japão em 1945 e marcaram o fim do conflito mundial. A primeira, denominada little boy (garotinho), foi lançada na cidade de Hiroshima em 6 de agosto e teve como elemento físsil o urânio-235. A segunda, chamada de fat man (homem gordo), foi detonada no dia 9 do mesmo mês em Nagasaki e teve como elemento físsil o plutônio-239.



**Figura 12:** Robert Oppenheimer (1904 - 1967).



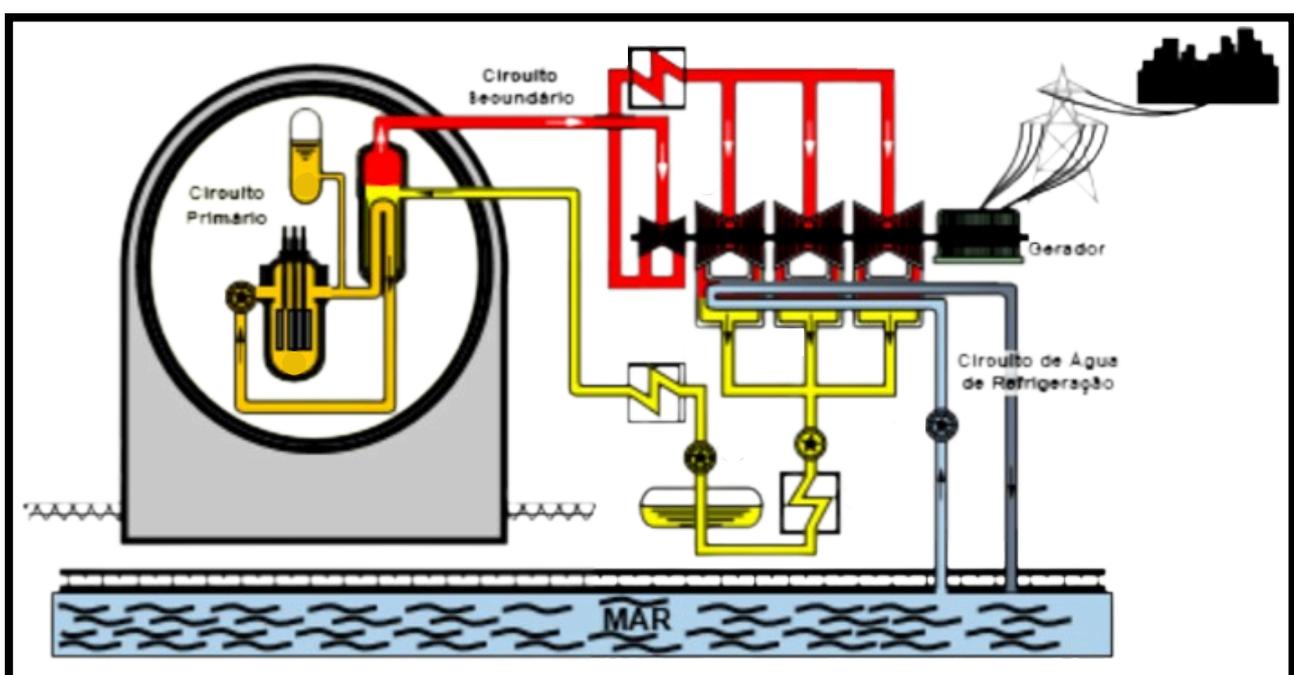
## 4.2. Energia Nuclear

A construção de uma usina nuclear envolve vários aspectos relativos à segurança que envolvem planejamento, construção civil, montagem dos equipamentos, operação e, por fim, o descarte dos rejeitos radioativos. O Brasil, atualmente, tem em operação duas usinas nucleares chamadas de Angra 1 e Angra 2, uma terceira (Angra 3) está em construção.

Uma usina nuclear é movida à combustível físsil, geralmente urânio-235 ou plutônio-239. Inicialmente o combustível físsil é comprimido em pastilhas e inserido em varetas que serão posicionadas dentro do reator nuclear. Quando um nêutron é disparado começa a fissão nuclear do combustível físsil que libera energia, principalmente na forma de calor.

O calor aquece uma porção de água que circula dentro do reator, mas não entra em contato com o combustível físsil. Essa água superaquecida circula por um sistema fechado e troca calor com outra porção de água que está fora do reator e a aquece até transformá-la em vapor. Esse vapor movimenta grandes turbinas que geram energia elétrica que é distribuída para as residências. Posteriormente, o vapor é condensado por outra porção de água externa, geralmente, oriunda de rios, lagos, oceanos etc.

**Figura 13:** Esquema do funcionamento de um reator nuclear.

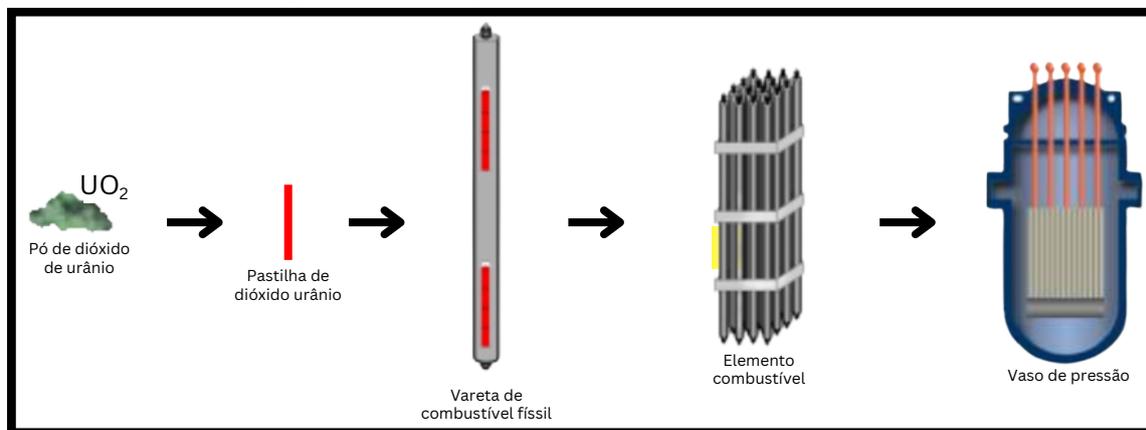


Fonte: Adaptado de Cardoso (2012).

## Alguns componentes do reator nuclear:

A vareta de combustível é a primeira barreira que impede a saída de material radioativo para o meio ambiente. As varetas, contendo o urânio, conhecidas como varetas de combustível, são montadas em feixes, numa estrutura denominada elemento combustível.

**Figura 14:** Componentes de um reator nuclear.

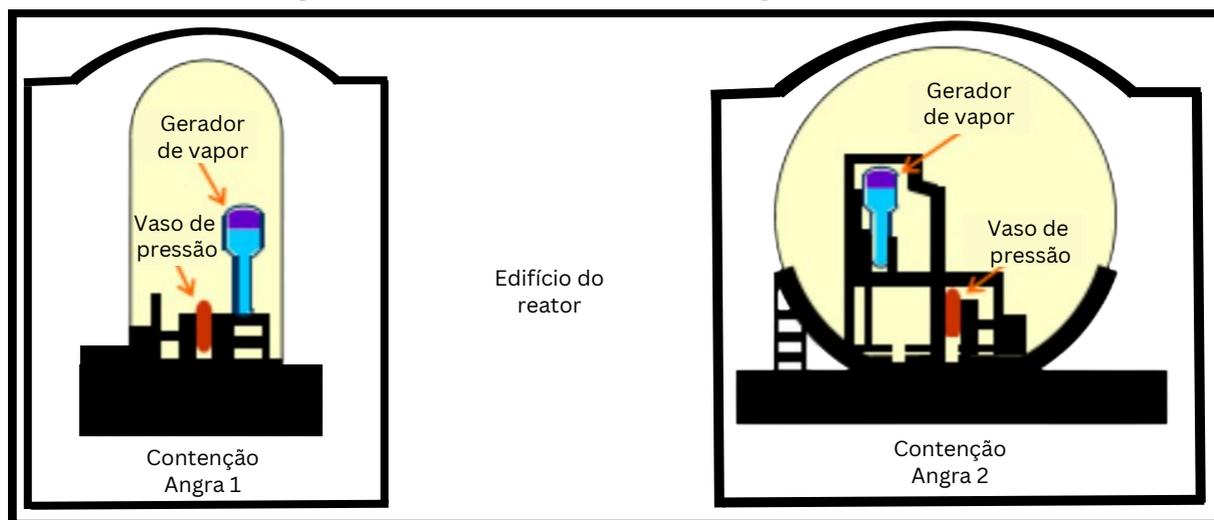


Fonte: Adaptado de Cardoso (2012).

O vaso de pressão do reator é a segunda barreira física que impede a saída de material radioativo para o meio ambiente. O elemento combustível é posicionado dentro de um grande vaso de aço, com “paredes”, no caso de Angra 1, de cerca de 20 cm e, no caso de Angra 2, de 25 cm.

A contenção é a terceira barreira que impede a saída de material radioativo para o meio ambiente. 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. No caso de Angra 1, a contenção tem a forma de um tubo cilíndrico. Em Angra 2, a contenção é esférica.

**Figura 15:** Edifício do reator em Angra 1 e 2.



Fonte: Adaptado de Cardoso (2012).

O edifício do reator, construído em concreto e envolvendo a contenção de aço, é a quarta barreira física que impede a saída de material radioativo para o meio ambiente. Além disso, protege o reator de impactos externos.

Um dos maiores problemas associados a geração de energia nuclear é o destino dos resíduos radioativos. Após a vida útil, as varetas de combustível físsil são substituídas por novas. As varetas usadas contêm radioisótopos e por esse motivo não podem ser descartadas em aterros sanitários. Além das varetas de combustível nuclear, todos os objetos (roupas, calçados, luvas etc.) usados pelos operadores que aproximaram-se do reator nuclear podem estar contaminados, por isso, também não podem ser descartados no lixo "comum". As varetas usadas são armazenadas no fundo de um reservatório de água para evitar a saída de radioisótopos para o meio ambiente. Os demais resíduos radioativos são armazenados em toneis e caixas lacradas em depósitos. Todos os resíduos radioativos produzidos durante a geração de energia são armazenados dentro da usina nuclear.

### **Vantagens:**

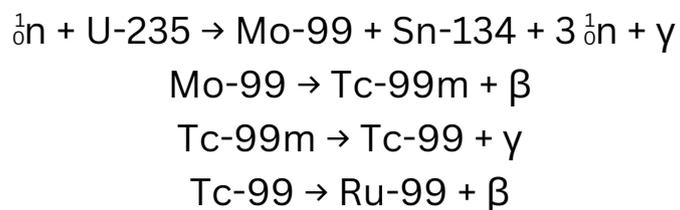
- ✓ Produção de baixo custo;
- ✓ Não consome combustível fóssil;
- ✓ Não produz gases do efeito estufa;
- ✓ Baixo consumo de combustível físsil;
- ✓ Alta eficiência na produção de energia;
- ✓ Independente de condições climáticas;
- ✓ Demanda pouco espaço geográfico para sua instalação;
- ✓ O Brasil é um país rico em urânio, que pode ser beneficiado para produzir combustível físsil.

### **Desvantagens:**

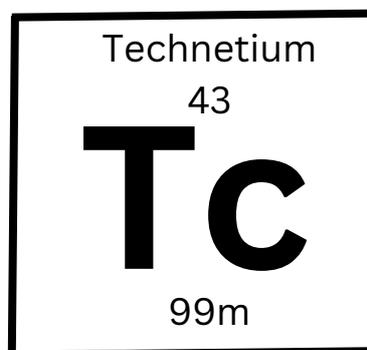
- ✓ Energia de fonte não renovável;
- ✓ Elevado custo do megawatt-hora;
- ✓ Produção de resíduos radioativos;
- ✓ Perigo de acidentes envolvendo a radiação nuclear;
- ✓ Elevado custo de instalação e manutenção;
- ✓ Aquecimento do ecossistema aquático causado pela água utilizada no sistema de resfriamento, que retorna ao rio, lago, oceano etc.

## 4.3. Radiofármacos

No campo da Medicina, a principal aplicação da fissão nuclear consiste na síntese de tecnécio-99m, um radiofármaco utilizado na medicina diagnóstica de imagem por ser um emissor de radiação gama pura de baixa energia (140keV). A fissão nuclear do urânio-235 produz molibdênio-99, que por sua vez, produz tecnécio-99m ao emitir uma partícula beta ( ${}_{-1}^0\beta$ ). O tecnécio-99m é metaestável e emite radiação gama ( $\gamma$ ) formando assim tecnécio-99. Por fim, o tecnécio-99 sofre decaimento e gera o núcleo estável de rutênio por meio da emissão de mais uma partícula beta. Essa sequência de reações nucleares pode ser representada, de forma simplificada, por meio das seguintes equações:



O tecnécio-99m compõe a fórmula de mais de 30 radiofármacos. O pertecnetato de sódio ( $\text{NaTcO}_4$ ) é o principal radiofármaco obtido a partir do tecnécio-99m. A radiação gama emitida durante a transição entre o Tc-99m e o Tc-99 é ideal para o diagnóstico por imagem, pois permite captar imagens de excelente resolução. Além disso, o período de decaimento do Tc-99m é de apenas 6h, o que minimiza o tempo de exposição a radiação gama pelo paciente.



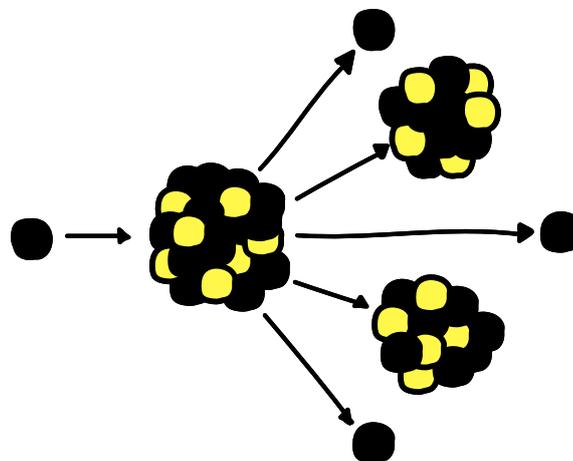
# 5. Considerações Finais

Conhecendo um pouco da história da fissão nuclear e suas aplicações, é possível beneficiar-se da radioatividade sem temê-la. A descoberta da fissão nuclear envolveu homens e mulheres, que de forma coletiva, estabeleceram as bases teóricas e experimentais desse fenômeno radioativo.

No Brasil, em 2021, as usinas nucleares Angra 1 e 2, foram responsáveis por 2,2% da produção energética do país, isso equivale a 14,4 TWh (terawatt-hora). Quando Angra 3 for concluída, esse número irá aumentar. Existem estudos para a implantação de outras usinas nucleares no Brasil, um exemplo disso é discussão sobre a construção de uma usina nuclear às margens do Rio São Francisco, na cidade de Itacuruba, no interior de Pernambuco.

O tecnécio-99m é um radioisótopo, proveniente da fissão nuclear do Urânio-235, utilizado em cerca de 80% dos procedimentos adotados na medicina nuclear. O pertecnetato de sódio, radiofármaco à base de tecnécio-99m, é empregado em exames de imagem da tireoide, das glândulas salivares e do coração.

Por fim, espera-se que esta cartilha possa contribuir para ressignificar o papel da fissão nuclear no desenvolvimento da Ciência e de Tecnologias que beneficiam a sociedade.



# 6. Para Entender Mais Sobre Fissão Nuclear

## Livros

A Energia Nuclear – Eliezer de Moura Cardoso [https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/centro-de-informacoes-nucleares/material-didatico-1/apostila\\_educativa\\_aplicacoes\\_energia-nuclear-e-suas-aplicacoes.pdf](https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/centro-de-informacoes-nucleares/material-didatico-1/apostila_educativa_aplicacoes_energia-nuclear-e-suas-aplicacoes.pdf)

Aplicações da Energia Nuclear na Saúde – Regina Pinto de Carvalho e Silvia Maria Velasques de Oliveira <https://www.gov.br/cnen/pt-br/material-divulgacao-videos-imagens-publicacoes/publicacoes-1/aplicacoesenergianuclearnaude.pdf>

História da Energia Nuclear – Jader Benuzzi Martins <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/centro-de-informacoes-nucleares/material-didatico-1/historia-da-energia-nuclear.pdf>

Radioatividade e Meio Ambiente: os Átomos Instáveis da Natureza – Kátia Aparecida da Silva Aquino e Fabiana da Silva Aquino <https://edit.s bq.org.br/anexos/radioatividade-meio-ambiente.pdf>

## Filmes e Séries

Oppenheimer (2023) – Christopher Nolan -

Chernobyl (2019) – Johan Renck - HBO

## Youtube

Entramos na USINA NUCLEAR de ANGRA!!! – Manual do Mundo <https://www.youtube.com/watch?v=ZsR-2zkEwCM>

Energia Nuclear em 2 minutos – Eletronuclear TV <https://www.youtube.com/watch?v=OzxiQdmTD58>

REAÇÃO em CADEIA: a HISTÓRIA da BOMBA ATÔMICA – Ciência Todo Dia <https://www.youtube.com/watch?v=6fsuiVHtEfc>

# Referências

CARDOSO, E. M. **Energia Nuclear e Suas Aplicações**. 3 ed. Rio de Janeiro: CNEN, 2012.

CARVALHO, R. P.; OLIVEIRA, S. M. V. **Aplicações da Energia Nuclear na Saúde**. São Paulo: SBPC; Viena, IAEA, 2017.

HOOK, E. B. Dissonância interdisciplinar e prematuridade: a sugestão de Ida Noddack de fissão nuclear. In: HOOK, E. B. (Org.). **Prematuridade na Descoberta Científica**. São Paulo: Perspectiva, 2007. p. 201-237.

OKUNO, E. **Radiação: efeitos, riscos e benefícios**. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

PASSOS, M. H. S.; SOUZA, A. A. **Química Nuclear e Radioatividade**. Campinas: Átomo, 2 ed, 2012.

RIBEIRO, M. J. S.; FERNANDES, L. S. Sequência didática baseada em elementos da história e filosofia da ciência para o ensino de fissão nuclear. **Educação Química em Ponto de Vista**. v. 6. p. 1-17. 2022.