

## MEDIDA DO FLUXO DE NÊUTRONS NO REATOR IPEN-MB-01

Fabiola A. Tolentino<sup>1</sup>, José R. Maiorino<sup>2</sup>, Ulysses D; Bitelli<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do ABC (UFABC)  
Rua Santa Adélia, 166  
09210-170-Santo André- SP- Brasil  
fabiola.tolentino@hotmail.com

<sup>2</sup>Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas  
Universidade Federal do ABC (UFABC)  
Rua Santa Adélia, 166  
09210-170-Santo André- SP- Brasil  
joserubens.maiorino@ufabc.edu.br

<sup>3</sup>Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN / CNEN - SP)  
Av. Professor Lineu Prestes 2242  
05508-000 São Paulo, SP  
ubitelli@ipen.br

### RESUMO

O trabalho consiste na aplicação da técnica de ativação de folhas para medida dos fluxos térmicos e intermediários em uma armadilha de fluxo localizada no centro do núcleo do reator IPEN MB-01. As medidas foram feitas pela irradiação de folhas nuas de  $^{197}\text{Au}$  e cobertas com folhas com cádmio em posições selecionadas da armadilha de fluxo de água. A contagem da radiação induzida na reação  $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$  foi feita por espectrometria gama usando detectores de NaI e HPGe. Para obter o fluxo de nêutrons térmicos e intermediários a técnica da razão de cádmio foi usada. A calibração dos espectrômetros gama foi feita com uma fonte padrão de  $^{152}\text{Eu}$ . Correção para as eficiências dos detectores foram levadas em consideração. Os resultados para as distribuições de fluxo axial e radial obtidas pelos espectrômetros são mostrados, dando boa concordância nos resultados. Como conclusão principal, o trabalho permitiu a aprendizagem das técnicas experimentais de medidas dos fluxos térmicos e intermediários, e da espectrometria gama necessário para tais medidas.

### 1. INTRODUÇÃO

Uma das técnicas utilizadas para a detecção de nêutrons é a chamada *análise de ativação neutronica*, que consiste no bombardeamento de partículas em um determinado material. A radioatividade induzida a partir desta reação pode ser medida utilizando detectores de radiação específicos, voltados para a espectrometria gama. [1]

Para a realização das medidas neste experimento foram utilizados como detectores de ativação folhas de  $^{198}\text{Au}$  infinitamente diluídas (1% de ouro e 99% de alumínio), através da reação,  $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$ .

As folhas de ativação foram organizadas de maneira que ocupassem a posição central axial e central radial do núcleo do reator em uma placa de Lucite acrílico. A contagem das folhas após a irradiação foi feita em dois tipos de detectores de radiação, o detector de cintilação Iodeto de Sódio (NAI) e o de estado sólido de Germânio Hiper-puro (HPGe).

No total foram usadas vinte e duas folhas. Primeiramente foram irradiadas onze folhas infinitamente diluídas por três horas sobre uma potência de irradiação correspondente à  $P = 75,00 \pm 0,38$  watts (apresentando 67% de confiança a nível estatístico) sobre as mesmas condições foram irradiadas as demais

Realizando os cálculos necessários o objetivo foi medir o fluxo de nêutrons térmicos e intermediários numa armadilha de fluxo de água instalada numa configuração do Reator IPEN-MB-01 a de número 267 octogonal, com uma armadilha de fluxo de 32 varetas combustíveis.

Neste trabalho as técnicas de medida dos fluxos de nêutrons térmicos e epitérmicos são descritas, e resultados para as distribuições de fluxos são apresentados.

## 2. MATERIAS E MÉTODOS

Para a medida dos fluxos [2] foi necessário o conhecimento exato da eficiência dos detectores de radiação. Para o detector HPGe, a calibração foi obtida utilizando linhas gama com energias no intervalo de 411, 80 KeV devido a facilidade na obtenção do fotopico do ouro nesta região.

A eficiência de ambos os detectores pode ser obtida a partir da contagem líquida da folhas de ativação conforme a equação 1.

$$\varepsilon = \frac{net}{LT} \cdot \frac{1}{I \cdot A} \quad (1)$$

Onde  $net$  é a contagem integrada em um fotopico,  $LT$  é o tempo de contagem descontado o “tempo morto” do detector;  $I$  (abundância gama) é a probabilidade de emissão gama do isótopo formado e  $A$  é a atividade da fonte radioativa no momento da contagem.

A atividade máxima de saturação de um detector pode ser determinada pela equação 2

$$A^\infty = \sum_{act} V \phi \quad (2)$$

Onde  $\sum_{act}$  é a seção de choque macroscópica média de ativação,  $V$  o volume do detector de ativação e  $\phi$  o fluxo de nêutrons.

A partir das contagens obtidas nos detectores pode se encontrar, utilizando a equação 3, para a atividade de saturação das folhas, cujo valor corresponde a taxa de reação de um detector quando submetido a um determinado fluxo de nêutrons.

$$A^{\infty} = \frac{\lambda (C - BG) \cdot e^{-\lambda t_e}}{\epsilon \cdot I (1 - e^{-\lambda t}) (1 - e^{-\lambda t_c})} \quad (3)$$

Onde  $\lambda$  é a constante de decaimento do radioisótopo formado,  $C$  a contagem do fotopico,  $BG$  a radiação de fundo,  $t$  o tempo de irradiação,  $t_c$  o tempo de contagem,  $t_e$  tempo de espera entre o término da irradiação e a contagem,  $I$  a probabilidade de emissão gama do isótopo formado e  $\epsilon$  a eficiência global de contagem.

Após a retirada do detector de ativação do reator, pode-se verificar a variação da atividade desse detector em função do tempo. Foi iniciado o processo de contagem das folhas utilizando os detectores HPGe e NaI, ambos acoplados a um sistema eletrônico para a aquisição de dados. A representação das contagens foi obtida utilizando o programa computacional chamado Maestro.

A partir das contagens foi obtido um gráfico, a fim de analisar a curva de decaimento para cada instante em que ocorreram as contagens. Desta análise foi encontrado o valor da contagem acumulada no sistema ( $C_0$ ) e a partir da equação 4 foi encontrada a atividade de saturação do detector.

$$A^{\infty} = \frac{\lambda C_0}{\epsilon \cdot I (1 - e^{-\lambda t}) (1 - e^{-\lambda t_c})} \quad (4)$$

Para a obtenção do gráfico da curva de decaimento, foi realizado um maior número de contagens com a folha 364 central. Utilizando o recurso do software Maestro, chamado "loop", contagens sucessivas foram realizadas durante um longo período, a partir dos dados foram obtidas as curvas de decaimento com o auxílio do software Origin 6.1.

Utilizando a técnica de razão de Cádmiu foi obtido o fluxo de nêutrons térmicos. Tal técnica consiste na irradiação de folhas de ouro nuas e folhas cobertas com cádmio, ambas irradiadas sobre condições idênticas.

O detector sem a cobertura de cádmio tem sua atividade de saturação ( $A_{nua}^{\infty}$ ) determinada a partir da soma do fluxo de nêutrons térmicos  $A_{th}^{\infty}$  e intermediários  $A_{int}^{\infty}$ , pela baixa seção de choque para nêutrons rápidos apresentada pelo material, os mesmos são desprezíveis para os cálculos segundo indica a equação 5.

$$A_{nua}^{\infty} = A_{th}^{\infty} + A_{int}^{\infty} \quad (5)$$

Para encontrar a parcela de nêutrons intermediários foi utilizado detector coberto com cádmio, material que apresenta uma alta seção de choque de absorção à nêutrons térmicos e que serviu como um filtro, para tanto foi necessário introduzir conforme a equação 6 o chamado fator de cádmio, cujo objetivo é a correção de uma pequena parcela de nêutrons intermediários que é absorvida na cobertura com cádmio.

$$A_{int}^{\infty} = F_{cd} \cdot A_{cd}^{\infty} \quad (6)$$

Para as folhas infinitamente diluídas a razão de cádmio pode ser encontrada segundo a equação 7.

$$R_{cd} = \frac{A_{nua}^{\infty}}{A^{\infty}} \quad (7)$$

Sendo conhecida a razão de cádmio, pela equação 8 torna-se possível determinar a parcela da atividade de saturação total devida a nêutrons térmicos.

$$A_{th}^{\infty} = A_{nua}^{\infty} \left( 1 - \frac{F_{cd}}{R_{cd}} \right) \quad (8)$$

O fluxo térmico foi obtido conforme a equação 9 a partir da combinação das equações 2, e 3.

$$\varphi_{th} = \frac{A_{nua}^{\infty} \left( 1 - \frac{F_{cd}}{R_{cd}} \right) \cdot P_a}{N_a \cdot m \cdot \sigma_{atv} \cdot FP} \quad (9)$$

Onde  $P_a$  é o peso atômico do núcleo alvo,  $N_a$  o número de Avogadro,  $m$  a massa do detector de ativação e  $\sigma_{atv}$  a seção de choque microscópica média de ativação.

Para restaurar o fluxo de nêutrons ao seu valor não perturbado o termo FP é introduzido e apresenta alto valor quanto maior for a seção de choque e espessura dos detectores de ativação. Para detectores infinitamente diluídos essa perturbação pode ser desprezada.

Na região intermediária o fluxo pode ser encontrado segundo a equação 10

$$\varphi_{int} = \frac{A_{cd}^{\infty}}{N_T} \cdot \frac{E_2}{I^{\infty}} \cdot \ln \frac{E_2}{E_{cd}} \quad (10)$$

Onde  $I^{\infty}$  é a integral de ressonância definida entre os limites  $E_{cd}$  e  $E_2$ , que se referem à energia de corte do cádmio, limiar da região intermediária e a região rápida do espectro neutrônico e  $N_T$  número de núcleos alvo.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O detector NaI apresenta uma baixa resolução energética, o que dificultou a separação de linhas energéticas específicas, sua calibração de eficiência foi realizada com o auxílio do Laboratório de Metrologia Nuclear do IPEN, que forneceu determinação absoluta da atividade das folhas centrais para que fosse aplicada a equação 1

A massa das folhas de ativação foi medida com o uso de uma balança Mettler H20, foram realizadas três medidas para cada folha e plotada uma curva da eficiência utilizando a equação 1 a partir de uma fonte de  $^{152}\text{Eu}$ .

O valor de eficiência encontrada no detector HPGe foi de  $0,0094 \pm 0,0001$ , e para o detector NaI  $0,447 \pm 0,077$ .

A abundância gama tabelada corresponde à  $0,9556 \pm 0,0007$ .

Para a determinação da atividade de saturação de cada folha o valor da constante de decaimento foi de  $\lambda = 2,9768 \cdot 10^{-6}$  desintegrações/s e o tempo de irradiação dos detectores de ativação foi de 10.800 segundos.

Para a obtenção da atividade de saturação de cada folha foi considerado o peso atômico do  $^{198}\text{Au}$  corresponde a  $P = 197,9$  g/mol [3], o  $C_0$  e sua incerteza foram obtidos, a partir da curva de decaimento de cada folha.

Para encontrar a atividade de saturação de nêutrons intermediários o fator de cádmio utilizado corresponde à [4] :

$$F_{cd} = 1,087 \pm 0,022.$$

Os valores médios utilizados de secção de choque de ativação para nêutrons térmicos, (energia menor que 0,55 eV) foram:

$$\sigma_{atv} (\text{folhas nas posições 1 e 5}) = 71,966 \text{ barns}$$

$$\sigma_{atv} (\text{folhas nas posições 2 e 4}) = 71,121 \text{ barns}$$

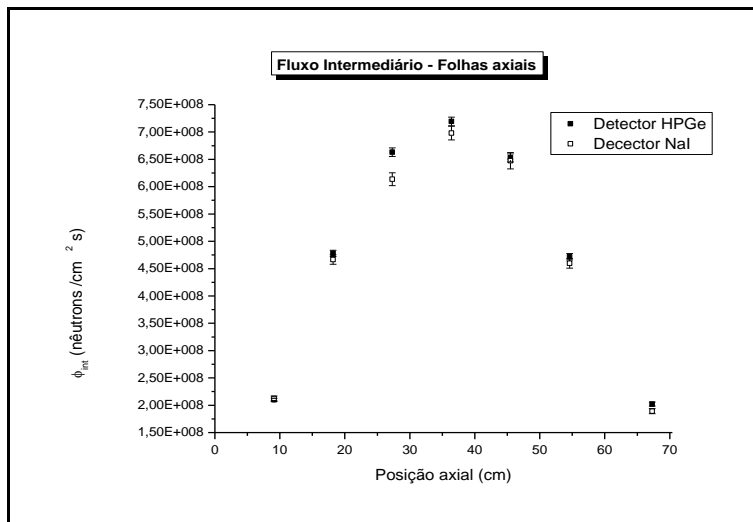
$$\sigma_{atv} (\text{folhas na posição 3}) = 85,100 \text{ barns}$$

Valores obtidos a partir da ponderação dos valores de secção de choque do ouro obtido nas posições de irradiação, através do código XSDRN[4].

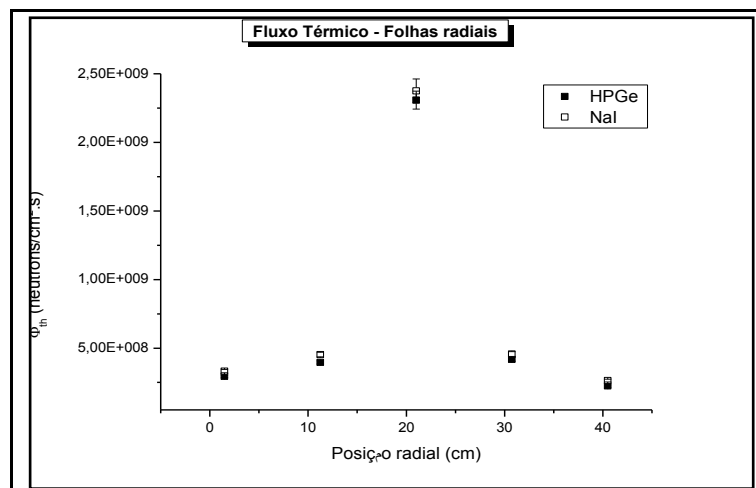
Os valores de fluxos das posições axiais e radiais não são os mesmos, pois as folhas axiais estiveram no centro da armadilha de fluxo, e as radiais fora. Para o cálculo do fluxo de nêutrons intermediários, o valor da integral de ressonância [5], para as energias  $E_{Cd} = 0,55$  eV e  $E_2 = 1,05$  MeV, foi :

$$I_R^\infty = 1,564 \cdot 10^{-21}$$

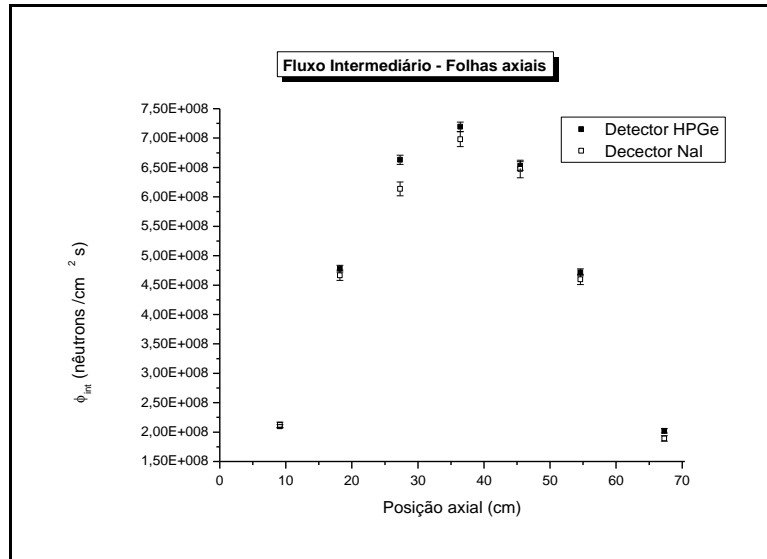
O fluxo térmico e intermediário obtido através dos detectores NaI e HPGe nas posições axiais e radiais podem ser visualizados nas figuras 1, 2, 3 e 4 abaixo:



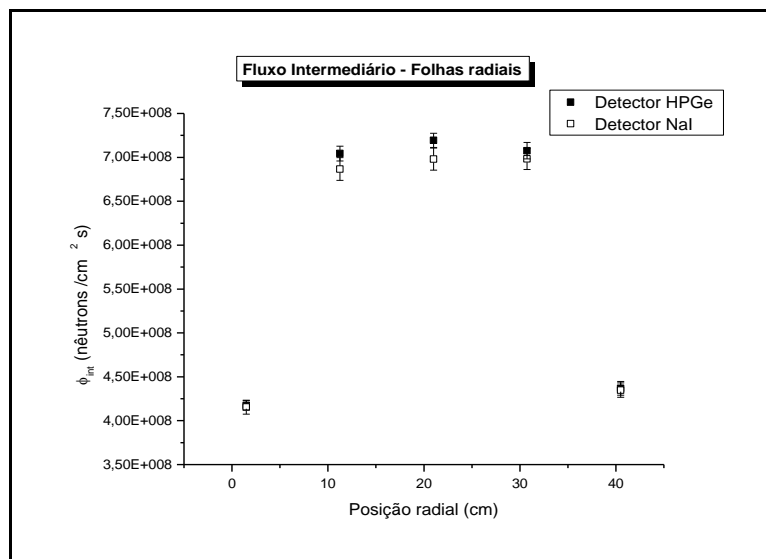
**Figura 1: Fluxo térmico nas posições axiais**



**Figura 2: Fluxo térmico nas posições radiais.**



**Figura 3: Fluxo intermediário nas posições axiais.**



**Figura 4: Fluxo intermediário nas posições radiais**

#### 4. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados é possível observar um maior fluxo de nêutrons térmicos na região central, os fluxos estão de acordo com o esperado para uma armadilha de fluxo na região central do reator.

Com os dados apresentados, pode-se analisar que tanto detectores HPGe quanto NaI podem ser utilizados para a técnica de análise por ativação, e que esta não foi alterada

significativamente pelo fato do detector NaI apresentar uma resolução menor para a região de energia de 411,80 eV.

### **AGRADECIMENTOS**

A autora principal agradece a orientação dos professores Dr. José R. Maiorino e Dr. Ulysses D. Bitelli, ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares pela utilização do Reator IPEN-MB-01 e dos laboratórios de medidas desta instituição. A bolsa PDPD da UFABC fornecida também é reconhecida.

### **REFERÊNCIAS**

1. Zamboni, C. B. (coordenadora), “Fundamentos da Física de nêutrons”, Ed. Livraria da Física, pp.55-61 e 89-102 (2007).
2. Bitelli, U. d’U. “Medida e calculo da distribuição espacial e energética de neutrôns no núcleo do reator”, São Paulo, IPEN (1998).
3. Nuclear Data Evaluation Laboratory. Korea Atomic Energy Research Institute, 2000 - <http://atom.kaeri.re.kr/>(2011).
4. Comunicação verbal, Prof. Dr. Ulysses D’Utra Bitelli, entre os dias 17 a 31 de janeiro de 2011.
5. Gonçalves, L. B., “Calibração dos canais nucleares do Reator IPEN/MB-01, obtida a partir da medida da distribuição espacial do fluxo de nêutrons térmicos no núcleo do reator através da irradiação de folhas de ouro infinitamente diluídas”. Dissertação (mestrado). IPEN, 2008.