

# Aula 13: Fissão Nuclear

## Introdução à Física Nuclear

Prof. Marcelo A. Leigui de Oliveira

Centro de Ciências Naturais e Humanas  
Universidade Federal do ABC  
Av. dos Estados, 5001  
09210-580 Santo André-SP

19 de novembro de 2024



Universidade Federal do ABC

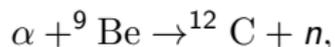
- 1 **Introdução histórica**
- 2 Fundamentos
- 3 Nêutrons
- 4 Reatores de fissão
- 5 Reatores no mundo
- 6 Tipos de reatores
- 7 Exercícios

# Introdução histórica



Figura: Da esquerda para a direita: Walter Bothe, o casal Curie-Joliot e James Chadwick.

**(1930)** W. Bothe e H. Becker descobrem uma radiação penetrante de carga neutra no bombardeamento  $\alpha$  do berílio:



que foi, inicialmente, interpretada como radiação  $\gamma$ .

# Introdução histórica



Figura: Da esquerda para a direita: Walter Bothe, o casal Curie-Joliot e James Chadwick.

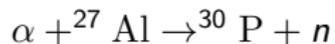
**(1932)** O casal I. Curie e F. Joliot verifica que essa radiação podia ejetar prótons com alta velocidade. J. Chadwick demonstra que a radiação penetrante deveria ter massa, com um valor muito próximo à do próton: descoberta do nêutron.

# Introdução histórica



Figura: Da esquerda para a direita: Walter Bothe, o casal Curie-Joliot e James Chadwick.

**(1935)** Descoberta da radioatividade artificial pelo casal Joliot-Curie:



# Introdução histórica



Figura: Da esquerda para a direita: Otto Hahn, Fritz Strassmann e Lise Meitner.

**(1938)** Hahn, Strassmann e Meitner descobrem a fissão:



após uma detalhada análise química, descobrindo os fragmentos.

# Introdução histórica

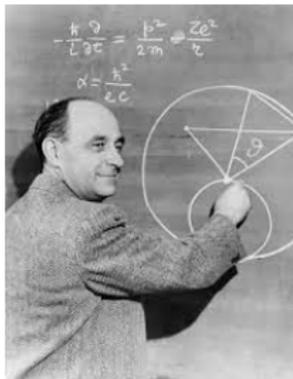


Figura: Enrico Fermi.

**(1942)** Fermi monta, na Universidade de Chicago, o primeiro reator de fissão controlada.

- 1 Introdução histórica
- 2 Fundamentos**
- 3 Nêutrons
- 4 Reatores de fissão
- 5 Reatores no mundo
- 6 Tipos de reatores
- 7 Exercícios

# Fundamentos

Fissão: repulsão eletrostática  $\times$  tensão superficial (analogia com uma gota líquida eletricamente carregada)

## Fundamentos

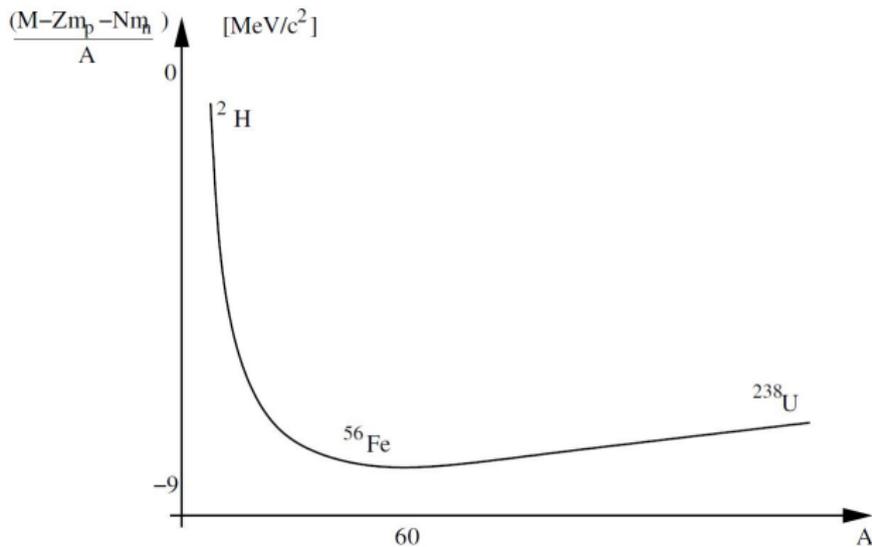


Figura: Diferença de massa por núcleon.

## Fundamentos

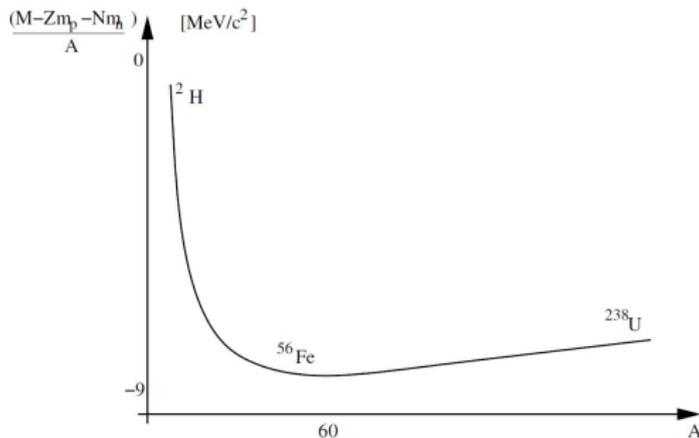


Figura: Diferença de massa por núcleon.

Núcleos pesados ( $Z > 92$ ) sofrem fissão espontânea.

## Fundamentos

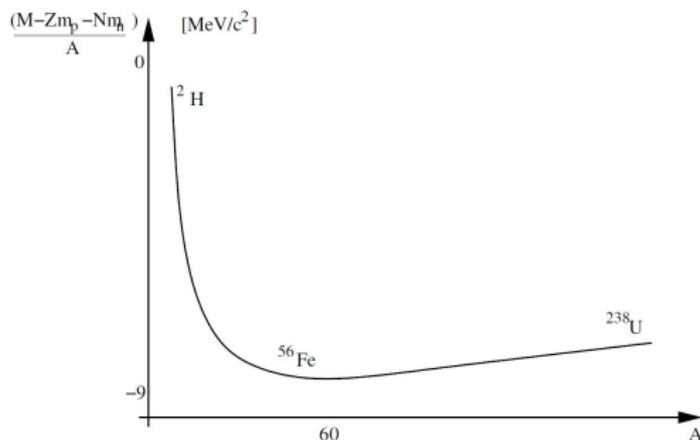


Figura: Diferença de massa por núcleon.

Núcleos pesados ( $Z > 92$ ) sofrem fissão espontânea ( $\Rightarrow$  limite superior na tabela periódica).

## Fundamentos

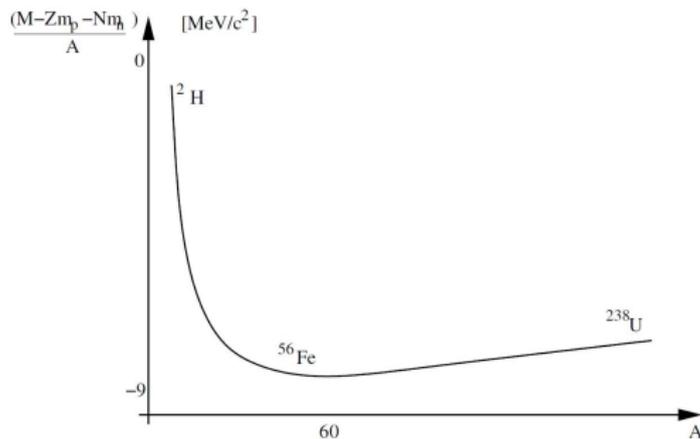
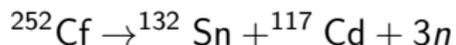


Figura: Diferença de massa por núcleon.

Núcleos pesados ( $Z > 92$ ) sofrem fissão espontânea ( $\Rightarrow$  limite superior na tabela periódica):



## Fundamentos

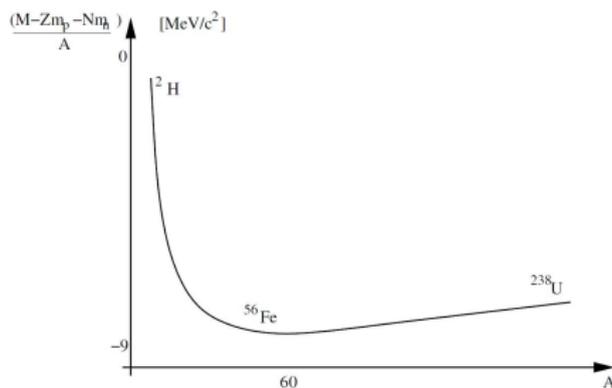
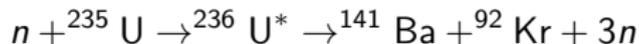


Figura: Diferença de massa por núcleon.

Núcleos pesados ( $Z > 92$ ) sofrem fissão espontânea ( $\Rightarrow$  limite superior na tabela periódica):

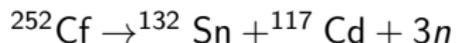


ou a fissão pode ser induzida pela captura de nêutrons ( $\Rightarrow$  processo explorado nos reatores):

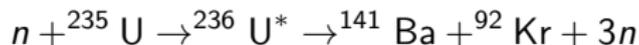


# Fundamentos

Núcleos pesados ( $Z > 92$ ) sofrem fissão espontânea ( $\Rightarrow$  limite superior na tabela periódica):



ou a fissão pode ser induzida pela captura de nêutrons ( $\Rightarrow$  processo explorado nos reatores):



A energia cinética disponível pode ser calculada pela diferença de massas (vide exercício 1); a repulsão eletrostática ejeta os fragmentos em sentidos opostos.

# Fundamentos

Energia de ativação (ou energia crítica): energia necessária para provocar a fissão.

# Fundamentos

Energia de ativação (ou energia crítica): energia necessária para provocar a fissão.

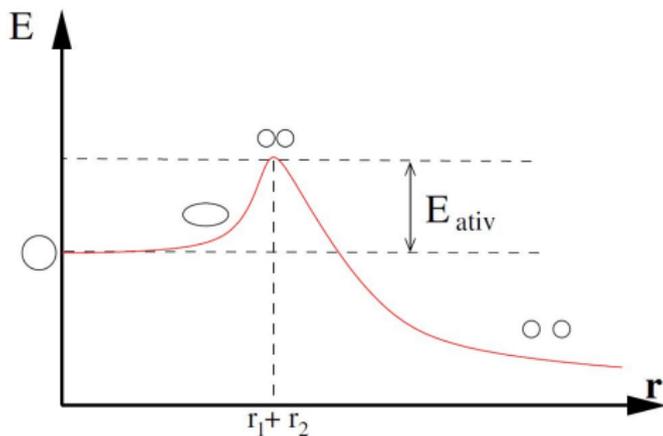


Figura: Energia de ativação.

# Fundamentos

Energia de ativação (ou energia crítica): energia necessária para provocar a fissão.

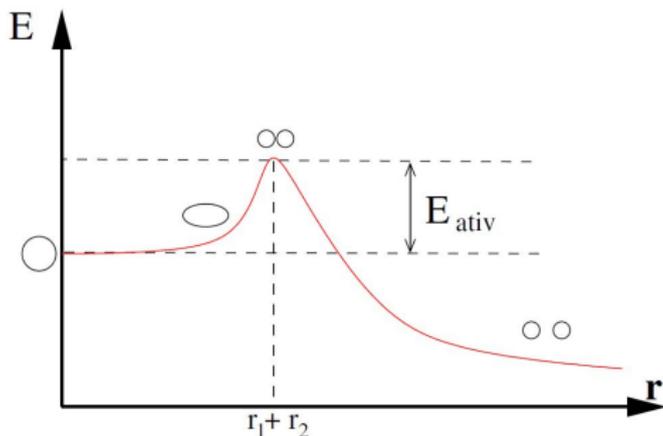


Figura: Energia de ativação.

No caso da fissão induzida, a energia de ativação é fornecida pelo nêutron. No caso da fissão espontânea, a emissão ocorre por tunelamento.

# Fundamentos

Energia de ativação (ou energia crítica): energia necessária para provocar a fissão.

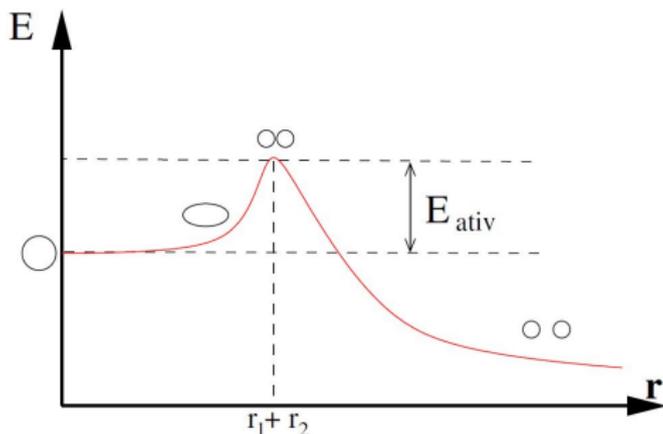


Figura: Energia de ativação.

No caso da fissão induzida, a energia de ativação é fornecida pelo nêutron. No caso da fissão espontânea, a emissão ocorre por tunelamento. Em alguns casos, a barreira de potencial pode ser muito reduzida (ou inexistente) e a meia-vida é muito curta.

# Fundamentos

Se o núcleo se deforma como um elipsóide, mantendo o volume constante:

$$\Delta E = \Delta E_{sup} + \Delta E_{coul}$$

# Fundamentos

Se o núcleo se deforma como um elipsóide, mantendo o volume constante:

$$\Delta E = \Delta E_{sup} + \Delta E_{coul} = -a_s A^{2/3} \left( \frac{2}{5} \varepsilon^2 \right) - a_c Z^2 A^{-1/3} \left( -\frac{1}{5} \varepsilon^2 \right)$$

# Fundamentos

Se o núcleo se deforma como um elipsóide, mantendo o volume constante:

$$\Delta E = \Delta E_{sup} + \Delta E_{coul} = -a_s A^{2/3} \left( \frac{2}{5} \varepsilon^2 \right) - a_c Z^2 A^{-1/3} \left( -\frac{1}{5} \varepsilon^2 \right),$$

onde  $\varepsilon$  é a excentricidade da elipse [ref.: Bohr & Wheeler, *Phys. Rev.*, **56** (1939) 426-450].

# Fundamentos

Se o núcleo se deforma como um elipsóide, mantendo o volume constante:

$$\Delta E = \Delta E_{sup} + \Delta E_{coul} = -a_s A^{2/3} \left( \frac{2}{5} \varepsilon^2 \right) - a_c Z^2 A^{-1/3} \left( -\frac{1}{5} \varepsilon^2 \right),$$

onde  $\varepsilon$  é a excentricidade da elipse [ref.: Bohr & Wheeler, *Phys. Rev.*, **56** (1939) 426-450].

No limite  $\Delta E = 0$ :

$$\frac{Z^2}{A} \approx \frac{2a_s}{a_c}$$

# Fundamentos

Se o núcleo se deforma como um elipsóide, mantendo o volume constante:

$$\Delta E = \Delta E_{sup} + \Delta E_{coul} = -a_s A^{2/3} \left( \frac{2}{5} \varepsilon^2 \right) - a_c Z^2 A^{-1/3} \left( -\frac{1}{5} \varepsilon^2 \right),$$

onde  $\varepsilon$  é a excentricidade da elipse [ref.: Bohr & Wheeler, *Phys. Rev.*, **56** (1939) 426-450].

No limite  $\Delta E = 0$ :

$$\frac{Z^2}{A} \approx \frac{2a_s}{a_c} \approx 50$$

# Fundamentos

Se o núcleo se deforma como um elipsóide, mantendo o volume constante:

$$\Delta E = \Delta E_{sup} + \Delta E_{coul} = -a_s A^{2/3} \left( \frac{2}{5} \varepsilon^2 \right) - a_c Z^2 A^{-1/3} \left( -\frac{1}{5} \varepsilon^2 \right),$$

onde  $\varepsilon$  é a excentricidade da elipse [ref.: Bohr & Wheeler, *Phys. Rev.*, **56** (1939) 426-450].

No limite  $\Delta E = 0$ :

$$\frac{Z^2}{A} \approx \frac{2a_s}{a_c} \approx 50$$

Denomina-se, assim, o *parâmetro de fissionabilidade*:

$$\frac{Z^2}{A} \geq 50$$

## Fundamentos

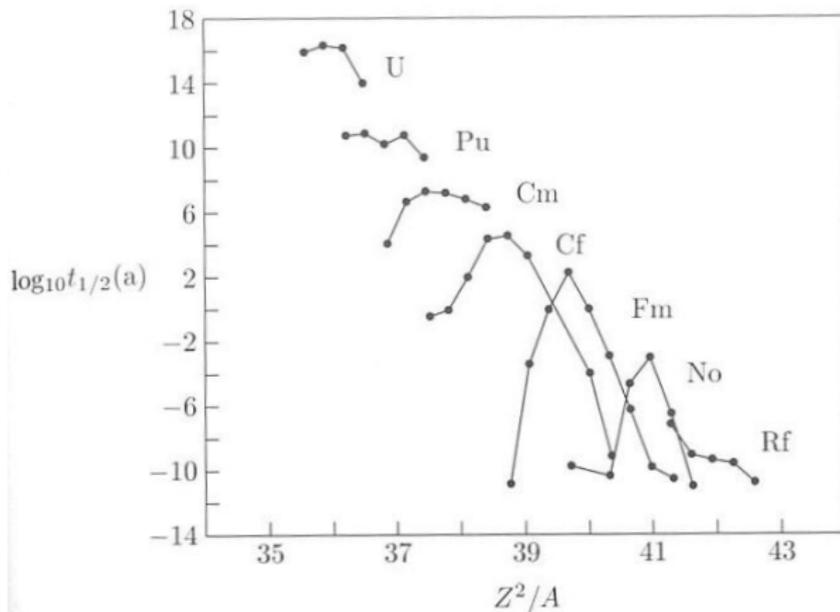


Figura: Meia-vida de núclídeos em função do parâmetro de fissionabilidade.

# Fundamentos

Faz-se a distinção:

- fissionável: núclídeos que sofrem fissão induzida por nêutrons com  $K > 0$ ;

# Fundamentos

Faz-se a distinção:

- fissionável: núclídeos que sofrem fissão induzida por nêutrons com  $K > 0$ ;
- físsil: núclídeos que sofrem fissão induzida por nêutrons com  $K = 0$ ;

# Fundamentos

Faz-se a distinção:

- fissionável: núclídeos que sofrem fissão induzida por nêutrons com  $K > 0$ ;
- físsil: núclídeos que sofrem fissão induzida por nêutrons com  $K = 0$ ;
- fértil: pode ser convertido em fissionável por ativação com nêutrons.

# Fundamentos

Agora, seja a captura de nêutron pelos isótopos de urânio.

# Fundamentos

Agora, seja a captura de nêutron pelos isótopos de urânio. A energia de excitação do nuclídeo resultante ( $^{A+1}U$ ), isto é, após a captura é:

- para o  $^{236}U$  :  $E_{excit} = 6,4 \text{ MeV} > E_{ativ} = 5,3 \text{ MeV}$ ;

# Fundamentos

Agora, seja a captura de nêutron pelos isótopos de urânio. A energia de excitação do nuclídeo resultante ( $^{A+1}U$ ), isto é, após a captura é:

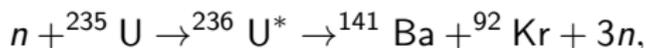
- para o  $^{236}U$  :  $E_{excit} = 6,4 \text{ MeV} > E_{ativ} = 5,3 \text{ MeV}$ ;
- para o  $^{239}U$  :  $E_{excit} = 5,2 \text{ MeV} < E_{ativ} = 5,9 \text{ MeV}$ .

# Fundamentos

Agora, seja a captura de nêutron pelos isótopos de urânio. A energia de excitação do nuclídeo resultante ( $A^{+1}U$ ), isto é, após a captura é:

- para o  $^{236}\text{U}$  :  $E_{excit} = 6,4 \text{ MeV} > E_{ativ} = 5,3 \text{ MeV}$ ;
- para o  $^{239}\text{U}$  :  $E_{excit} = 5,2 \text{ MeV} < E_{ativ} = 5,9 \text{ MeV}$ .

Assim, tem-se, tipicamente:

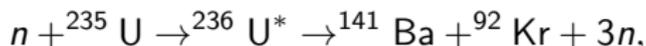


# Fundamentos

Agora, seja a captura de nêutron pelos isótopos de urânio. A energia de excitação do nuclídeo resultante ( $^{A+1}U$ ), isto é, após a captura é:

- para o  $^{236}\text{U}$ :  $E_{excit} = 6,4 \text{ MeV} > E_{ativ} = 5,3 \text{ MeV}$ ;
- para o  $^{239}\text{U}$ :  $E_{excit} = 5,2 \text{ MeV} < E_{ativ} = 5,9 \text{ MeV}$ .

Assim, tem-se, tipicamente:



mas, por outro lado:

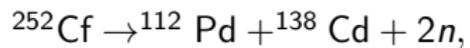


# Fundamentos

Distribuição de massas dos fragmentos

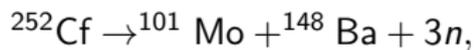
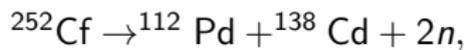
# Fundamentos

Distribuição de massas dos fragmentos:



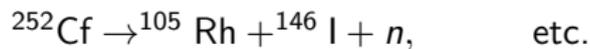
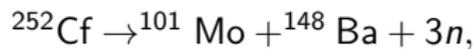
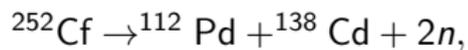
# Fundamentos

Distribuição de massas dos fragmentos:



# Fundamentos

Distribuição de massas dos fragmentos:



# Fundamentos

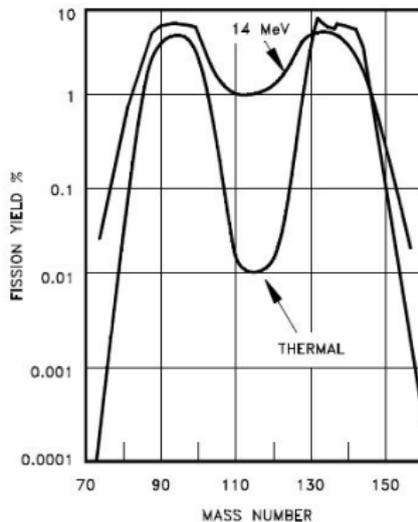


Figura: Distribuição de massa dos fragmentos de fissão.

# Fundamentos

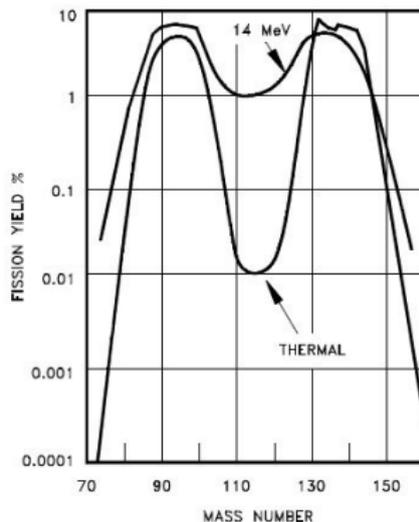


Figura: Distribuição de massa dos fragmentos de fissão.

Observa-se que a divisão simétrica é bem menos provável ( $\sim 600\times$ ), mas tal tendência vai desaparecendo para grandes energias de excitação.

# Fundamentos

## Balanço energético

# Fundamentos

Balço energético:

Tipicamente, a fissão de um núcleo pesado libera cerca de 200 MeV

# Fundamentos

Balço energético:

Tipicamente, a fissão de um núcleo pesado libera cerca de 200 MeV, tal que:

$$\text{fragmentos} = 165 \text{ MeV}$$

# Fundamentos

## Balanço energético:

Tipicamente, a fissão de um núcleo pesado libera cerca de 200 MeV, tal que:

$$\text{fragmentos} = 165 \text{ MeV}$$

$$\text{nêutrons} = 5 \text{ MeV}$$

# Fundamentos

## Balanço energético:

Tipicamente, a fissão de um núcleo pesado libera cerca de 200 MeV, tal que:

$$\text{fragmentos} = 165 \text{ MeV}$$

$$\text{nêutrons} = 5 \text{ MeV}$$

$$\text{decaimentos } - \beta = 7 \text{ MeV}$$

# Fundamentos

## Balço energético:

Tipicamente, a fissão de um núcleo pesado libera cerca de 200 MeV, tal que:

$$\text{fragmentos} = 165 \text{ MeV}$$

$$\text{nêutrons} = 5 \text{ MeV}$$

$$\text{decaimentos } - \beta = 7 \text{ MeV}$$

$$\text{decaimentos } - \gamma = 11 \text{ MeV}$$

# Fundamentos

## Balço energético:

Tipicamente, a fissão de um núcleo pesado libera cerca de 200 MeV, tal que:

$$\text{fragmentos} = 165 \text{ MeV}$$

$$\text{nêutrons} = 5 \text{ MeV}$$

$$\text{decaimentos } - \beta = 7 \text{ MeV}$$

$$\text{decaimentos } - \gamma = 11 \text{ MeV}$$

$$\text{neutrinos} = 12 \text{ MeV}$$

# Fundamentos

## Balço energético:

Tipicamente, a fissão de um núcleo pesado libera cerca de 200 MeV, tal que:

$$\text{fragmentos} = 165 \text{ MeV}$$

$$\text{nêutrons} = 5 \text{ MeV}$$

$$\text{decaimentos } - \beta = 7 \text{ MeV}$$

$$\text{decaimentos } - \gamma = 11 \text{ MeV}$$

$$\text{neutrinos} = \underline{12 \text{ MeV}}$$

$$200 \text{ MeV}$$

- 1 Introdução histórica
- 2 Fundamentos
- 3 Nêutrons**
- 4 Reatores de fissão
- 5 Reatores no mundo
- 6 Tipos de reatores
- 7 Exercícios

# Nêutrons

Os nêutrons emitidos na fissão seguem o seguinte espectro de energia:

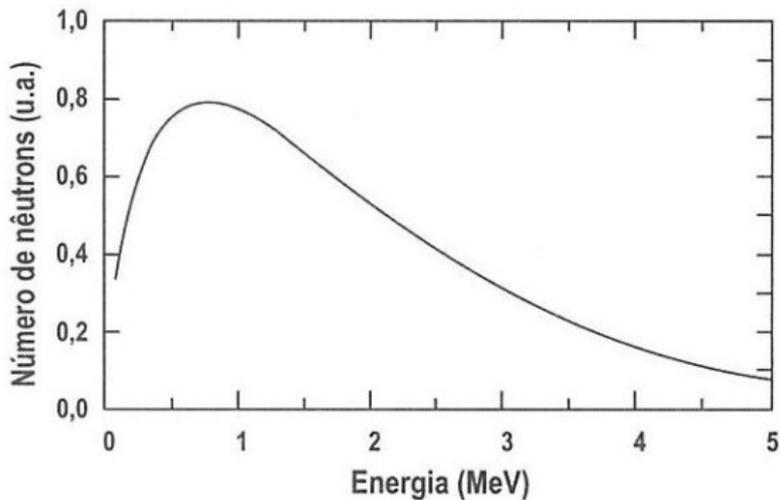


Figura: Distribuição de energia para nêutrons emitidos na fissão.

# Nêutrons

Os nêutrons emitidos na fissão seguem o seguinte espectro de energia:

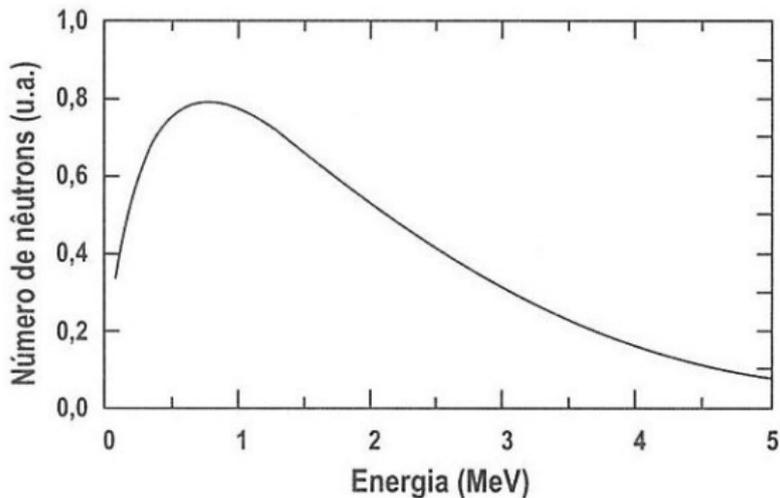


Figura: Distribuição de energia para nêutrons emitidos na fissão.

$$N(E) = \exp(-1,036E) \sinh \sqrt{2,29E}, \quad 0 < E < 10$$

# Nêutrons

Os nêutrons emitidos na fissão seguem o seguinte espectro de energia:

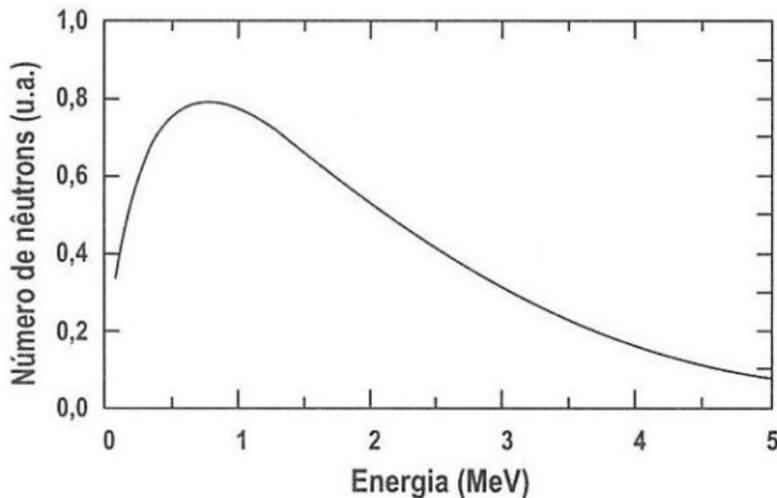
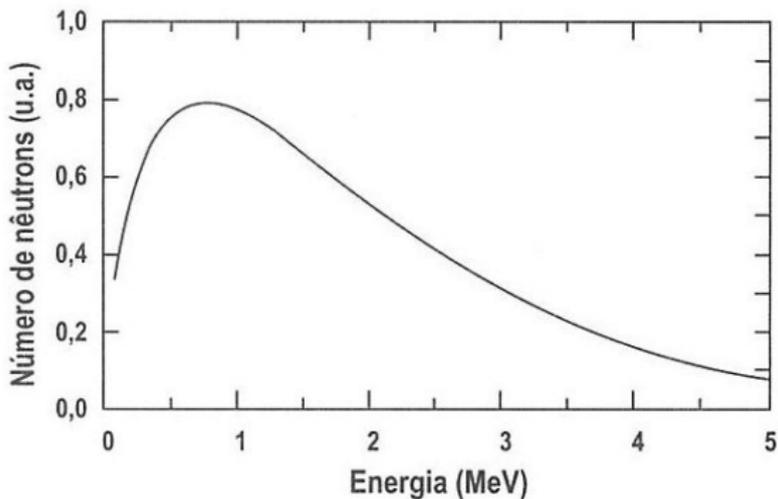


Figura: Distribuição de energia para nêutrons emitidos na fissão.

$$N(E) = \exp(-1,036E) \sinh \sqrt{2,29E}, \quad 0 < E < 10 \text{ MeV}, \text{ sendo que:}$$

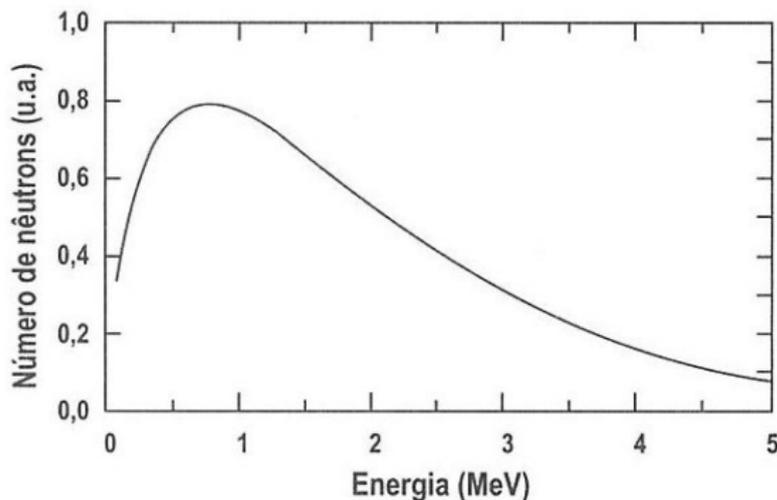
# Nêutrons



$$N(E) = \exp(-1,036E) \sinh \sqrt{2,29E}, \quad 0 < E < 10 \text{ MeV}, \text{ sendo que:}$$

→ a maior parte (>99%) são emitidos imediatamente ( $t < 10^{-14}$  s) após a fissão: nêutrons prontos (imediatos);

# Nêutrons

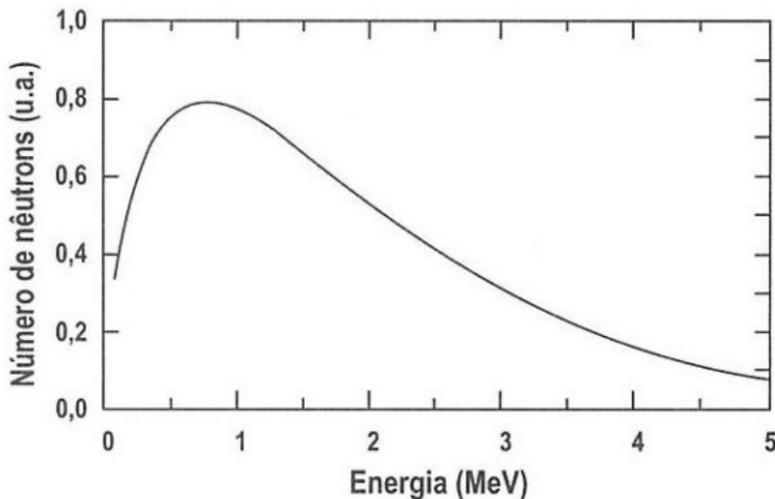


$N(E) = \exp(-1,036E) \sinh \sqrt{2,29E}$ ,  $0 < E < 10$  MeV, sendo que:

→ a maior parte (>99%) são emitidos imediatamente ( $t < 10^{-14}$  s) após a fissão:  
nêutrons prontos (imediatos);

→ o restante (<1%) são emitidos atrasados ( $t \gg 10^{-14}$  s) após a fissão:  
nêutrons retardados (atrasados).

# Nêutrons



$$N(E) = \exp(-1,036E) \sinh \sqrt{2,29E}, \quad 0 < E < 10 \text{ MeV}, \text{ sendo que:}$$

→ a maior parte (>99%) são emitidos imediatamente ( $t < 10^{-14}$  s) após a fissão:  
nêutrons prontos (imediatos);

→ o restante (<1%) são emitidos atrasados ( $t \gg 10^{-14}$  s) após a fissão:  
nêutrons retardados (atrasados) (exercício 3).

# Nêutrons

Agora, os nêutrons emitidos podem sofrer os seguintes processos:

- Reações de captura:  $n + {}^A X \rightarrow {}^{A+1} X^* \rightarrow {}^{A+1} X + \gamma$ ;

# Nêutrons

Agora, os nêutrons emitidos podem sofrer os seguintes processos:

- Reações de captura:  $n + {}^A X \rightarrow {}^{A+1} X^* \rightarrow {}^{A+1} X + \gamma$ ;
- Outras reações:  $n + X \rightarrow Y + Z$ ;

# Nêutrons

Agora, os nêutrons emitidos podem sofrer os seguintes processos:

- Reações de captura:  $n + {}^A X \rightarrow {}^{A+1} X^* \rightarrow {}^{A+1} X + \gamma$ ;
- Outras reações:  $n + X \rightarrow Y + Z$ ;
- Espalhamentos elásticos:  $n + X \rightarrow n + X$ ;

# Nêutrons

Agora, os nêutrons emitidos podem sofrer os seguintes processos:

- Reações de captura:  $n + {}^A X \rightarrow {}^{A+1} X^* \rightarrow {}^{A+1} X + \gamma$ ;
- Outras reações:  $n + X \rightarrow Y + Z$ ;
- Espalhamentos elásticos:  $n + X \rightarrow n + X$ ;
- Espalhamentos inelásticos:  $n + X \rightarrow n' + X^*$ .

# Nêutrons

Seção de choque para fissão devido à captura de nêutrons:

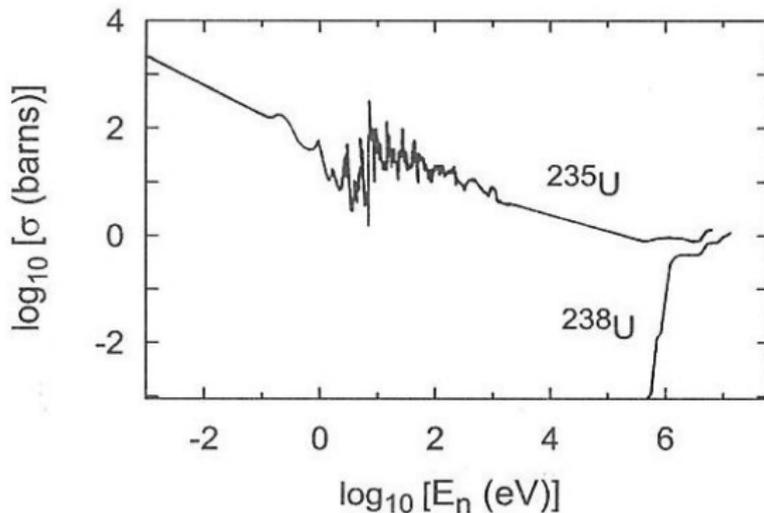


Figura: Seção de choque para a captura de nêutrons.

# Nêutrons

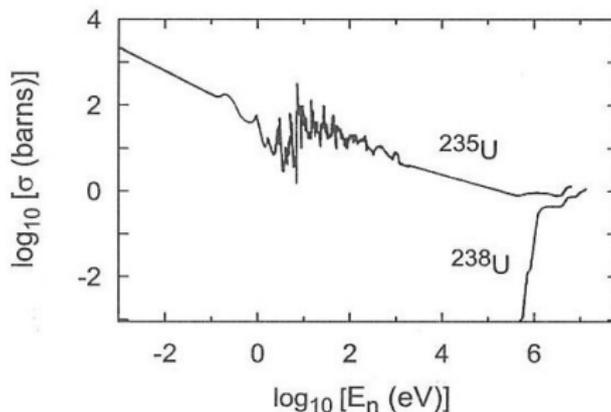


Figura: Seção de choque para a captura de nêutrons.

Note que os nêutrons lentos ( $E_n \rightarrow 0$ ) fissionam o  $^{235}\text{U}$ , com probabilidade muito maior ( $\sim 600\times$ ) que os nêutrons rápidos — este é o único isótopo encontrado na natureza fissionável por nêutrons lentos, mas sua abundância natural é de apenas 0,7%.

# Nêutrons

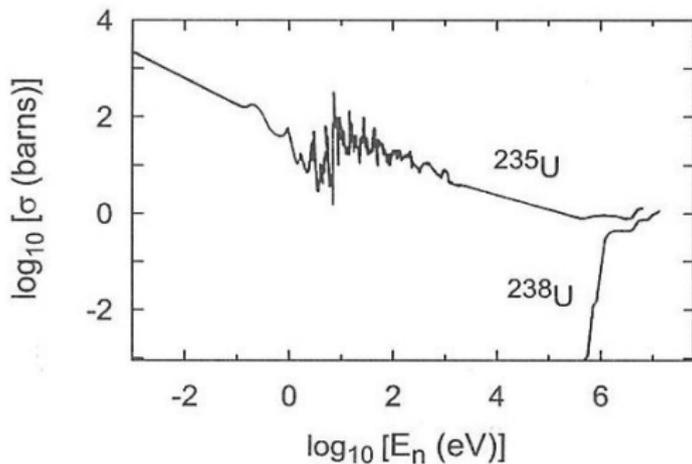
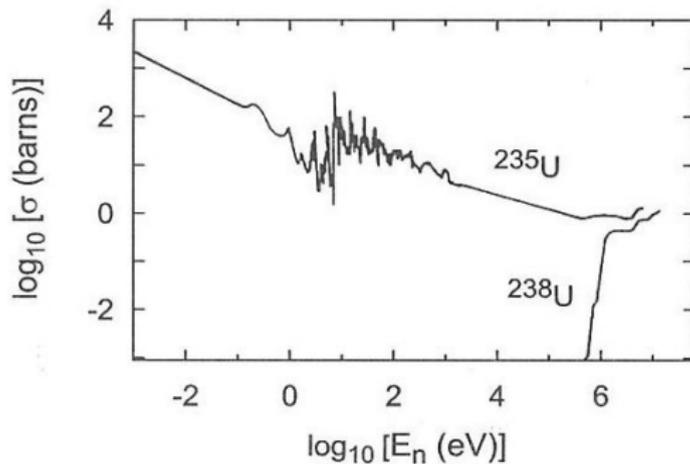


Figura: Seção de choque para a captura de nêutrons.

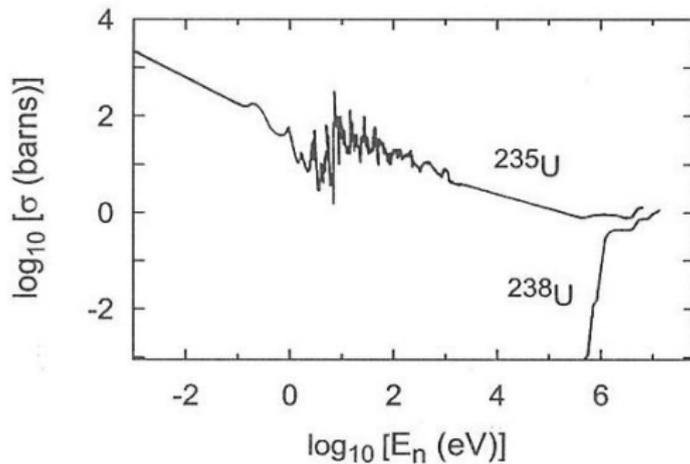
Note que os nêutrons lentos ( $E_n \rightarrow 0$ ) fissionam o  $^{235}\text{U}$ , com probabilidade muito maior ( $\sim 600\times$ ) que os nêutrons rápidos — este é o único isótopo encontrado na natureza fissionável por nêutrons lentos, mas sua abundância natural é de apenas 0,7%. Por outro lado, o  $^{238}\text{U}$  é fissionável por nêutrons para energias acima de um limiar de  $\sim 1\text{ MeV}$ .

# Nêutrons



Classificamos os nêutrons em:

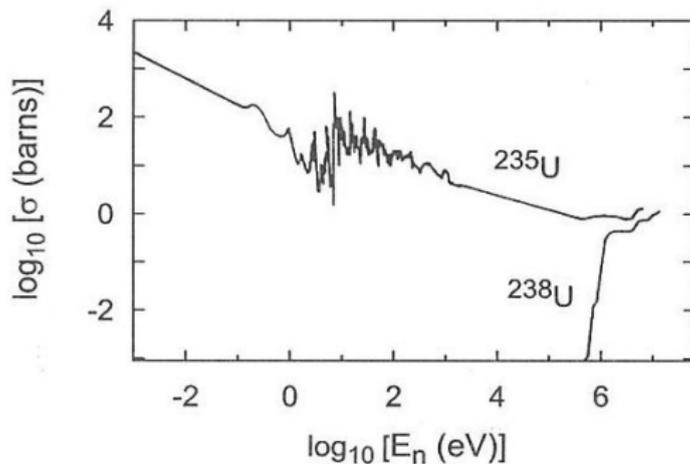
# Nêutrons



Classificamos os nêutrons em:

- térmicos:  $E \approx 0,025 \text{ eV} \Rightarrow T \sim 20^\circ \text{ C}$ ;

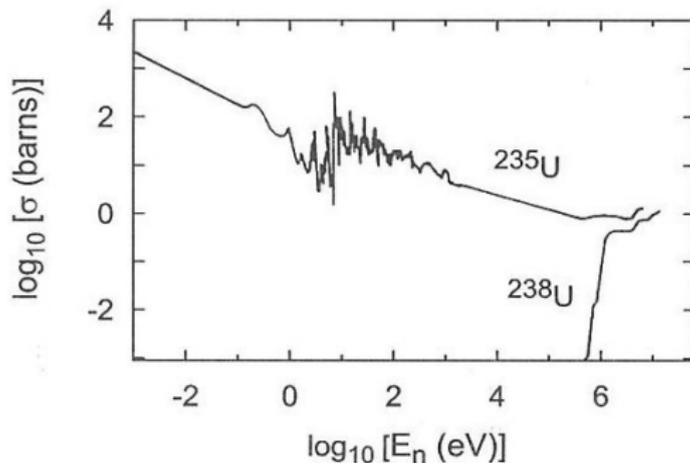
# Nêutrons



Classificamos os nêutrons em:

- térmicos:  $E \approx 0,025 \text{ eV} \Rightarrow T \sim 20^\circ \text{ C}$ ;
- epitérmicos:  $E \approx 1 \text{ eV}$ ;

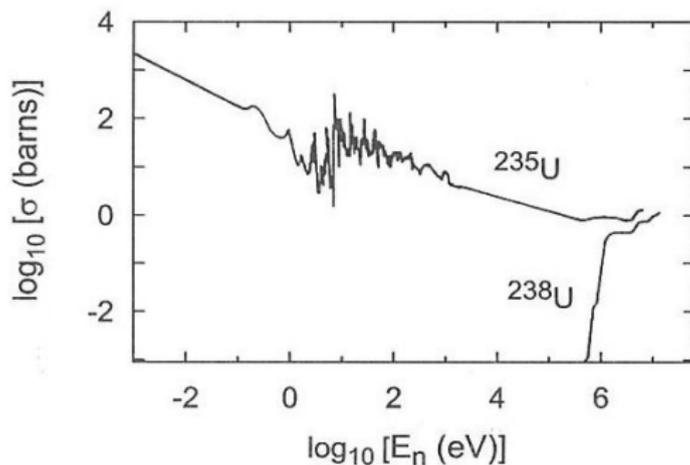
# Nêutrons



Classificamos os nêutrons em:

- térmicos:  $E \approx 0,025 \text{ eV} \Rightarrow T \sim 20^\circ \text{ C}$ ;
- epitérmicos:  $E \approx 1 \text{ eV}$ ;
- lentos/intermediários:  $1 \text{ eV} < E < 100 \text{ keV}$ ;

# Nêutrons



Classificamos os nêutrons em:

- térmicos:  $E \approx 0,025 \text{ eV} \Rightarrow T \sim 20^\circ \text{ C}$ ;
- epitérmicos:  $E \approx 1 \text{ eV}$ ;
- lentos/intermediários:  $1 \text{ eV} < E < 100 \text{ keV}$ ;
- rápidos:  $E > 100 \text{ keV}$ .

- 1 Introdução histórica
- 2 Fundamentos
- 3 Nêutrons
- 4 Reatores de fissão**
- 5 Reatores no mundo
- 6 Tipos de reatores
- 7 Exercícios

# Reatores de fissão

Um reator nuclear é uma máquina térmica baseada em um ciclo de nêutrons autossustentado.

# Reatores de fissão

Um reator nuclear é uma máquina térmica baseada em um ciclo de nêutrons autossustentado.

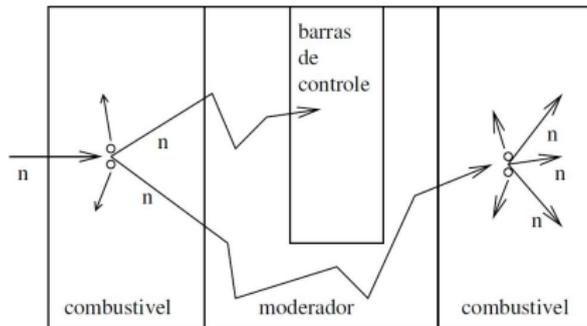
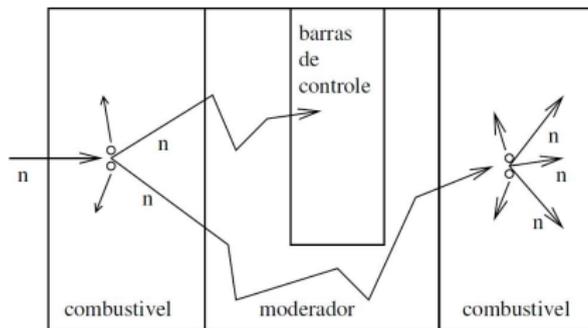


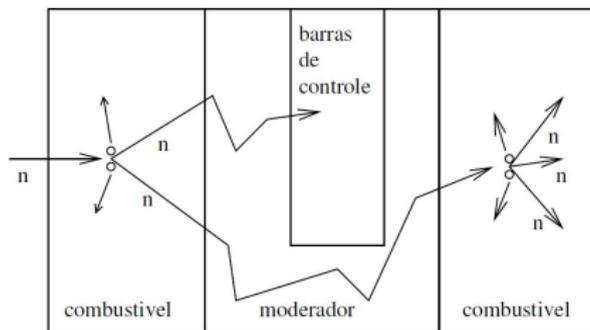
Figura: Ciclo de nêutrons.

# Reatores de fissão



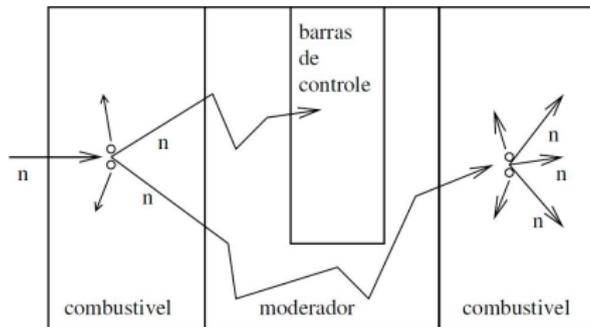
- **combustível:** isótopo fissionável e/ou fértil, material responsável pela geração de energia ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{232}\text{Th}$ );

# Reatores de fissão



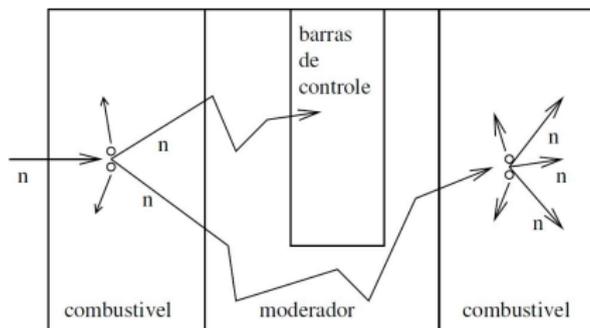
- combustível: isótopo fissionável e/ou fértil, material responsável pela geração de energia ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{232}\text{Th}$ );
- moderador: responsável pela termalização dos nêutrons ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$ , He, grafite, Na metálico);

# Reatores de fissão



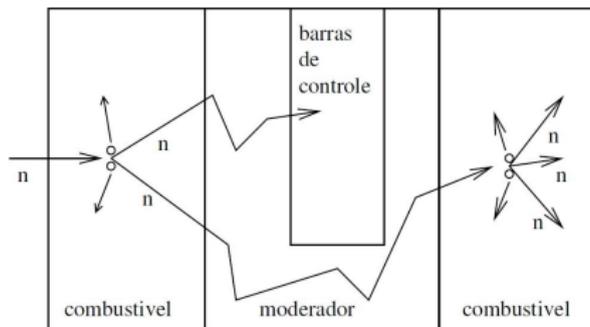
- **combustível:** isótopo fissionável e/ou fértil, material responsável pela geração de energia ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{232}\text{Th}$ );
- **moderador:** responsável pela termalização dos nêutrons ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$ , He, grafite, Na metálico);
- **refrigerador:** material que conduz o calor ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$ , He,  $\text{CO}_2$ , Na metálico);

# Reatores de fissão



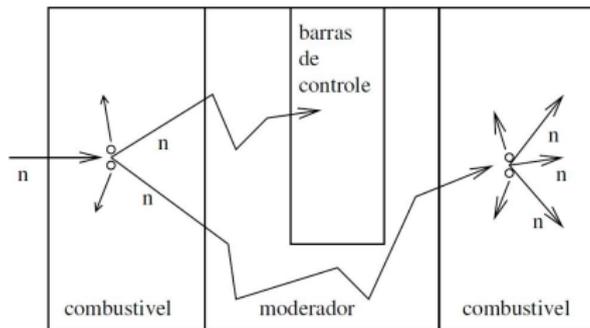
- combustível: isótopo fissionável e/ou fértil, material responsável pela geração de energia ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{232}\text{Th}$ );
- moderador: responsável pela termalização dos nêutrons ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$ , He, grafite, Na metálico);
- refrigerador: material que conduz o calor ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$ , He,  $\text{CO}_2$ , Na metálico);
- refletor: realiza retroespalhamento de nêutrons ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$ , grafite, U);

# Reatores de fissão



- combustível: isótopo fissionável e/ou fértil, material responsável pela geração de energia ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{232}\text{Th}$ );
- moderador: responsável pela termalização dos nêutrons ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$ , He, grafite, Na metálico);
- refrigerador: material que conduz o calor ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$ , He,  $\text{CO}_2$ , Na metálico);
- refletor: realiza retro-espalhamento de nêutrons ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$ , grafite, U);
- barras de controle: absorvedores de excesso nêutrons (Cd, B);

# Reatores de fissão



- **combustível:** isótopo fissionável e/ou fértil, material responsável pela geração de energia ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{232}\text{Th}$ );
- **moderador:** responsável pela termalização dos nêutrons ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$ , He, grafite, Na metálico);
- **refrigerador:** material que conduz o calor ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$ , He,  $\text{CO}_2$ , Na metálico);
- **refletor:** realiza retro-espalhamento de nêutrons ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$ , grafite, U);
- **barras de controle:** absorvedores de excesso nêutrons (Cd, B);
- **blindagem:** proteção contra o vazamento de nêutrons e raios- $\gamma$  (concreto, Pb,  $\text{H}_2\text{O}$ , aço).

# Reatores de fissão

Fator de reprodução efetivo de nêutrons:

$$k_{ef} = \frac{\text{n}^\circ \text{ de nêutrons capturados subsequentemente}}{\text{fissão}}$$

# Reatores de fissão

Fator de reprodução efetivo de nêutrons:

$$k_{ef} = \frac{\text{n}^\circ \text{ de nêutrons capturados subsequentemente}}{\text{fissão}}$$

- $k_{ef} < 1$ : subcrítico (reator não se sustenta);

# Reatores de fissão

Fator de reprodução efetivo de nêutrons:

$$k_{ef} = \frac{\text{n}^\circ \text{ de nêutrons capturados subsequentemente}}{\text{fissão}}$$

- $k_{ef} < 1$ : subcrítico (reator não se sustenta);
- $k_{ef} = 1$ : crítico (*massa crítica* para a operação);

# Reatores de fissão

Fator de reprodução efetivo de nêutrons:

$$k_{ef} = \frac{\text{n}^\circ \text{ de nêutrons capturados subsequentemente}}{\text{fissão}}$$

- $k_{ef} < 1$ : subcrítico (reator não se sustenta);
- $k_{ef} = 1$ : crítico (*massa crítica* para a operação);
- $k_{ef} > 1$ : supercrítico (reação explosiva).

# Reatores de fissão

Multiplicação subcrítica, seja um reator com um número inicial de 100 nêutrons com  $k_{ef} = 0,6$ .

# Reatores de fissão

Multiplicação subcrítica, seja um reator com um número inicial de 100 nêutrons com  $k_{ef} = 0,6$ :

geração:	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	...
	100	60	36	22	13	8	5	
		100	60	36	22	13	8	
			100	60	36	22	13	
				100	60	36	22	
					100	60	36	
						100	60	
							100	
$N_f =$	100	160	196	218	231	239	244	...

# Reatores de fissão

Multiplicação subcrítica, seja um reator com um número inicial de 100 nêutrons com  $k_{ef} = 0,6$ :

geração:	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	...
	100	60	36	22	13	8	5	
		100	60	36	22	13	8	
			100	60	36	22	13	
				100	60	36	22	
					100	60	36	
						100	60	
							100	
$N_f =$	100	160	196	218	231	239	244	...

Então:

# Reatores de fissão

Multiplicação subcrítica, seja um reator com um número inicial de 100 nêutrons com  $k_{ef} = 0,6$ :

geração:	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	...
	100	60	36	22	13	8	5	
		100	60	36	22	13	8	
			100	60	36	22	13	
				100	60	36	22	
					100	60	36	
						100	60	
							100	
$N_f =$	100	160	196	218	231	239	244	...

Então:

$$N_f = N_0 + N_0 k_{ef} + N_0 k_{ef}^2 + N_0 k_{ef}^3 + \dots$$

# Reatores de fissão

Multiplicação subcrítica, seja um reator com um número inicial de 100 nêutrons com  $k_{ef} = 0,6$ :

geração:	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	...
	100	60	36	22	13	8	5	
		100	60	36	22	13	8	
			100	60	36	22	13	
				100	60	36	22	
					100	60	36	
						100	60	
							100	
$N_f =$	100	160	196	218	231	239	244	...

Então:

$$N_f = N_0 + N_0 k_{ef} + N_0 k_{ef}^2 + N_0 k_{ef}^3 + \dots = \frac{N_0}{1 - k_{ef}}, \text{ para } k_{ef} < 1.$$

# Reatores de fissão

Multiplicação subcrítica, seja um reator com um número inicial de 100 nêutrons com  $k_{ef} = 0,6$ :

geração:	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	...
	100	60	36	22	13	8	5	
		100	60	36	22	13	8	
			100	60	36	22	13	
				100	60	36	22	
					100	60	36	
						100	60	
							100	
$N_f =$	100	160	196	218	231	239	244	...

Então:

$$N_f = N_0 + N_0 k_{ef} + N_0 k_{ef}^2 + N_0 k_{ef}^3 + \dots = \frac{N_0}{1 - k_{ef}}, \text{ para } k_{ef} < 1.$$

Definindo-se o *parâmetro de multiplicação subcrítica*  $M$ :

$$M \equiv \frac{N_f}{N_0}$$

# Reatores de fissão

Multiplicação subcrítica, seja um reator com um número inicial de 100 nêutrons com  $k_{ef} = 0,6$ :

geração:	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	...
	100	60	36	22	13	8	5	
		100	60	36	22	13	8	
			100	60	36	22	13	
				100	60	36	22	
					100	60	36	
						100	60	
							100	
$N_f =$	100	160	196	218	231	239	244	...

Então:

$$N_f = N_0 + N_0 k_{ef} + N_0 k_{ef}^2 + N_0 k_{ef}^3 + \dots = \frac{N_0}{1 - k_{ef}}, \text{ para } k_{ef} < 1.$$

Definindo-se o *parâmetro de multiplicação subcrítica*  $M$ :

$$M \equiv \frac{N_f}{N_0} = \frac{1}{1 - k_{ef}}$$

# Reatores de fissão

A evolução do número de nêutrons por geração permite definir alguns parâmetros importantes.

# Reatores de fissão

A evolução do número de nêutrons por geração permite definir alguns parâmetros importantes. Para isto, vamos, inicialmente, definir a seguinte notação:

$$N_{r,t}(\text{condição}).$$

# Reatores de fissão

A evolução do número de nêutrons por geração permite definir alguns parâmetros importantes. Para isto, vamos, inicialmente, definir a seguinte notação:

$$N_{r,t}(\text{condição}),$$

onde  $N$  é um número de nêutrons,  $r$  ou  $t$  significam, respectivamente, “rápidos” ou “térmicos” e a condição pode ser de várias naturezas

# Reatores de fissão

A evolução do número de nêutrons por geração permite definir alguns parâmetros importantes. Para isto, vamos, inicialmente, definir a seguinte notação:

$$N_{r,t}(\text{condição}),$$

onde  $N$  é um número de nêutrons,  $r$  ou  $t$  significam, respectivamente, “rápidos” ou “térmicos” e a condição pode ser de várias naturezas, em termos das energias:

- $E_t$ : para energias térmicas;

# Reatores de fissão

A evolução do número de nêutrons por geração permite definir alguns parâmetros importantes. Para isto, vamos, inicialmente, definir a seguinte notação:

$$N_{r,t}(\text{condição}),$$

onde  $N$  é um número de nêutrons,  $r$  ou  $t$  significam, respectivamente, “rápidos” ou “térmicos” e a condição pode ser de várias naturezas, em termos das energias:

- $E_t$ : para energias térmicas;
- $E_R$ : para energias de ressonância;

# Reatores de fissão

A evolução do número de nêutrons por geração permite definir alguns parâmetros importantes. Para isto, vamos, inicialmente, definir a seguinte notação:

$$N_{r,t}(\text{condição}),$$

onde  $N$  é um número de nêutrons,  $r$  ou  $t$  significam, respectivamente, “rápidos” ou “térmicos” e a condição pode ser de várias naturezas, em termos das energias:

- $E_t$ : para energias térmicas;
- $E_R$ : para energias de ressonância;
- $\forall E$ : para quaisquer energias.

# Reatores de fissão

Vamos aos parâmetros:

# Reatores de fissão

Vamos aos parâmetros:

fator de reprodução: 
$$\eta = \frac{N_r(\text{fissão } E_t)}{N_t(\text{absorv. combust.})}$$

# Reatores de fissão

Vamos aos parâmetros:

fator de reprodução: 
$$\eta = \frac{N_r(\text{fissão } E_t)}{N_t(\text{absorv. combust.})}$$

fator de utilização térmica: 
$$f = \frac{N_t(\text{absorv. combust.})}{N_t(\text{absorv. outros})}$$

# Reatores de fissão

Vamos aos parâmetros:

fator de reprodução:  $\eta = \frac{N_r(\text{fissão } E_t)}{N_t(\text{absorv. combust.})}$

fator de utilização térmica:  $f = \frac{N_t(\text{absorv. combust.})}{N_t(\text{absorv. outros})}$

fator de fissão rápida:  $\varepsilon = \frac{N_r(\text{fissão } \forall E)}{N_r(\text{fissão } E_t)}$

# Reatores de fissão

Vamos aos parâmetros:

fator de reprodução:

$$\eta = \frac{N_r(\text{fissão } E_t)}{N_t(\text{absorv. combust.})}$$

fator de utilização térmica:

$$f = \frac{N_t(\text{absorv. combust.})}{N_t(\text{absorv. outros})}$$

fator de fissão rápida:

$$\varepsilon = \frac{N_r(\text{fissão } \forall E)}{N_r(\text{fissão } E_t)}$$

probabilidade de escape da ressonância:

$$p = \frac{N_r(\text{saem } E_R)}{N_r(\text{entram } E_R)}$$

# Reatores de fissão

Vamos aos parâmetros:

fator de reprodução:

$$\eta = \frac{N_r(\text{fissão } E_t)}{N_t(\text{absorv. combust.})}$$

fator de utilização térmica:

$$f = \frac{N_t(\text{absorv. combust.})}{N_t(\text{absorv. outros})}$$

fator de fissão rápida:

$$\varepsilon = \frac{N_r(\text{fissão } \forall E)}{N_r(\text{fissão } E_t)}$$

probabilidade de escape da ressonância:

$$p = \frac{N_r(\text{saem } E_R)}{N_r(\text{entram } E_R)}$$

probabilidade de não-fuga rápida:

$$P_f = \frac{N_r(\text{permanecem})}{N_r(\text{antes da fuga})}$$

# Reatores de fissão

Vamos aos parâmetros:

fator de reprodução:

$$\eta = \frac{N_r(\text{fissão } E_t)}{N_t(\text{absorv. combust.})}$$

fator de utilização térmica:

$$f = \frac{N_t(\text{absorv. combust.})}{N_t(\text{absorv. outros})}$$

fator de fissão rápida:

$$\varepsilon = \frac{N_r(\text{fissão } \forall E)}{N_r(\text{fissão } E_t)}$$

probabilidade de escape da ressonância:

$$p = \frac{N_r(\text{saem } E_R)}{N_r(\text{entram } E_R)}$$

probabilidade de não-fuga rápida:

$$P_f = \frac{N_r(\text{permanecem})}{N_r(\text{antes da fuga})}$$

probabilidade de não-fuga térmica:

$$P_t = \frac{N_t(\text{permanecem})}{N_t(\text{antes da fuga})}$$

# Reatores de fissão

Exemplo:

Sejam:  $N_0 = 1000$  e  $\varepsilon = 1,175$ .

# Reatores de fissão

Exemplo:

Sejam:  $N_0 = 1000$  e  $\varepsilon = 1,175$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon = 1175$$

é o número de nêutrons após fissões a altas energias ( $^{235}\text{U}$  ou  $^{238}\text{U}$ ).

# Reatores de fissão

Exemplo:

Sejam:  $N_0 = 1000$  e  $\varepsilon = 1,175$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon = 1175$$

é o número de nêutrons após fissões a altas energias ( $^{235}\text{U}$  ou  $^{238}\text{U}$ ).

Se  $P_f = 0,98$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon P_f = 1151$$

# Reatores de fissão

Exemplo:

Sejam:  $N_0 = 1000$  e  $\varepsilon = 1,175$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon = 1175$$

é o número de nêutrons após fissões a altas energias ( $^{235}\text{U}$  ou  $^{238}\text{U}$ ).

Se  $P_f = 0,98$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon P_f = 1151$$

é o número de nêutrons que permanece no reator e 24 fogem.

# Reatores de fissão

Exemplo:

Sejam:  $N_0 = 1000$  e  $\varepsilon = 1,175$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon = 1175$$

é o número de nêutrons após fissões a altas energias ( $^{235}\text{U}$  ou  $^{238}\text{U}$ ).

Se  $P_f = 0,98$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon P_f = 1151$$

é o número de nêutrons que permanece no reator e 24 fogem.

Se  $p = 0,87$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon P_f p = 1001$$

# Reatores de fissão

Exemplo:

Sejam:  $N_0 = 1000$  e  $\varepsilon = 1,175$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon = 1175$$

é o número de nêutrons após fissões a altas energias ( $^{235}\text{U}$  ou  $^{238}\text{U}$ ).

Se  $P_f = 0,98$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon P_f = 1151$$

é o número de nêutrons que permanece no reator e 24 fogem.

Se  $p = 0,87$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon P_f p = 1001$$

escapam das ressonâncias e 150 são capturados.

# Reatores de fissão

Exemplo:

Sejam:  $N_0 = 1000$  e  $\varepsilon = 1,175$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon = 1175$$

é o número de nêutrons após fissões a altas energias ( $^{235}\text{U}$  ou  $^{238}\text{U}$ ).

Se  $P_f = 0,98$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon P_f = 1151$$

é o número de nêutrons que permanece no reator e 24 fogem.

Se  $p = 0,87$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon P_f p = 1001$$

escapam das ressonâncias e 150 são capturados.

Se  $P_t = 0,98$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon P_f p P_t = 981$$

# Reatores de fissão

Exemplo:

Sejam:  $N_0 = 1000$  e  $\varepsilon = 1,175$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon = 1175$$

é o número de nêutrons após fissões a altas energias ( $^{235}\text{U}$  ou  $^{238}\text{U}$ ).

Se  $P_f = 0,98$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon P_f = 1151$$

é o número de nêutrons que permanece no reator e 24 fogem.

Se  $p = 0,87$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon P_f p = 1001$$

escapam das ressonâncias e 150 são capturados.

Se  $P_t = 0,98$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon P_f p P_t = 981$$

permanecem e 20 fogem.

# Reatores de fissão

Exemplo:

Sejam:  $N_0 = 1000$  e  $\varepsilon = 1,175$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon = 1175$$

é o número de nêutrons após fissões a altas energias ( $^{235}\text{U}$  ou  $^{238}\text{U}$ ).

Se  $P_f = 0,98$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon P_f = 1151$$

é o número de nêutrons que permanece no reator e 24 fogem.

Se  $p = 0,87$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon P_f p = 1001$$

escapam das ressonâncias e 150 são capturados.

Se  $P_t = 0,98$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon P_f p P_t = 981$$

permanecem e 20 fogem.

Se  $f = 0,498$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon P_f p P_t f = 489$$

# Reatores de fissão

Exemplo:

Sejam:  $N_0 = 1000$  e  $\varepsilon = 1,175$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon = 1175$$

é o número de nêutrons após fissões a altas energias ( $^{235}\text{U}$  ou  $^{238}\text{U}$ ).

Se  $P_f = 0,98$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon P_f = 1151$$

é o número de nêutrons que permanece no reator e 24 fogem.

Se  $p = 0,87$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon P_f p = 1001$$

escapam das ressonâncias e 150 são capturados.

Se  $P_t = 0,98$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon P_f p P_t = 981$$

permanecem e 20 fogem.

Se  $f = 0,498$ :

$$\Rightarrow N_0\varepsilon P_f p P_t f = 489$$

dão origem a fissões do  $^{235}\text{U}$  e 492 são absorvidos em material não combustível.

# Reatores de fissão

Destes 489, digamos que 89 (18,2%) não causam fissão (por exemplo, gerando estados excitados  $^{236}\text{U}^*$  com emissão de radiação  $\gamma$ ), então, se o fator de reprodução para os nêutrons que causam fissão é  $\eta_0 = 2,5$ , o fator de reprodução efetivo  $\eta$  para todos os nêutrons absorvidos pelo combustível deve ter descontado este fator.

# Reatores de fissão

Destes 489, digamos que 89 (18,2%) não causam fissão (por exemplo, gerando estados excitados  $^{236}\text{U}^*$  com emissão de radiação  $\gamma$ ), então, se o fator de reprodução para os nêutrons que causam fissão é  $\eta_0 = 2,5$ , o fator de reprodução efetivo  $\eta$  para todos os nêutrons absorvidos pelo combustível deve ter descontado este fator:

$$\eta = \eta_0 - \Delta\eta = 2,5(1 - 0,182) = 2,045$$

# Reatores de fissão

Destes 489, digamos que 89 (18,2%) não causam fissão (por exemplo, gerando estados excitados  $^{236}\text{U}^*$  com emissão de radiação  $\gamma$ ), então, se o fator de reprodução para os nêutrons que causam fissão é  $\eta_0 = 2,5$ , o fator de reprodução efetivo  $\eta$  para todos os nêutrons absorvidos pelo combustível deve ter descontado este fator:

$$\eta = \eta_0 - \Delta\eta = 2,5(1 - 0,182) = 2,045$$

Assim, efetivamente:

$$\Rightarrow N_0 \varepsilon P_f p P_t f \eta = 1000 = N_f$$

# Reatores de fissão

Destes 489, digamos que 89 (18,2%) não causam fissão (por exemplo, gerando estados excitados  $^{236}\text{U}^*$  com emissão de radiação  $\gamma$ ), então, se o fator de reprodução para os nêutrons que causam fissão é  $\eta_0 = 2,5$ , o fator de reprodução efetivo  $\eta$  para todos os nêutrons absorvidos pelo combustível deve ter descontado este fator:

$$\eta = \eta_0 - \Delta\eta = 2,5(1 - 0,182) = 2,045$$

Assim, efetivamente:

$$\Rightarrow N_0 \varepsilon P_f p P_t f \eta = 1000 = N_f$$

De maneira que:

$$k_{ef} = \frac{N_f}{N_0} = \varepsilon P_f p P_t f \eta$$

# Reatores de fissão

De maneira que:

$$k_{ef} = \frac{N_f}{N_0} = \varepsilon P_f p P_t f \eta,$$

conhecida como *fórmula dos 6 fatores*.

# Reatores de fissão

De maneira que:

$$k_{ef} = \frac{N_f}{N_0} = \varepsilon P_f p P_t f \eta,$$

conhecida como *fórmula dos 6 fatores*.

Em complemento ao  $k_{ef}$ , há também o  $k_{\infty}$ , o fator de reprodução para um reator de volume infinito.

# Reatores de fissão

De maneira que:

$$k_{ef} = \frac{N_f}{N_0} = \varepsilon P_f p P_t f \eta,$$

conhecida como *fórmula dos 6 fatores*.

Em complemento ao  $k_{ef}$ , há também o  $k_{\infty}$ , o fator de reprodução para um reator de volume infinito. Neste caso não consideramos as fugas e para um reator hipotético de volume infinito:

$$k_{\infty} = \varepsilon p f \eta,$$

que é a *fórmula dos 4 fatores*.

- 1 Introdução histórica
- 2 Fundamentos
- 3 Nêutrons
- 4 Reatores de fissão
- 5 Reatores no mundo**
- 6 Tipos de reatores
- 7 Exercícios

# Reatores no mundo

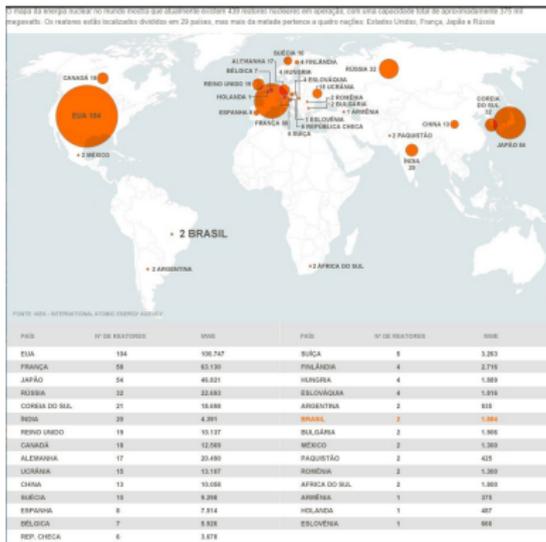


Figura: Reatores nucleares no mundo [Ref.: Terra].

Veja também os links:

[Eletronuclear](#)

[Wikipedia](#)

- 1 Introdução histórica
- 2 Fundamentos
- 3 Nêutrons
- 4 Reatores de fissão
- 5 Reatores no mundo
- 6 Tipos de reatores**
- 7 Exercícios

# Tipos de reatores

Nome (sigla)	Combustível	Moderador	Refrigerador	Observação
Light Water Reactor (LWR)	U enriquecido	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	
Boiling Water Reactor (BWR)	"	"	"	
Pressurized Water Reactor (PWR)	"	"	"	Angra I e II
Canada Deuterium Uranium (CANDU)	U comum	D <sub>2</sub> O	D <sub>2</sub> O	
Fast Breeder Reactors (FBR)	Pu	não tem	Na líquido	n rápidos
High Temperature Gas-Cooled Reactor (HTGR)	mistura Th/U	grafite	He	
Reactor Bolshoy Moshchnosty Kanalny (RBMK)	U enriquecido	grafite	H <sub>2</sub> O	produção de Pu, mas gera eletricidade
Accelerator Driven System (ADS)	massa crítica de U	-	-	acelerador de nêutrons
Reatores de potência				~ GW
Reatores de pesquisa				~ 10 – 10 <sup>2</sup> MW

# Tipos de reatores

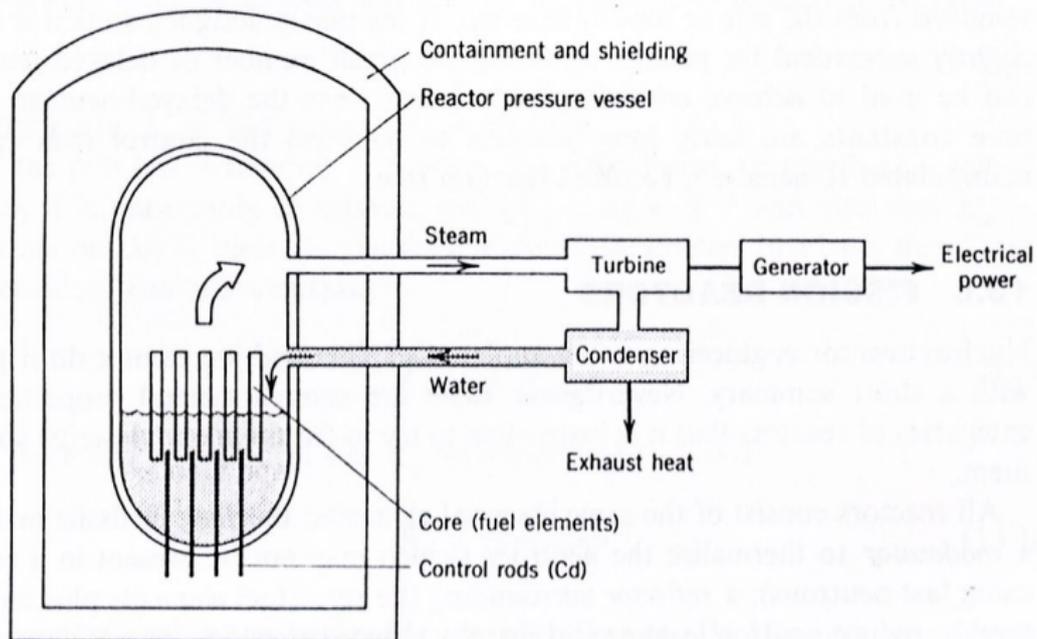


Figura: Reatores refrigerado com água leve (LWR): Boiling Water Reactor (BWR).

# Tipos de reatores

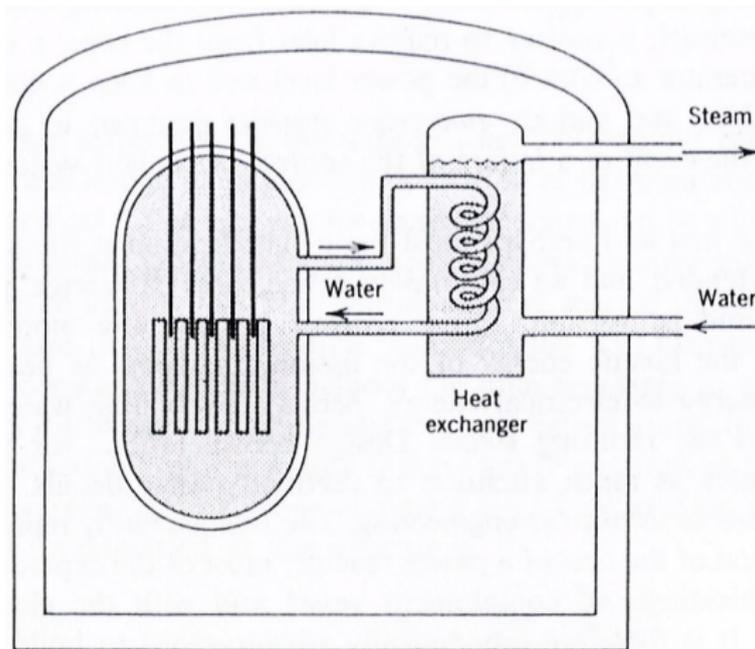


Figura: Reatores refrigerado com água leve (LWR): Pressurized Water Reactor (PWR).

# Tipos de reatores

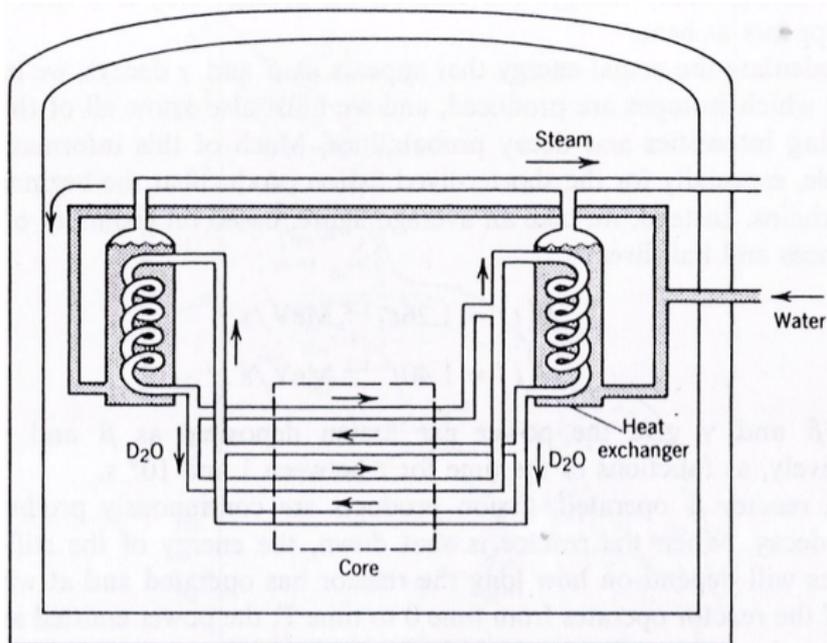


Figura: Reator refrigerado com água pesada (CANDU).

# Tipos de reatores

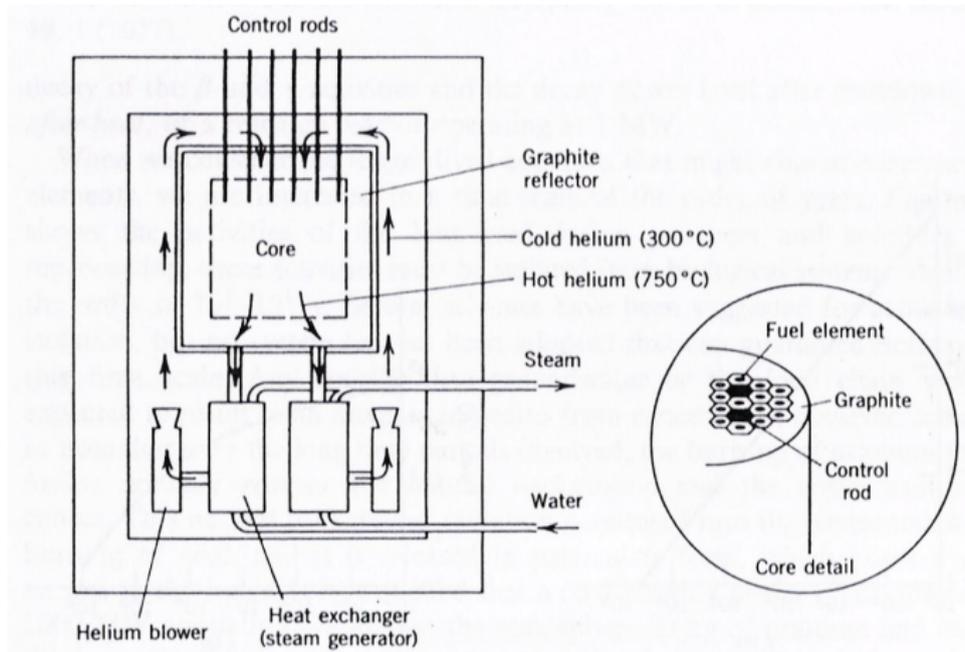


Figura: Reator refrigerado a gás He (HTGR).

# Tipos de reatores

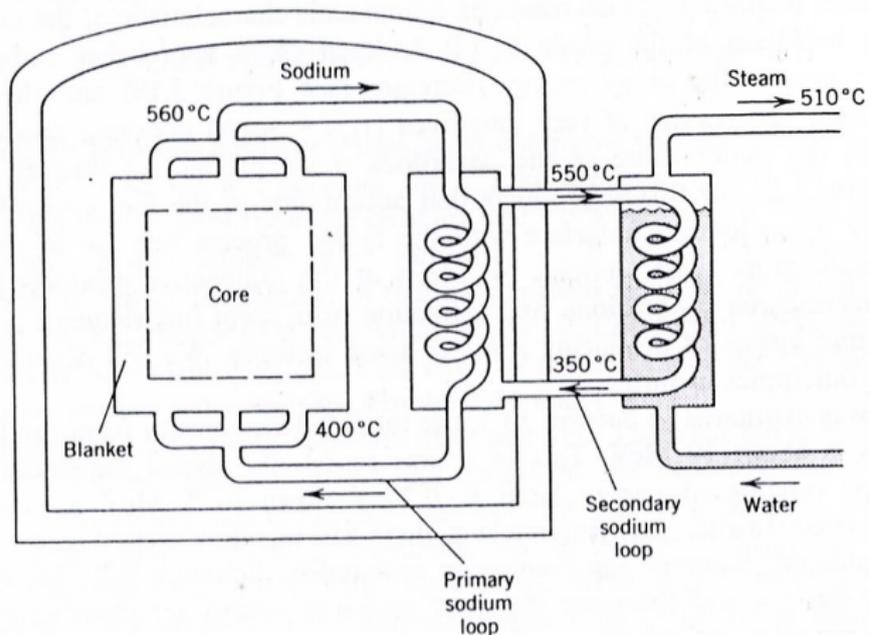


Figura: Reator refrigerado a Na líquido (FBR).

- 1 Introdução histórica
- 2 Fundamentos
- 3 Nêutrons
- 4 Reatores de fissão
- 5 Reatores no mundo
- 6 Tipos de reatores
- 7 Exercícios**

# Exercícios

- 1 Calcule a energia liberada na fissão:



Dados:  $m({}^{235}\text{U}) = 235,043923 \text{ u}$ ,  $m({}^{138}\text{Ba}) = 137,905241 \text{ u}$  e  $m({}^{96}\text{Mo}) = 95,904679 \text{ u}$ .

# Exercícios

- 2 Se a fissão do  $^{235}\text{U}$  libera, em média, 200 MeV por núcleo, qual é a energia total (em MWh) liberada na queima de 1 g de urânio.

# Exercícios

- 9 Num reator em regime explosivo ( $k_{ef} > 1$ ) são necessárias 700 gerações para a taxa de fissões dobrar. Se entre as gerações, o tempo transcorrido, na ausência de nêutrons retardados, é de  $\sim 10^{-3}$  s, calcule o tempo médio para esta duplicação:
- (a) Na ausência de nêutrons retardados;
  - (b) Com 0,65% dos nêutrons emitidos com atraso de 14 s.

# Exercícios

- 4 Se o fator de reprodução efetivo de um reator é  $k_{ef} = 1,001$ , calcule após quantas gerações, a potência do reator é multiplicada por 2, por 10 e por 100.