

## **DETERMINAÇÃO DA CAMADA MORTA EM DETECTORES DE GERMÂNIO HIPERPURO**

**Costa, P.<sup>1</sup>, Potiens Jr., A.J.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN

### **RESUMO**

O método de Monte Carlo é uma ferramenta muito útil para a caracterização de rejeitos radioativos, pois permite simular o transporte da radiação no meio para sistemas complexos de uma forma simplificada, utilizando números aleatórios nas amostragens das funções de distribuição de probabilidade. O cristal de germânio representa o volume ativo de detecção do detector HPGe, que possui uma região denominada camada morta ou camada inativa. Na literatura tem sido reportada uma diferença entre os valores experimentais e teóricos na obtenção da curva de eficiência desses detectores. Neste trabalho foi utilizado o código MCNP-4C para a determinação da camada morta em detectores de germânio hiperpuro. As correções dos valores da camada morta foram feitas variando-se a espessura e o raio do cristal de germânio. O detector possui 75,83 cm<sup>3</sup> de volume ativo de detecção, segundo informações fornecidas pelo fabricante. Entretanto os resultados encontrados mostraram que o valor de volume ativo real é menor do que o especificado, onde a camada morta representa 16% do volume do cristal. Essas correções no volume ativo de detecção permitem diminuir a diferença entre os valores teóricos e experimentais.

### **1. INTRODUÇÃO**

O desenvolvimento tecnológico e científico na área nuclear, ocorrido desde o começo do século vinte, levou a uma grande variedade de aplicações em pesquisa, medicina, indústria e geração de energia por fissão nuclear. Em conjunto com certas atividades humanas, essa prática gera rejeitos radioativos que necessitam de um gerenciamento que garanta a proteção da saúde humana e do meio ambiente nos dias de hoje e no futuro, sem impor uma carga indevida às futuras gerações [1].

A Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) define rejeito radioativo como [2] “qualquer material que contenha ou tenha sido contaminado com radionuclídeos em concentrações ou níveis de atividade maiores que os limites de isenção estabelecidos pela autoridade competente”.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) é o órgão no Brasil responsável pelo recebimento, tratamento e armazenamento de rejeitos radioativos e a Gerência de Rejeitos Radioativos (GRR) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) é a responsável pela gerência de todos os rejeitos radioativos gerados na instituição, bem como daqueles provenientes de hospitais, indústrias, universidades ou outras entidades da região sul do Brasil e do Estado de São Paulo.

---

<sup>1</sup> E-mail del Autor. pcosta@ipen.br

Dentre as várias etapas que compreendem a gerência dos rejeitos radioativos, a caracterização primária é a etapa em que são obtidas as informações físicas, químicas e radiológicas dos rejeitos podendo assim definir a forma adequada de tratamento de acordo com os critérios de aceitação para deposição final [3].

O método de Monte Carlo pode ser utilizado na caracterização de rejeitos radioativos, pois permite simular o transporte de radiação no meio para sistemas complexos de uma forma simplificada utilizando-se números aleatórios nas amostragens das funções de distribuição de probabilidade [4]. O código utilizado neste trabalho para o cálculo do transporte da radiação, baseado no método de Monte Carlo é o *Monte Carlo N-Particle Transport* (MCNP) que possui bibliotecas de secção de choque para nêutrons, fótons e elétrons [5].

A determinação da atividade da fonte radioativa faz parte da caracterização primária e para obter-se essa atividade por meio da espectrometria gama é necessário o conhecimento prévio da curva de eficiência para uma dada geometria, que pode ser obtido por meio da calibração em eficiência do detector [6].

As técnicas mais comuns utilizadas para o cálculo da eficiência são a calibração utilizando fontes com atividade conhecida ou por simulação pelo método de Monte Carlo (MC) [7,8].

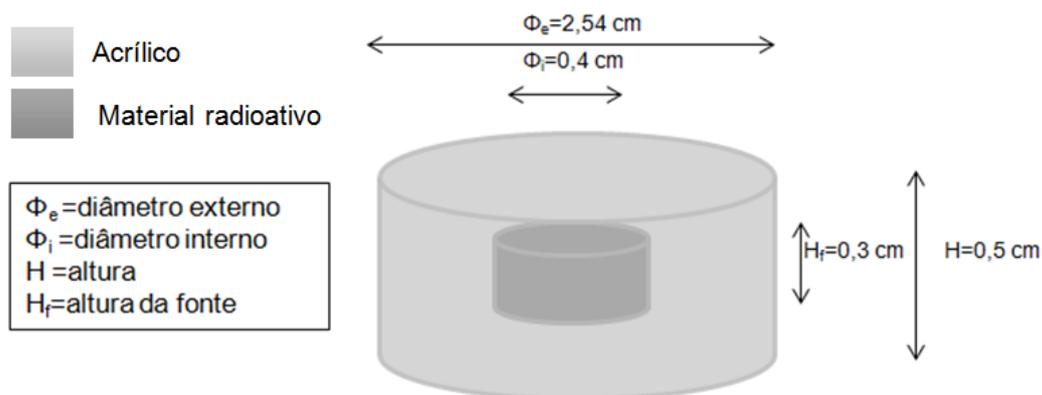
Diversos estudos têm sido realizados para solucionar a discrepância entre os resultados experimentais e teóricos, sendo os teóricos obtidos através de cálculos semi-empíricos ou simulações pelo método de Monte Carlo [7]. Na literatura consultada a camada morta é um parâmetro frequentemente associado a essa discrepância para o método de Monte Carlo associado à espectrometria gama com detectores HPGe. O aumento na espessura do cristal de germânio nessa camada acarreta no decréscimo da eficiência de detecção devido à atenuação da radiação gama e a diminuição do volume ativo [9,10].

O objetivo desse trabalho é determinar a camada morta do detector EGPC-15-190-R utilizando o código MCNP-4C.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1. Materiais**

Neste trabalho foram utilizados: o detector de germânio hiperpuro EGPC-15-190-R fabricado pela *Eurisys*, uma fonte padrão de  $^{241}\text{Am}$  indicada na Fig.1 com valor de atividade de  $48,8 \pm 0,6$  kBq e um suporte de PVC.



**Figura 1. Geometria da fonte  $^{241}\text{Am}$**

O suporte de PVC está indicado nas Fig.2 e 3 respectivamente a visão lateral e frontal.



**Figura 2. Suporte de PVC visão lateral**

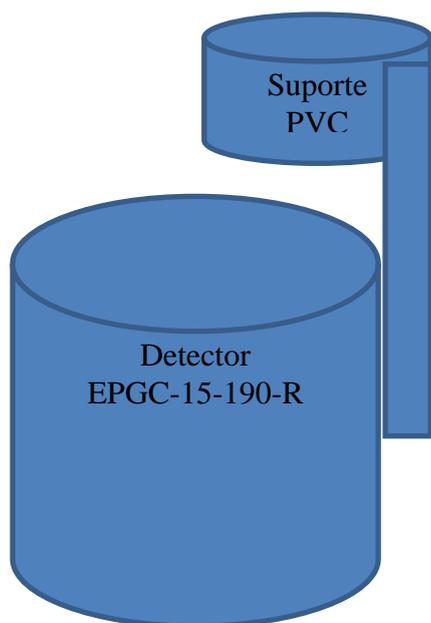


**Figura 3. Suporte de PVC visão frontal**

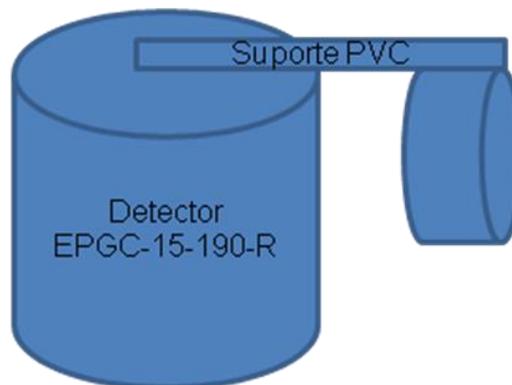
## 2.2 Método

Para determinar a camada morta do cristal de germânio os valores experimentais obtidos por meio da espectrometria gama foram comparados com os teóricos.

Os diagramas experimentais para os arranjos frontal e lateral estão representadas respectivamente nas Fig.4 e 5. Nos arranjos experimentais foi utilizada a fonte de  $^{241}\text{Am}$  posicionada a uma distância fonte-detector fixa de 10 cm com o auxílio de um suporte de PVC.



**Figura 4. Diagrama do arranjo frontal**



**Figura 5. Diagrama do arranjo lateral**

A literatura consultada sugere variar a espessura da camada morta entre os valores 0 e 7,5  $\mu\text{m}$  (ELANIQUE, 2012). Os valores de raio do cristal de HPGe foram variados de modo a simular regiões da camada morta.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na simulação pelo método de Monte Carlo, foi utilizado o cartão F8, o modo p, com um número de histórias de modo que o erro relativo na eficiência fosse menor que 5%. A energia utilizada na simulação para a fonte de  $^{241}\text{Am}$  foi de 59,54 keV.

As análises por espectrometria gama foram efetuadas utilizando-se o tempo de contagem 600 segundos. A eficiência experimental foi obtida utilizando-se o *software* GENIE 2000, por meio do certificado de calibração da fonte puntiforme de  $^{241}\text{Am}$ .

A Tab.1 indica os valores das eficiências experimentais ( $\epsilon_{\text{exp}}$ ) e suas respectivas incertezas para o arranjo frontal e lateral em função da energia da fonte para o tempo de 600 s e para a energia de 59,54 keV.

**Tabela 1. Eficiência experimental da camada morta do detector EGPC-15-190-R**

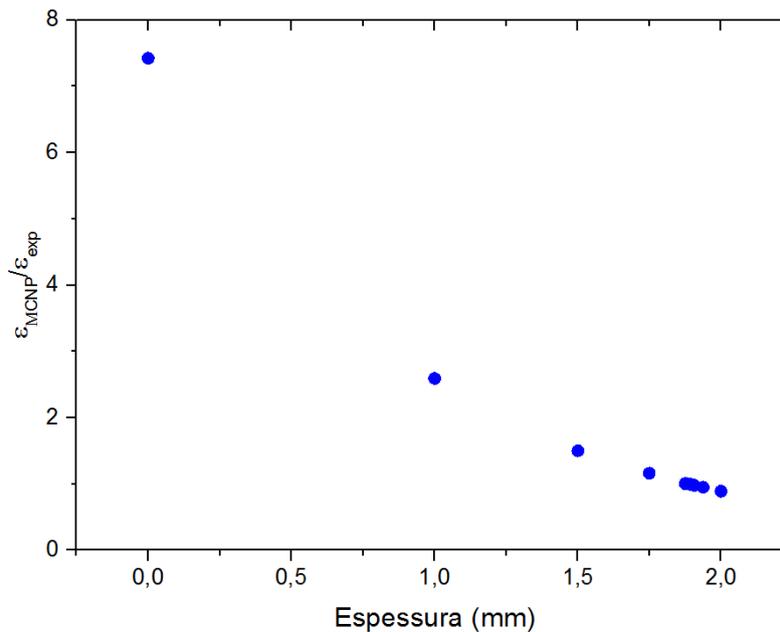
| Medida Frontal                           |               | Medida Lateral                           |               |
|--|---------------|--|---------------|
| $\epsilon_{\text{exp}} (\times 10^{-3})$ | Incerteza (%) | $\epsilon_{\text{exp}} (\times 10^{-4})$ | Incerteza (%) |
| 1,60                                     | 1,40          | 8,40                                     | 1,40          |

Na Tab.2 estão representados os valores da comparação entre as eficiências teóricas ( $\epsilon_{MCNP}$ ) e as eficiências experimentais ( $\epsilon_{exp}$ ) respectivamente para a variação da espessura e do raio do cristal do germânio para a energia de 59,54 keV.

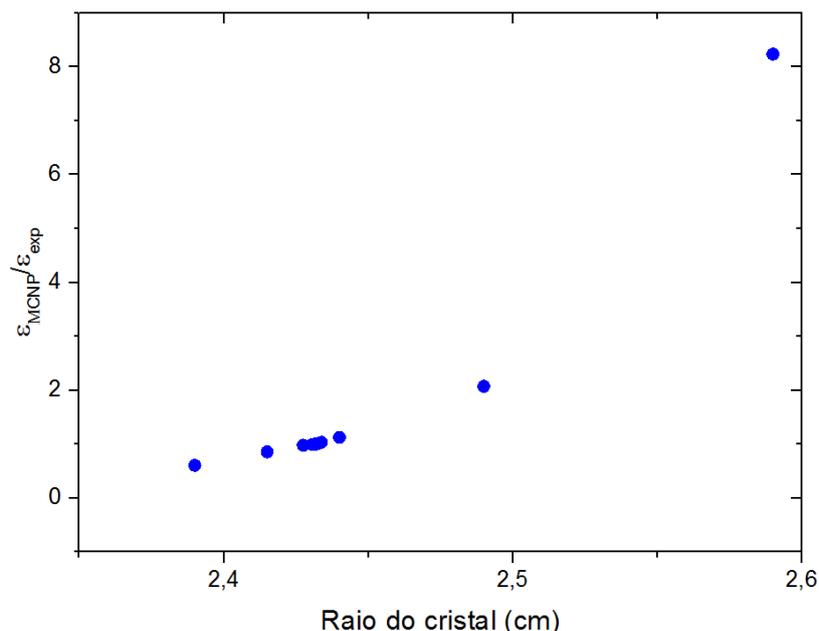
**Tabela 2. Valores teóricos da eficiência ( $\epsilon_{MCNP}$ ) e seus respectivos erros relativos para a variação da espessura da camada morta, relação entre o valor teórico e o experimental para a energia de 59,54 keV**

| Espessura (mm) | $\epsilon_{MCNP}/\epsilon_{exp}$ | Raio (cm) | $\epsilon_{MCNP}/\epsilon_{exp}$ |
|----------------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|
| 1,75000        | 1,1613                           | 2,490     | 2,0757                           |
| 1,87500        | 1,0061                           | 2,440     | 1,1243                           |
| 1,88281        | 1,0049                           | 2,434     | 1,0343                           |
| 1,88672        | 1,0012                           | 2,432     | 1,0036                           |
| 1,88818        | 1,0006                           | 2,431     | 1,0000                           |
| 1,88820        | 1,0000                           | 2,431     | 0,9953                           |
| 1,88843        | 0,9994                           | 2,428     | 0,9822                           |
| 1,88867        | 0,9988                           | 2,415     | 0,8592                           |
| 1,89063        | 0,9975                           | 2,390     | 0,6071                           |

Na Fig.6 e 7 respectivamente estão indicados os gráficos das relações entre a eficiência obtida pelo método de Monte Carlo e a eficiência experimental em função da espessura e do raio do cristal.



**Figura 6. Gráfico da relação entre a eficiência obtida pelo método de Monte Carlo e a eficiência experimental em função da espessura para a energia de 59,54 keV**



**Figura 7. Gráfico da relação entre a eficiência obtida pelo método de Monte Carlo e a eficiência experimental em função do raio do cristal para a energia de 59,54 keV**

Observando-se as Fig.6 e 7 nota-se que a relação entre a eficiência teórica e a experimental decresce com o aumento da espessura da camada morta e com a diminuição do raio do cristal de germânio.

Considerando as dimensões do cristal de germânio fornecidas pelo fabricante do detector EGPC-15-190-R, como tendo 3,6 cm de altura e 2,59 cm de raio. A partir da análise das Tab.2, foram escolhidos os valores de espessura de camada morta e raio do cristal cuja comparação entre as eficiências teóricas e a experimental fosse a mais próxima da unidade, pois indica que as eficiências teóricas e experimentais possuem o mesmo valor, ou seja, a geometria simulada se aproxima do volume ativo de detecção. Os melhores valores para a camada morta são de 1,882 mm na espessura e 2,4314 cm de raio. A partir do valor de camada morta determinado tem-se que o volume ativo corrigido do detector é de 63,32 cm<sup>3</sup>.

### 3. CONCLUSÕES

O volume real ativo representa 84% do volume de cristal de germânio. Como na região da camada morta os fótons podem ser atenuados, além do fato de não serem detectados, estabelecer as dimensões para essa região permite que nas simulações pelo método de Monte Carlo a geometria simulada do detector se aproxime mais da medida real do cristal de germânio.

Esse novo valor de volume ativo permitiu diminuir a discrepância entre os valores de eficiências experimentais e teóricas.

#### 4. REFERÊNCIAS

1. International Atomic Energy Agency – IAEA. *Classification of Radioactive Waste*, IAEA Nuclear Safety Series No GSG-1. Vienna, 2009.
2. International Atomic Energy Agency - IAEA. *Radioactive waste management glossary*, Vienna, 2003.
3. Comissão Nacional De Energia Nuclear – CNEN. *Critérios de Aceitação para Deposição de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação*. CNEN-NN-6.09. Rio de Janeiro, 2002.
4. Novo, J. B. M.; Dias, L. C. “Simulação Monte Carlo de mecanismo de transferência de energia de excitação eletrônica: modelo de Perrin para a supressão estática da luminescência”, *Química Nova*, v. **34**, pp. 707-709 (2011).
5. Briesmeister, J. F. MCNP<sup>TM</sup> – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, version 4c, LA-13709-M, Los Alamos National Laboratory, New Mexico, December 2000.
6. Vargas, M. J.; Timón, A. F.; Díaz, N. C.; Sánchez, D. P. “Influence of the geometrical characteristics of an HPGe detector on its efficiency”, *J Radional Nucl Chem*, v. **253**, pp. 439-443( 2002).
7. Elanique, A.; Marzocchi, O.; Leone, D.; Hegenbart, B.; Breustedt, B.; Oufni, L. “Dead layer thickness characterization of an HPGe detector by measurements and Monte Carlo”, *Applied Radiation and Isotopes*, v. **70**, pp. 538-542, 2012.
8. Sima, O.; Arnold, D. “On the Monte Carlo simulation of HPGe gamma-spectrometry systems”, *Applied Radiation and Isotopes*, v. **67**, pp. 701-705 ( 2009).
9. Agarwal, C.; Chaudhury, S.; Goswami, A.; Gathibandhe, M. “Full energy peak efficiency calibration of HPGe detector for point and extend sources using Monte Carlo code”, *J Radioanal Nucl Chem*, v. **287**, pp. 701-708( 2011).
10. Huy, N.Q. “Dead-Layer thickness effect for gamma spectra measured in an HPGe p-type detector”, *Nuclear Instrument and Methods in physics Research A*, v. **641**, pp. 101-104 (2011).