

A4 - CINÉTICA DE REATORES

4.1 INTRODUÇÃO

Ao estudarmos o "Fator de Multiplicação Subcrítica" verificamos que a população de nêutrons permanece constante para um determinado $K_{ef} < 1$, desde que haja uma fonte de nêutrons no núcleo do reator. Se esta fonte de nêutrons for retirada, mantendo-se o mesmo $K_{ef} < 1$ a população neutrônica anteriormente estável irá se reduzir gradativamente tendendo para zero.

Quando dizemos que um reator está crítico com $K_{ef} = 1$, sendo:

$$K_{ef} = \frac{\text{nº de nêutrons em uma dada geração}}{\text{nº de nêutrons na geração anterior}} \quad 4.1$$

devemos lembrar que esta expressão somente será válida se não existirem fontes de nêutrons no núcleo do reator. Obviamente, as fontes devidas às fissões espontâneas do próprio combustível são desprezíveis. Deste modo, podemos definir exatamente as condições de crítico, subcrítico e supercrítico.

$K_{ef} = 1$ "REATOR CRÍTICO" - População de nêutrons estável de geração para geração.

$K_{ef} < 1$ "REATOR SUBCRÍTICO"- População de nêutrons sendo reduzida de geração para geração.

$K_{ef} > 1$ "REATOR SUPERCRÍTICO"- População de nêutrons sendo aumentada de geração para geração.

4.2 REATIVIDADE " ρ "

Reatividade é uma variável que nos indica o quanto o reator está afastado de sua criticalidade ($K_{ef} = 1$). Esta reatividade é função, entre outras, da temperatura, como veremos no Apêndice 8. Qualquer variável que afete o " K_{ef} " irá alterar o valor da

reatividade " ρ ". Podemos definir reatividade como sendo a variação fracional da população de nêutrons entre duas gerações sucessivas.

Supondo que exista uma população de " N_0 " nêutrons em uma dada geração, na geração seguinte teremos uma população de $(N_0 \times K_{ef})$ nêutrons.

Sendo $[(N_0 \times K_{ef}) - N_0]$ a variação numérica sofrida pela população de nêutrons entre as duas gerações sucessivas, a variação fracional será dada por:

$$\frac{(N_0 \cdot K_{ef}) - N_0}{N_0 \cdot K_{ef}} = \frac{K_{ef} - 1}{K_{ef}} \quad 4.2$$

logo,

$$\rho = \frac{K_{ef} - 1}{K_{ef}} \quad 4.3$$

ou

$$K_{ef} = \frac{1}{1 - \rho} \quad 6.4$$

denominando $\Delta K = K_{ef} - 1$,

$$\rho = \frac{\Delta K}{K} \quad 6.5$$

A reatividade pode ser expressa por diferentes "unidades" que foram criadas, pois o valor de reatividade é adimensional.

Entre as unidades existentes, citaremos apenas aquelas que são mais largamente empregadas na prática:

- $\Delta K/K$ que vem a ser o próprio valor numérico de ρ .
- (%) $\Delta K/K$ valor numérico de $\rho \times 100$.
- p.c.m. valor numérico de $\rho \times 100000$ (p.c.m. = por cem mil).

Podemos verificar facilmente as relações:

$$\boxed{1 \frac{\Delta K}{K} = 100\% \frac{\Delta K}{K} = 10^5 \text{ p.c.m.}} \quad 4.6$$

ou

$$\boxed{1 \text{ p.c.m.} = 10^{-3} \% \frac{\Delta K}{K} = 10^{-5} \frac{\Delta K}{K}} \quad 4.7$$

Como exemplo, vamos calcular a reatividade em um reator cujo $K_{ef} = 0,9$.

$$\rho = \frac{K_{ef} - 1}{K_{ef}} = \frac{0,9 - 1}{0,9} = \frac{-0,1}{0,9} = -0,111 \frac{\Delta K}{K}$$

ou

$$\rho = -0,111 \frac{\Delta K}{K} = -11,1(\%) \frac{\Delta K}{K} = -11100(\text{p.c.m.})$$

Observe que a reatividade em um reator subcrítico é sempre negativa. Ela será positiva quando o reator estiver supercrítico e será igual a zero quando o reator estiver crítico.

$\rho = 0$ Reator crítico	$K_{ef} = 1$	$\therefore \rho = 0$
$\rho < 0$ Reator subcrítico	$K_{ef} < 1$	$\therefore \rho < 0$ (negativa)
$\rho > 0$ Reator supercrítico	$K_{ef} > 1$	$\therefore \rho > 0$ (positiva)

4.3 FATOR DE MULTIPLICAÇÃO DE EXCESSO " K_{ex} "

O fator de multiplicação de excesso (k_{ex}) é uma variável que indica quanto " K_{ef} " ultrapassa da unidade. $k_{ex} = (K_{ef} - 1) = \Delta K$.

Este termo não deve ser confundido com reatividade, pois:

$$\rho = \frac{K_{ef} - 1}{K_{ef}} = \frac{K_{ex}}{K_{ef}} = \frac{\Delta K}{K} \quad 4.8$$

4.4 NÊUTRONS DE FISSÃO

No processo de fissão o núcleo de U-235 absorve um nêutron formando um núcleo composto (U-236)*. Este núcleo irá se fissionar gerando dois outros núcleos com menor massa denominados de "Produtos de Fissão". Estes núcleos encontram-se em estado de excitação e sofrerão um processo de decaimento emitindo nêutrons ou outros tipos de radiações como α , β ou γ .

Os nêutrons gerados durante a fissão ou pelo decaimento de produtos de fissão dentro de um intervalo de 10^{-14} segundos são denominados por "Nêutrons Prontos" ou "Nêutrons Instantâneos".

Para todos os efeitos, os fatos que ocorrem dentro deste intervalo de tempo são considerados como instantâneos. Os produtos de fissão originais não são identificados, o que somente será possível após a emissão de nêutrons.

É por este motivo que nas equações representativas do processo de fissão os produtos originais são ignorados.

Os nêutrons prontos emitidos na fissão do U-235 constituem 99,35% do total de nêutrons emitidos na fissão. O restante 0,65% são denominados por "Nêutrons Atrasados" e são emitidos após 10^{-14} segundos da ocorrência da fissão (Tempo de geração dos nêutrons prontos 10^{-14} s).

Os nêutrons atrasados não são emitidos todos ao mesmo tempo. Eles são gerados a uma taxa gradualmente decrescente durante um intervalo de tempo da ordem de segundos após a fissão.

Na pesquisa e em cálculos de reatores é conveniente o agrupamento dos produtos de fissão em grupos cujas meias-vidas ($T_{1/2}$) sejam da mesma ordem de grandeza. Deste modo, são determinados parâmetros como meia-vida ($T_{1/2}$), vida média

(τ), e constante de decaimento (λ) que são válidos para um grupo específico de produtos de fissão emissores de nêutrons.

Usualmente os produtos de fissão do U-235 que decaem emitindo nêutrons (denominados por "precursores"), são classificados em 6 grupos cujas características estão relacionadas na Tabela 4.1. Estas características dos grupos precursores dependem do combustível utilizado, ou seja, do núcleo que sofre a fissão.

Na Tabela 4.2 temos uma comparação entre as frações de nêutrons atrasados provenientes do U-235 e do Pu-239.

Grupo N°	Meia-Vida $T_{1/2}$ (s)	Vida Média τ (s)	Cte. Decaim. λ (s ⁻¹)	Energia MeV	Fração β_i
1	55,72	78,66	0,0124	0,25	0,000215
2	22,72	31,52	0,0305	0,56	0,001424
3	6,22	8,66	0,111	0,43	0,001274
4	2,30	3,22	0,301	0,62	0,002568
5	0,61	0,72	1,14	0,42	0,000748
6	0,23	0,26	3,01	0,43	0,000273

$$\beta = \sum \beta_i = 0,0065$$

Tabela 4.1: Características dos Nêutrons Atrasados Emitidos pela Fissão do U-235

Na Figura 4.1 temos um exemplo do mecanismo de emissão de nêutrons atrasados pelo decaimento de um produto de fissão (precursor - Br-87).

O fato dos nêutrons atrasados serem emitidos com uma meia-vida bem definida, comprova que os mesmos são originados pelo decaimento de certos produtos de fissão.

Grupos N°	Frações β_i	
	U-235	Pu-239
1	0,000215	0,000073
2	0,001424	0,000626
3	0,001274	0,000443
4	0,002568	0,000685

5	0,000748	0,000181
6	0,000273	0,000092
Total	0,0065	0,0021

Tabela 4.2: Comparação entre as Frações de Nêutrons Atrasados Provenientes do U-235 e do Pu-239

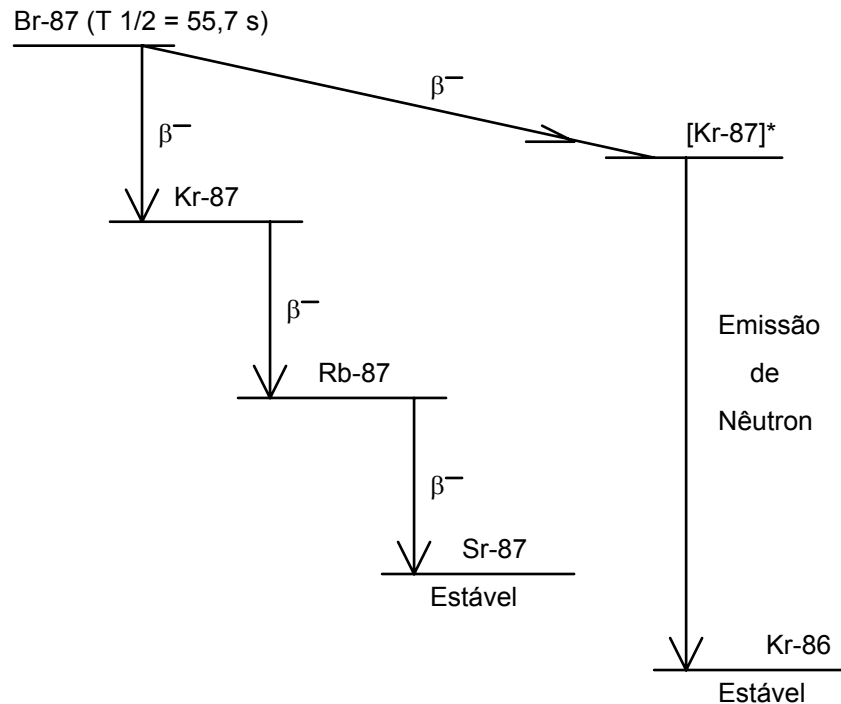


Figura 4.1: Mecanismo de Emissão de Nêutrons Atrasados pelo Decaimento de Um Produto de Fissão (Precursor: Br-87).

Por exemplo, o grupo 1 cuja meia-vida é de 55,7 segundos, está associado ao decaimento do Bromo-87. Já o grupo 2 com meia-vida de 22,7 segundos está associado ao decaimento do Iodo-137 e do Br-88.

Vida Média (τ) é definido como sendo o tempo médio necessário para que haja o decaimento de um núcleo precursor. Podemos dizer ainda que a vida média (τ) de um determinado precursor é o tempo médio transcorrido entre a fissão que deu origem à este precursor e o instante da emissão do nêutron atrasado.

Como visto em capítulos anteriores, matematicamente a vida média (τ) é equivalente ao inverso da constante de decaimento (λ).

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \text{ (seg)} \quad 4.9$$

A constante de decaimento (λ) é definida como a fração da população total de núcleos radioativos que se desintegram por unidade de tempo, dimensionalmente $[\lambda] = [s^{-1}]$.

A análise do comportamento dos nêutrons atrasados torna-se mais simples se trabalharmos com valores que representam todos os seis grupos ao mesmo tempo. Para isto, devemos calcular o valor da "vida média" (τ) representativa de todos os grupos de nêutrons atrasados.

$$\tau = \frac{\sum_{i=1}^6 \beta_i \tau_i}{\sum_{i=1}^6 \beta_i} \quad 4.10$$

onde:

β_i representa a fração de nêutrons atrasados do grupo "i"
 τ_i representa a vida média dos nêutrons atrasados do grupo "i"

No caso do combustível ser o U-235, teremos:

$$\bar{\tau} = 12,7(s). e. \bar{\lambda} = \frac{1}{\bar{\tau}} = 0,08(s^{-1})$$

É bom salientar que os valores da vida média ($\bar{\tau}$); da meia-vida $T_{1/2}$ ou da constante de decaimento ($\bar{\lambda}$) não são valores fixos, sofrendo variações caso o reator se torne supercrítico ou subcrítico.

Caso o reator esteja "supercrítico" ($K_{ef} > 1$), maior será o número de fissões e como resultado maior será o número de nêutrons produzidos. O número de nêutrons atrasados provenientes dos grupos cuja meia-vida são menores irão predominar sobre o número de nêutrons atrasados produzidos pelos grupos que possuem uma meia-vida mais elevada.

Deste modo, haverá uma variação no valor das frações de nêutrons atrasados (β_i). O valor de (β_i) aumentará para os grupos cujas meias-vidas sejam pequenas, os quais terão maior influência no cálculo da vida média $\bar{\tau}$ ($\downarrow$) e $\therefore \bar{\lambda}$ ($\uparrow$) quando o reator estiver supercrítico.

Caso o reator esteja "subcrítico" ($K_{ef} < 1$) a taxa de fissões estará decrescendo, o mesmo ocorrendo com a população de nêutrons. Como consequência, menos nêutrons atrasados estarão sendo produzidos e deste modo, os nêutrons atrasados provenientes de grupos com meia vida elevada irão predominar sobre o número de nêutrons atrasados produzidos pelos grupos cuja meia-vida seja pequena.

Com isto as frações (β_i) dos nêutrons atrasados provenientes de grupos com pequena meia-vida sofrerão uma redução, diminuindo sua influência no cálculo da vida média ($\bar{\tau}$) que irá se aproximar mais dos valores de (τ_i) correspondentes aos grupos com maior meia-vida.

$\bar{\tau}$ ($\uparrow$) e $\therefore \bar{\lambda}$ ($\downarrow$) quando o reator estiver subcrítico.

Na Figura 4.2 temos o comportamento da variação de $\bar{\lambda}$ com a reatividade levando-se em consideração que:

- para $\rho = 0$ Reator Crítico, $\bar{\tau} = 12,7$ (s) e $\bar{\lambda} = 0,08$ (s⁻¹)
- para $\rho > 0$ Reator Supercrítico, $\bar{\tau}$ ($\downarrow$) $\bar{\lambda}$ ($\uparrow$)
- para $\rho < 0$ Reator Subcrítico, $\bar{\tau}$ ($\uparrow$) $\bar{\lambda}$ ($\downarrow$)

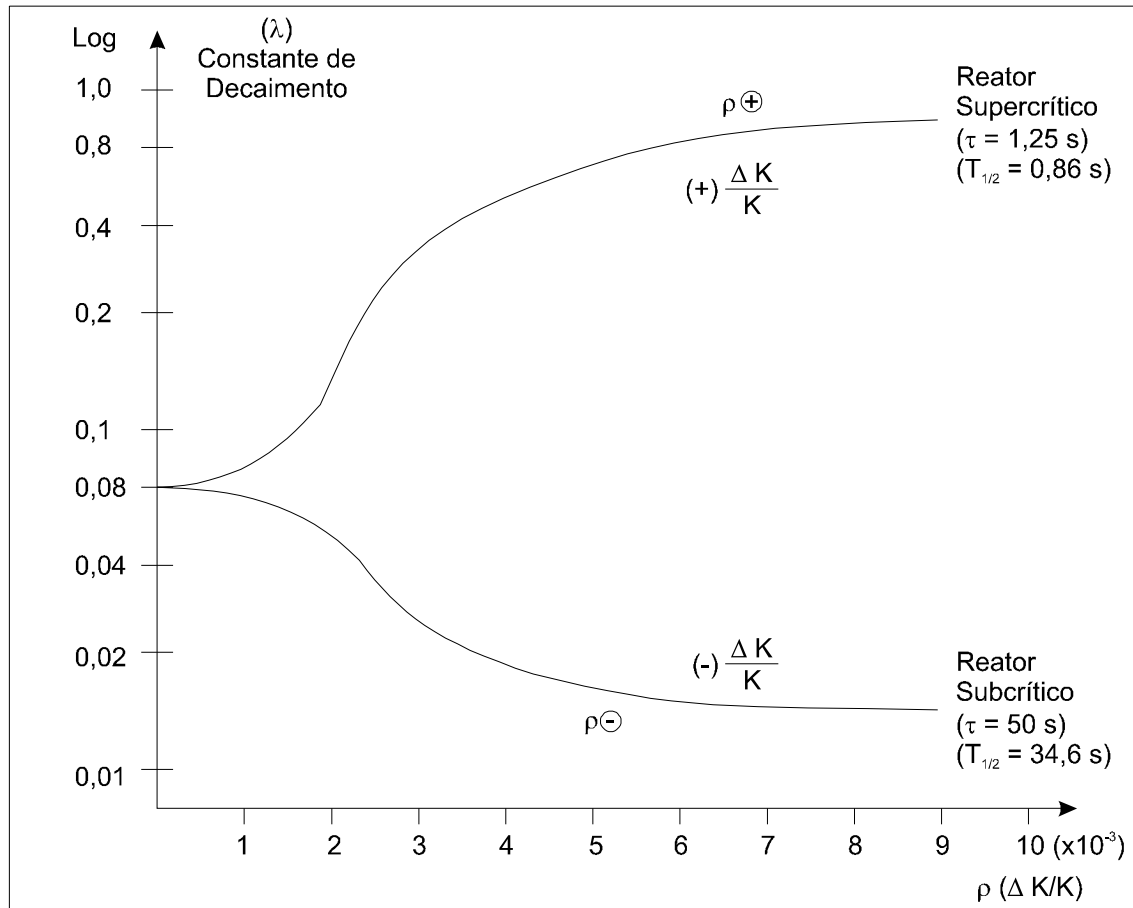


Figura 4.2: Variação de $\bar{\lambda}$ em Função da Reatividade (ρ).

4.5 FRAÇÃO DE NÊUTRONS ATRASADOS (β)

A fração de nêutrons atrasados (β) é definida como sendo a fração do número total de nêutrons de fissão que são emitidos pelo decaimento de alguns produtos de fissão, denominados precursores que sofrem decaimento em um tempo $t \geq 10^{-14}$ segundos da fissão que deu origem a estes precursores.

Como foi visto anteriormente, apenas 0,65% dos nêutrons de fissão do U-235 são classificados como nêutrons atrasados.

Os reatores PWR construídos pela Westinghouse utilizam como combustível U-235, U-238 e Pu-239 (o Pu-239 é produzido durante a operação do reator pela reação do U-238 + nêutron).

A percentagem de cada um destes elementos irá variar ao longo da vida útil do núcleo do reator. Como cada um deles possui seu próprio fator (β), o valor

global ($\bar{\beta}$) no núcleo do reator somente poderá ser calculado pela média ponderada. Como as concentrações de U-235, U-238 e Pu-239 variam ao longo da vida do núcleo do reator, o mesmo ocorrerá com ($\bar{\beta}$).

Para o reator Angra I:

- Começo da Vida: $\bar{\beta} = 0,0070 = 0,70\%$ (U-235 e U-238)
- Fim da Vida: $\bar{\beta} = 0,0055 = 0,55\%$ (U-235, U-238 e Pu-239)

Para o reator IEA-R1:

- $\bar{\beta} = 0,0065 = 0,65\%$ (20% U-235 e 80% U-238)

Para o reator IPEN/MB-01:

- $\bar{\beta} = 0,0078 = 0,78\%$ (4,3% U-235 e 95,7% U-238)

4.6 FRAÇÃO EFETIVA DE NÊUTRONS ATRASADOS (β_{ef})

Vamos analisar qual tipo de nêutrons (prontos ou atrasados) possui maior influência sobre o fator de multiplicação " K_{ef} ".

Considerando o fato dos nêutrons atrasados nascerem com uma energia menor que a energia dos nêutrons prontos é de se esperar que a influência dos mesmos sobre " K_{ef} " seja diferente.

O fato dos nêutrons atrasados serem gerados com energia inferior à energia mínima necessária para causar fissão no U-238, reduz a sua importância em relação aos nêutrons prontos. Em compensação, como os nêutrons atrasados nascem com baixas energias, a probabilidade de fuga durante o processo de moderação é reduzido, aumentando deste modo seu fator de importância. Um balanço destes fenômenos nos leva a definir um "Fator de Importância" (I). Nos reatores PWR, construídos pela Westinghouse, este fator de importância (I) é menor que 1, devido a grande quantidade de núcleos de U-238 existente no combustível, os quais poderiam sofrer maior número de fissões se houvesse maior quantidade de nêutrons rápidos.

Conhecido o fator de importância (I), a influência dos nêutrons atrasados sobre " K_{ef} " poderá ser determinada através de uma nova variável denominada "Fração Efetiva de Nêutrons Atrasados" ($\bar{\beta}_{ef}$).

$$\bar{\beta}_{ef} = I \cdot \bar{\beta} \quad 4.11$$

Para o reator nuclear de Angra I teremos:

- No começo da vida do núcleo (B.O.L.): $\bar{\beta}_{ef} = 0,0069 \text{ } (\Delta K/K)$.
- No fim da vida do núcleo (B.O.L.): $\bar{\beta}_{ef} = 0,0054 \text{ } (\Delta K/K)$.

Para o reator IEA-R1, o valor de (I) é próximo de 1 devido à utilização de combustível altamente enriquecido. Desta forma temos que: $\bar{\beta}_{ef} \cong \beta_{ef} = 0,0065$.

Para o reator IPEN/MB-01, embora tenhamos enriquecimento relativo baixo, não temos por outro lado variação de concentrações de U-235 e U-238, face a queima desprezível destes nuclídeos.

4.7 POTÊNCIA E PERÍODO DO REATOR

A potência de um reator nuclear é diretamente proporcional à população de nêutrons em seu núcleo. Se houver uma variação na população neutrônica, a potência do reator irá sofrer a mesma taxa de variação.

A taxa de variação na potência do reator pode ser expressa por uma nova variável denominada "Período do Reator" (T) que é definida como sendo: "o tempo (em segundos) necessário para que a potência do reator aumente de um fator "e" (e = 2,7182). A potência de um reator supercrítico pode ser expressa por:

$$\boxed{P = P_0 e^{t/T}} \quad 4.12$$

Se o Período do Reator for "pequeno" a variação de potência é rápida. Por outro lado, se o "Período do Reator" for "infinito", isto representa que a sua potência está sendo mantida constante.

O "Período do Reator" está diretamente associado com a taxa de variação da população neutrônica e pode ser calculada para pequenos valores de K_{ef} ($k_{ef} \leq 1,0005$), através da seguinte expressão matemática:

$$T = \frac{\ell}{K_{ef} - 1} = -\frac{\ell}{\Delta K} \quad 4.13$$

sendo, ℓ = tempo médio de vida dos nêutrons ou vida-média dos nêutrons.

Vamos considerar um reator supercrítico com $K_{ef} = 2$, cuja população inicial de nêutrons seja igual a 1. Na segunda geração teremos uma população de 2 nêutrons, na terceira 4 nêutrons, na quarta 8 nêutrons, na quinta 16 nêutrons e assim sucessivamente. Isto nos mostra um comportamento exponencial na população de nêutrons. Sabemos que:

- O período do reator (T) nos fornece uma indicação de taxa de variação da população neutrônica.
- Em um reator supercrítico a população neutrônica aumenta exponencialmente.

A variação da população neutrônica (ou do fluxo de nêutrons) em um reator supercrítico pode ser expressa pela seguinte equação:

$$N = N_0 \cdot e^{t/T} \quad 4.14$$

ou

$$\Phi = \Phi_0 \cdot e^{t/T} \quad 4.15$$

ou

$$P = P_0 \cdot e^{t/T} \quad 4.16$$

Já que população neutrônica "N", fluxo de nêutrons " Φ " e potência do reator "P", são variáveis diretamente proporcionais.

Na equação 6.14, temos que:

P_0 = Potência inicial.

P = Potência após um intervalo de tempo (t).

t = Intervalo de tempo para que a potência aumente de P_0 para P.

T = Período do reator.

4.8 EFEITO DO TEMPO MÉDIO DE VIDA DOS NÊUTRONS (ℓ) SOBRE O PERÍODO DO REATOR (T)

O tempo transcorrido desde a geração dos nêutrons até sua absorção por um núcleo ou sua fuga do reator é denominado por ℓ = tempo médio de vida do nêutron.

Um nêutron rápido leva $1,0 \times 10^{-4}$ segundos para entrar em equilíbrio térmico com o meio e outros $1,0 \times 10^{-4}$ segundos se difundindo no meio até ser absorvido.

Se além destes tempos somarmos o tempo de geração dos nêutrons prontos que é de $1,0 \times 10^{-14}$ segundos, obteremos o valor para o "tempo médio de vida dos nêutrons prontos" (ℓ^*).

$$\ell^* = 1,0 \times 10^{-4} \text{ (s)} + 1,0 \times 10^{-4} \text{ (s)} + 1,0 \times 10^{-14} \text{ (s)}$$

$$\ell^* = 2,0 \times 10^{-4} \text{ (segundos)}$$

Como exemplo, vamos calcular o período de um reator com um $K_{ex} = (K_{ef} - 1) = 0,0005$ (50 pcm).

Reator supercrítico, com $K_{ef} = 1,0005$.

$$T = \frac{\ell^*}{K_{ef} - 1} = \frac{\ell^*}{K_{ex}} = \frac{2 \times 10^{-4} \text{ (s)}}{0,0005} = 0,4 \text{ (s)}$$

Com este período de $T = 0,4$ (s) vamos calcular qual será o fator de acréscimo na potência do reator em 1 (s).

$$P = P_0 \cdot e^{\frac{t}{T}} \Rightarrow \frac{P}{P_0} = e^{\frac{t}{T}} = e^{\frac{1 \text{ (s)}}{0,4 \text{ (s)}}}$$

$$\frac{P}{P_0} = e^{2,5} = 12,2 \Rightarrow P = P_0 \times 12,2$$

Isto é indesejável em um reator nuclear, pois com este ritmo de variação de potência seu controle seria impossível.

Felizmente, nem todos os nêutrons existentes no núcleo do reator são nêutrons prontos. Uma geração de nêutrons somente estará completa após a geração de todos os grupos de nêutrons atrasados. A vida média (τ_i) destes grupos de nêutrons atrasados varia entre 0,2 (s) e 80 (s).

O cálculo da vida média "representativa" dos seis grupos nos fornece: $\bar{\tau} = 12,7$ (s) que somado aos 2×10^{-4} (s) devido ao tempo de termalização e ao tempo de difusão como térmico nos fornecerá o "tempo de vida médio dos nêutrons atrasados" (ℓ_1).

$$\ell_1 = 12,7(s) + 2 \times 10^{-4}(s) \cong 12,7(s)$$

Com (ℓ^*) e (ℓ_1) podemos calcular o "tempo médio de vida" (ℓ) de todos os nêutrons de uma geração:

$$\ell = \frac{\ell^* (\text{fração de nêutrons prontos}) + \ell_1 (\text{fração de nêutrons atrasados})}{(\text{fração de nêutrons prontos}) + (\text{fração de nêutrons atrasados})} \quad 4.17$$

$$\ell = \frac{2 \times 10^{-4}(s) \times 0,9935 + 12,7(s) \times 0,0065}{0,9935 + 0,0065} \cong 0,08(s)$$

Voltando ao nosso exemplo onde tínhamos um reator com $k_{ex} = 0,0005$, vamos calcular novamente o período do reator levando em consideração os nêutrons atrasados.

$$T = \frac{1}{K_{ex}} = \frac{0,08}{0,0005} = 160(s)$$

$$\frac{P}{P_0} = e^{t/T} = e^{t/160} = 1,003 \therefore P = 1,006 \times P_0$$

sendo esta variação de potência muito mais fácil de ser controlada.

Se for adicionada uma quantidade de reatividade que torne o reator supercrítico sem a participação dos nêutrons atrasados, o reator estará em condição de "Pronto Crítico".

Quando isto ocorrer, o período do reator será dado em função exclusiva dos nêutrons prontos tornando as variações de potência tão rápidas que tornam impossível o controle do reator.

Resumindo, podemos dizer que:

- O processo de aumento de potência segue uma lei exponencial tendo o período do reator como expoente.
- Pequenas variações no período do reator podem produzir variações consideráveis na potência.
- É necessária a participação dos nêutrons atrasados para manter a reação em cadeia controlável, mantendo o período dentro de limites aceitáveis.

4.9 RELAÇÃO ENTRE REATIVIDADE (ρ) E PERÍODO (T)

É de grande interesse prático a determinação do Período "T" em função da Reatividade "r" inserida no núcleo do reator. A relação entre r e T depende dos seguintes fatores:

- da Vida Média dos Nêutrons Prontos (ℓ^*).
- do Fator de Multiplicação Efetiva (K_{ef}).
- da Fração dos Nêutrons Atrasados (β_i).
- da Constante de Decaimento (λ_i) dos precursores (PF's) dos nêutrons atrasados.

Estas dependências estão agrupadas na equação matemática denominada "Equação Inhour":

$$\rho = \frac{\ell^*}{K_{ef} \cdot T} + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{1 + \lambda_i \cdot T} \quad 4.18$$

onde:

- ρ = reatividade ($\Delta K/K$)
 ℓ^* = tempo de vida média dos nêutrons prontos ($\approx 2,0 \times 10^{-4} s$)
 K_{ef} = fator de multiplicação efetivo
 T = período do reator (segundos)

β_i = fração de nêutrons atrasados pertencentes ao grupo i
 λ_i = constante de decaimento representativa dos precursores dos nêutrons atrasados pertencentes ao grupo i

A parcela $\ell^*/K_{ef} \cdot T$ é referente a contribuição dos "nêutrons prontos" para a reatividade do núcleo, enquanto a parcela $\sum_{i=1}^6 \beta_i / (1 + \lambda_i T)$ é referente à contribuição dos "nêutrons atrasados".

Se $\rho < \beta_{ef}$, a influência dos nêutrons prontos será insignificante e a equação Inhour poderá ser simplificada para:

$$\rho = \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{1 + \lambda_i T} \quad 4.19$$

A equação 6.17 simplificada poderá ser utilizada com precisão satisfatória para relacionar "Reatividade"(ρ) com o "Período"(T). Para esta simplificação considera-se:

- um valor médio ($\lambda = 0,1 \text{ s}^{-1}$) que represente a "Constante de Decaimento" dos grupos de produtos de fissão emissores de nêutrons atrasados.
- o valor de " β_{ef} " em substituição à somatória $\sum_{i=1}^n \beta_i$

O valor da fração de nêutrons atrasados $\beta_{ef} = \sum_{i=1}^n \beta_i$ é obtido por cálculos neutrônicos ou experimentalmente. Valores típicos:

- Para o Reator IEA-R1, $\beta_{ef} = 0,0065$.
- Para o Reator IPEN/MB-01, $\beta_{ef} = 0,0078$.

$$\rho = \frac{\beta}{1 + 0,1 T} \quad \text{ou} \quad T = \frac{\beta - \rho}{0,1 \rho} \quad 4.20$$

Como exemplo podemos determinar o Período do Reator IEA-R1 quando for adicionada uma reatividade de 100 pcm ($\rho = 0,001$), a partir da condição crítica:

$$1 + 0,1T = \frac{\beta}{\rho} \Rightarrow 0,1T = \frac{\beta}{\rho} - 1$$

$$0,1T = \frac{0,0065}{0,001} - 1 = 6,5 - 1 = 5,5$$

$$0,1T = 5,5 \Rightarrow T = \frac{5,5}{0,1} = 55 \text{ seg}$$

A relação entre a reatividade (ρ) e o período (T) pode também ser obtida de uma maneira mais rápida e suficientemente precisa para valores de $k_{ef} \leq 1,0005$ ($\rho \leq 0,0005$), através das equações:

$$T = \frac{\ell}{K_{ef} - 1} \quad 4.21$$

e

$$\rho = \frac{K_{ef} - 1}{K_{ef}} \quad \text{ou} \quad K_{ef} = \frac{1}{1 - \rho} \quad 4.22$$

onde (ℓ) é a vida média representativa dos nêutrons de uma geração (nêutrons prontos + nêutrons atrasados), $\ell \cong 0,08$ segundos.

A seguir, temos algumas aplicações típicas destas equações que podem ser utilizadas na operação do reator.

- Conhecido o valor do período, (T) determinar o valor da reatividade (ρ) (Apêndice 7).
- Partindo da condição de criticalidade, sobe-se uma barra de controle de (X) divisões. Determinar o período resultante (OBS.: Utilizar as curvas de calibração de barras para obtenção da reatividade inserida).
- Conhecido o valor do excesso de reatividade, $K_{ex} = (K_{ef} - 1)$, determinar o período (T) resultante.
- Conhecido o valor do período (T), determinar o excesso de reatividade (K_{ex}).

4.10 REATOR "PRONTO CRÍTICO"

Para tornar um reator "Pronto Crítico", é necessário inserir em seu núcleo uma reatividade ($\rho = \Delta K/K$) igual ao valor da fração de nêutrons atrasados ($\rho = \beta_{ef}$).

Nesta condição, a reação de fissão em cadeia é auto-sustentada sem que seja necessária a participação dos nêutrons atrasados.

Na equação 4.18 o valor de (ℓ) refere-se somente aos nêutrons prontos ($\ell^* = 2 \times 10^{-4}$ segundos). Para $\rho = 0,0065$ podemos calcular (K_{ef}):

$$K_{ef} = \frac{1}{1-\rho} = \frac{1}{1-0,0065} = \frac{1}{0,9935} = 1,0065$$

$$T = \frac{\ell^*}{K_{ef} - 1} = \frac{2 \times 10^{-4}}{1,0065 - 1} = \frac{2,0 \times 10^{-4}}{0,0065} = 0,030 \text{ segundos}$$

Como a variação da potência pode ser calculada pela equação 4.14, após 1 segundo teríamos, em um reator pronto crítico:

$$P = P_0 \cdot e^{\frac{1}{0,03}} = P_0 \cdot 3,0 \times 10^{14} \Rightarrow \frac{P}{P_0} = 3,0 \times 10^{14}$$

representando um aumento de potência que tornaria impossível o controle do reator.

4.11 RELAÇÃO ENTRE PERÍODO (T) E TEMPO DE DOBRAMENTO (δ)

A taxa de variação de potência em reatores de pesquisas normalmente é medida pelo "Período" (T) que é definido como o tempo necessário para que a potência sofra uma variação de um fator "e" (base dos logaritmos naturais ou neperianos).

Uma outra forma de medir-se a taxa de variação da potência é através do "Tempo de Dobramento" (δ) que é definido como o tempo necessário para que a potência sofra uma variação de um fator "2". A facilidade da observação de um fator de multiplicação inteiro faz com que o tempo de dobramento seja mais largamente utilizado durante medidas experimentais.

A relação entre o Tempo de Dobramento (δ) e o Período (T) é obtido a partir das equações 6.14 e:

$$\boxed{P = P_0 \cdot 2^{\frac{t}{\delta}}}$$
4.23

nos dá:

$$e^{t/T} = 2^{t/\delta} \Rightarrow \frac{t}{T} = \frac{t}{\delta} \ln 2$$

portanto:

$$T = \frac{\delta}{0,693} \quad 4.24$$

4.12 TRANSIENTES NO FLUXO DE NÊUTRONS

A equação exponencial utilizada para o cálculo da variação da potência e a "equação de INHOUR" são válidas apenas quando o período do reator for estável (constante).

Quando um reator crítico é levado para a condição de supercrítico há um intervalo de tempo durante o qual o período do reator estará variando.

O excesso de reatividade em um reator supercrítico resulta em uma imediata elevação da população de núcleos precursores de nêutrons atrasados.

A população de nêutrons atrasados não sofrerá um aumento imediato, continuando por um intervalo de tempo no mesmo nível em que se encontrava antes do reator ficar supercrítico.

A taxa de aumento da população total de nêutrons é então reduzida quando estes nêutrons atrasados iniciarem a participar do processo de reação em cadeia. Isto fará com que o período inicial seja aumentado.

No gráfico da Figura 4.3 (variação de potência x tempo), podemos observar que após a introdução de reatividade em um reator que está crítico e com uma potência estável, haverá um "salto" instantâneo no valor da potência (período inicial "T" muito pequeno).

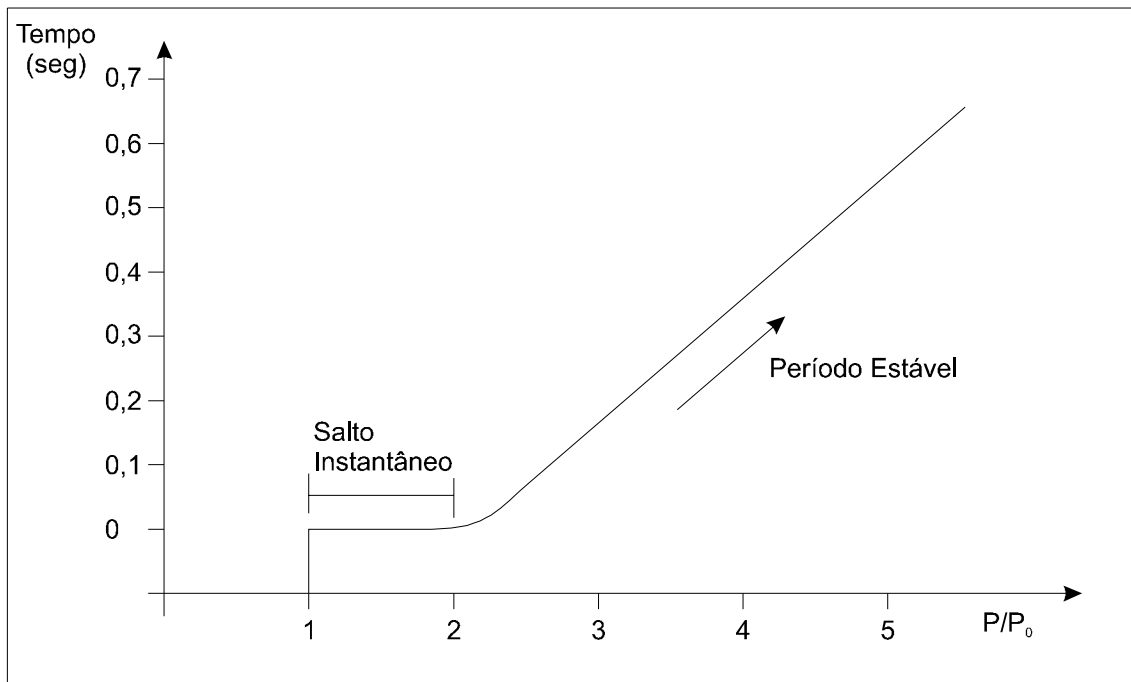


Figura 4.3: Variação Relativa da Potência em Função do Tempo (s).

Logo após haverá uma redução gradativa na taxa de variação da potência indicando a tendência de ficar com um período estável.

Note que, após o período do reator ficar estável, o aumento de potência, registrada em um gráfico semi-logarítmico, segue uma linha reta.

Quando o reator sofrer um desligamento instantâneo, o fluxo de nêutrons sofrerá uma queda instantânea devido à falta dos nêutrons prontos.

Os precursores dos nêutrons atrasados não decaem instantaneamente, o que irá ocorrer gradativamente em função da meia-vida ($T_{1/2}$) dos seis grupos precursores. O período (negativo) estável para o decaimento da potência será pois uma função da meia-vida dos grupos precursores de nêutrons atrasados. O gráfico da Figura 4.4 nos fornece a variação percentual de potência do reator após o "TRIP" (Desligamento Rápido).

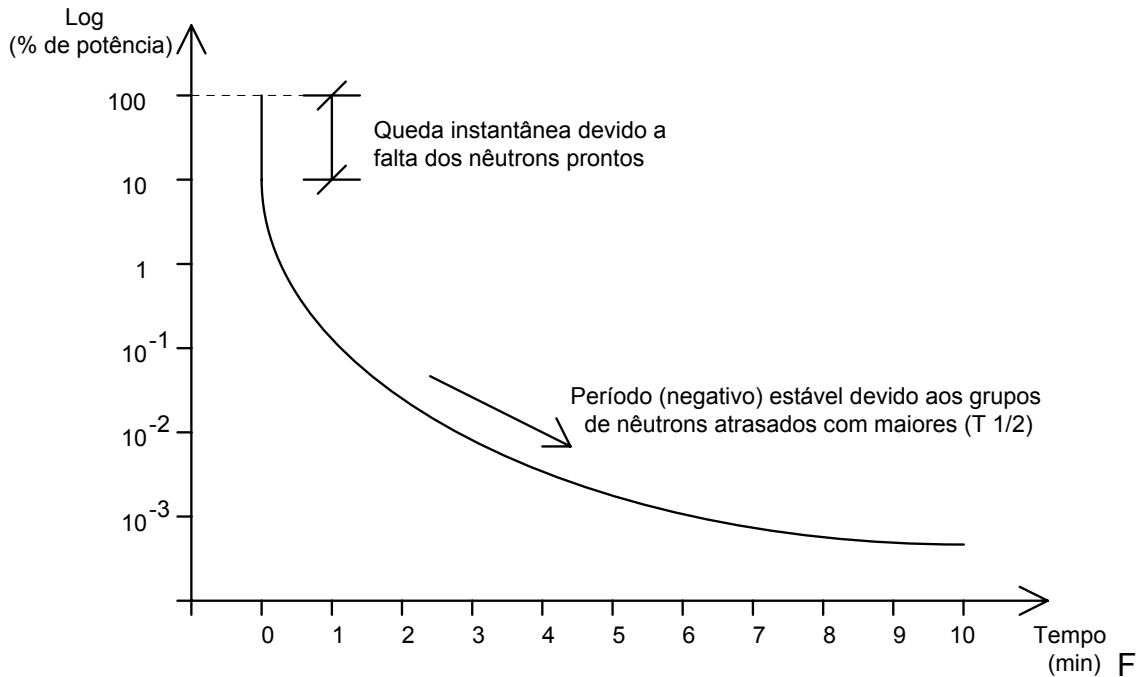


figura 4.4: Queda da Potência Após o Desligamento do Reator.

QUESTÕES DO CAPÍTULO A4

- 4.1 A população neutrônica de um conjunto subcrítico num dado instante t devido a uma fonte de nêutrons é C_0 . Ao remover a fonte o que ocorrerá com esta população?
- 4.2. Defina K_{ef} .
- 4.3. Quais as condições de K_{ef} para o reator ser crítico, subcrítico e supercrítico?
- 4.4. Defina Reatividade e o seu significado.
- 4.5. Qual a relação entre as unidades de reatividade ($\Delta K/K$; $\% \Delta K/K$, p.c.m.)?
- 4.6. Um reator tem K_{ef} num instante t_0 igual a 0,9 e num instante $t > t_0$ igual a 1,01. Quais são os sinais das reatividades em ambos instantes?
- 4.7. Quais os sinais da reatividade para o reator crítico, subcrítico e supercrítico?
- 4.8. O que significa K_{ex} ?
- 4.9. O que são nêutrons prontos e atrasados e o que diferem entre si?
- 4.10. Quais as porcentagens entre nêutrons prontos e nêutrons atrasados num reator cujo combustível é o U-235? Quanto uma é maior que a outra?
- 4.11. Qual o intervalo de tempo de geração dos nêutrons prontos?

- 4.12. Que são precursores?
- 4.13. Por que os nêutrons são classificados em seis grupos? Poderiam ser mais? Justifique.
- 4.14. Qual a porcentagem de nêutrons do grupo 5 do U^{235} em relação:
- a. a outros grupos de nêutrons atrasados.
 - b. ao número total de nêutrons (prontos e atrasados).
- 4.15. Para mesmo número de átomos de U-235 e Pu-239 quem contribui mais com nêutrons atrasados e para qual deles se poderia ter melhor controle do reator?
- 4.16. Explique a criação do nêutron através do Br-87.
- 4.17. Explique o significado de vida média de um precursor.
- 4.18. Qual o valor da vida média representativa de todos os grupos de nêutrons atrasados?
- 4.19. Explique porque a constante de decaimento $\bar{\lambda}$ é variável em função do estado do reator (crítico, supercrítico e subcrítico). Faça um gráfico esboçando sua explicação.
- 4.20. Um reator de alta queima de combustível, composto pelos combustíveis U-235, Pu-239 e U-238 tem seu $\bar{\beta}$ obtido através da ponderação dos β dos referidos tipos de combustíveis. Sabendo que a queima de tais elementos são distintas, o que você esperaria de $\bar{\beta}$ ao longo da vida do reator?
- 4.21. Forneça os valores de $\bar{\beta}$ do Reator de Angra I, do Reator IEA-R1 e do Reator IPEN/MB-01.
- 4.22. Qual a relação entre Potência e Fluxo de Nêutrons de um reator?
- 4.23. O que é Período do reator?
- 4.24. Qual a relação entre Período, K_{ef} e Tempo Médio de Vida dos nêutrons?
- 4.25. Qual a relação entre Período e Potência de um reator?
- 4.26. Defina Tempo Médio de Vida dos nêutrons prontos (ℓ^*). Como ele é constituído?

- 4.27. Se existisse somente nêutrons prontos, qual seria o período para um reator cujo $K_{ex} = 0,0005$ e cujo ℓ^* fosse 2×10^{-4} seg. Qual seria o acréscimo na potência P_0 do reator durante 1 segundo?
- 4.28. Determine o "tempo médio de vida" (ℓ) de todos os nêutrons de uma dada geração, sabendo que:
- a fração dos nêutrons prontos é 0,9922.
 - a fração dos nêutrons atrasados é 0,0078.
- 4.29. No exercício anterior determine o período correspondente para um K_{ex} de 0,0005.
- 4.30. Sabendo que a potência no instante t_0 vale P_0 , qual seria o novo valor após 10 segundos levando em conta os resultados dos 2 exercícios anteriores?
- 4.31. Escreva a equação de Inhour identificando os termos relativos aos nêutrons prontos e atrasados e cada um dos parâmetros.
- 4.32. Escreva a equação de Inhour simplificada quando $\rho < \beta_{ef}$. Qual a outra expressão que pode ser obtida neste caso ($\rho < \beta_{ef}$) que fornece valores relativamente precisos no caso de pequenas reatividades?
- 4.33. O que é reator pronto crítico? Qual a condição de pronto-criticalidade para o IEA-R1 e IPEN/MB-01?
- 4.34. Determine os valores de k_{ef} para a condição de pronto criticalidade do IEA-R1 e IPEN/MB-01, bem como os períodos correspondentes.
- 4.35. O que é Tempo de Dobramento? Qual a sua relação com Período?
- 4.36. Existe uma grandeza denominada SUR ("Start-Up Rate") que é comumente utilizada, por razões de conveniência em certos reatores. Sabendo que $1 \text{ SUR} = 1 \text{ DPM}$ (década por minuto), qual a relação entre esta SUR e o Período do reator, em segundos?
- 4.37. Cite uma condição de validade da equação de "INHOUR".
- 4.38. Explique por que ao se inserir uma certa quantidade de reatividade positiva num reator crítico ele dá um salto repentino, estabilizando-se alguns segundos após, num determinado período.

- 4.39. Por que não podemos utilizar a equação de Inhour para obter a criticalidade imediatamente após a uma inserção de reatividade?
- 4.40. Explique porque quando ocorre um "SCRAM" no reator há um súbito decréscimo do fluxo neutrônico e posteriormente uma contínua diminuição deste fluxo, porém gradativa.