

Notas de Aula de Introdução à Física Nuclear (NHZ3026)

Prof. Dr. Marcelo Augusto Leigui de Oliveira
 Centro de Ciências Naturais e Humanas (CCNH)
 Universidade Federal do ABC (UFABC)
 Santo André - SP

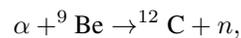
AULA #13: FISSÃO NUCLEAR: FÍSICA DE NÊUTRONS E DE REATORES

I. INTRODUÇÃO HISTÓRICA



Figura 1: Da esquerda para a direita: Walter Bothe, o casal Curie-Joliot e James Chadwick.

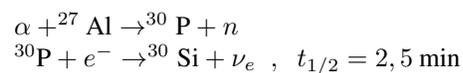
(1930) W. Bothe e H. Becker descobrem uma radiação penetrante de carga neutra no bombardeamento α do berílio:



que foi, inicialmente, interpretada como radiação γ .

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

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



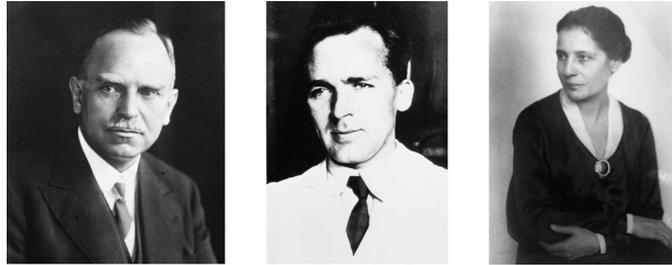
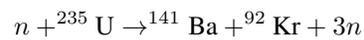


Figura 2: Da esquerda para a direita: Otto Hahn, Fritz Strassmann e Lise Meitner.

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



após uma detalhada análise química, descobrindo os fragmentos.

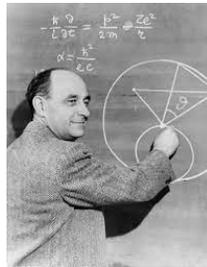


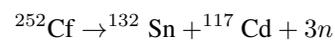
Figura 3: Enrico Fermi.

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

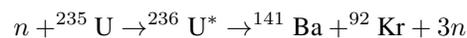
II. FUNDAMENTOS

Fissão: repulsão eletrostática x tensão superficial (analogia com uma gota líquida eletricamente carregada)

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.

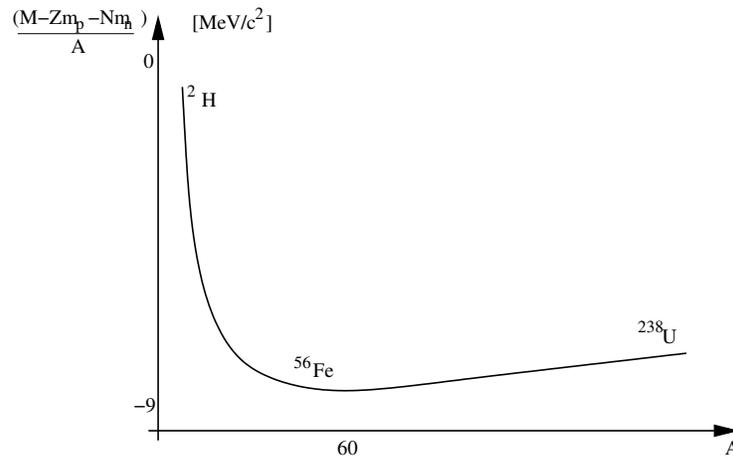


Figura 4: Diferença de massa por núcleon.

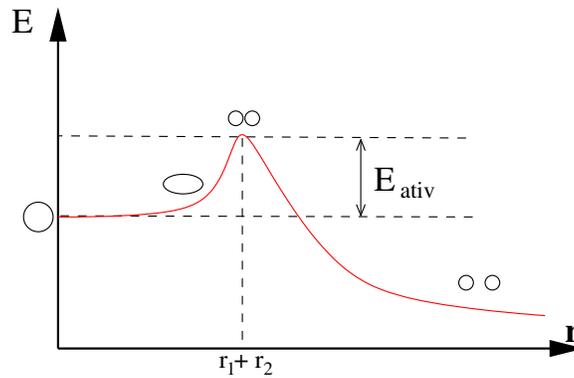


Figura 5: Energia de ativação.

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

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.

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 ε 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*:

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

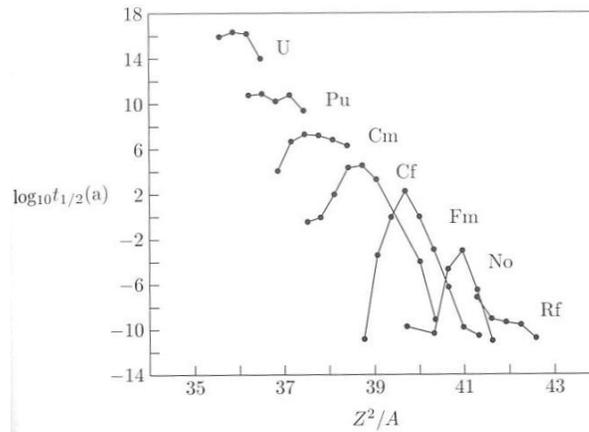


Figura 6: Meia-vida de núcleos em função do parâmetro de fissionabilidade.

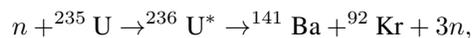
Faz-se a distinção:

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

Agora, seja a captura de nêutron pelos isótopos de urânio. A energia de excitação do núcleo 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 : $E_{excit} = 5,2 \text{ MeV} < E_{ativ} = 5,9 \text{ MeV}$.

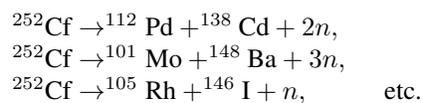
Assim, tem-se, tipicamente:



mas, por outro lado:



Distribuição de massas dos fragmentos:



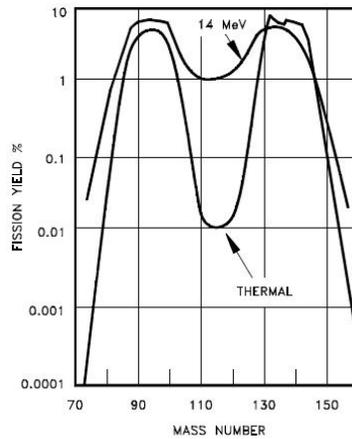


Figura 7: Distribuição de massa dos fragmentos de fissão.

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

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

fragmentos	=	165 MeV
nêutrons	=	5 MeV
decaimentos $-\beta$	=	7 MeV
decaimentos $-\gamma$	=	11 MeV
neutrinos	=	<u>12 MeV</u>
		200 MeV

III. NÊUTRONS

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

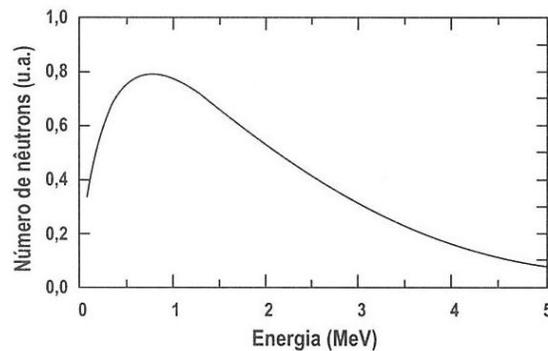


Figura 8: Distribuição de energia para nêutrons emitidos na fissão.

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

sendo que (exercício 3):

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

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

Agora, os nêutrons emitidos podem sofrer os seguintes processos:

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

Seção de choque para fissão devido à captura de nêutrons:

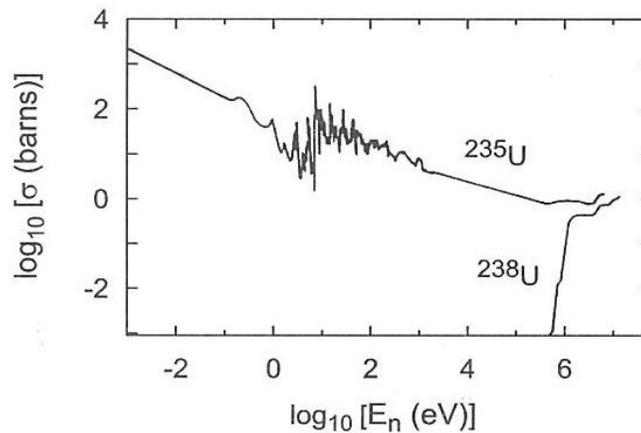


Figura 9: Seção de choque para a captura de nêutrons.

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 ~ 1 MeV.

Classificamos os nêutrons em:

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

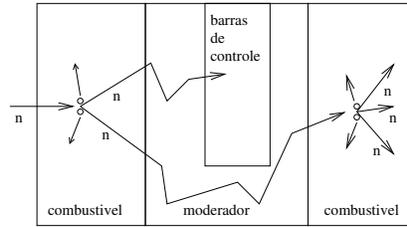


Figura 10: Ciclo de nêutrons.

IV. REATORES DE FISSÃO

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

- combustível: isótopo fissionável e/ou fértil, material responsável pela geração de energia (^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{232}Th);
- moderador: responsável pela termalização dos nêutrons (H_2O , D_2O , He, grafite, Na metálico);
- refrigerador: material que conduz o calor (H_2O , D_2O , He, CO_2 , Na metálico);
- refletor: realiza retroespalhamento de nêutrons (H_2O , D_2O , grafite, U);
- barras de controle: absorvedores de excesso nêutrons (Cd, B);
- blindagem: proteção contra o vazamento de nêutrons e raios- γ (concreto, Pb, H_2O , aço).

Fator de reprodução efetivo de nêutrons:

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

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

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

geração:	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	...
	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: $N_f = N_0 + N_0k_{ef} + N_0k_{ef}^2 + N_0k_{ef}^3 + \dots = \frac{N_0}{1-k_{ef}}$, para $k_{ef} < 1$.

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

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

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.

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

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}U ou ^{238}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}U e 492 são absorvidos em material não combustível.

Destes 489, digamos que 89 (18,2%) não causam fissão (por exemplo, gerando estados excitados $^{236}\text{U}^*$ com emissão de radiação γ), então, se o fator de reprodução para os nêutrons que causam fissão é $\eta_0 = 2,5$, o fator de reprodução efetivo η 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:

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

conhecida como *fórmula dos 6 fatores*.

Em complemento ao k_{ef} , há também o k_{∞} , 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*.

V. REATORES NO MUNDO



Figura 11: Reactores nucleares no mundo [Ref.: Terra].

Veja também os links:

[Eletronuclear](#)

[Wikipedia](#)

VI. TIPOS DE REATORES

Nome (sigla)	Combustível	Moderador	Refrigerador	Observação
Light Water Reactor (LWR)	U enriquecido	H ₂ O	H ₂ O	
Boiling Water Reactor (BWR)	"	"	"	
Pressurized Water Reactor (PWR)	"	"	"	Angra I e II
Canada Deuterium Uranium (CANDU)	U comum	D ₂ O	D ₂ 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 ₂ 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 ² MW

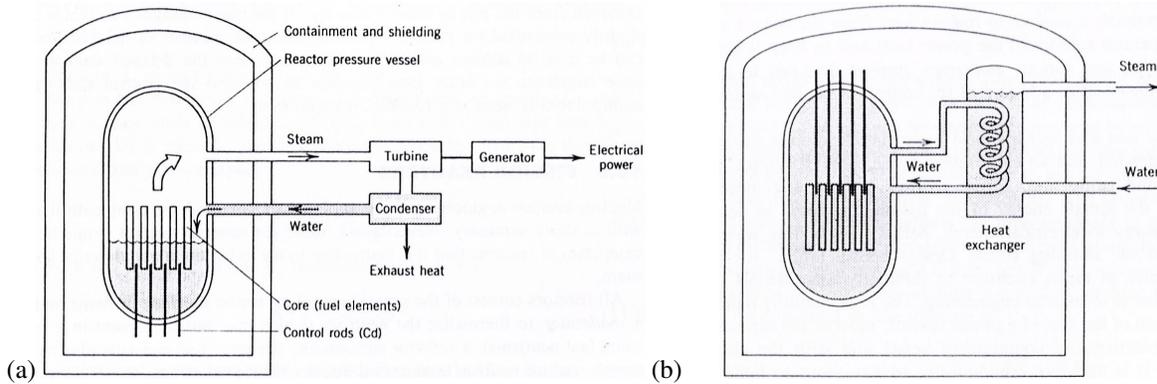


Figura 12: Reatores refrigerado com água leve (LWR): (a) BWR; (b) PWR.

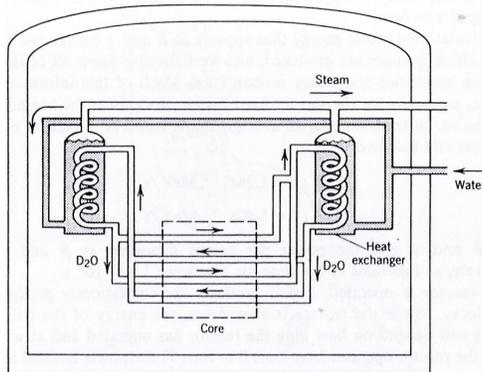


Figura 13: Reator refrigerado com água pesada (CANDU).

Nome (sigla)	Combustível	Moderador	Refrigerador	Observação
Light Water Reactor (LWR)	U enriquecido	H ₂ O	H ₂ O	
Boiling Water Reactor (BWR)	"	"	"	
Pressurized Water Reactor (PWR)	"	"	"	Angra I e II
Canada Deuterium Uranium (CANDU)	U comum	D ₂ O	D ₂ O	
Fast Breeder Reactors (FBR)	Pu	não tem	Na líquido	n rápidos
High Temperature Gas-Cooled Reactor (HTGR)	mistura Th/U	grafite	He	
Reator Bolshoy Moshchnosty Kanalny (RBMK)	U enriquecido	grafite	H ₂ 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 ² MW

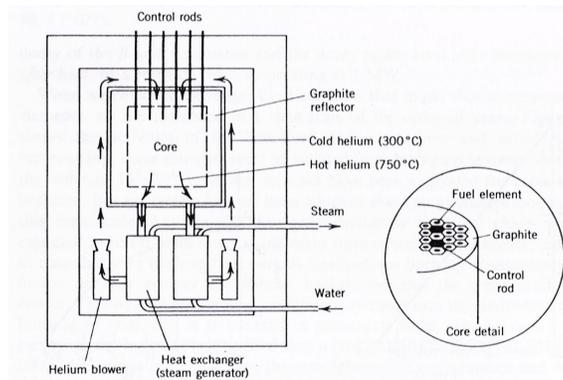


Figura 14: Reator refrigerado a gás He (HTGR).

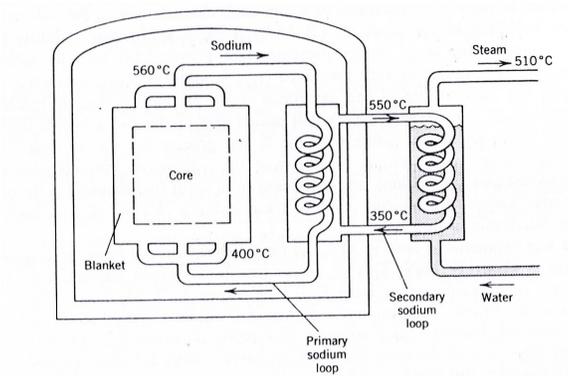


Figura 15: Reator refrigerado a Na líquido (FBR).

VII. 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 $m({}^{96}\text{Mo}) = 95,904679 \text{ u}$.

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.
3. 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.
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.