

# MEDIDAS DE PARÂMETROS ASSOCIADOS A REAÇÕES NUCLEARES INDUZIDAS POR NÊUTRONS NO REATOR IEA-R1

*Mauro S. Dias, Renato Semmler, Ione M. Yamazaki, Denise S. Moreira, Franco Brancaccio, Marina F. Koskinas*

Centro do Reator de Pesquisas – IPEN-CNEN/SP  
Av. Professor Lineu Prestes, 2242  
05508-000 São Paulo – SP  
msdias@ipen.br

## RESUMO

O presente trabalho apresenta uma retrospectiva dos diversos parâmetros para reações nucleares induzidas por nêutrons, que foram determinados pelo Laboratório de Metrologia Nuclear (LMN) do IPEN, utilizando o reator IEA-R1. Esses parâmetros incluem: seções de choque, integrais de ressonância, além dos parâmetros  $k0$  e  $Q0$ , que são associados ao Método de Ativação Neutrônica (NAA). Para este propósito, o LMN dispõe de sistemas de calibração primários e secundários, que são necessários para a determinação da atividade do radionuclídeo

produzido na reação com nêutron. Os resultados destes estudos possibilitaram a melhoria da qualidade nos dados nucleares, a publicação de diversos trabalhos em periódicos internacionais, além da orientação de Mestrados e Doutorados.

## 1. INTRODUÇÃO

O Laboratório de Metrologia Nuclear (LMN) do IPEN, desde a o início da década de 90, vem determinando experimentalmente diversos parâmetros para reações nucleares induzidas por nêutrons, utilizando o reator IEA-R1. Esses parâmetros incluem: secções de choque, integrais de ressonância, além dos parâmetros  $k0$  e  $Q0$ , que são associados ao Método de Ativação Neutrônica (NAA). Este trabalho apresenta uma retrospectiva dessas medidas. Para este propósito, o laboratório dispõe de um sistema de calibração secundário que utiliza detector semicondutor de HPGe. Em alguns casos, torna-se necessária a utilização de sistemas de calibração primários, por meio da técnica de coincidência  $4\pi\beta-\gamma$ , também disponíveis no LMN. Estes sistemas primários servem para gerar fontes padrões para o sistema secundário ou para determinar diretamente a atividade do radionuclídeo formado pela reação nuclear. A seguir são apresentadas as diferentes medidas de parâmetros efetuadas ao longo dos anos, classificadas pelo tipo de parâmetro e reação nuclear envolvida.

## 2. SECÇÕES DE CHOQUE E INTEGRAIS DE RESSONÂNCIA

No início da década de 1990, o LMN iniciou suas pesquisas de medidas de secção de choque no estudo das reações de limiar para o espectro de nêutrons de fissão do  $^{235}\text{U}$ , componente do núcleo do reator IEA-R1. Para reduzir a ativação produzida por meio de nêutrons térmicos e epitérmicos, as amostras são irradiadas no interior de um envoltório de cádmio, juntamente com um conjunto de amostras de referência, para as quais as secções de choque de limiar na região rápida sejam bem conhecidas.

As reações inicialmente estudadas foram:  $^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni}$ ,  $^{127}\text{I}(n,2n)^{126}\text{I}$ ,  $^{55}\text{Mn}(n,2n)^{54}\text{Mn}$ ,  $^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu}$  e  $^{31}\text{P}(n,p)^{31}\text{Si}$ . Em seguida, iniciou-se um programa de mestrado[1] em que foram estudadas as seguintes reações:  $^{115}\text{In}(n,n')^{115\text{m}}\text{In}$ ,  $^{232}\text{Th}(n,f)\text{P.F.}$ ,  $^{46,47,48}\text{Ti}(n,p)^{46,47,48}\text{Sc}$ ,  $^{55}\text{Mn}(n,2n)^{54}\text{Mn}$ ,  $^{51}\text{V}(n,\alpha)^{48}\text{Sc}$ ,  $^{90}\text{Zr}(n,2n)^{89}\text{Zr}$ ,  $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$ ,  $^{24}\text{Mg}(n,p)^{24}\text{Na}$ ,  $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$ ,  $^{59}\text{Co}(n,\alpha)^{56}\text{Mn}$  e  $^{64}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$ . Estes estudos, além da dissertação de mestrado, deu origem a duas publicações em periódicos internacionais [2, 3].

Em continuidade, iniciou-se um programa de doutorado [4] versando sobre a medida da secção de choque e integral de ressonância para algumas reações de captura radiativa, em alvos de núcleos radioativos. Neste programa, foram incluídas as reações  $^{137}\text{Cs}(n,\gamma)^{138}\text{Cs}$ ,  $^{57}\text{Co}(n,\gamma)^{58}\text{Co}$  e  $^{241}\text{Am}(n,\gamma)^{242\text{g}}\text{Am}$ . Além do doutorado, estes estudos deram origem a várias publicações em periódicos internacionais [5-8]. Após estas medidas, o LMN participou de um estudo desenvolvido pelo Instituto de Física da USP, relacionado à determinação da secção de choque e integral de ressonância para a reação  $^{41}\text{K}(n,\gamma)^{42}\text{K}$ , dando origem a uma publicação internacional [9].

A partir de 2017, iniciou-se um programa de mestrado [10] com o estudo da determinação da seção de choque térmica e integral de ressonância, para a reação  $^{166\text{m}}\text{Ho}(n,\gamma)^{167}\text{Ho}$ . Esta medida é particularmente complexa, uma vez que demanda a determinação da atividade por um método primário, com os núcleos radioativos  $^{166\text{m}}\text{Ho}$  e  $^{166}\text{H}$ , agindo como interferentes. Este estudo já possibilitou uma publicação em periódico [11].

### 3. PARÂMETROS ASSOCIADOS À ANÁLISE POR ATIVAÇÃO NEUTRÔNICA

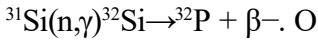
A partir de 2007, o LMN iniciou suas pesquisas relacionadas à determinação de parâmetros relacionados ao Método  $k0$  de Análise por Ativação Neutrônica, aplicando a metodologia de Análise por Covariâncias para o tratamento das incertezas dos dados. Esta iniciativa foi pioneira na literatura e deu ensejo à determinação de diversos parâmetros relacionados com o Método  $k0$  com análise rigorosa das incertezas. Inicialmente, associado a um programa de doutorado [12], foi determinado com precisão o parâmetro  $\alpha$  [13], associado à forma do espectro de nêutrons epitérmicos, na posição 24A que fica próxima ao núcleo do reator IEA- R1, conforme mostra a Figura 1. Em seguida, nesta mesma posição, mediu-se os parâmetros  $k0$  e  $Q0$  para os núcleos  $^{64}\text{Zn}$  e  $^{68}\text{Zn}$  [14]. Em continuidade, iniciou-se um novo programa de doutorado [15], resultando na determinação de  $k0$  e  $Q0$  para os núcleos  $^{74}\text{Se}$ ,  $^{113}\text{In}$ ,  $^{186}\text{W}$  e  $^{191}\text{Ir}$  [16]. As posições das amostras para a irradiação de 2015, estão apresentadas na Figura 2.

### 4. OUTRAS APLICAÇÕES ESPECÍFICAS COM FEIXES DE NÊUTRONS

Durante o início dos anos 2000, foi desenvolvido no LMN um programa de doutorado [17] versando sobre a deconvolução de espectros de nêutrons aplicando Redes Neurais, utilizando como detectores de nêutrons: folhas de ativação e

Esferas de Bonner. Além do doutorado, este estudo deu origem a uma publicação em periódico internacional [18].

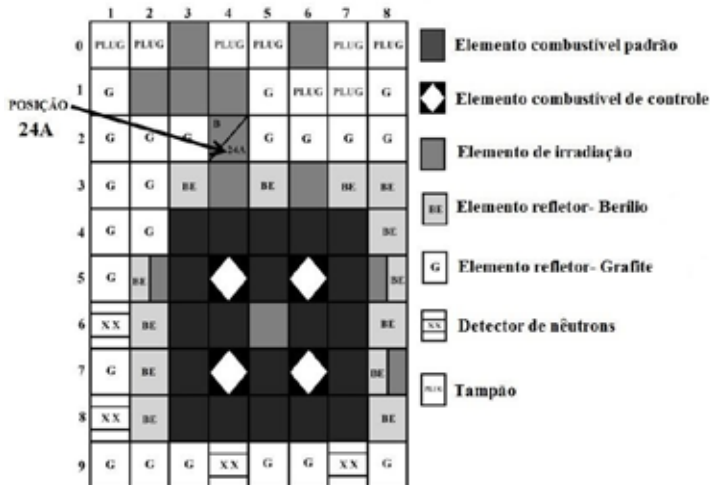
Durante a década de 1990 e início dos anos 2000, o IPEN desenvolveu um sistema de dopagem de silício para a produção de semicondutores, por meio da reação



LMN participou deste desenvolvimento, que deu origem a duas publicações em periódicos internacionais [19,20].

No período de 2014 a 2015, o LMN participou de uma colaboração com o grupo de imageamento com nêutrons do IPEN, por meio da modelagem por Monte Carlo de um dos canais de irradiação do reator IEA-R1, utilizando o código MCNP. Este estudo deu origem a três publicações em periódicos internacionais [21-23].

**Figura 1** – Configuração do reator IEA-R1 de outubro de 2014. A posição de irradiação utilizada (24 A) é indicada por uma seta.



**Figura 2** – Coelho preparado para as irradiações realizadas no ano de 2015 (a); com amostras sem cobertura de cádmio (b); com amostras com cobertura de Cd (c); visão frontal do coelho.



## 5. CONCLUSÃO

O reator IEA-R1 tem sido essencial para as pesquisas do LMN, possibilitando a determinação de diversos parâmetros neutrônicos de importância em tecnologia nuclear e de interesse na comunidade científica, conforme verifica-se pelos trabalhos apresentados em conferências ou aceitos para publicação em periódicos internacionais. Além disso, tem sido muito importante na formação de recursos humanos de alto nível, contribuindo para os programas de mestrado, doutorado e pós-doutorado do IPEN/USP. Para o futuro, estão previstas as medidas de parâmetros associados ao método  $k0$  e secções de choque, para núcleos que requerem uma melhoria na qualidade dos dados apresentados na literatura.

## AGRADECIMENTOS

A equipe do LMN agradece a todos os colaboradores que participaram ou tem participado nas pesquisas relacionadas ao uso do reator IEA-R1, a saber: alunos de pós-graduação do LMN nos diversos níveis; ao IPEN: pela equipe de irradiação do reator, à oficina mecânica e à direção do Centro do Reator de Pesquisas (CRPq), que tem dado o máximo de apoio às atividades do LMN nesta área.

## REFERÊNCIAS

1. MAIDANA, N. L. *Medidas de secções de choque médias no espectro de fissão do U-235, para algumas reações de limiar*. 1993. 88 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN-SP), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 1993. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/10314>.
2. GERALDO, L. P.; DIAS, M. S.; KOSKINAS, M. F. Average neutron gross section measurements in U-235 fission spectrum for some threshold reactions. *Radiochim. Acta*, v. 57, n. 2-3, jan. 1992.
3. MAIDANA, N. L.; DIAS, M. S.; GERALDO, L. P. Measurements of U-235 fission neutron spectrum averaged cross sections for threshold reactions. *Radiochim. Acta*, v. 64, n. 1, jan. 1994.
4. MAIDANA, N. L. *Medida de secções de choque para reações de captura de nêutrons no  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{241}\text{Am}$  considerando a formação de estados isoméricos*. 2000. 188 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear – Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), Universidade de São Paulo, 2000.
5. MAIDANA, N. L.; MESA, J.; VANIN, V. R.; CASTRO, R. M.; DIAS, M. S.; KOSKINAS, M. F.  $^{57}\text{Co}(n,g)^{58}\text{Co}$  reaction cross section: thermal and resonance integral measurements and energy dependence. *Phys. Rev. C*, v. 70, n. 1, p. 014602, jul. 2004.
6. MAIDANA, N. L.; DIAS, M. S.; KOSKINAS, M. F. Measurement of the thermal neutron capture cross section of Cs-137. *Radiochim. Acta*, v. 83, n. 3, jan. 1998.
7. MAIDANA, N. L.; DIAS, M. S.; KOSKINAS, M. F. Measurement of the thermal neutron capture cross section and resonance integral of Am-241. *Radiochim. Acta*, v. 89, n. 7, jan. 2001.
8. MAIDANA, N. L.; TAKEDA, M. N.; DIAS, M. S.; KOSKINAS, M. F.; VANIN, V. R. Absolute measurement of sources activities in the cross-section determination: improvement by simulation. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, v. 553, n. 3, p. 559-568, nov. 2005.
9. FERREIRA JR., F. A.; MAIDANA, N. L.; VANIN, V. R.; DIAS, M. S.; KOSKINAS, M. F.; LÓPEZ-PINO, N.  $^{41}\text{K}(n, \gamma)^{42}\text{K}$  thermal and resonance integral cross section measurements. *Radiochim. Acta*, v. 100, n. 12, p. 871-878, dez. 2012.

10. MORAIS, T. S. L. *Medida de seção de choque térmica e integral de ressonância para a reação  $166\text{mHo}(n,\gamma)167\text{Ho}$* . 2020. 117 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear – Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2020. DOI:10.11606/D.85.2020.tde-07102020-140506.
11. MORAIS, T. S. L.; DIAS, M. S. Study of induced activity of  $167\text{Ho}$  from different neutron capture paths. *J. Phys. Conf. Ser.*, v. 1291, p. 012024, jul. 2019.
12. CARDOSO, V. *Estudo das covariâncias envolvidas no método  $k_0$  de análise por ativação neutrônica*. 2011. 119 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear – Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2011. DOI: 10.11606/T.85.2011.tde-09052012-150636.
13. DIAS, M. S.; CARDOSO, V.; KOSKINAS, M. F.; YAMAZAKI, I. M. Determination of the neutron spectrum shape parameter  $\alpha$  in  $k_0$  NAA methodology using covariance analysis. *Appl. Radiat. Isot.*, v. 68, n. 4-5, p. 592-595, 2010.
14. DIAS, M. S. *et al.* Measurements of  $k_0$  and  $Q_0$  values for  $64\text{Zn}(n,\gamma)65\text{Zn}$  and  $68\text{Zn}(n,\gamma)69\text{mZn}$  reactions with covariance analysis. *Appl. Radiat. Isot.*, v. 69, n. 7, p. 960-964, jul. 2011.
15. BARROS, L. F. *Determinação de  $k_0$  e  $Q_0$  para as reações  $74\text{Se}(n,g)75\text{Se}$ ,  $113\text{In}(n,g)114\text{mIn}$ ,  $186\text{W}(n,g)187\text{W}$  e  $191\text{Ir}(n,g)192\text{Ir}$* . 2018. 166 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear – Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2018. DOI: 10.11606/T.85.2018.tde-21092018-143710.
16. BARROS, L. F. *et al.* Determination of  $k$  and  $Q$  for  $74\text{Se}$ ,  $113\text{In}$ ,  $186\text{W}$  and  $191\text{Ir}$  targets applying covariance analysis. *Appl. Radiat. Isot.*, v. 154, p. 108846, dez. 2019.
17. BRAGA, C. C. *Aplicação da técnica de redes neurais em espectrometria e dosimetria de nêutrons, utilizando Esferas de Bonner e folhas de ativação*. 2001. 133 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear – Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2001. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/10911>.
18. BRAGA, C. C.; DIAS, M. S. Application of neural networks for unfolding neutron spectra measured by means of Bonner Spheres. *Nucl. Instruments*

*Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, v. 476, n. 1-2, p. 252-255, jan. 2002.

19. CARBONARI, A. W.; PENDL, W.; SEBASTIÃO, J. R.; SAXENA, R. N.; DIAS, M. S. An irradiation rig for neutron transmutation doping of silicon in the IEA-R1 research reactor. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, v. 83, n. 1-2, p. 157-162, out. 1993.

20. DIAS, M.; SEBASTIÃO, J.; KOSKINAS, M. Methodology for monitoring the residual activity in silicon rods irradiated with thermal neutrons. *Appl. Radiat. Isot.*, v. 57, n. 6, p. 801-804, dez. 2002.

21. PUGLIESI, F.; STANOJEV PEREIRA, M. A.; PUGLIESI, R.; DIAS, M. S. The feasibility of the polycarbonate Durolon™ as a thermal neutron dosimeter. *Appl. Radiat. Isot.*, v. 89, pp. 1-5, jul. 2014.

22. PUGLIESI, R.; ANDRADE, M. L. G.; DIAS, M. S.; SIQUEIRA, P. T. D.; PEREIRA, M. A. S. Study of pixel damages in CCD cameras irradiated at the neutron tomography facility of IPEN-CNEN/SP. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, v. 804, p. 59-63, dez. 2015.

23. PUGLIESI, R.; ANDRADE, M. L. G.; PEREIRA, M. A. S.; SCHOUERI, R. M.; DIAS, M. S. Neutron imaging at the IPEN-CNEN/SP and its use in technology. *Neutron News*, v. 25, n. 4, p. 40-43, out. 2014.