

# CALIBRAÇÃO DE UM DISPOSITIVO DE MAPEAMENTO DE FLUXO DE NÊUTRONS – SPND/RÓDIO NO REATOR IEA-R1, POR MEIO DO MÉTODO DE ATIVAÇÃO DE FOLHAS

Walter Ricci Filho, Mauro S. Dias, Julio B. M. Tondin e Marina F. Koskinas

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN/CNEN-SP  
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242, Cidade Universitária  
05508-000 São Paulo, SP, Brasil

## RESUMO

O conhecimento do fluxo de nêutrons\* é de fundamental importância para o programa de pesquisa e desenvolvimento do Centro do Reator de Pesquisas IEA-R1 do IPEN, especialmente nos estudos relacionados com danos de irradiação em sólidos, cálculo de blindagem e produção de radioisótopos. O presente trabalho tem como objetivo mapear o fluxo de nêutrons por meio de um dispositivo desenvolvido no reator IEA-R1, que utiliza um detector tipo SPND (Self-Powered Neutron Detector), contendo Ródio. Este dispositivo é colocado nas posições onde são irradiadas as amostras no reator, operando em potências de 2 e 5 MW.

O dispositivo foi desenvolvido utilizando dois tubos de alumínio, um externo e outro interno. No tubo interno estão alojados o detector (SPND/Ródio) e uma escala graduada que posiciona o detector na posição/prateleira do elemento de irradiação desejada. O SPND é ligado a um eletrômetro, onde é feita a aquisição da corrente gerada, em Ampères. Este eletrômetro está conectado a um PC que faz a aquisição da corrente durante um determinado período e, através de um programa, calcula o fluxo de nêutrons.

Para a calibração do dispositivo em termos de fluência de nêutrons foi empregado o método de ativação de folhas de  $^{197}\text{Au}$ . Os resultados preliminares demonstram que este dispositivo pode, em tempo real, fornecer medidas confiáveis sem a necessidade de eletrônica sofisticada.

**Keywords:** neutron flux, Rhodium, self power neutron detector.

## I. INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é dotar o Reator IEA-R1 de instrumentação adequada para mapeamento de fluxo de neutrons de maneira prática e confiável.

Com a crescente produção de radioisótopos, radiofármacos e novos experimentos, torna-se cada vez mais importante o conhecimento do fluxo de nêutrons no reator. Em trabalho anterior, foi descrita a primeira etapa deste experimento [1]. Esta segunda etapa visa determinar a relação existente entre as medidas com um detector tipo SPND (Self-Powered Neutron Detector), contendo Ródio e a irradiação de folhas de  $^{197}\text{Au}$ , que é o método indireto tradicionalmente utilizado.

## II. INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA

O dispositivo utilizado é o mesmo descrito na primeira etapa deste experimento [1]. O sistema de detecção consta de dois tubos de alumínio, um externo e outro interno. No tubo interno, está o alojamento do

detector SPND/Ródio e uma escala graduada que posiciona o detector na posição/prateleira do elemento de irradiação desejada. O SPND é ligado a um eletrômetro onde é feita a aquisição da corrente gerada, em Ampères. Utilizando uma conexão GPIB entre o eletrômetro e o computador, são feitas aquisições da corrente e, por meio de um programa específico, é calculado o valor do fluxo de nêutrons na posição desejada.

O detector de SPND/Ródio utilizado no presente trabalho possui as características apresentadas na Tabela 1.

O ródio é um dos materiais mais utilizados em SPND's para sistemas de monitoração "in-core" pela alta corrente fornecida e esquema de decaimento razoavelmente simples. Possui como desvantagem uma resposta lenta, aproximadamente 10 minutos para estabilizar, logo que é inserido no reator. Para as demais medidas, um tempo de aproximadamente 5 minutos é suficiente para estabilizar o valor da corrente produzida. Estudos realizados [1], comprovam sua utilização como dispositivo de calibração. Assim, a partir de uma calibração inicial, é possível determinar o fluxo neutrônico em tempo real.

TABELA 1. Características do Detetor SPND/Ródio

Diâmetro externo do detector	(mm)	2,4
Diâmetro externo do cabo	(mm)	1,5
Comprimento do cabo	(mm)	12000
Sensibilidade p/ nêutron térmico (A/n.cm <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )		4x10 <sup>-21</sup>
Intervalo de operação	(n.cm <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )	10 <sup>11</sup> – 10 <sup>14</sup>
Desvio de linearidade	(%)	5
Tempo de resposta	(min.)	3
Temperatura máxima de operação	(°C)	450
Queima (Burn up)	1x10 <sup>2</sup> ln.cm <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> (%)	8,06

Fabricante: Beijing Nuclear Instrument Factory

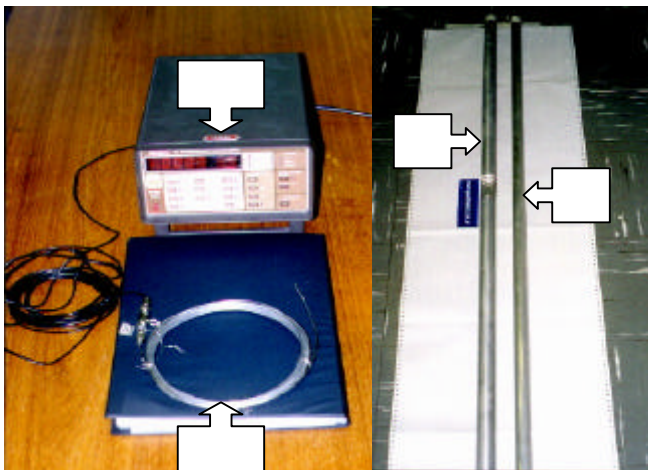


Figura 1. Eletrômetro, SPND/Ródio e Cabo e Tubos de Alumínio.

A Fig. 1, mostra a instrumentação utilizada para mapear o fluxo de nêutrons térmicos no núcleo do reator. Pode-se observar: o SPND/Ródio com seus 12 metros de cabo metálico (C); o eletrômetro Keithley – 617 (D); o tubo de alumínio que serve de guia para o SPND (A) e um elemento de irradiação que serve para alojar as folhas de ativação (B). O tubo de alumínio (B) serve de referência para determinar a altura exata do SPND, quando colocado no núcleo.

A Fig.2 apresenta o esboço da configuração do reator e as posições dos elementos de irradiação onde foram realizadas as medidas de fluxo.

Os elementos são: EIBE – elemento de irradiação de berílio, EIA – elemento de irradiação de água, EIF – elemento de irradiação de fios e EIGRA – elemento de irradiação de grafita.

## CONFIGURAÇÃO 211

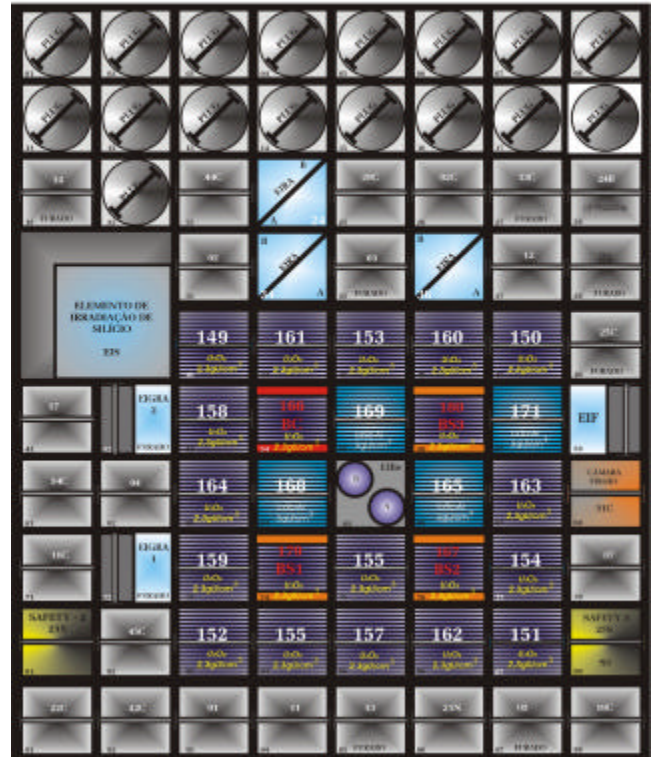


Figura 2. Núcleo do Reator com 24 Elementos Combustíveis e 1 Elemento de Berílio no Centro (Configuração 211).

### III. METODOLOGIA PARA O MAPEAMENTO DO FLUXO DE NÊUTRONS

Na primeira etapa do trabalho, foram colocadas folhas de ouro puro, com e sem invólucro de Cd, nas posições de irradiação existentes no núcleo do reator, com o objetivo de determinar o fluxo de nêutrons térmicos e epitérmicos. Nesta fase, o núcleo do reator estava limpo, ou seja, sem nenhuma amostra para irradiar.

Foram irradiadas um total de 78 folhas de ouro, sendo 39 nuas e 39 com cádmio. As folhas de ouro foram irradiadas nas prateleiras 2, 5 e 8 para as posições 24A, 24B, 34A, 34B, 36A, 36B, 65A, 65B e 58, além das prateleiras 2, 6, 10, 14, 18 e 22 para as posições 52 e 72.

As irradiações efetuadas com <sup>197</sup>Au, com e sem cobertura de Cd, permitiram a determinação dos fluxos de nêutrons térmicos e epitérmicos. O tempo de irradiação foi de 1 hora. Após esse tempo, as folhas foram retiradas do núcleo e em seguida, com o reator mantendo as mesmas condições de operação, iniciou-se o mapeamento com o dispositivo SPND/Ródio.

Quando o reator atingiu a potência desejada, inseriu-se o tubo de alumínio com o SPND/Ródio na posição a ser mapeada. Após aproximadamente 10 minutos, para atingir a estabilização, foi feita leitura da corrente produzida pelo SPND. O mesmo procedimento foi utilizado em todas as outras posições de irradiação.

Os experimentos foram realizados com o reator operando a uma potência de 2 MW e as condições de operação foram mantidas constantes. Medidas adicionais foram efetuadas com o reator operando a 5 MW

Para um campo de nêutrons bem termalizado (coeficiente epitérmico da ordem de 0,03), a corrente do eletrômetro está relacionada com o fluxo térmico pela seguinte equação:

$$\phi_{Th} = \frac{I_{me}}{(g + r.s).S_{me}} \quad (1)$$

$$\phi_{Th} = \frac{I_{me}}{(1,025 + 0,03 \times 7,375) \times 4 \times 10^{-21}} \quad (2)$$

portanto,

$$\phi_{Th} = I_{me} \times 2,01 \times 10^{20} \quad (3)$$

onde:

$\phi_{Th}$  → fluxo de nêutrons térmicos.

$I_{me}$  → corrente medida no eletrômetro.

$S_{me}$  → sensibilidade do detetor p/ nêutrons térmicos fornecido pelo fabricante (A/nv).

$g, s, r$  → fatores de Westcott [3].

Entretanto, o fluxo de nêutrons não é bem termalizado em diversas posições de irradiação, principalmente próximo no núcleo do reator. Como o SPND foi irradiado sem a cobertura de Cádmiu, tornou-se necessário efetuar um cálculo da influência dos nêutrons epitérmicos na ativação do detetor.

Aplicando as relações da literatura [4,5], determinou-se os fatores de auto-blindagem térmico, no valor de 0,65 e epitérmico, no valor de 0,09. Como resultado, obteve-se uma dependência aproximadamente linear entre a corrente  $I_{me}$  e o Fluxo de nêutrons total, dada por:

$$\phi_{Total} = a I_{me} + b \quad (4)$$

O fator de correção relacionado com o consumo do material emissor [1] não foi considerado para estas medidas, uma vez que o detetor foi utilizado pela primeira vez no presente experimento.

#### IV. RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados para os coeficientes da equação (4) foram os seguintes:

$$a = (2,37 \pm 0,11) \times 10^{20} \text{ e } b = -(9,9 \pm 7,6) \times 10^{11}$$

A incerteza estimada na corrente do SPND foi de 10%, baseada na variação nas leituras para a mesma posição, em diferentes dias de operação do reator. Para a determinação do fluxo de nêutrons, a incerteza dominante é

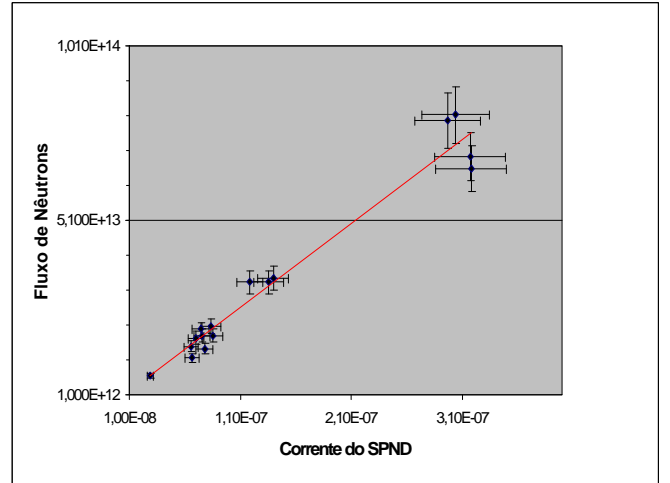


Figura 3. Dependência entre o Fluxo Total de Nêutrons e a Corrente Medida pelo SPND.

no fator de auto-blindagem térmica, que foi estimada com valor da ordem de 10%.

O valor de  $a$ , um pouco superior ao indicado pela equação (3), pode ser resultante de uma contribuição dos nêutrons epitérmicos superior ao previsto. Esta contribuição será verificada posteriormente por medidas efetuadas com o detetor SPND revestido com cádmio.

O valor de  $b$  é pequeno e seu valor negativo pode resultado do número limitado de pontos com fluxo de nêutrons abaixo de  $1 \times 10^{13} \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Para uma calibração do detetor SPND, com o objetivo de reproduzir o fluxo de nêutrons obtido pelas folhas de ativação, isto é, na ausência de fatores de perturbação de fluxo (auto-blindagem nula), o ajuste por mínimos quadrados, para 14 graus de liberdade, resultou:

$$a = (3,55 \pm 0,16) \times 10^{20} \text{ e } b = -(1,1 \pm 1,2) \times 10^{12}$$

Esta dependência linear está ilustrada na Figura 3. Neste caso, o valor de  $a$ , é cerca de 35% maior que no ajuste anterior, pois não utiliza o fator de auto-blindagem para nêutrons térmicos, que é igual a 0,65. O valor de  $b$  é essencialmente nulo, dentro da incerteza experimental. Com estes parâmetros é possível reproduzir o fluxo de nêutrons, medido pelas folhas de ativação, com uma incerteza da ordem de 10%.

A Tabela 2 apresenta a corrente medida pelo SPND em diversas posições de irradiação, na região central do núcleo (Prateleira 5).

Nesta tabela, a terceira coluna indica os valores obtidos com as folhas de ativação de  $^{197}\text{Au}$ . A quarta coluna indica os valores obtidos por meio da equação (4).

TABELA 2. Resultados de Corrente e Fluxo de Nêutrons na Região Próxima ao Centro do Núcleo do Reator (prateleira 5).

posição	Potência (MW)	SPND corrente (A)	Folhas de Au-197 fluxo de nêutrons total (n/cm <sup>2</sup> .s)	Valor Ajustado (equação 4) fluxo de nêutrons total (n/cm <sup>2</sup> .s)
24 A	2	$6,64 \times 10^{-8}$	$1,77 \times 10^{13}$	$2,25 \times 10^{13}$
24 B	2	$2,87 \times 10^{-8}$	$9,81 \times 10^{12}$	$9,10 \times 10^{12}$
34 A	2	$6,97 \times 10^{-8}$	$2,63 \times 10^{13}$	$2,37 \times 10^{13}$
34 B	2	$6,57 \times 10^{-8}$	$2,27 \times 10^{13}$	$2,22 \times 10^{13}$
36 A	2	$8,56 \times 10^{-8}$	$2,73 \times 10^{13}$	$2,93 \times 10^{13}$
36 B	2	$7,79 \times 10^{-8}$	$2,17 \times 10^{13}$	$2,66 \times 10^{13}$
52	2	$8,39 \times 10^{-8}$	$3,12 \times 10^{13}$	$2,87 \times 10^{13}$
72	2	$7,43 \times 10^{-8}$	$3,01 \times 10^{13}$	$2,53 \times 10^{13}$
65 A	2	$1,40 \times 10^{-8}$	$5,18 \times 10^{13}$	$4,85 \times 10^{13}$
65 B	2	$1,35 \times 10^{-7}$	$4,99 \times 10^{13}$	$4,70 \times 10^{13}$
65 A	5	$2,97 \times 10^{-8}$	$1,20 \times 10^{14}$	$1,04 \times 10^{14}$
65 B	5	$3,04 \times 10^{-7}$	$1,22 \times 10^{14}$	$1,07 \times 10^{14}$

## V. CONCLUSÃO

Pode-se considerar que o detector SPND está calibrado para potências de 2 e 5 MW, com uma exatidão da ordem de 10% , a partir de medidas de fluência de nêutrons térmicos e epitérmicos, efetuadas com folhas de <sup>197</sup>Au, na região de fluxo máximo..

As medidas de corrente do SPND em outras prateleiras não mantiveram a mesma proporcionalidade com os resultados obtidos com as folhas de ativação. Uma razão possível pode ter sido a perturbação no fluxo causada pela presença de materiais vizinhos, tais como barras de controle ou materiais sendo ativados, que podem alterar o valor da leitura de corrente. Note-se que as medidas de fluxo efetuadas com as folhas de ativação, foram realizadas ao longo de uma hora, com o núcleo sem nenhum outro material sendo ativado e com as barras de controle em posições fixas.

Novas medidas deverão ser efetuadas, recobrando o SPND com cádmio para verificar a influência de nêutrons epitérmicos. Medidas adicionais estão previstas, com o objetivo de monitorar o perfil do fluxo de nêutrons em dias diferentes, e verificar possíveis alterações nas condições do núcleo do reator ao longo do tempo.

Estas medidas permitirão uma análise mais rigorosa das fontes de erro, possibilitando a aplicação da metodologia de Matriz de Covariância, no tratamento das incertezas.

## REFERÊNCIAS

- [1] Surkov, V. **Determinação da sensibilidade de detectores auto-energizados (SPDs)**. São Paulo 1994. (Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares).
- [2] Ricci F<sup>o</sup>, W. **Análise do Elemento de Irradiação de Berílio no Reator IEA-R1m**, São Paulo 1998. (Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares).
- [3] Westcott, C.H. **Effective Cross Section Values for Well-Moderated Thermal Reactor Spectra**. Atomic Canada Limited. Report AECL-1101, EANDC(Can)-4, TNCC(Can)-30, Chalk River, Ontario, September, 1960.
- [4] Kena, B.T and Van Domelen, B.H. **Neutron Activation: Relationship of Sample Mass to Self-Shielding Factor**. Intern. Journal of Applied Radiation and Isotopes, **17** (1966) 47-50.
- [5] Baumann, N.P. **Resonance integrals and self-shielding factors for detector foils**. Report DP-817, January, 1963.

## ABSTRACT

The IEA-R1 reactor has undergone a modernization to increase its operating power to 5 MW, in order to allow a more efficient production of radioisotopes.

The objective of this work is to provide the reactor with flux monitoring device using a rhodium Self-Powered Neutron Detector (SPND).

The work presents the results obtained with Rhodium-SPND in several irradiation positions inside the reactor core. A calibration procedure has been performed by means of <sup>197</sup>Au activation foils, with and without cadmium cover, in order do measure the thermal and epithermal neutron fluxes.