

## MEDIDA DO "BUCKLING" NA UNIDADE CRÍTICA IPEN/MB-01

Ulysses d'Utra Bitelli, Adimir dos Santos e Rogério Jerez

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN/CNEN-SP  
Caixa Postal 11049  
05499-900, São Paulo, Brasil

### RESUMO

Este trabalho apresenta a medida da curvatura do fluxo de nêutrons ("Buckling") no núcleo da Unidade Crítica IPEN/MB-01. Para tal, foi medida a distribuição espacial do fluxo de nêutrons térmicos, epitérmicos e rápidos, ao longo da direção dos três eixos ortogonais do núcleo do reator, utilizando-se detectores de ativação (folhas) de ouro coberto com Cádmio e de Índio. O valor obtido para o "Buckling" foi de  $97,34 \pm 0,64 \text{ m}^{-2}$ .

### INTRODUÇÃO

Num núcleo de reator do tipo paralelepípedo retangular, o fluxo de nêutrons no estado estacionário na região assintótica, considerando-se como origem dos eixos o centro do mesmo, pode ser dado pela expressão /1/:

$$\Phi = A \cdot \cos \frac{\pi \cdot x}{a} \cdot \cos \frac{\pi \cdot y}{b} \cdot \cos \frac{\pi \cdot z}{c}$$

O parâmetro A está relacionado com a magnitude do fluxo de nêutrons e esta diretamente relacionado a potência de operação do reator (P), volume do reator ( $v=a.b.c$ ), energia liberada por fissão ( $\gamma$ ) e  $\Sigma_f$  a seção de choque média macroscópica de fissão. Assim, A pode ser dada pela expressão:

$$A = \frac{\pi^3 \cdot P}{8 \cdot V \cdot \gamma \cdot \Sigma_f}$$

O parâmetro relacionado com a distribuição espacial do fluxo de nêutrons é o "Buckling" do sistema ( $B^2$ ) que nos dá uma medida da curvatura do fluxo de nêutrons.

Assim, da primeira equação, obtemos o "Buckling" para um núcleo de reator na forma de um paralelepípedo retangular:

$$B^2 = \left( \frac{\pi}{a} \right)^2 + \left( \frac{\pi}{b} \right)^2 + \left( \frac{\pi}{c} \right)^2$$

Sendo a e b as dimensões radiais extrapoladas do núcleo e c as dimensões axiais extrapolada.

### UNIDADE CRÍTICA IPEN/MB-01

A Unidade Crítica IPEN/MB-01 é uma instalação destinada ao estudo das características neutrônicas de

núcleos moderados a água leve, possibilitando a verificação experimental de métodos de cálculo, estruturas celulares e malhas do reator, efetividade das barras de controle e resposta do núcleo a inserções de reatividade. Assim sendo, a unidade crítica foi concebida com a flexibilidade necessária para testar diferentes configurações do núcleo. As características da unidade crítica, estão descritas na referência /2/. Todavia, podemos salientar que as medidas do "Buckling" foram realizadas utilizando a configuração quadrada do núcleo, ou seja um arranjo de 26x26 varetas combustíveis nas direções Leste-Oeste e Norte-Sul do núcleo (Figura 1). Tal configuração foi utilizada, ao invés da 28x26, por ser menos reativa, o que possibilitou minimizar os efeitos de perturbação das barras de controle na obtenção do fluxo de nêutrons assintótico.

### PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram realizadas um total de 9 operações da Unidade Crítica IPEN-MB/01 para mapeamento do fluxo de nêutrons térmicos, epitérmicos e rápidos, ao longo das direções radiais x e y, respectivamente as direções Norte-Sul e Leste-Oeste, conforme podemos visualizar na figura 1. A direção axial z foi mapeada no sentido paralelo às varetas combustíveis, ao longo do comprimento ativo do combustível, conforme podemos visualizar na Figura citada. Todos os mapeamentos foram realizados na região central do núcleo, nas respectivas direções x, y e z.

O mapeamento foi feito ao longo das direções, utilizando-se 11 folhas na direção axial, distantes entre si 45 mm e 11 folhas na direção radial distantes entre si 40 mm, procurando com isso, cobrir todo o comprimento ativo de combustível do núcleo do reator. Uma visualização do dispositivo de lucite (suporte das folhas), utilizado para mapeamento do fluxo de nêutrons, pode ser vista na figura 2.

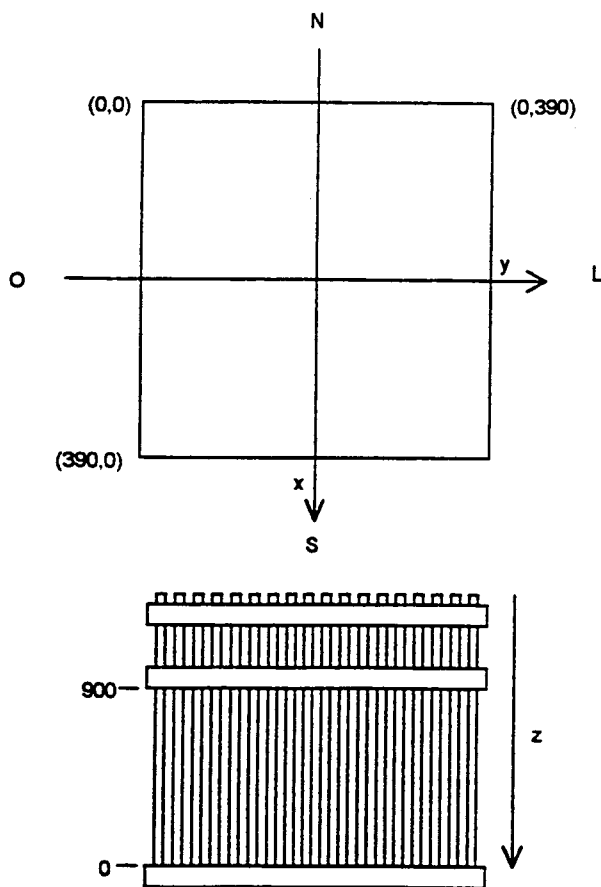


Fig. 1- Núcleo do Reator com as direções x, y e z mapeadas pelas Folhas de Ouro e Índio.

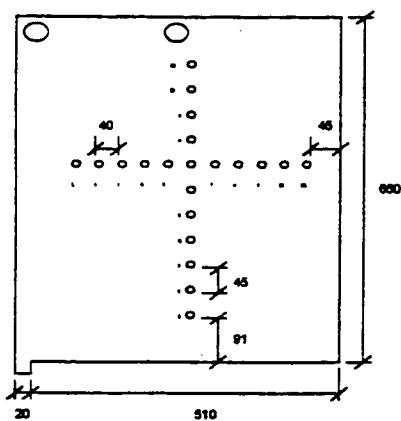


Fig. 2- Suporte das Folhas de Ativação inserido no núcleo do Reator IPEN/MB-01

Das nove (09) irradiações realizadas, três irradiações (03) utilizaram folhas de ouro nuas, três folhas de ouro cobertas com Cádmiio e três folhas de Índio, em cada uma das direções x, y e z. A espessura das folhas de ouro foram de 0,0125 mm, enquanto as de Índio 0,5 mm, todas elas com um diâmetro de 8 mm.

As irradiações foram realizadas com o reator operando a um nível de potência de 100 watts, por duas horas, com as barras de controle BC1 e BC2, inseridas, o equivalente a 29% do comprimento ativo axial do núcleo do reator.

Após a irradiação, as folhas foram levadas ao laboratório, onde foram contadas numa bancada calibrada de Germânio Hiper-puro (HPGe). Basicamente, as reações monitoradas na bancada HPGe, são as de captura radioativa nas folhas de Au, do tipo  $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$  para nêutrons térmicos e epitérmicos e nas folhas de In a reação  $^{115}\text{In}(n,n')^{115m}\text{In}$ , para nêutrons rápidos com energia superior a 0,82 Mev.

## RESULTADOS OBTIDOS

A condição de fluxo de nêutrons assintótico é atingida a partir da determinação experimental da razão de Cádmiio ( $R_{\text{Cd}}$ ) ao longo do comprimento ativo do reator. Se a razão de Cádmiio se mantém constante (Razão entre as atividades das folhas nuas e cobertas com Cádmiio), significa que o espectro de energia dos nêutrons se mantém constante, não sofrendo a influência das barras de controle, bem como da mudança de meio na interface nucleo-refletor e nesse caso, está caracterizada a região ao longo do qual o fluxo de nêutrons mantém a sua condição assintótica /3/. Nesse caso, a distribuição do fluxo de nêutrons assintótico deverá assumir a forma de um seno, se considerarmos como origem das coordenadas do núcleo, cuja forma geométrica é de um paralelepípedo, um de seus vértices.

A Razão de Cádmiio ( $R_{\text{Cd}}$ ) medida através da irradiação de folhas de ouro nuas e cobertas com Cádmiio, se manteve constante ao longo das coordenadas correspondentes à posição (cota) ocupada entre as folhas 3 e 11. O valor obtido, para a configuração do núcleo quadrada foi de:

$$R_{\text{Cd}} = 1,70 \pm 0,20$$

Os valores de fluxo de nêutrons normalizados em relação ao seu valor máximo, podem ser visualizados nas figuras 3 a 8, respectivamente nas direções radiais do núcleo x, y e na direção axial z, para as folhas de Au e In, usando como ajuste por mínimos quadrados uma função senoidal do tipo:

$$y = A_1 \cdot \text{sen}(\pi \cdot x / A_2)$$

O valor do "Buckling" ( $B^2$ ) é obtido quando o fluxo de nêutrons se anula, ou seja para o valor de  $y=0$ . Isto é obtido quando  $x=A_2$ , ou seja, o coeficiente  $A_2$ , obtido do ajuste por mínimos quadrados, nos fornece a distância para o qual o fluxo de nêutrons se curva até atingir o zero, ou seja o proprio valor de  $B^2$ , uma vez que o mesmo é dado por uma simples fórmula matemática do tipo:  $B^2 = (\pi / A_2)^2$

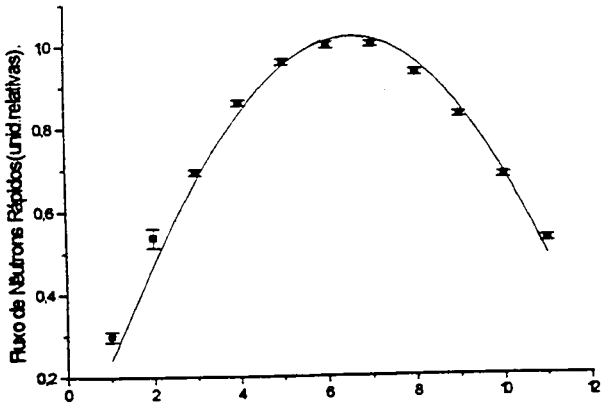


Fig. 3:- Curvatura do Fluxo de Nêutrons - Direção Axial - Folhas de In.

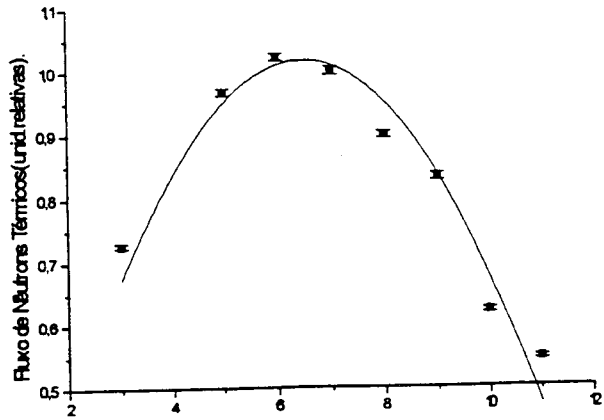


Fig. 6:- Curvatura do Fluxo de Nêutrons - Direção Axial - Folhas de Au/Cd.

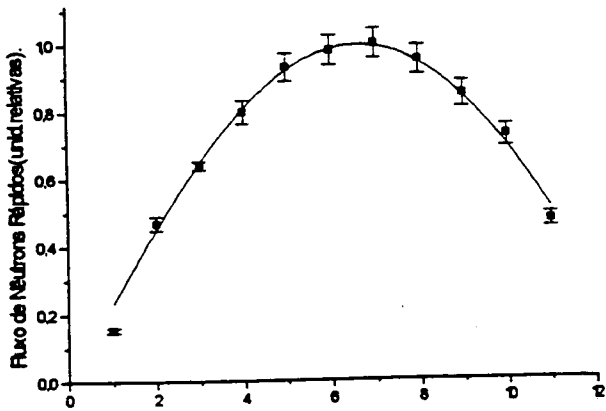


Fig. 4:- Curvatura do Fluxo de Nêutrons - Direção Radial NS - Folhas de In.

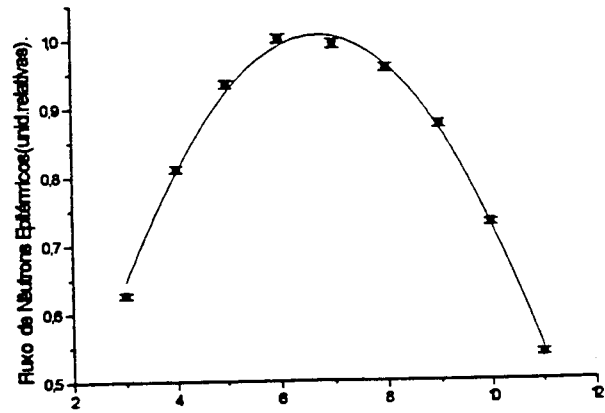


Fig. 7:- Curvatura do Fluxo de Nêutrons - Direção Radial NS - Folhas de Au/Cd.

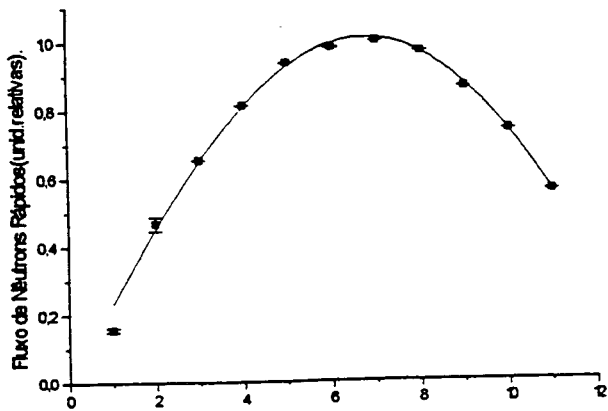


Fig. 5:- Curvatura do Fluxo de Nêutrons - Direção Radial LO - Folhas de In.

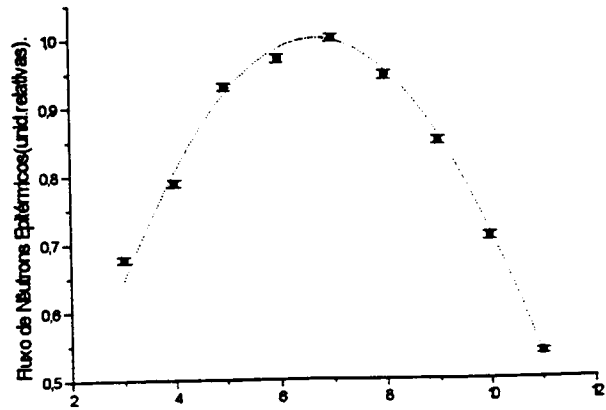


Fig. 8:- Curvatura do Fluxo de Nêutrons - Direção Radial LO - Folhas de Au/Cd.

Esta expressão é característica de um reator do tipo paralelepípedo retangular. Assim, representando graficamente, todos os valores de fluxo ao longo das respectivas direções (valores normalizados) é possível se obter para cada um dos ajustes da função senoidal (fluxo de nêutrons assintótico) os valores de  $A_1$  e  $A_2$ , por mínimos quadrados. O valor de  $A_1$  está relacionado a magnitude do fluxo de nêutrons e no nosso caso específico, não nos interessa, já o valor da constante  $A_2$  está relacionado diretamente ao valor do "Buckling" ( $B^2$ ). Os valores de  $A_2$  obtidos podem ser visualizados nos respectivos gráficos (figuras) e inseridos na expressão anterior, possibilita obter o valor do "Buckling" nas respectivas direções radiais e axial. Assim os valores de  $B^2$  obtidos, a partir da medida da distribuição espacial do fluxo de nêutrons epitérmicos, com folhas de Au cobertas com Cd, foram:

$$B^2_{\text{rad,x}} = (34,40 \pm 0,05) \text{ m}^{-2}$$

$$B^2_{\text{rad,y}} = (34,07 \pm 0,13) \text{ m}^{-2}$$

$$B^2_{\text{axial z}} = (28,86 \pm 0,45) \text{ m}^{-2}$$

O valor do "Buckling" do reator, dado pela somatória dos valores em cada direção, obtido com as folhas de Au cobertas com Cd (fluxo epitérmico), é:

$$B^2_{\text{Au}} = (97,33 \pm 0,47) \text{ m}^{-2}$$

Analogamente, os valores de "Buckling" obtidos com as folhas de In (fluxo de nêutrons rápidos) são:

$$B^2_{\text{rad,x}} = (33,89 \pm 0,10) \text{ m}^{-2}$$

$$B^2_{\text{rad,y}} = (35,03 \pm 0,36) \text{ m}^{-2}$$

$$B^2_{\text{axial z}} = (28,43 \pm 0,21) \text{ m}^{-2}$$

O valor do "Buckling" do reator, dado pela somatória dos valores em cada direção, obtido com as folhas de In, é:

$$B^2_{\text{In}} = (97,35 \pm 0,43) \text{ m}^{-2}$$

### CONCLUSÃO

Os valores obtidos para a curvatura do fluxo de nêutrons ("Buckling"), tanto para as folhas de Índio que monitora um fluxo neutônico acima de 0,82 Mev, como para as folhas de Ouro com cobertura de Cádmiu, que monitora principalmente um fluxo epitérmico à energia de 4 eV (principal ressonância do Au-197), são bastante concordantes, o que reforça a validade da escolha da extensão da região assintótica. Assim, se tirarmos uma média desses dois valores obtidos, com esses dois diferentes detectores de ativação (medida não relacionadas),

obtemos o valor do "Buckling" Material do reator IPEN/MB-01, a saber:

$$B^2 = (97,34 \pm 0,64) \text{ m}^{-2}$$

Esse valor experimental fornecerá subsídios experimentais ao grupo de neutrônica, a fim de verificar se os seus códigos estão ou não superestimando a fuga de nêutrons do núcleo do reator e o impacto que isso causa nos cálculos de distribuição de fluxo e reatividade.

Outro parâmetro muito importante que pode ser obtido a partir do "Buckling" é o fator de multiplicação infinito ( $k_{\infty}$ ). Sabemos que partindo-se das equações em 2 grupos de energia na região assintótica, conforme descrito por Duderstadt / 5/, chega-se a:

$$k_{\text{eff}} = \frac{k_{\infty}}{(1 + B^2 L_1^2)(1 + B^2 L_2^2)}$$

Onde num sistema crítico  $k_{\text{eff}}=1$  e portanto tem-se:

$$k_{\infty} = (1 + B^2 L_1^2)(1 + B^2 L_2^2),$$

que é a expressão utilizada para a obtenção do  $k_{\infty}$  a partir do "Buckling" medido. Os parâmetros  $L_1$  e  $L_2$  (comprimentos de difusão) são funções de parâmetros básicos (coeficientes de difusão, seções de choque macroscópicas de absorção, etc.), obtidos a partir das constantes de grupo geradas com o código celular HAMMER-TECHNION /4/.

Assim, sabendo-se os valores de  $L_1^2$  e  $L_2^2$ , respectivamente, 30,5829 cm<sup>2</sup> e 1,90763 cm<sup>2</sup>, podemos estimar o valor de  $k_{\infty}$ :

$$k_{\infty} = 1,3218$$

Finalmente, sugere-se como trabalho futuro, a medida do "Buckling" utilizando-se outros detectores de ativação, na forma de folhas e fios, variando-se a temperatura do moderador.

### REFERÊNCIAS

- [1]- LAMARSH, J.R. Introduction to Nuclear Reactor Theory. Reading Mass., Addison-Wesley, 1966.
- [2] SANTOS, A. & MENEZES, A. Tema Especial de Física de Reatores e Termo-Hidráulica-IX ENFIR, 1-4, (25-29/10/93), Caxambú, M.G.
- [3] KAPLAN, I. ET ALLI. Massachusetts Institute of Technology Exponential Assembly Studies of Low-Enrichment, Heavy-Water Lattices. Exponential and Critical Experiments. Proceedings of a Symposium-vol. 2, Amsterdam 2-6 September 1963.

[4] SUICH, J.E. & HONECK, H.C. **The Hammer System Heterogeneous Analysis of Multigroup Methods of Exponential and Reactor.** Aiken, S.C., Du Pont de Nemours, Savannah River Laboratory (DP-1064), 1967.

[5] DUDERSTADT, J.J. & HAMILTON, L.J. **Nuclear Reactor Theory.** John Wiley & Sons, Inc., 1976.

[6] MIYOSHI, YOSHINORI ET ALI. **A Geometric Buckling Expression for Regular Polygons: Measurements in Low-Enriched UO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O Lattices.** Nuclear Technology, Vol. 103, Setembro de 1993.

#### ABSTRACT

This work presents the methodology to obtain the Material Buckling of the IPEN/MB-01 Reactor. The shape of the neutron flux in the asymptotic region was measured by means of Gold (bare and Cd-covered) and Indium foils irradiations. There has been a good consistency and the final result for the Buckling is  $(97,34 \pm 0,64) \text{ m}^{-2}$ .