

Termohidráulica de Sistemas de Geração de Potência II

PMT 3533

Objetivo

O curso tem as seguintes finalidades:

- **Apresentar uma visão geral dos reatores nucleares de potência e de pesquisa e seus principais sistemas;**
- **Apresentar as principais características dos projetos dos reatores nucleares de potência e de pesquisa;**
- **Apresentar os conceitos básicos sobre os processos de geração de calor no núcleo dos reatores nucleares;**
- **Apresentar os conceitos básicos sobre os processos de transferência de calor e escoamento de fluidos nos outros sistemas dos reatores nucleares (PWR);**

Forma de Avaliação

$$NF = (MT + MLE + PF) / 3$$

NF: Nota Final;

MT: Média dos Testes (Testes ao final de cada assunto a ser aplicado na própria plataforma Moodle);

MLE: Média das Listas de Exercícios;

PF: Média do Projeto Final (A ser discutido com a turma durante o curso).

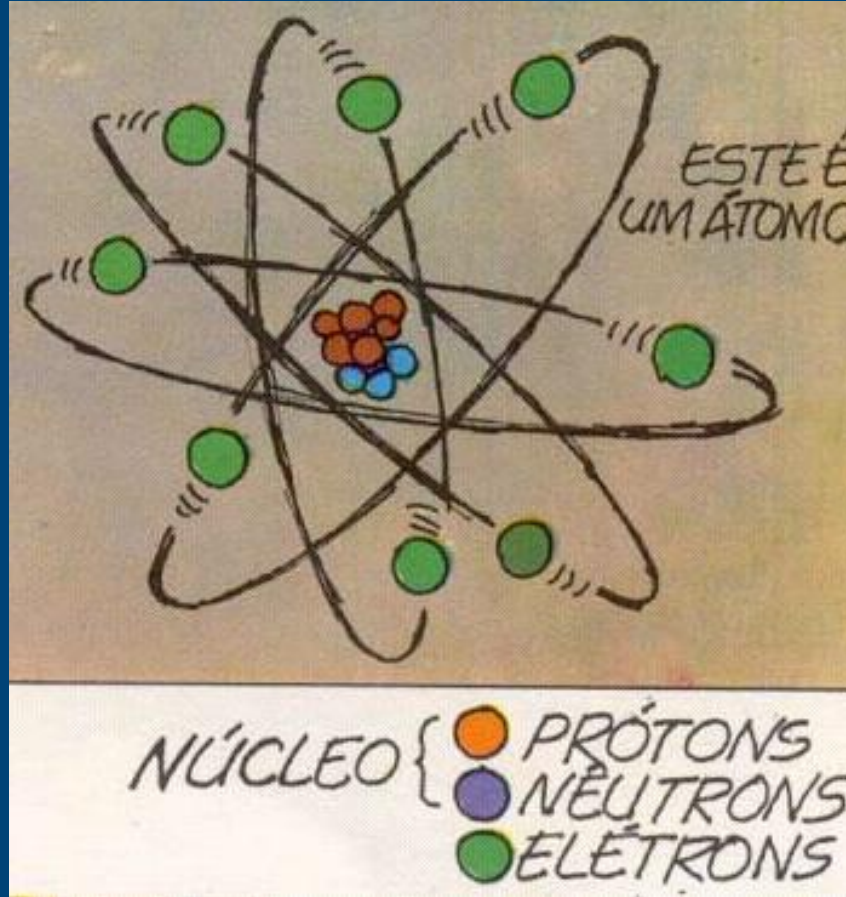
Fonte de Calor: Fissão

▶ 1938

-Hahn e Lise Meitner descobriram a fissão



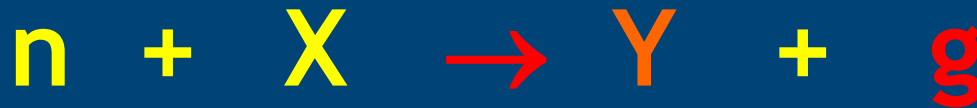
Átomo



Interação de Nêutrons com a Matéria

- Os nêutrons não possuem carga elétrica , não interagem com a eletrosfera do átomo → muito penetrante.
- nêutrons perdem energia → interação com o núcleo do átomo.

Formulação Geral:



Nêutron

Núcleo alvo

Núcleo produto

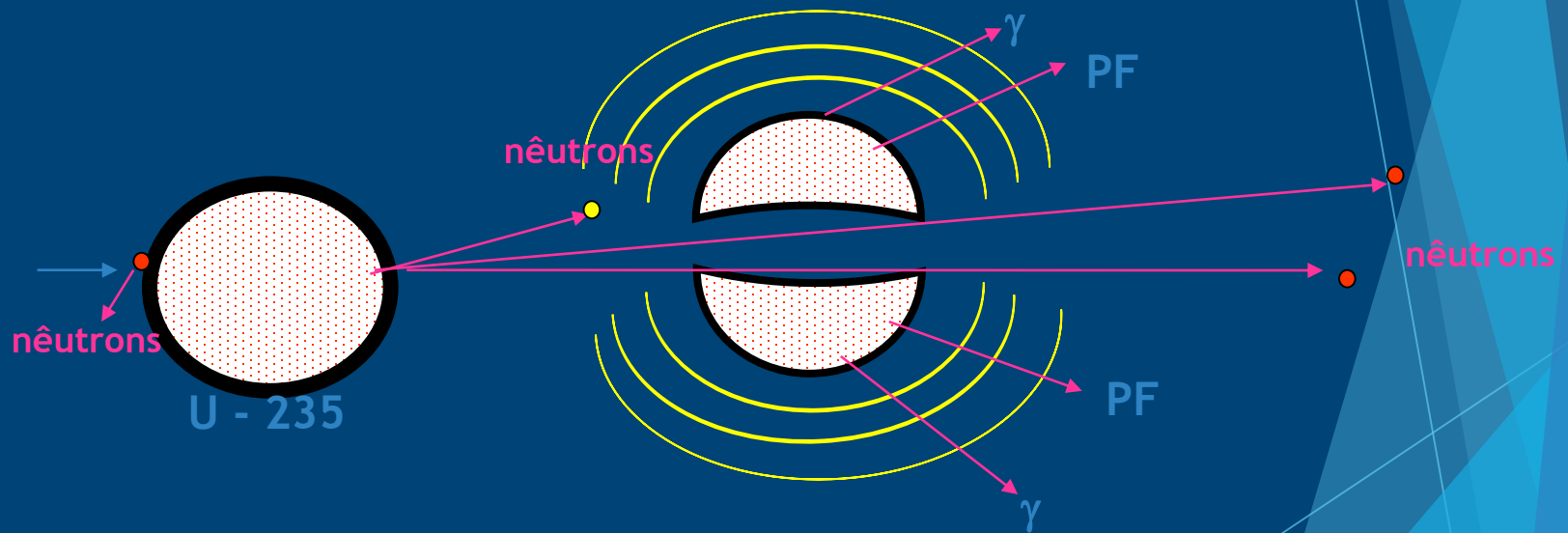
produto da interação

Dependendo da natureza de g :

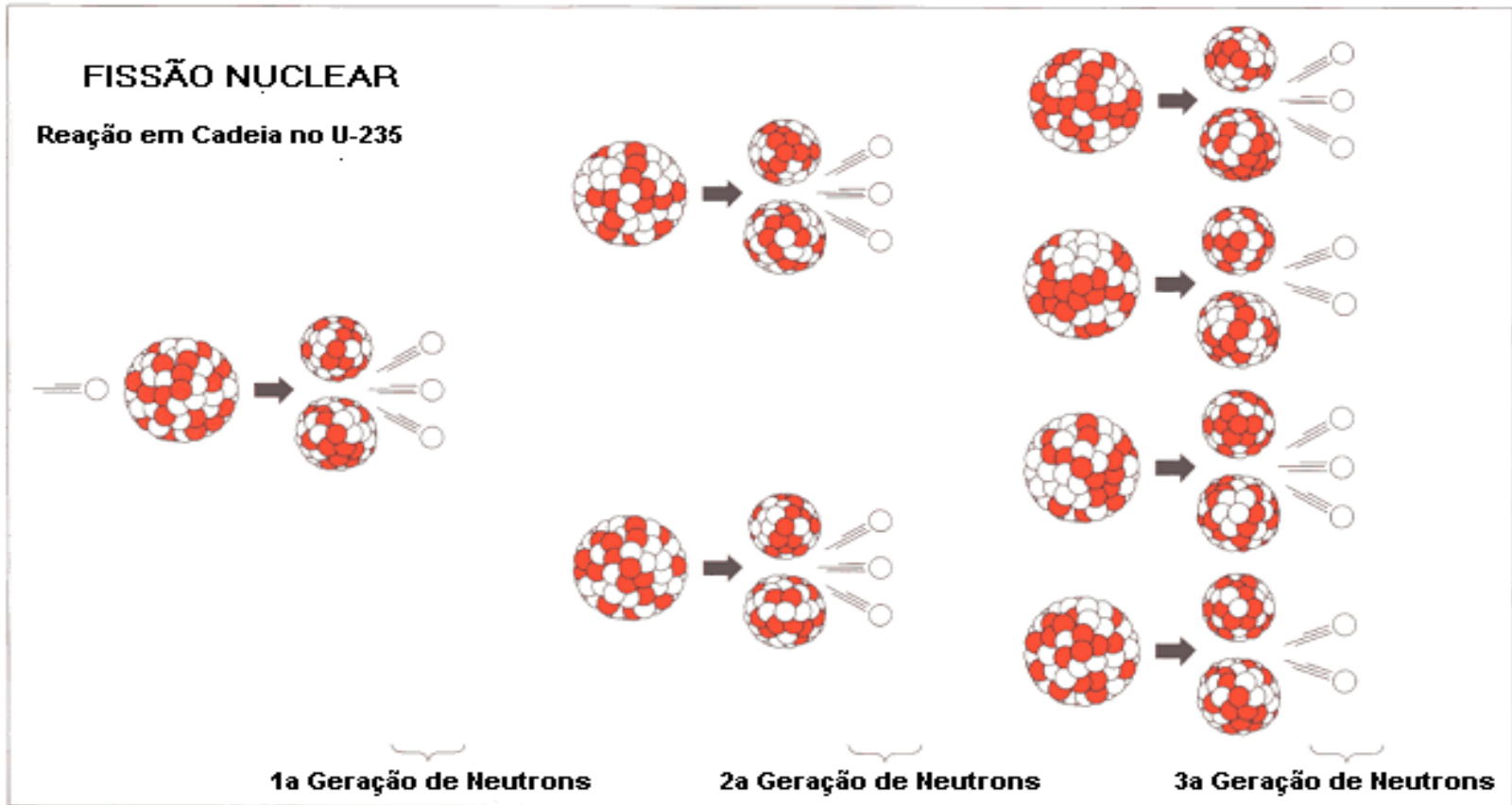
- a. Espalhamento elástico: **g** é o nêutron e a energia cinética total se conserva;
- b. Espalhamento inelástico: **g** é o nêutron e a energia cinética total não se conserva (o núcleo alvo fica excitado);
- c. Captura: **g** é uma ou mais partículas carregadas (α , p, deut)
- d. Captura radioativa: **g** é um raio gama;
- e. Fissão: **g** é um núcleo atômico mais 2 ou 3 nêutrons rápidos.

Fissão Nuclear

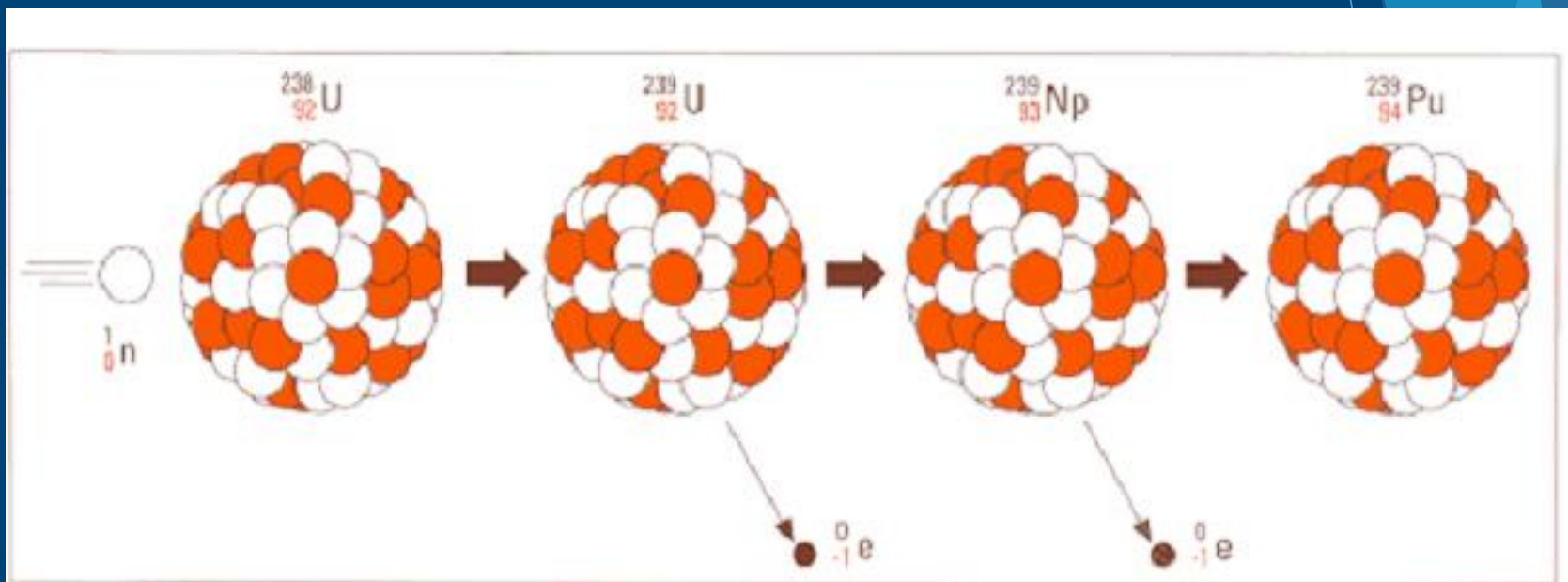
Emissão de nêutrons na fissão



EMISSÃO DE NEUTRON NA FISSÃO Nuclear



Reação de Captura

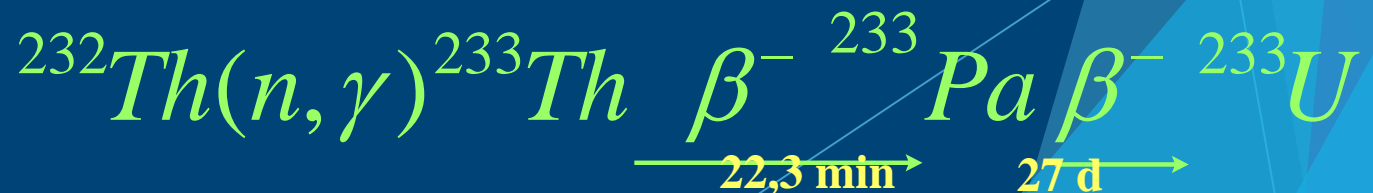
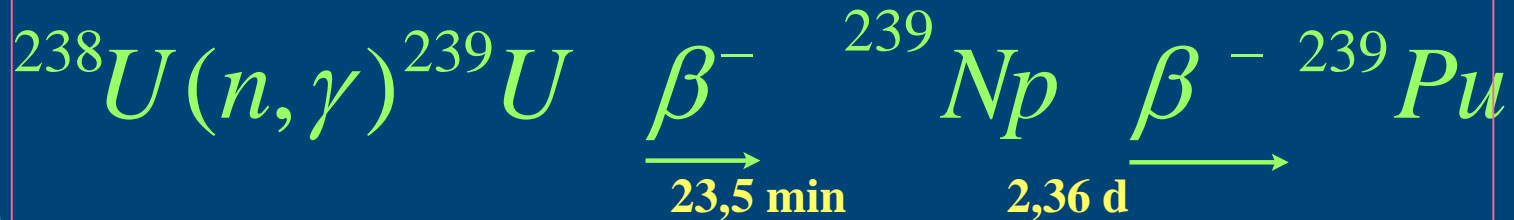


Reação de captura no U-238, produção de Pu-239

Apenas três nuclídeos são importantes:

U-235 ocorre naturalmente

U-233 são produzidos
Pu-239 artificialmente



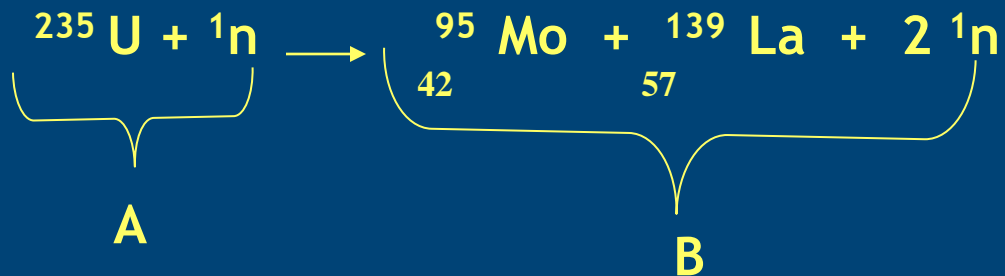
Medida pela variação de massa do sistema antes e depois da fissão.

Valor médio geral = 200MeV / fissão

Experimentalmente
se mede:

⇒ energia cinética dos PF (167 MeV)
+
⇒ energia cinética dos nêutrons emitidos
(2,5 nêutrons) (5MeV)
+
⇒ energia dos γ prontos (7MeV)
+
⇒ decaimento dos PF ($\beta + \gamma$) (21MeV)
(+ neutrinos 11MeV)
Total = 200 MeV

BALANÇO DE MASSA:



$$m_{\text{A}} = 235,124 \text{ u.m.a} + 1,009 \text{ u.m.a}$$

$$m_{\text{A}} = 236,133 \text{ u.m.a}$$

$$m_{\text{B}} = 94,946 \text{ u.m.a} + 138,955 \text{ u.m.a} + 2,018 \text{ u.m.a}$$

$$m_{\text{B}} = 235,918 \text{ u.m.a}$$

$$\Delta m = 236,133 - 235,918 \text{ u.m.a}$$

$$\Delta m = 0,215 \text{ u.m.a}$$

$$E = 931,5 \times 0,215 = \underline{200\text{MeV}}$$

Combustível

Quantidade necessária para operar uma usina de 1.000 MWe por ano



3 caminhões
de 10 t



**30 t
Nuclear**

5,5 metaneiros
de 200.000 t



**1.100.000 t
Gás Natural
(GNL)**

7 petroleiros
de 200.000 t



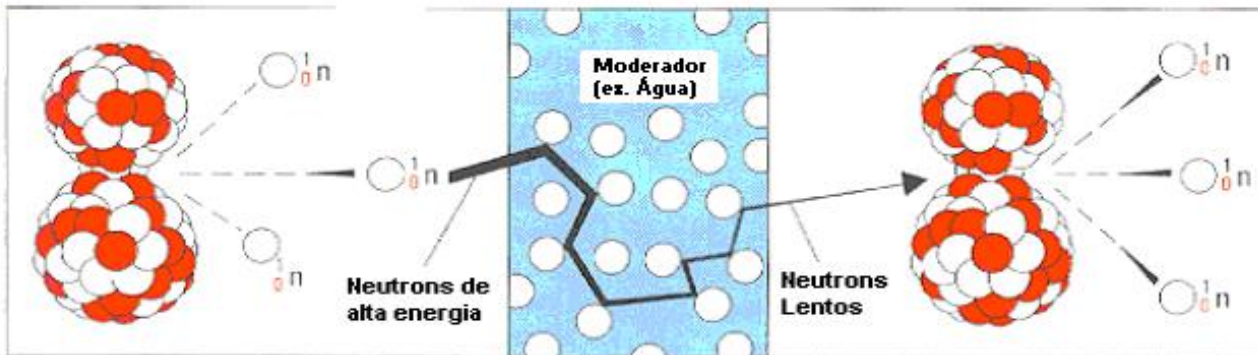
**1.400.000 t
Óleo**

11 cargueiros
de 200.000 t

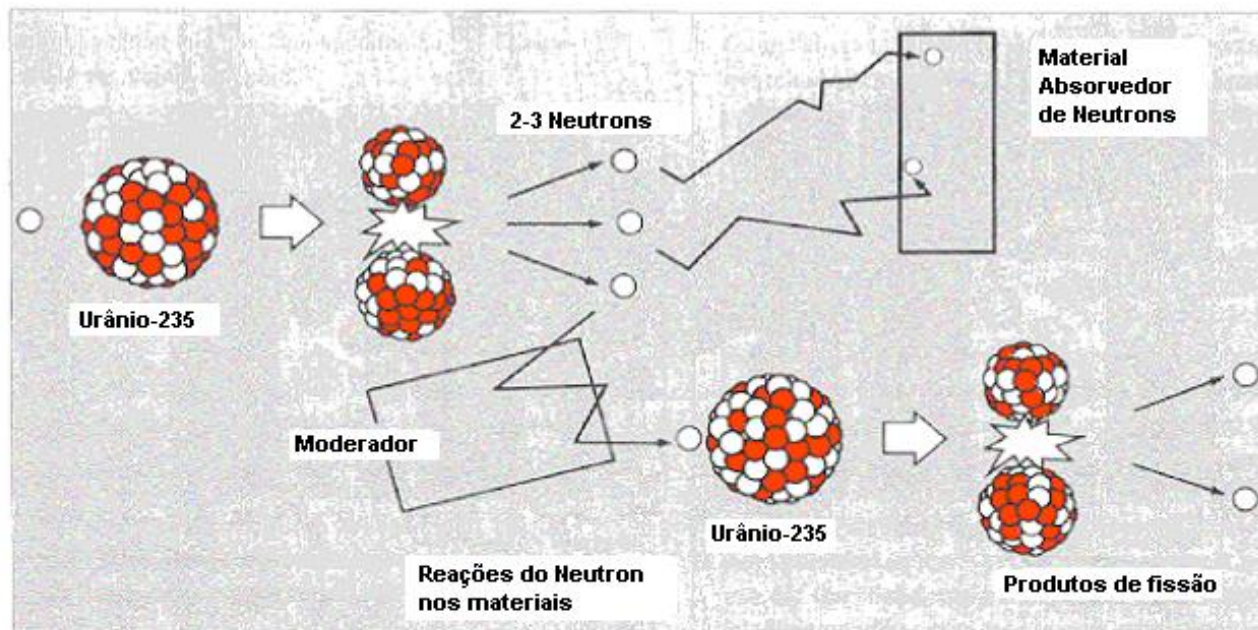


**2.000.000 t
Carvão**

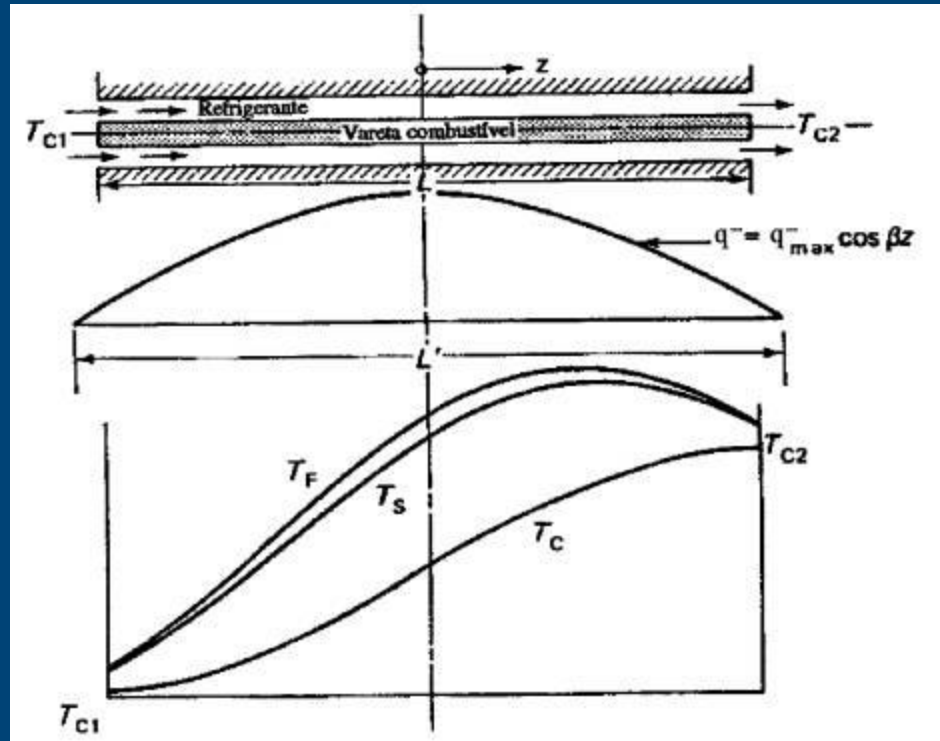
Ciclo do Nêutrons em um Reator Nuclear Térmico



Redução da energia dos neutrons de fissão no moderador



Geração Axial de Calor :



q'' → equação de uma parábola

AXIALMENTE :

T_c – temperatura do refrigerante

T_s – temperatura na superfície externa do revestimento

T_F – temperatura no centro do combustível

*densidade
de
nêutrons*

$$q''' \propto n$$

$$\left(\frac{\text{nêutrons}}{\text{cm}^2 \cdot \text{seg}} \right)$$

$$q''' = q'''_{\text{máx}} \cos \beta z$$

$$\beta = 4\pi/L$$

Distribuição Axial de Fluxo Real

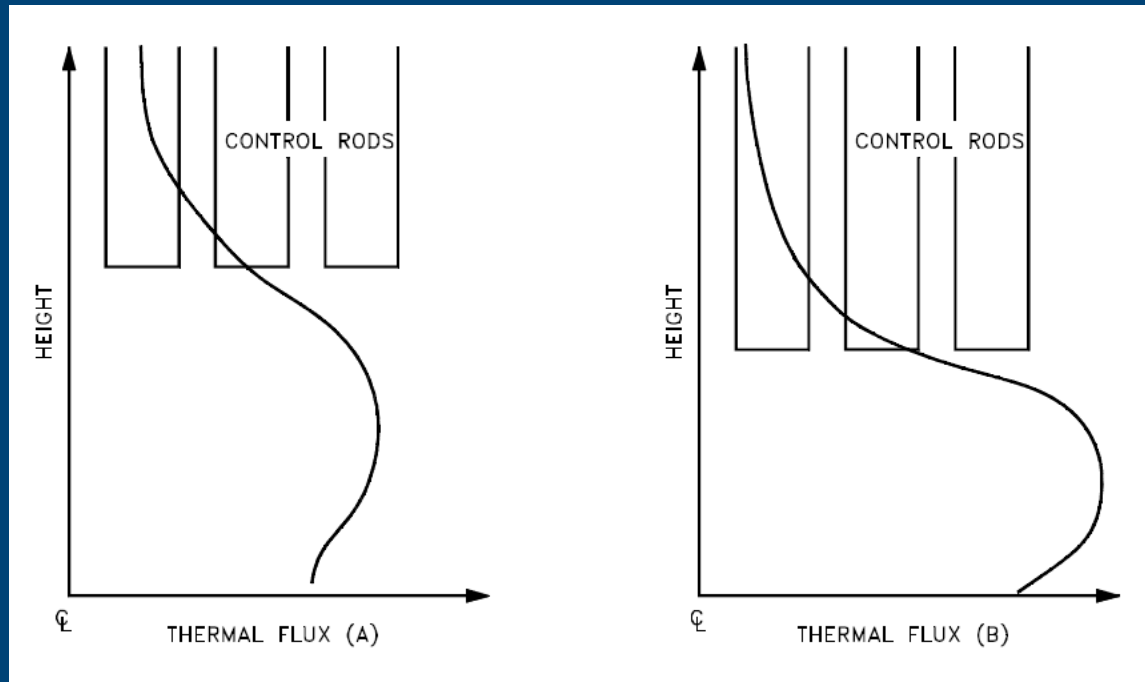
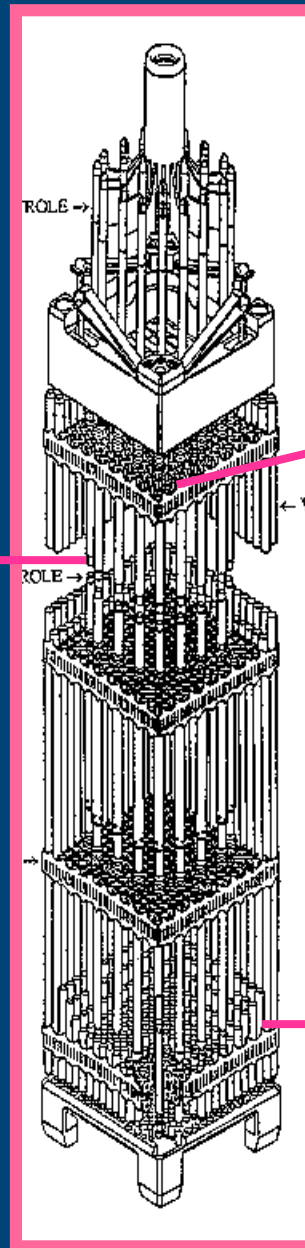


Figura de um Elemento Combustível

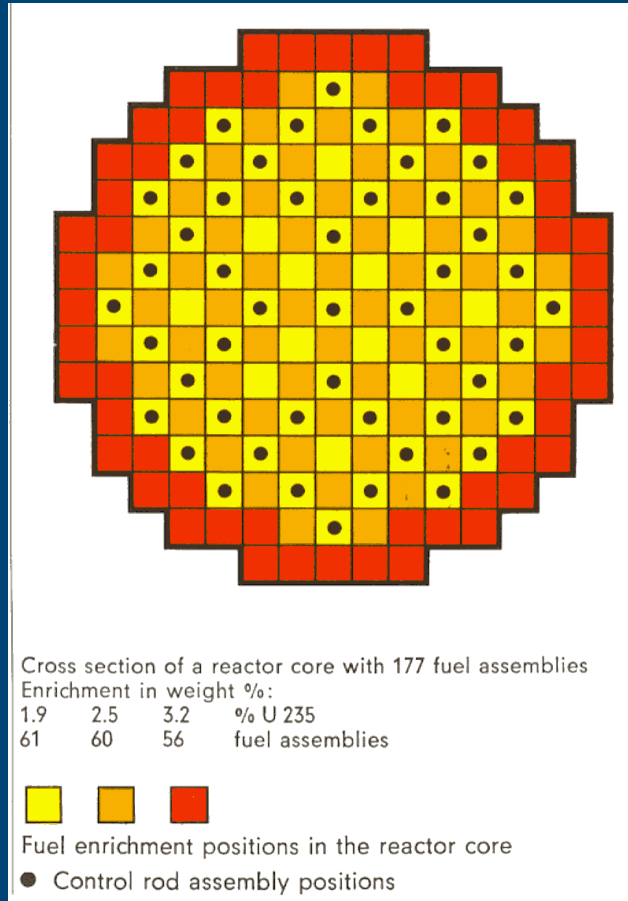
Barras de Controle



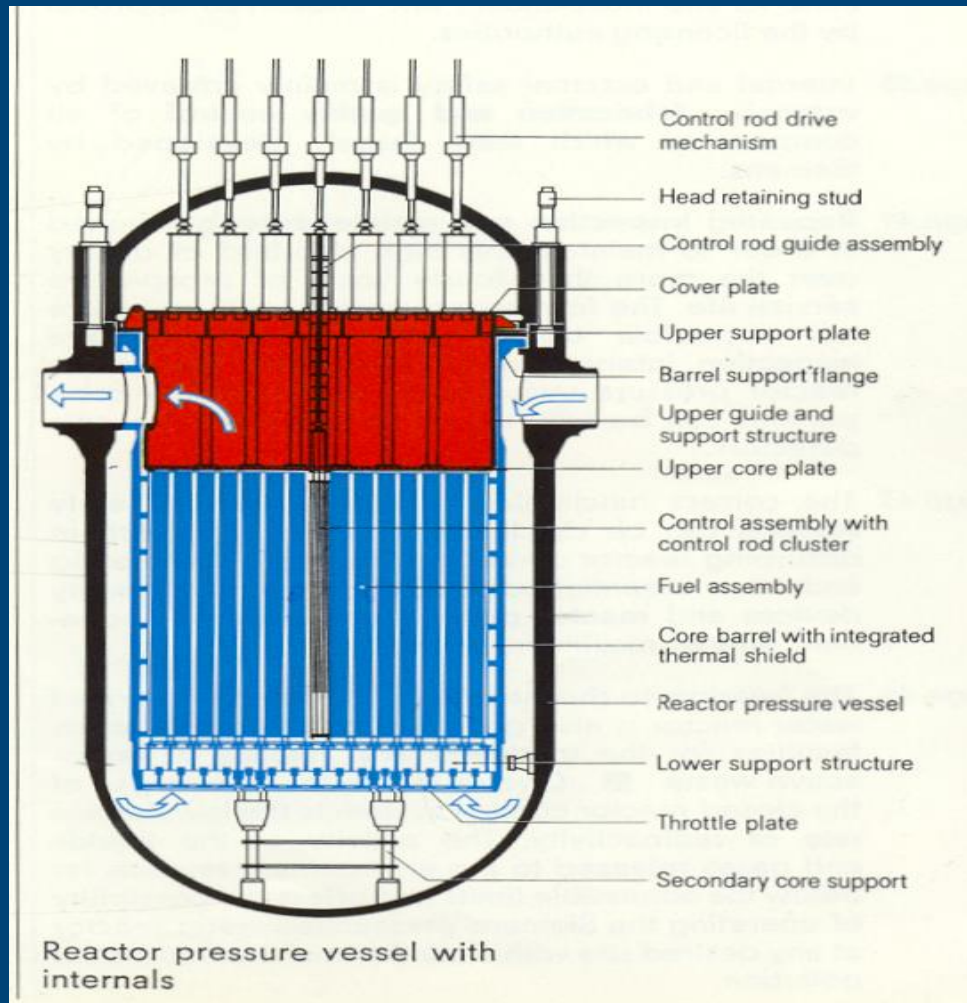
Grades
Espaçadoras

Varetas
Combustíveis

Distribuição Radial de Potência no Núcleo



Distribuição Radial de Potência no Núcleo



Fatores de Potência Radial e Axial

A carga inicial de combustível em um reator nuclear, seja ele de Potência ou de Pesquisas, é feita com três densidades de urânio distintas.

Cada carga de Elementos Combustíveis tem um ciclo de aproximadamente 18 meses quando são retirados os elementos combustíveis centrais e os Elementos Combustíveis mais periféricos passam para uma posição mais central e os Ecs novos entram na periferia.

Esta estratégia se justifica pelo fato que na região periférica ocorre maior perda de nêutrons por fuga, apesar dos refletores, e a região central essa fuga praticamente não existe e, portanto, o número de fissões é maior (gerando maior calor). É uma maneira de tentar “uniformizar” o fluxo de calor no núcleo.

Canal Quente e Canal Médio

Apesar de toda estratégia para tentar uniformizar a distribuição de potência no núcleo, sempre existirá uma região com maior número de fissões e, portanto com maior geração de calor.

Desta forma podemos definir um canal Mais Quente no núcleo e um Canal Médio.

Canal Quente e Canal Médio

O Canal Quente é aquele que será utilizado para o cálculo das temperaturas máximas de combustível, revestimento e fluido refrigerante, além de outros fatores limitantes de projeto que serão apresentados futuramente.

O Canal Médio é um Canal Hipotético, no qual são calculadas as temperaturas médias de combustível, revestimento e de saída do fluido refrigerante, ou seja condições médias de operação do núcleo.

Escolha do Refrigerante para Reatores Nucleares

Refrigerante

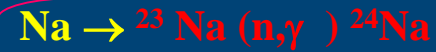
- gás (He, CO₂)

- H₂O $\sigma_c \uparrow$ Requerem altas pressões

- D₂O $\sigma_c \downarrow$

(muito cara)

- metal líquido



liga Na-K

Escolha do Revestimento para Reatores Nucleares

Propriedades

- baixa seção de choque de absorção
- valores elevados de
 - ρ - massa específica
 - c - calor específico
 - K - condutividade térmica
- estabilidade química
- baixa atividade induzida por nêutrons

CONTROLE DA POTÊNCIA DE UM REATOR NUCLEAR

$$K_{ef} = v\varepsilon(1 - L_f)P(1 - L_t)f \frac{\sigma_f}{\sigma_a}$$

Taxa de Fuga de Nêutrons	+	Taxa de Absorção de Nêutrons	=	Taxa de Produção de Nêutrons
-----------------------------	---	---------------------------------	---	---------------------------------

$$\textcircled{1} \quad \eta = \frac{v\sigma_f}{\sigma_a}$$

②

③

$$\therefore K_{ef} = \eta\varepsilon P f (1 - L_f)(1 - L_t)$$

Sistema auto – sustentado

$K_{ef} = 1$ (sistema crítico)

Se $K_{ef} > 1$

sistema supercrítico

Se $K_{ef} < 1$

sistema subcrítico

$$k_{\infty} = \eta\varepsilon P f$$

A criticalidade ($k_{ef} = 1$) é mantida artificialmente com a introdução de barras absorvedoras de nêutrons chamadas barras de controle ou a introdução de material absorvedor no fluido refrigerante.

As fugas de neutrões podem ser diminuídas envolvendo o núcleo do reator com material refletor de nêutrons, que tem as mesmas propriedades dos moderadores (H_2O , grafita, Be).

Controle de um reator nuclear

Propósitos

- a) variar a reatividade
- b) manter o reator crítico
- c) desligar o reator

Meios

- a) introdução de material absorvedor de nêutrons
- b) diminuir a quantidade de moderador
- c) alterar a geometria do reator

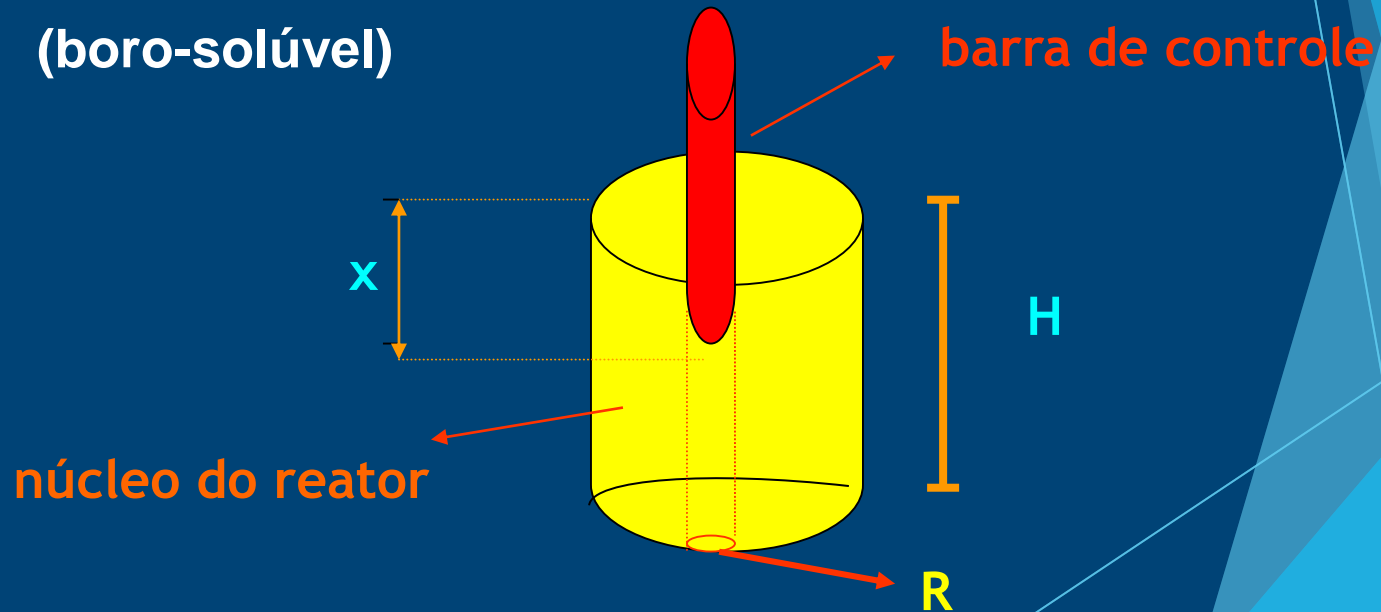
Absorvedores de nêutrons

- barras de controle

(B_4C , Ag - In - Cd,
Hf)

- absorvedor solúvel no moderador

(boro-solúvel)



- veneno queimável (óxido B, óxido de Gd - combustível ou estruturas)

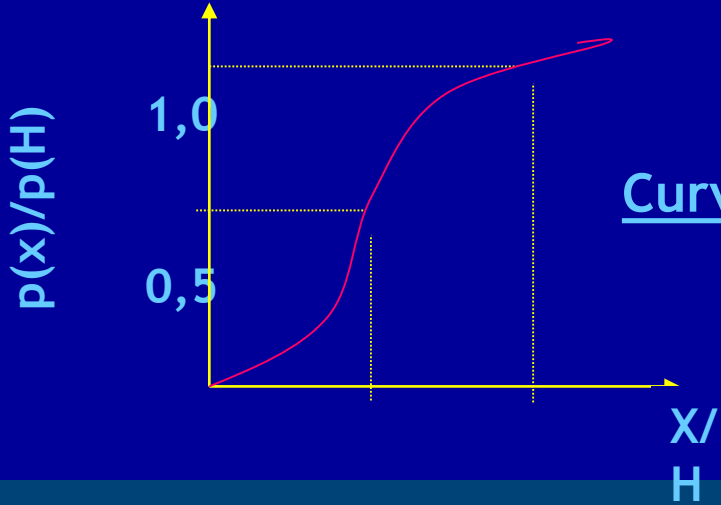
Demonstra-se:

$$\rho(x) = \rho(H) \left[\frac{x}{H} - \frac{1}{2\pi} \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi x}{H} \right) \right]$$

Reatividade da barra

Reatividade total da barra

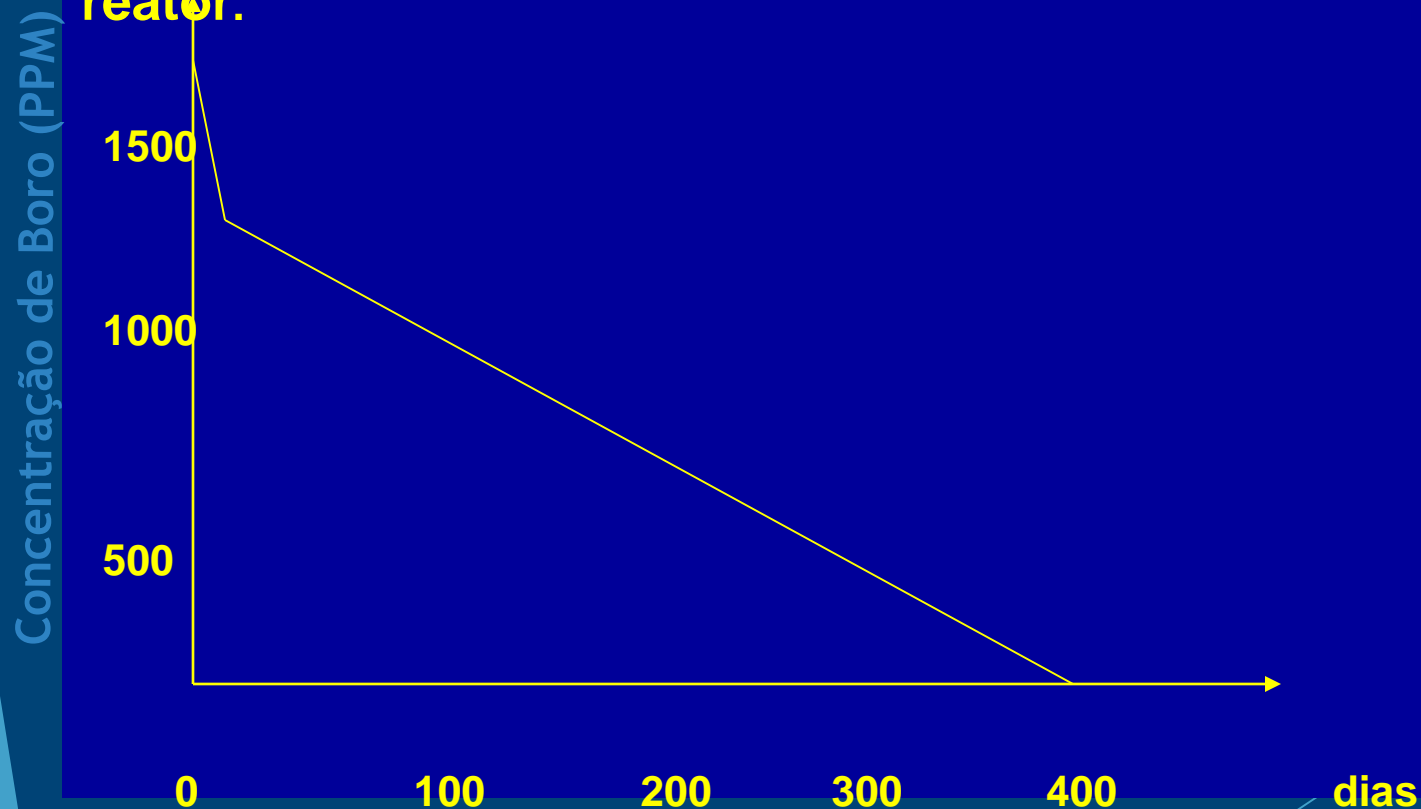
$$\frac{\rho(x)}{1000.000} = \frac{k-1}{k} = \rho$$



Curva integral de barra

Boro Solúvel (ácido bórico)

A concentração acompanha a variação de reatividade no reator.



Termodinâmica e Transferência de Calor em Reatores Nucleares

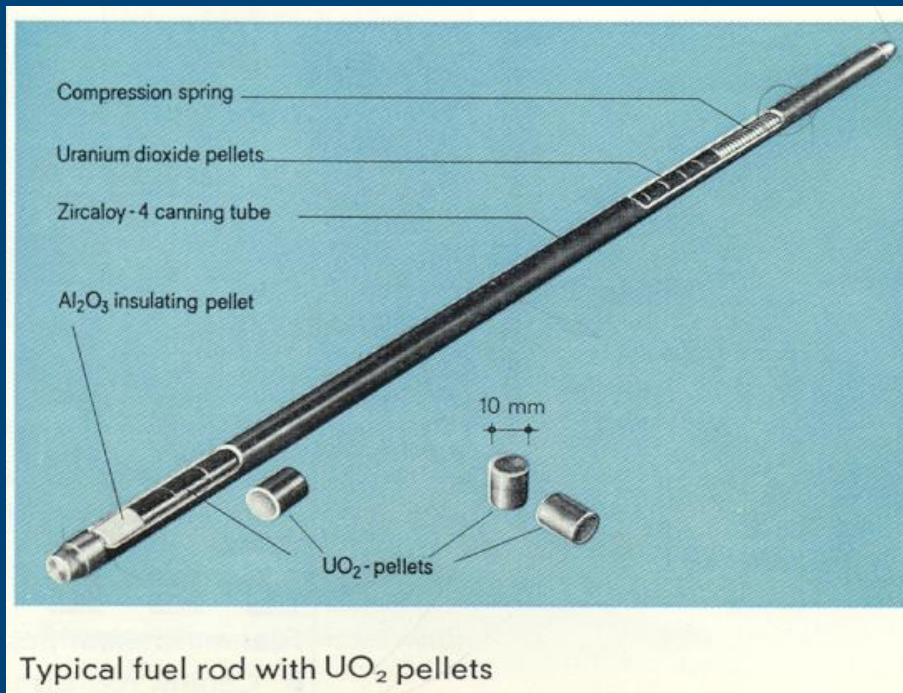
- Transferência de Calor e Circulação de Fluido em Reatores Nucleares

Termodinâmica e Transferência de Calor

Transferência de Calor e Circulação de Fluido em Reatores Nucleares:

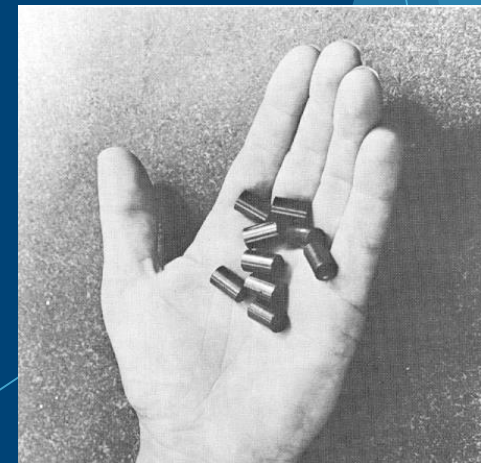
- A energia gerada na fissão deve ser transferida, sob a forma de Calor , do combustível para um fluido Refrigerante;
- O sistema de refrigeração deve ser tal que a temperatura seja mantida abaixo dos limites impostos pelas propriedades dos materiais (combustível, fluido e estruturas).

REATORES REFRIGERADOS A H₂O PRESSURIZADA (PWR)



Vareta Combustível

Pastilhas Combustíveis



Condução de Calor em Elementos Combustíveis (EC)

Propriedades
térmicas do
combustível

- elevada condutividade térmica
- boa resistência à corrosão
- boa resistência mecânica em altas temperaturas
- temperatura máxima de operação elevada

Condução de Calor em Elementos Combustíveis (EC)

Funções do Revestimento

- evita a liberação de PF
- dá estrutura ao combustível nuclear
- amplia a área de troca de calor

Propriedades do Revestimento

- baixa seção de choque de captura
- elevada condutividade térmica
- inércia química com relação ao combustível e ao refrigerante
- boa resistência mecânica a altas temperaturas

Condução de Calor em Elementos Combustíveis (EC)

Materiais mais usados como revestimento:

- liga de alumínio
- liga de magnésio (Magneox)
- Aço inox
- Ligas de zircônio (zircaloy)