



# Estimativa Computacional da Radiação Espalhada no Laboratório de Calibração com Nêutrons do IPEN

T. S. Alvarenga <sup>a</sup>; C. A. Federico<sup>b</sup>; C. C. Valeriano<sup>a</sup>; L. V. E. Caldas<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Comissão Nacional de Energia Nuclear (IPEN/CNEN), São Paulo, Brasil  
*talvarenga@ipen.br, caiovaleriano@hotmail.com, lcaldas@ipen.br.*

<sup>b</sup> Instituto de Estudos Avançados, Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA/IEAv), São Paulo, Brasil  
*claudiofederico@ieav.*

---

## RESUMO

Com o aumento do uso de técnicas que utilizam radiação de nêutrons, houve um crescimento considerável no número de detectores para esse tipo de radiação. Para ajudar a atender à demanda de calibração desse tipo de detector, foi projetado um laboratório de calibração de detectores com nêutrons, com fonte de <sup>241</sup>AmBe. Neste tipo de laboratório, um dos problemas principais está relacionado ao conhecimento da radiação espalhada, que é significativa neste tipo de atividade. Com o intuito de estimar esta radiação espalhada de maneira a balizar a configuração final do laboratório, foram realizadas simulações computacionais utilizando-se o método de Monte Carlo por meio do código MCNP5. As simulações foram realizadas modelando o ambiente do laboratório sem a presença dos elementos estruturais e com a sala completa, de maneira a avaliar o fluxo de nêutrons e equivalente de dose ambiente, H\*(10), em quatorze posições de especial interesse dentro da instalação. Com base nos resultados, foram avaliadas as limitações e as condições a serem observadas para o uso pretendido do laboratório.

Palavras-chave: Calibração, Detector de nêutrons, Espalhamento da radiação.

---

---

## ABSTRACT

With the increase of the use of neutron radiation techniques, there was a considerable growth in the number of detectors for this type of radiation. To help meet the calibration demand of this type of detector, a neutron calibration laboratory was designed, with an  $^{241}\text{AmBe}$  source. In practical situations in this type of laboratory, one of the main problems is related to the knowledge of scattered radiation, which is significant in this type of activity. In order to estimate this scattered radiation to define the final configuration of the laboratory, computational simulations were performed using the Monte Carlo method with the MCNP5 code. The simulations were performed by modelling the laboratory environment without the presence of the structural elements and the complete room in order to evaluate the neutron flux and the expected ambient dose equivalent,  $H^*(10)$ , in fourteen positions of special interest within the facility. Based on the results, the limitations and conditions to be observed for the intended use of the laboratory were evaluated.

*Keywords:* Calibration, Neutron detector, Radiation scattering.

---

## INTRODUÇÃO

A radiação de nêutrons é utilizada em três áreas: industrial, pesquisa e médica. Na indústria, o uso da radiação de nêutrons destaca-se pela geração de energia nuclear e prospecção de petróleo. Na área médica, os nêutrons são usados em terapia de captura de nêutrons por boro (BNCT). No campo científico, os nêutrons estão presentes nos estudos de fissão e fusão[1].

A utilização de um sistema de medição da radiação de nêutrons é de suma importância, pois permite monitorar uma área e avaliar a segurança das instalações e dos operadores. A obtenção de uma medição confiável da radiação de nêutrons é uma tarefa muito difícil, devido ao grande intervalo de energia, aos seus mecanismos complexos de interação com a matéria e a diferentes geometrias de irradiação. Consequentemente, a resposta obtida pelo instrumento é limitada, podendo ocorrer uma subestimativa ou uma superestimativa da dose; essa é uma característica da maioria dos instrumentos disponíveis comercialmente [2].

No passado, a monitoração de indivíduos expostos a radiações de nêutrons era muito limitada; somente os trabalhadores de reatores e aceleradores precisavam ser monitorados. Essa demanda é crescente devido ao aumento do uso de técnicas na indústria, em pesquisa e na área médica, que utilizam radiações de nêutrons, aumentando assim o número de trabalhadores potencialmente expostos a essa radiação, e assim levando a uma necessidade maior de monitoração individual.

A calibração dos instrumentos de medição de radiação, tais como os monitores de radiação e os dosímetros, é realizada com o objetivo de assegurar medições precisas e exatas com uma incerteza associada, atendendo às exigências estabelecidas pelas autoridades regulamentadoras [3].

A calibração é definida como um conjunto de operações que estabelece a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição e os valores obtidos por um sistema padrão [4]. Segundo a norma NE 3.02 da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), é obrigatória a calibração dos instrumentos de medição por entidades autorizadas, em conformidade com as normas específicas, para garantir que o instrumento esteja trabalhando devidamente [5]. Os laboratórios de calibração devem possuir seus campos de radiação bem caracterizados, e as condições de calibração muito bem controladas.

No Brasil só há um laboratório de calibração de detectores de nêutrons, localizado no Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI/IRD-CNEN, Rio de Janeiro), com uma demanda muito grande de serviços com este tipo de radiação. Assim, tendo em vista que o IPEN possui mais de 30 equipamentos detectores de nêutrons utilizados pelos trabalhadores dos dois reatores nucleares e dos dois cíclotrons, além de várias fontes radioativas, que necessitam ser calibrados periodicamente, com o intuito de descentralizar a oferta de calibração, surgiu a necessidade da montagem de um segundo laboratório de calibração com nêutrons, no IPEN, com o propósito de atender à demanda interna e externa [6].

Nas situações práticas envolvendo a calibração de detectores de radiação de nêutrons, um dos problemas principais está relacionado à radiação espalhada ocasionada por meio da interação dos nêutrons com o ar e com os componentes estruturais do laboratório tais como: paredes, piso e teto, onde ocorre a maior contribuição [7]. Para evitar essas situações, o laboratório de calibração deveria ser no vácuo e não possuir qualquer superfície que possa causar espalhamento da radiação; no entanto, em situações práticas é impossível obter tais condições.

Os principais efeitos ocasionados pelos nêutrons espalhados são: as alterações no espectro e na fluência, medidos em certas posições de interesse no laboratório de calibração, conseqüentemente influenciando a leitura do instrumento a ser calibrado e ocasionando um erro sistemático na calibração dos dispositivos para medição de nêutrons[8].

Com o intuito de estimar a radiação espalhada no laboratório, foram realizadas simulações computacionais, onde foi avaliado o fluxo de nêutrons e  $H^*(10)$ . Com os resultados obtidos foram avaliadas as limitações e as condições a serem observadas para o uso pretendido do laboratório.

## 1. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização da simulação do LCN do IPEN, utilizou-se o código de Monte Carlo MCNP5. Este código foi desenvolvido e é mantido pelo Laboratório Nacional de Los Alamos (EUA); é um método estatístico no qual se utiliza uma sequência de números aleatórios com a finalidade de solucionar problemas matemáticos e físicos, os quais são muito difíceis de serem obtidos de maneira direta; pode ser utilizado para o cálculo de transporte de radiação de nêutrons, fótons e elétrons [9].

Foram simuladas  $2 \times 10^9$  histórias, com o *tally* F4, com o objetivo de se obter resultados com incertezas menores. A geometria utilizada foi baseada nas plantas baixas do laboratório, disponíveis no IPEN, bem como as medições no local, para garantir que todas as dimensões utilizadas na simulação estejam em concordância com as do laboratório.

O laboratório está localizado no Bunker (local semi-enterrado), que é uma instalação integrante do Laboratório de Calibração de Instrumentos, do Centro de Metrologia das Radiações. O LCN possui dimensões de 6,88 m x 5,46 m e paredes de concreto com espessura de 15 cm e cobertas por *drywall*. O laboratório possui 2,8 m de altura, sendo que o teto de concreto possui 15 cm de espessura, e o piso de granito tem 5 cm de espessura.

A inserção da constituição dos materiais do LCN no código MCNP5 foi feita com base nos dados do relatório PNNL-15870 [8], onde o concreto possui a densidade de  $2,35 \text{ g/cm}^3$ , granito  $2,69 \text{ g/cm}^3$ , portas de madeira  $0,42 \text{ g/cm}^3$ , porta de ferro  $7,874 \text{ g/cm}^3$  e a porta de chumbo de  $11,35 \text{ g/cm}^3$  [10].

Com o intuito de avaliar a radiação espalhada, que ocorre devido à interação dos nêutrons com o ar e com os componentes estruturais do laboratório tais como: piso, teto, paredes e portas, foram realizadas simulações computacionais utilizando o método de Monte Carlo por meio do código MCNP5. As simulações foram realizadas modelando o ambiente do laboratório sem a presença dos elementos estruturais e com a sala completa, de maneira a avaliar o fluxo de nêutrons e  $H^*(10)$ .

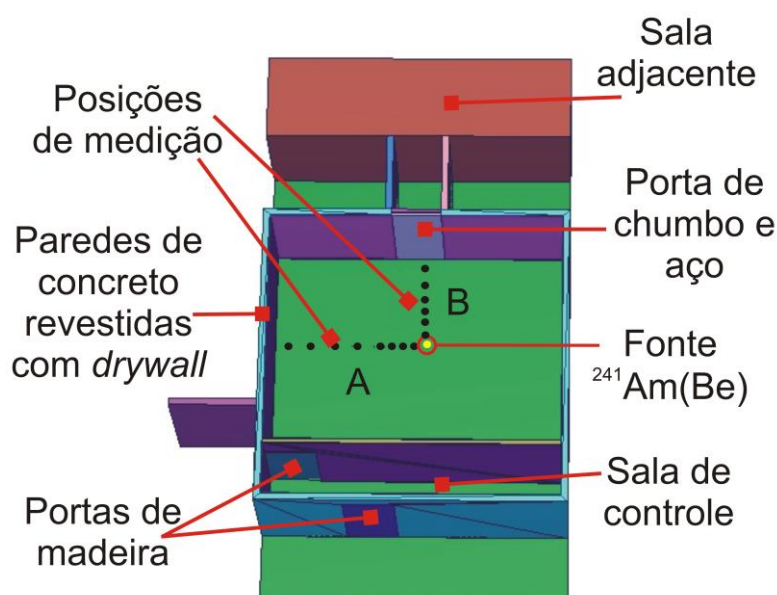
A fonte radioativa utilizada para realização deste estudo foi de  $^{241}\text{AmBe}$  (37 GBq), posicionada à altura de 140 cm do piso, mesma altura utilizada nos procedimentos de calibração. O espectro desta fonte, utilizado na simulação, foi obtido por meio da norma ISO 8529-1 [3].

Foram avaliados quatorze posições de especial interesse em duas direções perpendiculares em várias distâncias: direção A: entre 25 cm e 300 cm; e na direção B: entre 10 cm e 200 cm, em relação à fonte de  $^{241}\text{AmBe}$ . Nestas posições foram inseridas esferas de ar com 1,0 cm de raio, preenchidas com o mesmo material que preenche a sala (ar atmosférico).

## 2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados os resultados obtidos por meio da simulação utilizando o código MCNP5. A Figura 1 apresenta a localização das posições de interesse e a geometria da sala, utilizadas com o código MCNP5.

**Figure 1:** Geometria da instalação do LCN, utilizada nas simulações de Monte Carlo com o código MCNP5.



Em cada uma das quatorze posições de interesse, foi determinado o espectro de nêutrons na sala sem e com os componentes estruturais. Com o objetivo de evitar as incertezas advindas das mudanças da geometria no código de Monte Carlo, todas as superfícies e células foram mantidas, mas a

densidade dos materiais foi ajustada como tendo o valor zero, de maneira que os volumes se comportem como vácuo, evitando a ocorrência de espalhamento da radiação.

O espectro obtido em cada posição de medição foi convertido em equivalente de dose ambiente  $\dot{H}^*(10)$ , utilizando os coeficientes de conversão da norma ICRP 74 [10]; os valores do fluxo de nêutrons foram obtidos diretamente do código MCNP5.

A radiação de nêutrons espalhada foi determinada por meio da razão entre os valores obtidos de  $H^*(10)$  da sala com todos os componentes estruturais e os valores  $H^*(10)$  da sala sem os componentes estruturais. O mesmo procedimento foi empregado na avaliação da influência da radiação espalhada sobre o fluxo de nêutrons [11]. A Tabela 1 apresenta os resultados da influência da radiação espalhada do fluxo de nêutrons e dos valores de  $H^*(10)$  obtidos nas quatorze posições de medição.

**Table 1:** Influência da radiação espalhada na determinação do fluxo de nêutrons e do  $H^*(10)$  nas posições de interesse.

Distância da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ (cm)	Influência (%)	
	$H^*(10)$	Fluxo de nêutrons
	Direção A	
25	1,9	5
50	6,6	15
75	12,6	28
100	21,9	42
150	35,1	59
200	44,6	70
250	54,3	78
300	91,5	84
Direção B		
10	0,2	1
25	1,8	4
40	4,4	10
70	12,2	26
100	22,7	42
200	48,4	71

A partir dos resultados na Tabela 1, é possível observar que as posições de calibração nos sentidos A e B a 200 cm, em relação à fonte de nêutrons, apresentam uma influência da radiação espalhada de 44,6 % e de 48,4% para os valores de  $H^*(10)$ .

Por meio dos resultados obtidos pelas simulações, na Tabela 1 observa-se que a radiação espalhada torna-se gradualmente mais significativa conforme aumenta a distância da fonte, podendo chegar a representar 84% do campo em termos de fluxo de nêutrons ou até 91,5% em termos de  $H^*(10)$  para algumas das distâncias e situações avaliadas.

Este problema é bastante significativo e recorrente neste tipo de laboratório, a ponto da norma ISO 8529-2[12] recomendar que a distância máxima de calibração seja fixada de forma que o aumento da leitura devido ao espalhamento na sala seja menor do que 40%. Assim, para que o laboratório possa exercer as atividades pretendidas, deve-se avaliar as opções de redução do espalhamento do local ou limitação das distâncias a serem utilizadas de maneira a atender à norma existente.

### **3. CONCLUSÕES**

Foi possível observar, que por meio do comportamento da radiação espalhada nas simulações efetuadas, que a distância máxima de calibração deve ser de 100 cm tanto na direção A como na direção B, assim atendendo às limitações impostas pela norma ISO 8629-2[12] na configuração simulada do laboratório. Com base nos resultados obtidos devem ser avaliadas e planejadas as possíveis alterações, condições e limitações de operação do laboratório para atender ao seu propósito.

### **4. AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem às agências de fomento CAPES, FAPESP, CNPq e ao MCTIC, com o projeto INCT – Metrologia das Radiações na Medicina, pelo apoio financeiro.



## REFERÊNCIAS

- [1] LUSZIK-BHADRA, M.; ALBERTS, W. G.; DIETZ, E.; GULDBAKKE, S. Aspects of combining Albedo and track etched techniques for use in individual neutron monitoring. **Radiation Protection Dosimetry**, v.46 (1), p.31-36 , 1993.
- [2] SCHUHMACHER, H. Neutron calibration facility. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 110, p. 33-42, 2004.
- [3] ISO, INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, **Reference Neutron Radiations – Part 2: Characteristics and Methods of Production**, ISO 8529-1, 2001.
- [4] INMETRO, INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE e TECNOLOGIA. **Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados (VIM)**. 1ª edição luso-brasileira, 2012.
- [5] CNEN, COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, **Diretrizes Básicas de Radioproteção**, NN-3.01/004, Rio de Janeiro, 2011.
- [6] ALVARENGA, S. T. **Instalação e Caracterização Básica de um Laboratório para Testes de Monitores Portáteis com Radiação de Nêutrons**. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, 2014.
- [7] KHABAZ, R. Analysis of neutron scattering components inside a room with concrete walls. **Applied Radiation and Isotopes**, v.95, p.1-7, 2015.
- [8] VEGA-CARRILO, R. H.; MANZANARES-ACUÑA, E.; IÑIGUEZ, P. M.; GALLEGO, E.; LORENTE, A. Spectrum of isotopic neutron sources inside concrete wall spherical cavities. **Radiation Measurements**, v.42, p.1373-1379, 2007.
- [9] MCNP — **A general Monte Carlo N-particle transport code**, Version 5. LA-UR-03-1987. Los Alamos National Laboratory, 2008.
- [10] McCONN, JR. R. J; GESH, C. J, PAGH, R. T; RUCKER, R. A; WILLIAMS, R. G. Radiation portal monitor project. Compendium of material composition data for radiation transport modeling. PNNL-15870, Rev. 1, **Pacific Northwest National Laboratory**, 2011.

- [11] ICRP, INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiations, Report 74**, Pergamon Press, Oxford, 1996.
- [12] ISO, INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Reference Neutron Radiations. Calibration Fundamentals of Radiation Protection Devices related to the Basic Quantities characterizing the Radiation Field. ISO 8529**, Part 2, Geneva, 2000.