

MAPEAMENTO E MONITORAÇÃO DA DENSIDADE DE FLUXO DE NÊUTRONS EM REGIÃO PRÓXIMA AO NÚCLEO DO REATOR IEAR-1

Mauro S. Dias
Marina F. Koskinas
Carlos A.M. Silva
Eliane Pocobi
Rodolfo R. Machado

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Comissão Nacional de Energia Nuclear/São Paulo

SUMÁRIO

O presente trabalho descreve o procedimento adotado pelo Laboratório de Metrologia Nuclear para o mapeamento e monitoração da densidade de fluxo de nêutrons térmicos em uma região próxima ao núcleo do Reator IEAR-1. A região mapeada, com cerca de 5,5 cm de diâmetro e 40 cm de comprimento, destina-se à calibração de câmaras de ionização ou outros detectores de nêutrons produzidos no IPEN. Nesta região foram irradiadas cerca de 80 folhas de ativação, constituídas de uma liga de Au-Al, contendo 0,130% de ^{197}Au . A atividade do nuclídeo ^{198}Au , obtido por reação (n,γ) , foi determinada em um cintilador de NaI(Tl), calibrado através da medida absoluta de algumas folhas de ativação em sistema de coincidência 4π (PC) β - γ . A densidade de fluxo de nêutrons foi calculada em função da atividade para todos os pontos selecionados na região e integrada para obter o fluxo médio na região mapeada.

ABSTRACT

The procedure followed by the Nuclear Metrology Laboratory at IPEN (São Paulo) for mapping and monitoring the thermal neutron flux density in a region near the IEAR-1 reactor core is described. The mapped region, measuring 5.5 cm in diameter and 40 cm long, will be used to calibrate ion chambers or other neutron detectors produced at IPEN. About 80 activation foils, made of Au-Al alloy containing 0.130% of ^{197}Au , were irradiated. The nuclide ^{198}Au , obtained by (n,γ) reaction, was measured in a NaI(Tl) scintillator, which was calibrated by measuring some foils absolutely by means of a 4π (PC) β - γ coincidence system. The thermal neutron flux density was calculated as a function of the foil activity for all measured points and integrated in order to obtain the average neutron flux in the mapped region.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e fabricação de câmaras de ionização e outros detectores de nêutrons pelo Departamento de Aplicações na Engenharia e Indústria (TE) do IPEN, gerou a necessidade de estabelecer um método para efetuar a calibração destes detectores, em termos de resposta do detector em função do fluxo de nêutrons incidente na região sensível do detector.

O presente trabalho descreve o método desenvolvido pelo Laboratório de Metrologia Nuclear (LMN) do IPEN, para o mapeamento e monitoração da densidade de fluxo de nêutrons térmicos nesta região de interesse, próxima ao núcleo do reator IEAR-1.

ARRANJO EXPERIMENTAL

A densidade de fluxo de nêutrons térmicos foi determinada pelo método de ativação de folhas, através da reação $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$. As folhas de ativação foram constituídas de uma liga de Au-Al, contendo 0,130% de ^{197}Au . As folhas possuíam cerca de 4 mm^2 de área contendo uma massa de ^{197}Au em torno de 0,8 μg . Dois conjuntos de folhas foram preparados: no primeiro, denominado "sem cádmio", as folhas foram simplesmente envolvidas em uma folha de alumínio com 0,025 mm de espessura. No segundo, denominado "com cádmio", as folhas foram colocadas em uma cápsula de cádmio com 1,1 cm de diâmetro e 0,06 cm de espessura de parede.

As folhas de ativação foram dispostas para irradiação de acordo com o arranjo experimental esquematizado na figura 1. Este arranjo foi projetado e construído pela equipe do Departamento de Aplicações (TE) do IPEN, de acordo com uma proposta inicial, sugerida pelo LMN.

Neste arranjo, as folhas destinadas ao mapeamento da região de interesse foram colocadas na posição B. Esta é a região onde serão inseridos os detectores de nêutrons a serem calibrados. A região mapeada, de forma cilíndrica, possui cerca de 5,5 cm de diâmetro e 44 cm de comprimento e nela foram colocadas 55 folhas de ativação. Estas folhas foram dispostas em 5 fileiras de 11 folhas, ao longo da direção longitudinal do cilindro, conforme mostra a figura 1. Em cada fileira foram colocadas 6 folhas sem cádmio (representadas na figura por círculos fechados) e 5 folhas com cádmio (círculos abertos).

As folhas de ativação foram fixadas em um suporte constituído de uma placa de alumínio com 0,4 mm de espessura, moldada de modo a formar uma superfície cilíndrica, onde foram colocadas as folhas externas. Na região central desse cilindro foi colocada outra placa de alumínio em posição diametral, para a colocação das folhas centrais. Em razão das variações na densidade de fluxo de nêutrons na região mapeada, ocasionadas por variações de potência ou de configuração do núcleo do reator, foi necessário incluir um arranjo adicional de folhas de ativação, com o objetivo de monitorar estas variações no fluxo. Este arranjo é apresentado nas posições A e C da figura 1. Optou-se pela monitoração da densidade de fluxo ao longo da direção vertical, cobrindo toda a extensão da região mapeada. Dois conjuntos de folhas (6 sem cádmio e 5 com cádmio) foram colocadas, um em cada lado da região mapeada, a fim de levar em conta possíveis variações do fluxo na direção horizontal. A distância de 19,5 cm entre os monitores e o centro da região mapeada foi considerada suficientemente grande, de modo a tornar desprezível a depressão no fluxo de nêutrons, causada pela presença dos monitores. Esta distância torna desprezível também a depressão na região dos monitores, causada pela presença da câmara de ionização quando colocada em conjunto com os monitores, por ocasião de sua calibração.

CONDIÇÕES DE IRRADIAÇÃO

O arranjo experimental da figura 1 foi colocado próximo ao núcleo do rea-

torIEAR-1, de modo que a região mapeada ficasse a 21 cm da posição 5 da placa matriz do reator (figura 2) e os monitores contidos em um plano paralelo à face do reator. Como a região mapeada ficou posicionada a uma distância relativamente grande do núcleo, mudanças na configuração do núcleo ou alterações nas posições das barras de controle devem ter uma influência menor no comportamento do fluxo de nêutrons na região mapeada, em comparação à regiões mais próximas ao núcleo do reator.

DETERMINAÇÃO DAS ATIVIDADES

A atividade do nuclídeo formado, ^{198}Au , foi determinada em um cintilador de NaI(Tl), calibrado através da medida absoluta de algumas folhas de ativação em um sistema de coincidências 4π (PC) β - γ . As medidas foram efetuadas após um tempo de espera de no mínimo dois dias, de modo a permitir o decaimento do nuclídeo ^{24}Na ($T_{1/2} = 15$ hs), formado pela ativação do alumínio por nêutrons rápidos, por meio da reação $^{27}\text{Al}(\alpha, n)^{24}\text{Na}$. A exatidão alcançada nos valores de atividade foi da ordem de 2 - 3%.

CÁLCULO DO FLUXO

A densidade de fluxo de nêutrons térmicos foi obtida por meio da seguinte expressão(1):

$$\phi_{th} = \phi_0 \left(1 - \frac{4s}{\sqrt{\pi} \mu}\right) \left(\frac{4T}{\pi T_0}\right)^{1/2} \quad (1)$$

onde:

$$\phi_0 = n v_0 = \frac{(A_s - F_{cd} A_{cd}) R'}{F N_T \sigma_0 (g+rs) (R'-1)}$$

A_s e A_{cd} - são, respectivamente, as atividades saturadas sem e com o envoltório de cádmio.

F_{cd} - é o fator de correção para a razão de cádmio.

$\frac{R'}{R'-1}$ - é a razão entre a densidade de nêutrons total e a de subcádmio(até o corte em E_{cd}).

F - é o fator de correção para perturbação no fluxo de nêutrons, causado pela presença da folha.

N_T - é o número total de átomos da folha.

σ_0 - é a seção de choque (n, γ) em $0,0253$ eV = $(98,8 \pm 0,3)$ b.

g, r e s - são fatores de Westcott.

$\mu = 5$ - é um coeficiente para ajuste da função de junção.

T - é a temperatura do nêutron e $T_0 = 293,6$ K.

O efeito de perturbação no fluxo, causado pelas folhas de ativação descritas no presente trabalho foi menor que 0,1%.

A densidade de fluxo térmico na região mapeada é função das coordenadas x , y e z . A origem deste sistema de coordenadas foi escolhida no centro da região mapeada e orientada de acordo com a figura 1. Para obter o fluxo de nêutrons integrado em toda região mapeada, escolheu-se um modelo analítico que pudesse descrever satisfatoriamente a variação espacial no fluxo. Considerando que a variação da densidade de fluxo na direção vertical (z) segue aproximadamente a relação:

$$\phi(z) = c_0 + c_1 z + c_2 z^2 \quad (2)$$

Para descrever a região mapeada, escolheu-se a seguinte função como modelo tridimensional:

$$\phi(x, y, z) = \phi(x) \cdot \phi(y) \cdot \phi(z) \quad (3)$$

onde:

$$\phi(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$$

$$\phi(y) = b_0 + b_1 y + b_2 y^2$$

$$\phi(z) = c_0 + c_1 z + c_2 z^2$$

Desprezando os termos cruzados de terceira ordem ou superiores, a expressão (3) se reduz a:

$$\phi(x,y,z) = A_0 + A_1 x + A_2 y + A_3 z + A_4 x^2 + A_5 y^2 + A_6 z^2 + A_7 xy + A_8 xz + A_9 yz \quad (4)$$

A relação (2) foi utilizada para descrever a variação do fluxo ao longo dos monitores.

Os valores dos coeficientes A_i e c_i foram determinados através de um ajuste por mínimos quadrados da expressão (3) aos pontos experimentais obtidos na região mapeada. Para isso utilizou-se o programa S.A.S. (2), instalado no computador do IPEN.

Pela expressão (3), o fluxo total integrado no cilindro mapeado, de raio R e altura H, é dado por:

$$\phi_T = \int_V \phi(x,y,z) dx dy dz$$

portanto:

$$\phi_T = \pi R^2 H \left[A_0 + (A_4 + A_5) \frac{R^2}{4} + A_6 \frac{H^2}{12} \right] \quad (5)$$

A densidade de fluxo média, na região mapeada, é dada por:

$$\bar{\phi} = \phi_T / V,$$

onde: V é o volume do cilindro. Segue que:

$$\bar{\phi} = A_0 + (A_4 + A_5) \frac{R^2}{4} + A_6 \frac{H^2}{12} \quad (6)$$

O fator de normalização para a monitoração é uma média das integrais da densidade de fluxo na direção vertical F_A e F_C , para os monitores localizados nas posições A e C, respectivamente:

$$F_N = \frac{F_A + F_C}{2} \quad (7)$$

onde:

$$F_A = C'_0 + C'_2 \frac{H^2}{12}$$

$$\text{e } F_C = C''_0 + C''_2 \frac{H^2}{12}$$

C'_i e C''_i são os coeficientes obtidos no ajuste do fluxo na direção vertical, utilizando a equação (2).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores dos coeficientes obtidos pelo ajuste por mínimos quadrados das funções (4) e (2) (F_A e F_C), aos dados experimentais, são apresentados na tabela 1. O teste estatístico F, aplicado ao ajuste por mínimos quadrados da função (4) aos pontos experimentais, reduziu o número de coeficientes a apenas sete, eliminando-se os coeficientes A_2 , A_7 e A_9 . O desvio quadrático médio previsto pelo ajuste resultou em cerca de 4% do fluxo máximo na região mapeada.

Na tabela 1 estão incluídos o fluxo médio para toda a região mapeada ($R = 2,75\text{cm}$ e $H = 40\text{cm}$) e o fator de normalização (em nêutrons/ cm^2s). As incertezas indicadas para estes parâmetros, obtidas por propagação dos erros no coeficientes, resultaram em 2,3% e 4,7%, respectivamente. Acrescentado-se a estes valores a incerteza nos valores de atividade, da ordem de 2,5%, temos incertezas finais de 3,4% e 5,3%, respectivamente. Estas incertezas foram consideradas satisfatórias e indicam o método descrito no presente trabalho como adequado para calibrações rotineiras de detectores de nêutrons.

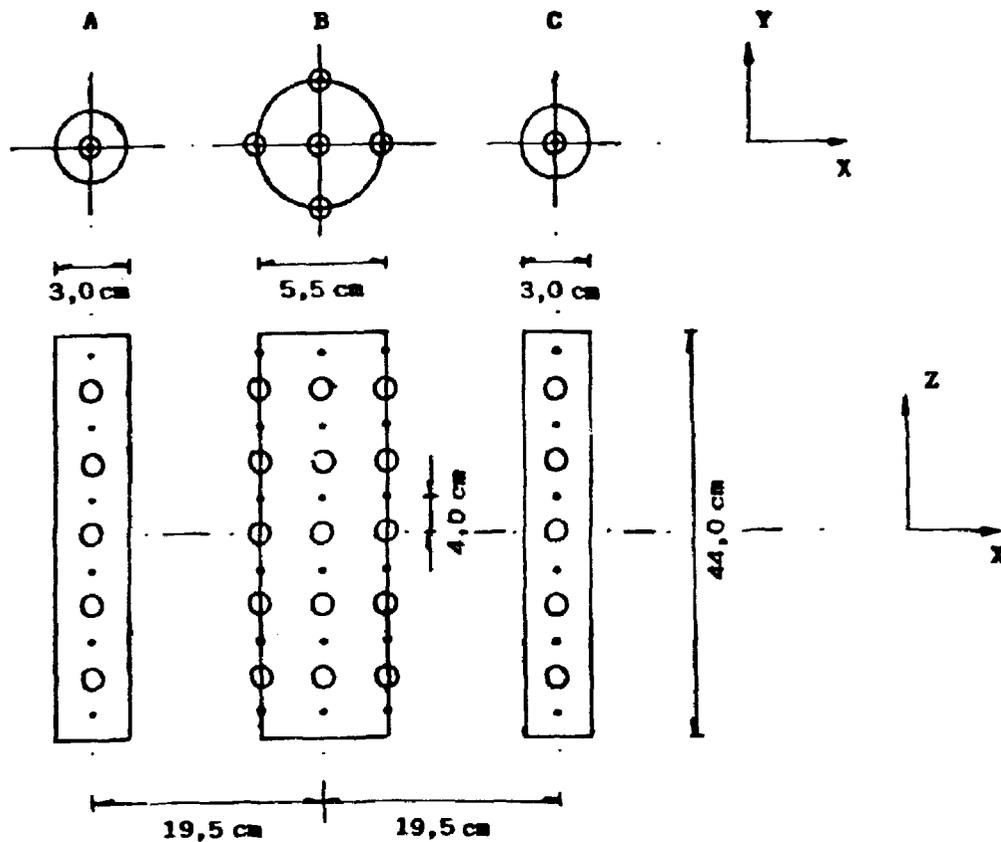


Figura 1 - Esquema do posicionamento das folhas de ativação para o mapeamento e monitoração da densidade de fluxo de nêutrons térmicos. A e C representam os monitores e B a região mapeada.
 Círculo aberto: folha com cádmio.
 Círculo fechado: folha sem cádmio.

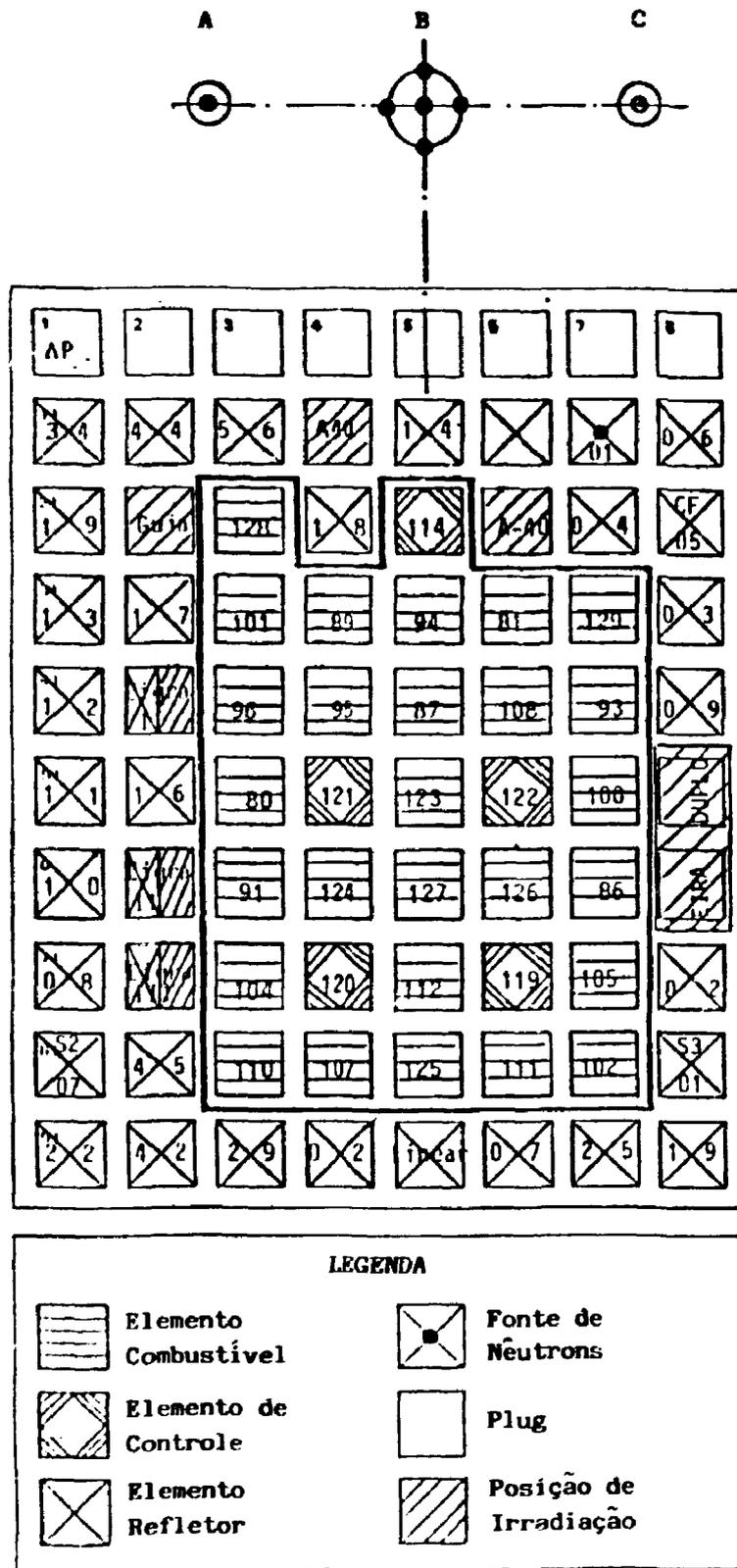


Figura 2 - Esquema da configuração do núcleo do reator IEAR-1 no dia da irradiação. Na parte superior da figura está indicada a localização do arranjo experimental.

Tabela 1 - Parâmetros envolvidos no mapeamento e monitoração da densidade de fluxo de nêutrons térmicos. (R = 2,75cm, H = 40cm).

Parâmetro	Valor ($\times 10^9$)	Incerteza Absoluta ($\times 10^9$)
A ₀	36,05	0,68
A ₁	-0,91	0,15
A ₃	-0,277	0,019
A ₄	-0,287	0,098
A ₅	-0,255	0,098
A ₆	-0,0149	0,0017
A ₈	0,033	0,011
C ₀ '	24,1	1,0
C ₁ '	-0,061	0,052
C ₂ '	-0,0093	0,0044
C ₀ ''	18,5	1,2
C ₁ ''	-0,113	0,058
C ₂ ''	-0,0069	0,0049
$\bar{\varphi}$	33,03	0,77
F _N	20,28	0,93

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao trabalho do Departamento de Aplicações (TE) do IPEN, e em especial ao Sr. Artur R. Vieira pelo projeto, construção e testes do arranjo experimental utilizado no presente trabalho para a irradiação das folhas de ativação.

REFERÊNCIAS

1. KOSKINAS, M.F. - Medida do fluxo térmico, epitérmico e rápido no reator IEAR-1 pelo método de ativação de folhas. São Paulo, 1979 (Dissertação de Mestrado) IEA-DT-117.
2. A.J. BARR, J.H. Goodnight and J.P. Sall, SAS Institute Inc., Post Office Box 10066, Raleigh, North Carolina 27605, U.S.A.