

**MEDIDA DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL  
DO FLUXO DE NÊUTRONS TÉRMICOS  
NO NÚCLEO DO REATOR IEA-R1**

Ulysses d'Utra Bitelli  
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN  
Travessa R, Nº 400  
CEP 05508, São Paulo, SP

**RESUMO**

Em vista da conversão gradual do núcleo do Reator IEA-R1 de alto para baixo enriquecimento, da necessidade de calibração de potência e de se aferir a precisão dos cálculos de distribuição de fluxo de nêutrons ao longo do núcleo, foram realizadas medidas da distribuição de fluxo de nêutrons térmicos em todos os elementos combustíveis do Reator IEA-R1, utilizando-se o método de ativação de folhas de ouro. Os valores absolutos de fluxo de nêutrons são apresentados neste trabalho.

**INTRODUÇÃO**

A distribuição espacial do fluxo de nêutrons térmicos no núcleo de um reator é de fundamental interesse, pois do seu conhecimento podemos estimar o consumo do combustível nuclear (queima) e em consequência estimar o tempo de vida de uma dada configuração do núcleo. Além disso, tal conhecimento é importante por aspectos ligados à segurança, pois de tal conhecimento podemos obter os fatores de pico em cada elemento combustível.

A obtenção experimental é particularmente importante, pois além de se obter os parâmetros acima citados, possibilita verificar a precisão da metodologia de cálculo utilizada, além de permitir obter o fluxo médio de nêutrons térmicos no núcleo e a correspondente potência gerada no mesmo.

Assim é necessária a utilização de um tipo de detector capaz de realizar medidas absolutas do fluxo neutrônico com boa precisão.

O detector utilizado é distribuído ao longo do núcleo é o detector de ativação, que nada mais é do que uma diminuta folha metálica de ouro de alta pureza. No caso utilizamos folhas de ouro de diâmetro de 8 mm, espessura de 0,0125 mm e pureza de 99,999 %.

Essas folhas de ouro são fixadas em suportes de acrílico (apresenta mesmo comportamento neutrônico que a água) e inseridas dentro de um dos canais do elemento combustível.

A metodologia utilizada para análise dos dados é a técnica da razão de cádmio que consiste na irradiação, sob idênticas condições (tempo de irradiação, potência, posicionamento de barras de controle, etc.), de duas folhas de ouro, sendo uma nua (sem cobertura) e outra coberta com cádmio. Assim a atividade de saturação induzida por nêutrons térmicos numa folha de ouro nua é devido a nêutrons térmicos e epitérmicos.

$$A_{ma}^{\infty} = A_{th}^{\infty} + A_{epit}^{\infty} \quad (1)$$

sendo

$A_{th}^{\infty}$  a atividade de saturação devida a nêutrons térmicos, e  
 $A_{epit}^{\infty}$  a atividade de saturação devida a nêutrons epitérmicos.

Analogamente, a atividade de saturação induzida numa folha de ouro coberta com cádmio é devido a nêutrons epitérmicos devido a alta seção de choque de absorção do cádmio a nêutrons térmicos, assim

$$A_{epit}^{\infty} = A_{cd}^{\infty} \cdot F_{cd} \quad (2)$$

sendo

$A_{cd}^{\infty}$  a atividade de saturação da folha coberta com cádmio, e  
 $F_{cd}$  o fator de cádmio

O fator de cádmio leva em conta o fato do cádmio não ser um filtro ideal, ou seja ele não é totalmente transparente aos nêutrons epitérmicos. Assim, a razão de cádmio sendo definida por

$$R_{cd} = \frac{A_{nua}^{\infty}}{A_{cd}^{\infty}} \quad (3)$$

permite, rearranjando as expressões, obter:

$$A_{th}^{\infty} = A_{ma}^{\infty} \left( 1 - \frac{F_{cd}}{R_{cd}} \right) \quad (4)$$

A relação da atividade de saturação com o fluxo neutrônico é dada pela expressão

$$A^{\infty} = \sum_{av} \Phi \cdot V$$

$$A^{\infty} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot \Phi \cdot m \cdot FP}{P_a} \cdot \sigma_{av} \quad (5)$$

sendo

$m$  a massa da folha de ouro considerada,  
 $P_a$  o peso atômico do ouro,  
 $\sigma_{av}$  a seção de choque microscópica média de ativação do Au-197,  
 $\Phi_{th}$  o fluxo de nêutrons térmicos, e  
 $FP$  o fator de perturbação do fluxo neutrônico causado pelo detector (folha de ouro).

Substituindo a expressão (4) em (5) e isolando  $\Phi$  teremos o fluxo de nêutrons térmicos (n/cm<sup>2</sup>.s) dada por

$$\Phi_{th} = \frac{A_{ma}^{\infty} \left( 1 - \frac{F_{cd}}{R_{cd}} \right) \cdot P_a}{6,023 \cdot 10^{23} \cdot m \cdot \sigma_{av} \cdot FP} \quad (6)$$

O fator de perturbações do fluxo neutrônico pode ser creditado basicamente a dois fatores: autoblindagem (G) e depressão de fluxo (K).

$$FP = K \cdot G \quad (7)$$

O fator de autoblindagem (G) nos dá a probabilidade de absorção do nêutron ao longo das camadas externas da folha para as internas, provocando uma distribuição de fluxo não homogênea no detetor de ativação, tendo como consequência uma diminuição na ativação da folha causada pela diminuição do fluxo neutrônico. Assim, G... pode ser obtido da expressão:

$$G = \frac{1}{\Sigma_a d} \left[ \frac{1}{2} - E_3(\Sigma_a d) \right] \quad (8)$$

sendo

$\Sigma_a$  a seção de choque macroscópica média de absorção, e  
d a espessura da folha.

A inserção de um absorvedor de nêutrons num campo neutrônico produz uma depressão de fluxo nas vizinhanças do mesmo. Tal fator estimado por Skyrme, Ritchie e Eldridge é dado por:

$$K = \frac{1}{1 + \left[ \frac{1}{2} - E_3(\tau) \right] \cdot g(R, \gamma)}$$

sendo

$$\gamma = \lambda / \lambda_s$$

$$\tau = \Sigma_a \cdot d \text{ e } g(R, \gamma)$$

a razão entre o livre caminho médio total e o livre caminho médio de espalhamento do meio, o fator de Skyrme modificado por Ritchie e Eldridge, para uma dada folha de raio R, tal que

$$g(R, \gamma) = \left\{ \frac{3}{2} \left( \frac{L}{\lambda} \right) S \left( \frac{2R}{L} \right) - K \left( \frac{2R}{\lambda}, \gamma \right) \right\} r_s \quad (10)$$

onde

L é o comprimento de difusão do meio,  
 $r_s$  o fator de correção de Skyrme-Ritchie-Eldridge, e  
S a função de Skyrme dada por

$$S(x) = \frac{4}{3}x - \frac{1}{8}x^2 + \frac{4}{45}x^3 - \frac{x^4}{192} + \dots \quad (11)$$

sendo

$$x = 2R/L.$$

A função de Skyrme, bem como o fator  $r_s$  podem ser obtidos graficamente [1], enquanto  $k(2R/\lambda, \gamma)$  pode ser aproximada por  $k = 1/15(2r/\lambda_s)$  para  $2R < \lambda_s$  ou  $K = 0,15$  para  $2R \gg \lambda_s$ .

Outro fator de correção que deve ser levado em conta no numerador da expressão (6) é a correção para a rampa de subida de potência durante o início da irradiação da folha, quando o reator está na condição de supercriticalidade até a potência de irradiação dos detetores de ativação.. A expressão necessária para se efetuar a correção pode ser obtida no trabalho realizado por D. K. Wehe [2]

#### DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

Foram irradiadas 468 folhas de ouro inseridas em 27 elementos combustíveis ("in-core") à potência constante de 201 watts.

Para tal, foram realizadas 7 irradiações distintas no nível de potência citado, devidamente monitoradas através da câmara de ionização compensada (CIC) do canal linear do Reator IEA-R1, mantido fixo em cada uma das

operações em 4.95 nA.

Além disso, procurou-se manter fixas as posições das barras de controle do reator a fim de garantirem todas as irradiações a mesma distribuição espacial do fluxo de nêutrons ao longo do comprimento ativo da CIC do canal linear.

A Tabela 1 mostra os elementos combustíveis mapeados em cada operação de irradiação, bem como as posições das Barras de Controle e o tipo de folha inserido (nua ou coberta com Cádmiu).

As posições de barra da Tabela 1 se referem a quantidade de passos (mm) retiradas do núcleo ativo do Reator IEA-R1. Uma placa de lucite contendo 9 folhas de ouro (Au) foi inserida no terceiro canal (sentido Norte) de cada elemento combustível mapeado (Tabela 1), cobrindo o perfil de fluxo axial ao longo do comprimento ativo da placa combustível do elemento.

Tabela 1: Ordem dos Mapeamentos de Fluxo Realizados no Reator IEA-R1.

Irrad	Elementos Combustíveis Mapeados					Folha de Au
		119	122	120	128	
1	102, 105, 129, 123, 112, 91, 80, 130, 109, 134, 135, 108, 133, 99	750	750	750	768	Nua
2	105, 129, 91, 130, 136 e 137	750	750	750	821	Cd
3	102, 98, 81, 108, 125 e 99	750	750	750	843	Cd
4	111, 112, 124, 131, 126 e 127	750	750	750	897	Cd
5	133, 134, 109, 123 e 127	750	750	750	867	Cd
6	80, 95, 132 e 135	750	750	750	844	Cd
7	111, 127, 98, 132, 81, 124, 131, 126, 136, 107, 125, 95 e 137	750	750	750	759	Nua

O tempo de irradiação das folhas de Ouro, sejam nuas ou cobertas com Cádmiu, foi de 1 hora. A subida de rampa de potência até a potência de irradiação foi devidamente cronometrada a fim de se descontar a contribuição da mesma na atividade total da folha de Au irradiada, através de expressões apropriadas [2].

#### RESULTADOS OBTIDOS

Após a irradiação das folhas, estas foram encaminhadas a uma bancada HPGe ("High Purity Germanium Detector") devidamente calibrada em energia e com uma eficiência muito bem conhecida para os 411,8044 keV emitidos pelo  $^{198}\text{Au}$ , formado através da reação de captura radioativa  $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$  no núcleo do reator.

A atividade de saturação da folha ( $A^\infty$ ) é obtida através da expressão:

$$A^\infty = \frac{\lambda \cdot C \cdot e^{t_c}}{E \cdot I \cdot (1 - e^{-t_c}) \cdot (1 - e^{-t_i})} \quad (12)$$

sendo

$\lambda$  a constante de decaimento do radionuclídeo contado,  
C a contagem líquida do fotopico,  
 $t_e$  o tempo de espera para contagem,  
 $t_i$  o tempo de irradiação,  
 $t_c$  o tempo de contagem,  
E eficiência global de contagem para o fotopico considerado, e  
I a abundância gama do fotopico.

Obtida a atividade de saturação de cada folha nua e coberta com Cádmiu,  $\Phi_{\text{FH}}$  é obtido através da Tabela 2 para cada ponto mapeado.

Tabela 2: Fluxo de Nêutrons Térmicos Médio ( $\Phi$ ) por Elemento Combustível e Distribuição Espacial por Cota da Parte Ativa da Placa Combustível ( $\times 10^8 n/cm^2s$ )

EC	$\Phi^*$	Fluxo Nêutrons ( $n/cm^2s$ ) - Parte Ativa Placa Combustível									
		1.5	8.5	15.5	22.5	29.5	36.5	43.5	50.5	57.5	
80	15.77	7.11	8.83	13.71	18.41	22.00	22.21	18.89	15.11	11.97	
81	11.40	5.65	7.48	10.61	—	15.13	15.90	11.78	11.03	7.45	
91	12.40	8.06	8.24	10.16	14.64	16.35	16.93	15.00	10.92	8.32	
95	14.64	3.21	4.65	10.22	17.68	21.86	20.51	19.32	15.20	11.01	
98	12.08	5.56	7.59	10.67	14.07	—	15.50	14.63	11.33	7.90	
99	20.51	7.14	11.94	—	22.03	25.32	26.95	24.33	—	15.76	
102	13.61	6.48	—	12.13	15.49	17.98	17.68	17.78	11.86	10.30	
105	9.47	4.39	6.43	8.89	11.87	12.77	12.63	10.08	7.94	6.19	
107	17.34	3.71	10.30	15.06	20.43	24.10	23.59	20.91	16.57	10.65	
108	15.25	5.61	8.40	13.50	18.05	21.42	18.70	19.48	14.66	10.44	
109	15.87	5.92	9.12	13.87	18.07	21.57	20.91	19.36	—	10.63	
111	11.55	6.68	8.81	11.15	14.39	—	13.73	12.90	11.00	6.77	
112	17.82	7.13	10.45	15.16	17.96	21.84	—	23.56	19.19	13.45	
123	14.69	7.82	8.84	13.17	16.64	19.83	18.16	17.71	14.36	9.65	
124	14.95	7.28	7.69	10.80	17.33	22.44	20.93	17.65	14.93	10.45	
125	13.90	6.46	6.42	11.34	15.97	19.73	18.63	—	13.96	9.76	
126	14.51	7.35	7.35	11.33	16.27	20.03	18.52	18.20	15.26	10.09	
127	19.26	8.07	9.52	15.68	19.36	26.30	29.87	22.47	20.93	15.40	
129	11.62	6.36	8.13	—	13.63	15.21	13.68	13.15	10.42	9.01	
130	17.19	7.41	8.64	17.36	20.05	22.21	23.17	20.73	16.66	12.58	
131	18.37	7.44	8.11	13.65	20.80	25.36	26.80	22.14	20.43	14.25	
132	13.69	6.72	9.32	—	14.60	17.66	17.91	15.28	12.76	9.90	
133	16.35	7.18	6.96	11.37	16.53	20.90	—	20.98	20.26	16.64	
134	16.29	4.90	5.44	10.55	—	18.82	—	24.37	20.30	18.18	
135	16.86	5.06	2.64	10.74	19.69	23.54	24.51	22.79	21.69	13.39	
136	9.99	5.89	5.71	8.76	—	12.84	14.30	11.50	9.45	6.39	
137	9.35	4.40	5.12	7.61	9.62	11.29	—	12.64	9.85	7.87	

(\*)  $\Phi \times 10^8 n/cm^2s$ .

Nota: A incerteza associada é de 6% a um nível de confiança estatística de 95%.

Obtidas as distribuições de fluxo ao longo do núcleo é possível se obter o fluxo médio de nêutrons térmicos no núcleo do Reator IEA-R1 ( $\Phi_N$ ). Assim, para um nível de corrente de 4,95 nA da CIC do canal linear, para as posições de Barras de Controle especificadas na Tabela 1, referentes a configuração do núcleo 165B (Figura 1), obteve-se o seguinte valor de fluxo médio no núcleo, a um nível de confiança estatística de 95%.

$$\Phi_N = (1.56 \pm 0.10) \times 10^9 n/cm^2s$$

O fator de pico experimental, obtido para cada elemento combustível (canal 3 - face Norte), pode ser obtido das razões entre o fluxo de nêutrons térmicos máximo e médio no canal de refrigeração mapeado. Os resultados podem vistos na Tabela 3.

#### CONCLUSÃO

Os resultados experimentais obtidos (distribuição espacial axial do fluxo de nêutrons térmicos por elemento, fator de pico no canal mapeado e fluxo médio de nêutrons térmicos) neste trabalho são extremamente importantes e fornecem subsídios para verificar a precisão da metodologia de cálculo utilizada [3], bem como realizar a calibração de potência do Reator IEA-R1 [4].

A fim de visualizar o elemento combustível (canal de refrigeração mapeado) é apresentada a figura 2, bem como um exemplo de perfil de fluxo de nêutrons térmicos obtido para o elemento combustível 105 (EC 105).

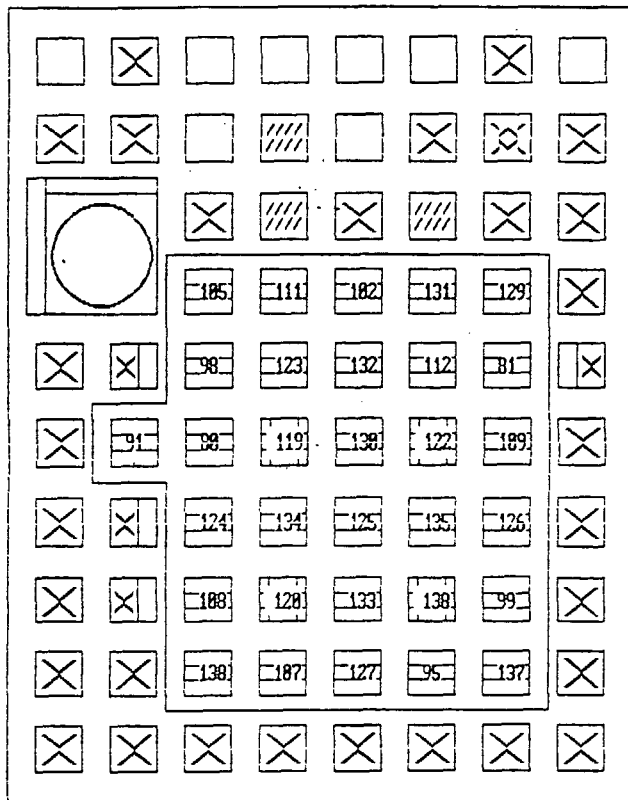
A distribuição espacial do fluxo de nêutrons térmicos, obtida para a configuração do núcleo 165B, ao longo de todos os elementos combustíveis, foi realizada 14 anos depois em que pela última vez se realizou tais medidas [5]. Isto se deve ao fato das mesmas serem extremamente trabalhosas e requererem total disponibilidade do Reator IEA-R1, por um período de uma semana, para a realização das irradiações. Assim, tais dados experimentais são extremamente importantes e constituem uma rara oportunidade do grupo de neutrônica do IPEN/CNEN-SP avaliar a sua metodologia de cálculo [3].

Tabela 3: Fator de Pico Obtido no Canal Mapeado do Elemento Combustível (Canal 3 - Face Norte)

Elemento Combustível (EC)	Fator de Pico (Canal 3 do EC)	Cota da Placa Ativa (cm)
80	1.41 ± 0.12	36.5
81	1.00 ± 0.09	36.5
91	1.09 ± 0.09	36.5
95	1.40 ± 0.12	29.5
98	1.00 ± 0.09	36.5
99	1.73 ± 0.15	36.5
102	1.15 ± 0.10	29.5
105	0.82 ± 0.07	29.5
107	1.55 ± 0.13	29.5
108	1.37 ± 0.11	29.5
109	1.36 ± 0.12	29.5
111	0.92 ± 0.08	29.5
112	1.51 ± 0.13	29.5
123	1.27 ± 0.11	29.5
124	1.44 ± 0.12	29.5
125	1.26 ± 0.12	29.5
126	1.28 ± 0.11	29.5
127	1.69 ± 0.14	36.5
129	0.98 ± 0.08	29.5
130	1.49 ± 0.13	36.5
131	1.63 ± 0.14	36.5
132	1.15 ± 0.10	36.5
133	1.35 ± 0.11	43.5
134	1.56 ± 0.13	36.5
135	1.57 ± 0.13	43.5
136	0.92 ± 0.08	36.5
137	0.81 ± 0.07	43.5

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ritchie, R. H. & Eldridge, M. B. - Thermal Neutron Flux Depression by Absorbing Foils. *Nuclear Science and Engineering*, 8: 300-11, 1960.
- [2] Wehe, D. K. & King, J. S. - Absolute Measurements of Neutron Spectra in High and Low Enriched Uranium Materials Test Reactor Fuel. *Nuclear Science and Engineering* : 110, 56-78, 1992.
- [3] Pintaud, M. de F. e Santos, A. - Comparação Teoria / Experimento do Mapeamento de Fluxo do Reator IEA-R1. *IX Encontro Nacional de Física de Reatores e Termo-Hidráulica*, Caxambú, MG, 1993.
- [4] Bitelli, U. d'U. - Calibração de Potência do Reator IEA-R1 pelo Método de Ativação de Folhas de Ouro. *IX Encontro Nacional de Física de Reatores e Termo-Hidráulica*, Caxambú, MG, 1993.
- [5] Mestnik F<sup>o</sup>, J. - A Distribuição Espacial do Fluxo de Nêutrons no Núcleo do Reator IEA-R1, Obtida por Meio da Ativação de Folhas. *Dissertação de Mestrado, IEA-DT-132*, 1979.



- |  |                                   |  |                                   |
|--|-----------------------------------|--|-----------------------------------|
|  | Elemento Combustível Padrão       |  | Fonte de Neutrons                 |
|  | Elemento Combustível de Controle  |  | Tampão                            |
|  | Elemento Refletor                 |  | Elemento de Irradiação            |
|  | Elemento de Irradiação de Grafite |  | Elemento de Irradiação de Silício |

Fig.1- Nucleo do Reator IEA-R1(165B).

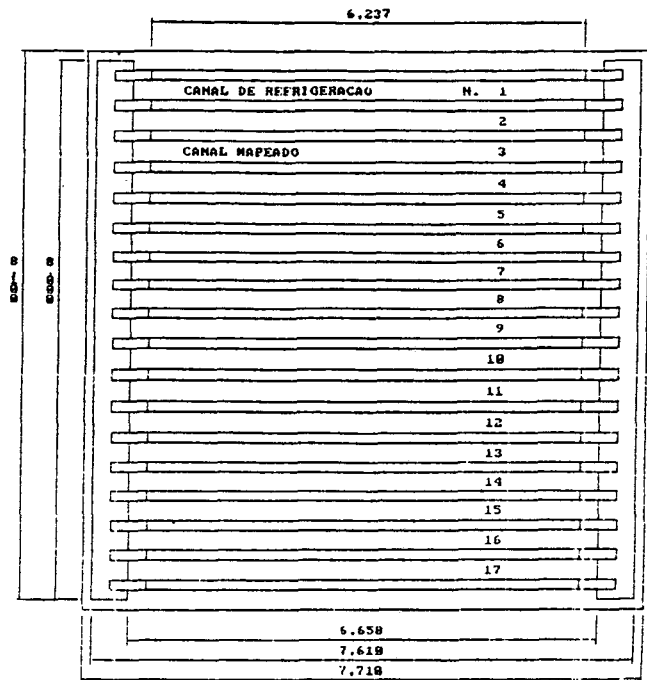


Fig.2- Elemento combustível do Reator IEA-R1.

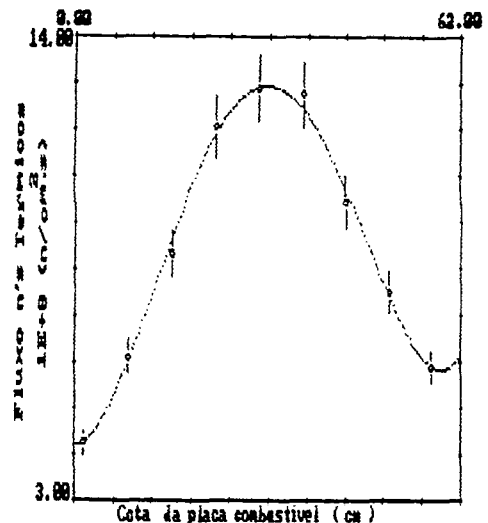


Fig.3- Fluxo de nêutrons térmicos no EC 105.

**ABSTRACT**

This work presents the spatial thermal neutron flux in IEA-R1 reactor obtained by activation foils methods. These measurements were made in 27 fuel elements of the reactor core (165B configuration). The results are important to compare with theoretical values, power calibration and safety analysis.