

MEDIDA DO ESPECTRO DE ENERGIA DOS NÊUTRONS NO NÚCLEO DO REATOR IPEN/MB-01

Ulysses d'Utra Bitelli, Fernando Prat G. Martins, Rogério Jerez, Rosangela R. Cacure

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN / CNEN - SP)

Av. Prof. Lineu Prestes, 2242

05508-000 São Paulo, SP

ubitelli@ipen.br

RESUMO

Este trabalho apresenta a medida do espectro de energia dos nêutrons no núcleo do Reator IPEN/MB-01. Para tal, são inseridos detectores de ativação na forma de diminutas folhas metálicas, no moderador, utilizando um dispositivo articulado que permite que as folhas fiquem posicionadas na posição central do núcleo do reator. Após a irradiação, os detectores de ativação são submetidos a espectrometria gama num sistema de contagem de Germânio hiper-puro, o que possibilita a obtenção da atividade de saturação por núcleo alvo, principal dado de entrada do código computacional de desdobramento de espectro "unfolding" SANDBP, que fornece, após um ajuste iterativo, a solução apropriada do espectro.

1. INTRODUÇÃO

Muitos dos parâmetros nucleares são obtidos através da espectrometria gama de alvos irradiados no núcleo de um reator de pesquisa. É o caso das folhas de ativação, como, por exemplo, folhas de ouro, índio, níquel, magnésio, etc, que possibilitam através da medida da atividade nelas induzidas, conhecidos parâmetros como tempo de irradiação, tempo de contagem, tempo de espera para contagem (decaimento), eficiência do sistema de contagem, seção de choque para a reação nuclear, etc, determinar o fluxo de nêutrons no local em que as mesmas foram irradiadas. Os valores obtidos permitem conhecer a extensão da região assintótica no núcleo do reator, o valor da razão de cádmio na mesma, para folhas de ouro, índio, urânio, etc, a curvatura do fluxo de nêutrons ("Buckling" – parâmetro relacionado a fuga de nêutrons no núcleo do reator), permitindo uma comparação direta com os mesmos parâmetros obtidos através do cálculo, utilizando programas como o Citation que utiliza a teoria de difusão, ou mesmo o MCNP – 4C que utiliza o método de monte carlo.

A distribuição energética dos nêutrons no núcleo do reator, bem como a distribuição espacial em grupos de energia térmico, epitérmico ou rápido, é de fundamental importância, pois do seu conhecimento pode-se aferir com razoável precisão uma série de parâmetros neutrônicos como taxas de reação, queima de combustível, reatividade, etc.

O Espectro de nêutrons de um reator pode ser obtido a partir dos valores experimentais das taxas de reação (atividade de saturação por núcleo alvo) induzidos nos detectores de ativação após serem irradiados no núcleo do reator, na posição que se deseja medir o espectro de nêutrons. Para tal, utilizam-se códigos computacionais como o SANDBP (*Spectrum Analysis by Neutron Detectors - Budapest version of SANDII*), capaz de através de um processo iterativo, ajustar o espectro que melhor se adequar a um conjunto de dados de entrada, como

o conjunto de valores experimentais de taxas de reação e um espectro inicial de entrada característico do tipo de reator. Este espectro pode ser obtido a nível celular em códigos como o Hammer-Technion para a célula representativa do núcleo do reator em questão e será alterado pelo programa, através de um processo iterativo em que serão obtidos fatores de correção em cada faixa de energia, ajustando o espectro até que a diferença da *i*-ésima iteração e a *i*-ésima +1 iteração, esteja abaixo de um valor pré-estabelecido na entrada do código.

2. DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL

O Reator IPEN/MB-01 é um reator de potência zero especialmente projetado para a medida de uma grande variedade de parâmetros de Física de Reatores, objetivando correlacionar teoria ao experimento. Após quase 17 anos de operação e mais de 1700 operações, vários dos experimentos realizados no Reator IPEN/MB-01 se tornaram padrões de comparação internacional (“Benchmark”).

O núcleo do reator em sua configuração padrão retangular consiste de um arranjo de 28x26 varetas combustíveis, enriquecida a 4,3% com um encamisamento de aço inox (304), inseridas dentro de um tanque moderador de água leve. Uma completa descrição do reator pode ser obtida na literatura [4].

2.1. CONDIÇÕES DA IRRADIAÇÃO

Para este trabalho foram irradiadas 9 folhas de ativação de diferentes materiais, na posição central do núcleo do reator, onde se têm o maior fluxo de nêutrons rápidos. As folhas de ativação irradiadas, o tempo de irradiação, bem como a massa e a espessura das folhas podem ser vistas na Tabela 1.

Tabela 1 – Tempo de irradiação, massa e espessura das folhas irradiadas.

Folhas Irradiadas	Tempo de Irradiação (s)	Massa (g)	Espessura (mm)
Au ¹⁹⁷	3600	0,02727	0,0254
Au ¹⁹⁷ c/ cádmio	3600	0,02744	0,0254
In ¹¹⁵	3600	0,1220	0,127
Mg ²⁴	10800	0,03152	0,127
Mg ²⁴ c/ cádmio	21600	0,03152	0,127
Fe ⁵⁶ c/ cádmio	21600	0,13490	0,127
Al ²⁷ c/ cádmio	3600	0,0446	0,127
Ti ⁴⁸ c/ cádmio	21600	0,1417	0,254
Ni ⁵⁸	7200	0,2850	0,254

O tempo de irradiação foi calculado levando-se em conta a meia-vida do produto formado na reação nuclear e a seção de choque de ativação do alvo irradiado. Em algumas folhas foram utilizadas “caixas” de cádmio como cobertura, a fim de evitar-se interferência de nêutrons térmicos. Todas as irradiações foram realizadas à potência de 100 Watts, na posição central do núcleo do reator, no moderador e foram normalizadas entre si, através do registro da contagem do canal 10 do reator durante o tempo de irradiação, distante 40 cm do núcleo em

sua face leste, trata-se de um detector tipo pulso de Boro-10. Com isso qualquer pequena flutuação na potência do reator de uma irradiação para a outra pode ser corrigida e normalizada.

As barras de controle BC1 e BC2 são inseridas à mesma altura no núcleo do reator, durante todas as irradiações, para manter as condições de simetria na distribuição do fluxo de nêutrons no núcleo do Reator IPEN/MB-01.

2.2. ESPECTROMETRIA GAMA

Após a irradiação as folhas de ativação são levadas ao laboratório, para através da espectrometria gama das mesmas, determinar-se a taxa de contagem ao término da irradiação, parâmetro diretamente proporcional a atividade da folha neste mesmo período de tempo. Para tal, utiliza-se um sistema de contagem cujo detector de estado sólido é um germânio hiperpuro (HPGe) de eficiência intrínseca de 40%. Um exemplo de espectrometria gama realizada na folha de Magnésio irradiada pode ser visualizada na Figura 1.

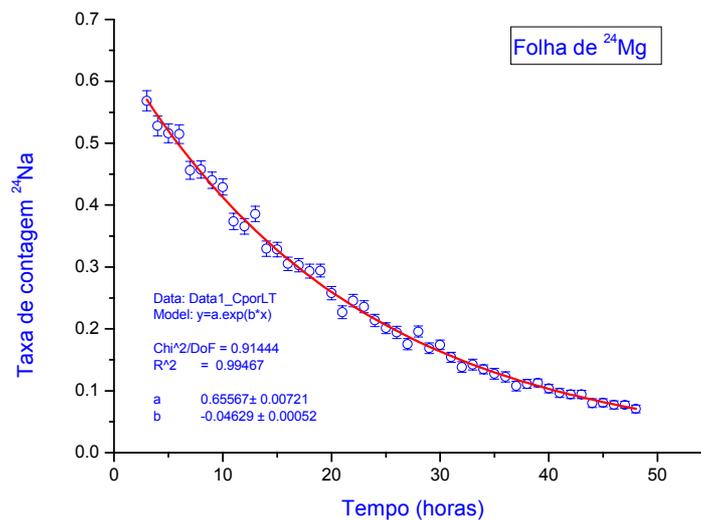


Figura. 1 – Curva de decaimento da Folha de Mg obtida por espectrometria gama do radionuclídeo formado (^{24}Na)

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Conhecida a taxa de contagem das folhas de ativação, determina-se a atividade de saturação por núcleo alvo (A^∞ / N_{at}) para cada detector. Isto pode ser visualizado dividindo-se a equação (1) por (2):

$$A^\infty = \frac{C \cdot \lambda \cdot e^{\lambda \cdot t_e}}{I \cdot \varepsilon \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t_c}) (1 - e^{-\lambda \cdot t_i})} \cdot \frac{f_1}{f_2} \quad (1)$$

$$N_{at} = \frac{m \cdot N_A}{A} \cdot f_{iso} \quad (2)$$

Onde:

C é a taxa de contagens líquidas, λ é a constante de decaimento, t_e é o tempo de espera do término da irradiação ao início da contagem, I é a abundância gama do fotopico, ε é a eficiência do sistema de detecção HPGe para um dado fotopico de energia, t_c é o tempo de contagem e t_i o tempo de irradiação. Os parâmetros f_1 e f_2 da expressão (1) se referem a fatores de correção devido à rampa de subida de potência, durante a irradiação das folhas e ao fator de normalização monitorado pelo canal 10 da instrumentação nuclear para monitorar pequenas diferenças de potências entre irradiações distintas, respectivamente.

Os resultados obtidos para cada detector, podem ser visualizados na Tabela 2:

Tabela 2 - A^∞ / N_{at} das folhas irradiadas no núcleo do Reator IPEN/MB-01

Folha Irradiada	Reação Nuclear	Fotopico (KeV)	A^∞ / N_{at} (Bq/ átomos)
Au ¹⁹⁷	Au ¹⁹⁷ (n, γ) Au ¹⁹⁸	411,80	1.3791.10 ⁻¹³
Au ¹⁹⁷ c/ cádmio	Au ¹⁹⁷ (n, γ) Au ¹⁹⁸	411,80	1.0020.10 ⁻¹³
In ¹¹⁵	In ¹¹⁵ (n,n' γ) In ^{115m}	336,25	2.4735.10 ⁻¹⁶
Mg ²⁴	Mg ²⁴ (n,p) Na ²⁴	1368,84	2.4118.10 ⁻¹⁸
Mg ²⁴ c/ cádmio	Mg ²⁴ (n,p) Na ²⁴	1368,84	2.3249.10 ⁻¹⁸
Fe ⁵⁶ c/ cádmio	Fe ⁵⁶ (n,p) Mn ⁵⁶	846,6	1.8671.10 ⁻¹⁸
Al ²⁷ c/ cádmio	Al ²⁷ (n, α) Na ²⁴	1368,84	1.2532.10 ⁻¹⁸
Ti ⁴⁸ c/ cádmio	Ti ⁴⁸ (n,p) Sc ⁴⁸	983,5	4.1608.10 ⁻¹⁹
Ni ⁵⁸	Ni ⁵⁸ (n,p)Co ⁵⁸	811	1.8716.10 ⁻¹⁶

Obtidas as atividades de saturação por núcleo alvo, juntamente com o espectro de entrada do reator, pode-se montar o input (entrada do código) e executar o código de desdobramento de espectro SANDBP.

Nas Figuras 2, 3 e 4 podem ser vistos o espectro de entrada do código, e o espectro após os ajustes iterativos (Solução Apropriada do Espectro). Tal espectro foi obtido através do código Hammer-Technion [3], para uma célula representativa do reator IPEN/MB-01.

Os valores de fluxo obtido para cada grupo de energia, após 3 iterações na estrutura de 26 grupos de energia obtidos através do código SANDBP podem ser vistos na Tabela 3.

Um comparativo das atividades de saturação por núcleo alvo medidas e calculadas após 3 iterações, pode ser visto na Tabela 4.

4. CONCLUSÃO

O espectro de energia dos nêutrons obtido pela ativação de múltiplos detectores, apresentou um desvio padrão de 9,37% entre as atividades de saturação por núcleo alvo medidas e ajustadas a partir do espectro calculado pelo Hammer-Technion que serviu de entrada ao

código SANDBP. Observando as Figuras 2 e 3, verificamos que os valores calculados pelo código Hammer-Technion, a partir da célula representativa do núcleo do reator, concordam satisfatoriamente em quase todo o espectro de energia dos nêutrons com os valores do espectro de energia obtido do ajuste a partir da ativação das folhas dadas na Tabela 2.

Observando as Figuras 3 e 4 verificamos que o espectro de energia dos nêutrons na posição central obtido no moderador é característico de um reator térmico, podendo ser dividido em três faixas de energia: a região térmica ($<0,5$ eV) que pode ser aproximado por uma distribuição maxwelliana, a região intermediária (0,5 eV à 0,5 MeV) que tem a forma $1/E$ e a região rápida ($> 0,5$ MeV) que pode ser representada pelo espectro de Watt.

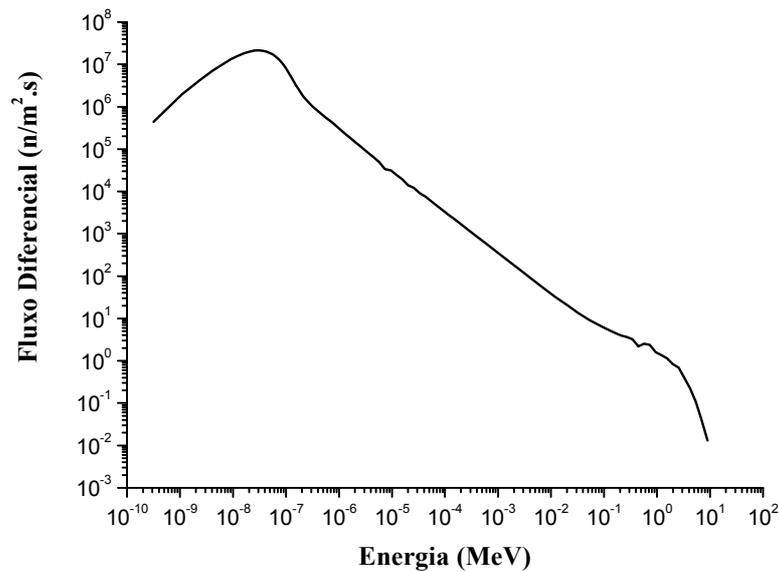


Figura 2 – Espectro de entrada do código em 82 grupos de energia

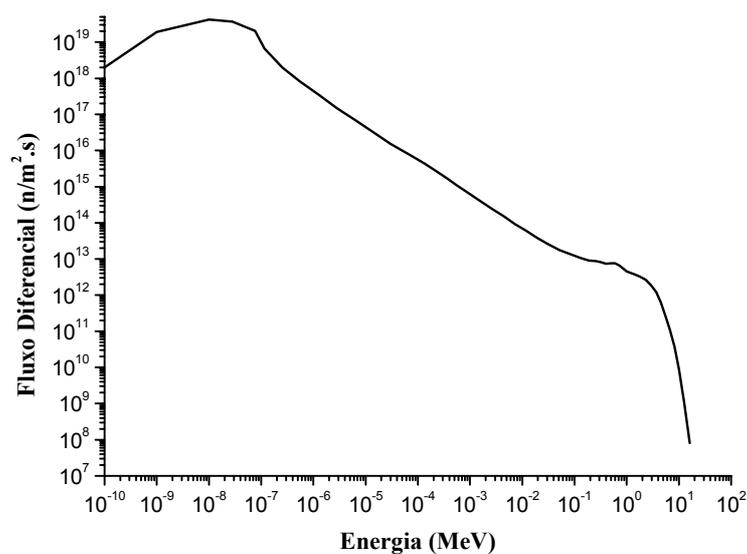


Figura 3 – Espectro ajustado após 3 iterações em 50 grupos de energia

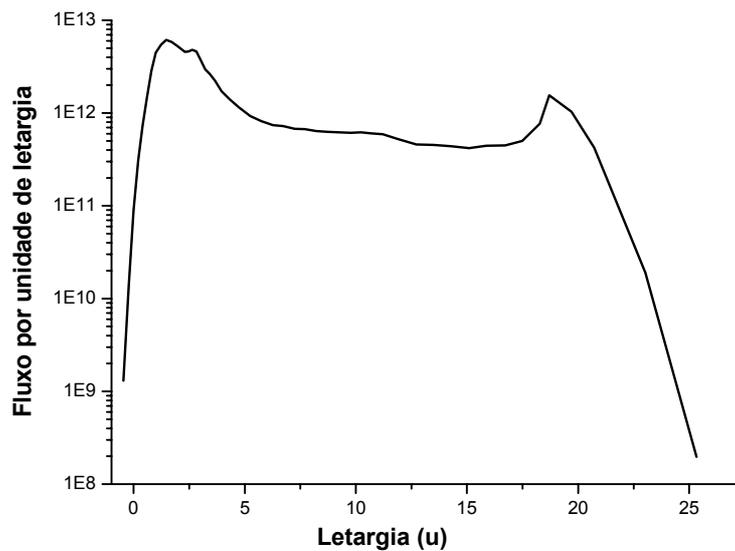


Figura 4 – Espectro em 50 grupos de energia após 3 iterações, em unidades de letargia.

Tabela 3- Espectro de energia em 26 grupos.

Energia(MeV)	Fluxo(n/m ² s)	Energia(MeV)	Fluxo(n/m ² s)
--	--	2,15.10 ⁻³	6,028.10 ¹¹
1.00.10 ⁻¹⁰	--	4,65.10 ⁻³	6,656.10 ¹¹
2,15.10 ⁻⁷	4,168.10 ¹²	1.00.10 ⁻²	6,405.10 ¹¹
4,65.10 ⁻⁷	6,793.10 ¹¹	2,15.10 ⁻²	7,064.10 ¹¹
1.00.10 ⁻⁶	5,331.10 ¹¹	4,65.10 ⁻²	7,797.10 ¹¹
2,15.10 ⁻⁶	5,287.10 ¹¹	0,10	9,366.10 ¹¹
4,65.10 ⁻⁶	5,039.10 ¹¹	0,20	1,124.10 ¹²
1.00.10 ⁻⁵	5,044.10 ¹¹	0,40	1,722.10 ¹²
2,15.10 ⁻⁵	5,116.10 ¹¹	0,80	2,958.10 ¹²
4,65.10 ⁻⁵	5,375.10 ¹¹	1,40	2,973.10 ¹²
1.00.10 ⁻⁴	5,796.10 ¹¹	2,50	3,669.10 ¹²
2,15.10 ⁻⁴	6,169.10 ¹¹	4,00	2,938.10 ¹²
4,65.10 ⁻⁴	5,849.10 ¹¹	6,50	1,504.10 ¹²
1.00.10 ⁻³	6,231.10 ¹¹	10,50	2,881.10 ¹¹

Os valores de fluxo de nêutrons no centro do reator, obtidos nas regiões térmica, intermediária e rápida são $\phi_t = 5,0.10^8$ n/cm².s, $\phi_{int} = 1,33.10^9$ n/cm².s e $\phi_r = 1,36.10^9$ n/cm².s, respectivamente. Assim, o fluxo integral de nêutrons de todas as energias no centro do reator é $\phi_I = 3,19.10^9$ n/cm².

Como proposta de trabalho futuro, serão irradiados mais detectores de ativação que atuem predominantemente na faixa intermediária do espectro, como folhas de urânio, tório, escândio, etc, onde os efeitos de auto-blindagem no fluxo de nêutrons, devido as ressonâncias nas seções de choque tem um forte impacto no espectro de energia dos nêutrons.

Tabela 4 – Comparação das atividades de saturação por núcleo alvo medidas e calculadas.

Reação	A^∞ / N_{at} Medida (Bq / núcleo)	A^∞ / N_{at} Calculada (Bq / núcleo)	Desvio A^∞ / N_{at} Medida x Calculo (%)
$Au^{197}(n,\gamma) Au^{198}$	$1.379.10^{-13}$	$1.377.10^{-13}$	0.14
$Au^{197}(n,\gamma) Au^{198}$ c/ cd	$1.002.10^{-13}$	$1.012.10^{-13}$	-1.18
$In^{115}(n,n') In^{115m}$	$2.474.10^{-16}$	$2.770.10^{-16}$	-10.68
$Mg^{24}(n,p) Na^{24}$	$2.412.10^{-18}$	$2.552.10^{-18}$	-5.48
$Mg^{24}(n,p) Na^{24}$ c/ cd	$2.325.10^{-18}$	$2.527.10^{-18}$	-7.99
$Fe^{56}(n,p) Mn^{56}$ c/ cd	$1.867.10^{-18}$	$1.619.10^{-18}$	15.32
$Al^{27}(n,\alpha) Na^{24}$ c/ cd	$1.253.10^{-18}$	$1.209.10^{-18}$	3.64
$Ti^{48}(n,p) Sc^{48}$ c/ cd	$4.161.10^{-19}$	$4.500.10^{-19}$	-7.53
$Ni^{58}(n,p) Co^{58}$	$1.872.10^{-16}$	$1.647.10^{-16}$	13.66

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos operadores de reator Cesar Luiz Veneziani, Reginaldo Gilioli e Marco Antonio Sabo pelas operações de irradiação e ajuda na montagem dos arranjos experimentais no núcleo do reator.

REFERÊNCIAS

1. Szondi, E. J.; Zsolnay, E. M.: Documentation of the Code SANDBP. Report, Institute of Nuclear Techniques, Technical University of Budapest, Budapest, September 1992.
2. McElroy, W. N. et alli.: SAND II. Neutron Flux Spectra Determinations by Multiple foil Activation n iterative e method. Oak Ridge National Laboratory, RSIC Computer Code Collection CCC - 112. May 1969.
3. Suich, J. E.; Honeck, H.C. The Hammer System Heterogeneous Analysis of MiltGroup Methods of Exponential and Reactor. Aiken, S.C., Du Pont de Nemours, Savannah River Laboratory, 1967.
4. Santos, A. et alli. Critical Loading Configurations of the IPEN/MB-01 Reactor. Nea/NSC/DOC (95) 03/IV, Leu-COMP-Therm-077, 2004.
5. Bitelli, U. d'U. Medida e Cálculo da Distribuição Espacial e Energética de Nêutrons no Núcleo do Reator IEA - R1. São Paulo: 1988. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.
6. International Atomic Energy Agency. Neutron Fluence Measurement Vienna, 1970. (Technical Reports Series n° 107)