

EXPERIÊNCIA 9

DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA DE OPERAÇÃO DO REATOR IPEN/MB-01

1. TEORIA

A potência P dissipada no núcleo de um reator nuclear ou num dado volume V de seu núcleo é dada pela equação abaixo, sendo G a energia recuperável por fissão, N_f o número de átomos físeis no volume considerado, σ_f a seção de choque de fissão dos átomos físeis em todo espectro de energia dos nêutrons e ϕ o fluxo de nêutrons em todo espectro de energia.

$$P = G \int_V \int_E N_f(r) \sigma_f(r, E) \phi(r, E) dV dE \quad (1)$$

Se considerarmos que a queima de combustível seja desprezível ou mesmo homogênea no núcleo, N_f será independente da posição r no núcleo do reator e poderá ser retirado da integral, bem como os parâmetros neutrônicos σ_f e ϕ se trabalharmos, respectivamente, com os valores médios de seção de choque e fluxo de nêutrons ao longo do volume considerado do reator e do espectro neutrônico. Assim, a expressão (1) é modificada para uma nova expressão (2) mais concisa dada a seguir.

$$P = G \cdot N_f \cdot \bar{\sigma}_f \cdot \bar{\phi} = G \cdot \bar{\Sigma}_f \cdot \bar{\phi} = G \cdot \bar{R}_f \quad (2)$$

Assim da expressão acima, constatamos que basta obtermos experimentalmente o valor médio da taxa de reação de fissão nuclear no combustível do reator ou algum parâmetro proporcional à mesma, para obtermos experimentalmente a potência de operação.

Neste experimento estaremos mostrando duas técnicas experimentais utilizadas na obtenção da potência de operação do reator IPEN/MB-01, no entanto devemos ter em mente que outros métodos são utilizados em reatores de pesquisa e potência como o método de balanço térmico, decaimento do nitrogênio, etc.

2. TÉCNICA DE ATIVAÇÃO DE FOLHAS DE OURO

2.1. Introdução

O valor médio do fluxo de nêutrons térmicos medido no elemento moderador (água) é um parâmetro neutrônico proporcional à potência do reator. Se irradiarmos uma série de folhas de ativação espalhadas criteriosamente no moderador (interior do núcleo), podemos medir os valores do fluxo de nêutrons em cada um dos locais de irradiação e após uma análise dos dados, obter o valor médio do mesmo, através da utilização da equação (2).

Obviamente que algumas correções se farão necessárias, tendo em vista que estaremos medindo o fluxo de nêutrons no moderador e não no combustível onde são geradas as reações de fissão nuclear e conseqüentemente a potência. No nosso caso, usaremos folhas de ouro, elemento com alta seção de choque de ativação de nêutrons térmicos (valor médio da seção de choque térmica de **73,64 barn** - obtida pelo grupo de Física de Reatores a partir de cálculos celulares). Além disso, estamos medindo o fluxo de nêutrons térmicos e não o fluxo de nêutrons integral em todo o espectro de energia, assim temos que reescrever a equação (2), incorporando a mesma dois fatores de correção, o fator F conhecido como fator de desvantagem térmico (Razão entre o fluxo médio no combustível para o fluxo médio no moderador- no caso do Reator IPEN/MB-01, **F= 0,769**) e o fator R que levará em conta a parcela das fissões nucleares devido a nêutrons rápidos (no caso do Reator IPEN/MB-01, **R=1,155**). Assim, teremos:

$$P = G.N_f . \bar{\sigma}_f . \bar{\phi} . R . F = G . \bar{\Sigma}_f . \bar{\phi} . R . F = G . \bar{R}_f . R . F \quad (3)$$

Essa expressão será utilizada na obtenção experimental da potência de operação do reator IPEN/MB-01 pela técnica de ativação de folhas de ouro.

2.2. Irradiação no Núcleo do Reator IPEN/MB-01

O experimento consistirá na irradiação de folha de ativação de ouro nua e coberta com cádmio na posição central (M14) do núcleo do reator, sob idênticas condições de irradiação (potência, posição das barras de controle, período do reator durante a rampa de subida de potência, posicionamento no núcleo, etc). Conhecido o valor da razão de cádmio nesta posição, será possível determinarmos o fluxo de nêutrons térmicos a partir das expressões dadas a seguir.

$$A_0 = \frac{\lambda . C . \exp(- \lambda . t_e) . F_R}{\varepsilon . I . (1 - \exp(- \lambda . t_c))} \quad (4)$$

sendo,

$$A_{nua}^{\infty} = \frac{A_0}{(1 - \exp(-\lambda.t_i))} \quad (5)$$

Assim, obtido experimentalmente os valores da atividade da folha de ouro ao término da irradiação (A_0), podemos calcular o valor da atividade de saturação da folha de ouro nua (A_{nua}^{∞}) que corresponderia a atividade da folha àquele nível de potência se a mesma fosse irradiada por um tempo infinito. Sabemos que A_{nua}^{∞} é numericamente igual ao valor da taxa de reação nuclear na folha de ouro. Esta taxa de reação nuclear de ativação neutrônica é proporcional ao fluxo de nêutrons térmicos no ponto de irradiação, conforme equação (6) dada a seguir e conseqüentemente à potência de operação do reator (vide equação 3). Logo, o fluxo de nêutrons térmicos (ϕ_{th}) medido na posição central M14 do núcleo do reator IPEN/MB-01 será dada pela expressão:

$$\phi_{th} = \frac{A_{nua}^{\infty} (1 - F_{cd} / R_{cd})}{N_{Au} \cdot \bar{\sigma}_{act} \cdot F_P} \quad (6)$$

Há uma razão entre o valor do fluxo de nêutrons térmicos medido na posição central do núcleo (M14) e outras posições anteriormente medidas e criteriosamente definidas, dadas a seguir na Tabela 1 dos anexos. Elas servirão para a obtenção dos valores absolutos do fluxo de nêutrons térmicos nas demais posições do núcleo e possibilitarão a obtenção do valor médio do fluxo no núcleo do reator correspondente a certo nível de corrente do canal 5 (canal calibrado em potência) do reator. Todavia, para facilitar o trabalho adiantamos que a razão entre o fluxo de nêutrons térmicos no centro do reator e o fluxo médio de nêutrons térmicos no núcleo, para a configuração quadrada é de **1,73**.

Os parâmetros que aparecem nas expressões (4), (5) e (6) são definidos a seguir:

- λ Constante de desintegração do Au-198 ($2,9768.10^{-6} \text{ s}^{-1}$);
- C Contagem líquida do fotopico do Au-198 centrado a energia de 411,80 KeV;
- F_R Fator de correção de rampa de subida de potência (função do período T de supercriticalidade). Será unitário se o período for igual na irradiação da folha nua e coberta com cádmio. Caso contrário pode ser estimado pela expressão $FR = t_i / t_i + T$, onde T = tempo da rampa (s) / $\ln (P_{final}(\text{watts})/P_{inicial}(\text{watts}))$;
- t_i Tempo de irradiação (3600 s);
- t_e Tempo de espera do termino da irradiação até a contagem (espectrometria gama da folha de ouro);

- t_c Tempo de contagem (s) da folha durante a espectrometria gama;
- ε Valor absoluto da eficiência global de contagem para a energia do fotopico gama considerado (411,80 KeV) na posição pré-estabelecida de contagem; valor fornecido pelas curvas de eficiência em energia dadas pelo professor.
- I Probabilidade de emissão do fotopico gama de 411,80 KeV do ^{198}Au ($I = 0,956$);
- F_{cd} Fator de Cádmiu que nos dá a fração de nêutrons epitérmicos absorvidos na caixa de cádmio (Para espessura de cádmio de 0,5 mm $F_{cd} \approx 1,098$);
- R_{cd} Razão de cádmio que nos dá a razão das atividades entre as folhas de ouro nuas e com cádmio de massas iguais, $R_{cd} = A^{\infty}_{nua} / A^{\infty}_{cd}$, para o caso das folhas infinitamente diluídas, ou seja em forma de liga 1%Au-99%Al, com átomos de ouro dispersos numa matriz de alumínio; No caso de folhas puras as atividades das folhas devem ser corrigidas quanto ao efeito de auto-blindagem (perturbação);
- F_p Fator de perturbação de fluxo devido principalmente ao efeito de auto-blindagem do fluxo de nêutrons térmicos nas camadas internas da folha de Au. No caso de folhas infinitamente diluídas (átomos de ouro dispersos numa matriz de alumínio) $F_p = 1$ e no caso de folhas puras de espessura d (cm) e secção de choque macroscópica de ativação média $\bar{\Sigma}_{act}$ (cm⁻¹), F_p será dado pela expressão (7) dada a seguir.

$$F_p = \frac{1}{\bar{\Sigma}_{act} \cdot d} \left[\frac{1}{2} - E_3(\bar{\Sigma}_{act} \cdot d) \right] \quad (7)$$

Sendo a função exponencial de terceira ordem $E_3(\bar{\Sigma}_{act} \cdot d)$ tabelada e fornecida se necessária pelos instrutores.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Preparação e Irradiação da Folha de Ouro

- a) Escolha a folha a ser irradiada. Meça a sua massa numa balança de precisão.

$$M \text{ (g)} = \underline{\hspace{5cm}}$$

- b) Estime a quantidade de átomos N_0 de Au-197, existente na folha, lembrando que a percentagem isotópica f do isótopo 197 é de 100% . Utilize para tal a equação (8) dada a seguir. Peso atômico do Au, $A = 196,967$.

$$N_0 = \frac{6.0225 \cdot 10^{-23} \cdot M \cdot f}{A} \quad (8)$$

$$N_0 = \underline{\hspace{5cm}} \text{ átomos .}$$

- c) Monte a folha de ouro no suporte de acrílico fixado no dispositivo experimental a ser inserido no núcleo do reator. Certifique-se o correto posicionamento para que a mesma seja inserida exatamente na posição central M14 do núcleo do reator.
- d) Insira o dispositivo com a folha no núcleo do reator. Verifique se o tipo de configuração geométrica do núcleo e anote abaixo.

Tipo de configuração: _____

- e) Inspecionado o núcleo, deixe a célula crítica e inicie os procedimentos experimentais para a irradiação da folha de ouro.
- f) Utilizando um cronômetro meça o tempo de rampa de subida de potência de $0,7 \cdot 10^{-8}$ até o nível de corrente do canal 5 em que se deseja medir a potência do reator. Anote o nível desejado do canal 5, o período de subida de potência (T) pelo canal de potência 3 e o tempo de rampa em segundos. Anote também o horário de início da irradiação, lembrando que a folha será irradiada por 1 hora (3600 s).

Corrente do canal 5 (A) _____

Período do canal 3 (s) _____

Tempo de rampa (s): _____

Horário de início: ____ : ____ ' : ____ '' dia: ____ / ____ / ____.

- g) Após 1 hora de irradiação proceder ao desligamento do reator apenas por queda de barras de controle e segurança, utilizando o “scram “ experimental. Acionar o cronômetro para determinar o tempo de espera (te) para o início da contagem da folha irradiada (espectrometria gama).

Horário de término: ____ : ____ ' : ____ '' dia: ____ / ____ / ____.

- h) Após autorização da Proteção Radiológica e da chefia da instalação, adentrar a célula crítica para retirada do dispositivo com a folha de Au. Após monitoração da proteção radiológica levar o dispositivo para o setor de descontaminação e proceder a desmontagem da folha no suporte de irradiação.

3.2. Espectrometria Gama da Folha de Ouro

- a) Posicionar a folha no suporte de acrílico , inserindo-a na gaveta mais distante do detector de germânio hiper-puro (N.º7) ou em outra segundo orientação do instrutor.

Gaveta N.º : _____

Suporte N.º: _____

- b) Programar o programa Maestro para realizar contagens de 1 em 1 hora, afim de obtermos pelo menos 15 espectros gravados para posterior análise. Os arquivos de espectro gerados ter o nome registrado abaixo.

Início de contagem: ____ : ____ ' : ____ '' dia: ____ / ____ / ____.

Tempo de espera para contagem (te) : _____

Nome do arquivo do espectro: _____

- c) Os espectros serão então coletados até o dia seguinte. Após o término da coleta, os espectros serão analisados e as contagens diferenciais líquidas do fotopico do ouro (411,80 KeV), bem como os tempos de contagem descontados o tempo morto (LT- “Live time”), tempos de espera (te), deverão ser anotados na Tabela 4. As janelas de contagem do fotopico serão definidas automaticamente no programa Maestro, no primeiro espectro e serão mantidas constantes nos demais. Registre abaixo o limite inferior e superior das mesmas, bem como o tempo morto do primeiro espectro (menor te).

Limite inferior da janela (canal): _____

Limite superior da janela (canal): _____

Tempo morto do primeiro espectro (%) _____

3.3. Análise dos resultados

- a) A partir dos dados da Tabela 4, utilizando o programa Origin, construa o gráfico das contagens líquidas integradas no foto pico (Net) do Au-198, divididas pelos respectivos valores de LT (Tempo de contagem descontado o tempo morto) em função dos respectivos tempos de espera (te).
- b) Ajuste uma função exponencial do tipo $y = a \cdot \exp(bx)$, fornecendo como valor inicial do coeficiente b a constante de decaimento do Au-198, na unidade h^{-1} , pois o valor da abscissa no eixo x é o tempo dado em horas (sabendo que a

meia-vida ($T_{1/2}$) do Au-198 é de 2,695 dias e que $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$). Anote a seguir os valores dos coeficientes, o adotado (caso b, mantido fixo no ajuste) e o valor obtido do ajuste do coeficiente a. O coeficiente a corresponderá a taxa de contagem C_0 da folha de ouro ao término da irradiação ($t_e = 0$).

$$b = \text{_____} \text{ h}^{-1}$$

$$a = C_0 = \text{_____} \text{ contagens / s.}$$

- c) A partir da expressão (4), determine a atividade da folha de Au ao término da irradiação (A_0), a partir dos valores de eficiência obtidos das curvas de eficiências das gavetas 7 ou 6, fornecidas pelos instrutores. Anote abaixo os valores de eficiência em valores absolutos, bem como o valor de A_0 obtido.

$$\varepsilon (\text{Gaveta } \text{_____}) = \text{_____}.$$

$$A_0 (\text{s}^{-1}) = \text{_____} \text{ Bq}$$

- d) anote abaixo o valor da Razão de Cádmiu (R_{cd}) medida na posição M14.

$$R_{cd} = A_{\text{nua}}^{\infty} / A_{\text{Cd}}^{\infty} = \text{_____}.$$

- e) A partir do valor da atividade ao término da irradiação (A_0) e da razão de cádmio (R_{cd}), determine os valores da atividade de saturação, taxa de reação e fluxo de nêutrons térmicos através das equações (5) ou (6).

$$A^{\infty} (\text{Bq}) = \text{_____}.$$

$$R (\text{Fissões/s}) = \text{_____}.$$

$$\phi_{\text{th}} = \text{_____} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$$

- f) Determine o valor do fluxo de nêutrons térmicos médio no núcleo do Reator IPEN/MB-01, sabendo que a razão entre os valores de fluxo térmico de nêutrons na posição central em relação ao valor médio do núcleo é conhecido.

$$\bar{\phi}_{\text{th}} = \text{_____} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$$

- g) Confirme o resultado acima calculando o mesmo a partir dos dados da Tabela 1, onde são apresentados 105 valores relativos medidos em metade do núcleo do Reator IPEN/MB-01. Considere a simetria do núcleo geométrica e a igualdade de composição entre as duas partes do núcleo (face norte e sul).

$$\bar{\phi}_{th} = \text{_____} \text{ n/cm}^2\text{.s}$$

- h) A partir da expressão (3), calcule a potência de operação do reator para o nível de corrente do canal 5 especificado no item f. Dado: $G = 200 \text{ MeV} = 3,21 \cdot 10^{-11} \text{ J}$

P (watts) = _____

Tabela 1 Valores do Fluxo de Nêutrons Térmicos no Núcleo do Reator IPEN/MB-01 – Configuração Retangular 28x28 - Normalizados em Relação à Posição Central M14.

Posição Radial	Cota Axial (Z) - mm						
	91	182	273	364	455	546	637
A	0.39	0.52	0.61	0.68	0.54	0.36	0.23
B	0.40	0.45	0.64	0.59	0.49	0.41	0.24
C	0.43	0.54	0.81	0.68	0.43	0.15	0.26
D	0.33	0.49	0.70	0.59	0.32	0.07	0.14
E	0.25	0.39	0.62	0.48	0.33	0.09	0.14
F	0.61	0.79	1.22	1.05	0.87	0.49	0.23
G	0.74	0.67	0.73	0.88	0.76	0.38	0.24
H	0.79	0.73	0.99	0.75	0.80	0.44	0.26
I	0.63	0.66	1.02	0.71	0.35	0.14	0.10
J	0.40	0.55	0.55	0.67	0.52	0.35	0.19
K	0.61	0.77	1.12	1.18	0.96	0.56	0.31
L	0.58	0.66	0.96	0.90	0.59	0.44	0.28
M	0.62	0.79	1.07	1.00	0.74	0.52	0.41
N	0.56	0.65	0.69	0.80	0.53	0.48	0.37
O	0.45	0.87	0.88	0.98	0.70	0.43	0.28

Tabela 3 Tabela da Função Exponencial de Terceira Ordem (E_3).

$X = \sum_{ih} .d$	$E_3(X)$
0,000	0,500000
0,001	0,499004
0,002	0,498014
0,003	0,497030
0,004	0,496052
0,005	0,495078
0,006	0,494109
0,007	0,493144
0,008	0,492184
0,009	0,491228
0,010	0,490277
0,020	0,480968
0,050	0,45919
0,080	0,431120
0,100	0,416291
0,500	0,221604

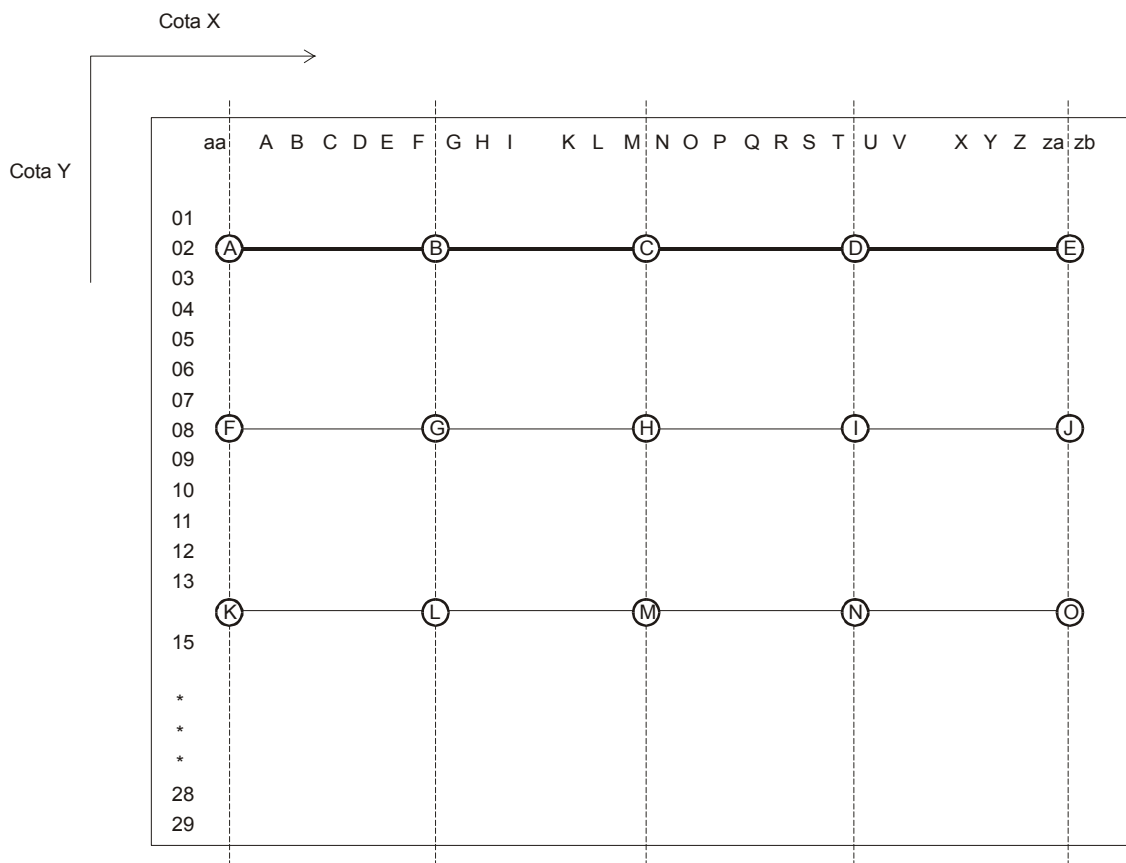


Figura 1 Posicionamento das Folhas de Ouro nos planos x-y na direção radial quando das medidas dos valores do Fluxo de Nêutrons Térmicos.

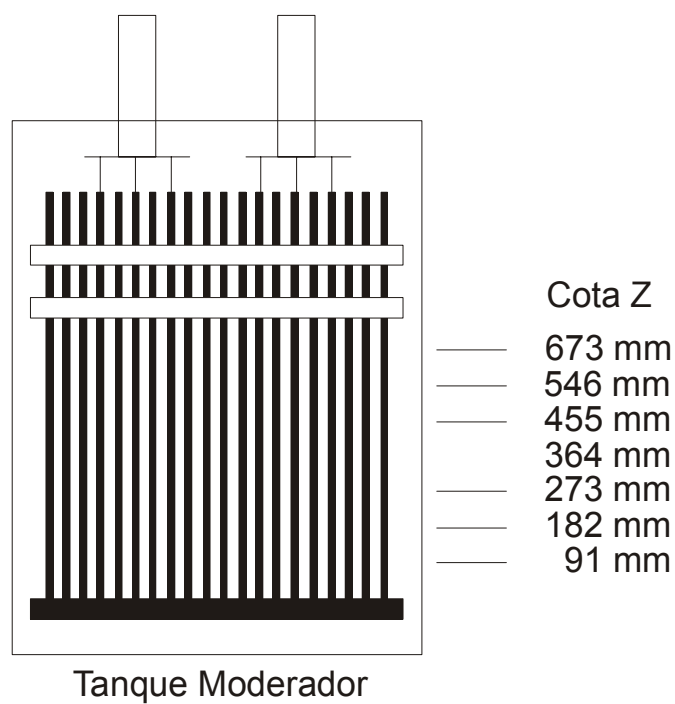


Figura 2 Posicionamento das Folhas de Ouro Segundo a Direção Axial (cotas) ao Núcleo do Reator IPEN/MB-01 (Início do Comprimento Ativo: Cota 91 mm e Final do Comprimento Ativo: Cota 673 mm).

4. QUESTÕES

4.1. Compare e comente o valor obtido no experimento com aquele da mesa de operação do reator para a corrente do canal 5.

4.2. Caso a medida tivesse sido realizada com folhas de ouro hiper-puras (100%) de espessura 0,013 mm e 8 mm de diâmetro. Qual seria o valor da razão de cádmio, sabendo que neste caso, a razão de cádmio corrigida (R_{cd}^*) seria dada abaixo pela equação 8?

Dado: $\bar{\Sigma}_{th} = 4,36 cm^{-1}$;

$E_3(4,36 \cdot 0,0013) = \text{vide tabela 3};$

$G_{th} = \text{Expressão (7)} ;$

$G_{epit} = 0,347;$

$C_{nua} = C_{th} + C_{epit} = 40747 \pm 204$ (LT=396s , te=194,73 h);

$C_{Cd} = 56917 \pm 245$ (LT=1002 , te= 192,38 h)

$$R_{cd}^* = \frac{C_{th} + C_{epit}}{C_{Cd}} = F_{cd} + \frac{C_{th}}{C_{epit}} \cdot \frac{G_{epit}}{G_{th}} \quad (8)$$