

## Construção de uma curva de eficiência de um detector HPGe para fins de calibração

**Max Dos Santos Ramos<sup>1</sup>; William Luna Salgado<sup>1,2</sup>; Ronaldo Lins<sup>1</sup>; José Ubiratan Delgado<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> IRD; <sup>2</sup> UFRJ/COPPE

E-mail: msxramos@gmail.com

**Resumo:** Este trabalho visa construir a curva de eficiência absoluta de um detector HPGe, foi utilizado a metodologia do Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI), que é um laboratório nacional de padrão secundário. Para a medição dos padrões de calibração foi utilizado um aparato experimental com distância de 20 cm do detector e a curva foi feita de 121,78 até 1408 keV.

**Palavras-chave:** espectrometria gama, eficiência absoluta, detector HPGe.

**Abstract:** This work aims to build the absolute efficiency curve of an HPGe detector, using the methodology of the National Ionizing Radiation Metrology Laboratory (LNMRI), which is a national laboratory of secondary standard. For the measurement of the calibration standards, an experimental apparatus with a distance of 20 cm from the detector was used and the curve was made from 121.78 to 1408 keV.

**Keywords:** gamma spectrometry, absolute efficiency, HPGe detector.

### 1. INTRODUÇÃO

Em muitas práticas realizadas em distintas áreas do conhecimento humano, necessita-se de sustentação metrológica. Quanto mais preciso o processo de calibração, que está diretamente ligado a rastreabilidade e incerteza, maior a confiança na técnica utilizada.

Para a espectrometria gama, que é uma técnica analítica nuclear de identificação e quantificação de radionuclídeos emissores gama desde a preparação da amostra, geometrias e tipo de detector, tem-se em cada fase os controles e garantias de qualidades, principalmente nas práticas do uso de radionuclídeos em que houve um aumento na demanda, devido aos procedimentos que fazem uso da emissão de pósitrons, ou tomografia (PET).

A necessidade da padronização das soluções e/ou fontes radioativas de calibração dos sistemas de medição, propiciou à Metrologia alternativas e métodos, destacando-se a espectrometria gama, que

mostra-se muito eficiente ao padronizar os radionuclídeos emissores gama de meia-vida curta, e serem usados como padrão de detecção em ativímetros nos próprios serviços de medicina nuclear.

Como a espectrometria gama é um processo que envolve uma cadeia de medição, vários parâmetros devem ser considerados, sendo um deles a eficiência da detecção, que depende de fatores como tipo de radionuclídeo, geometria de medição e o tamanho do detector em que suas curvas de calibração em eficiência, determinadas empiricamente para cada energia de emissão, geometria e sistema de medição, ligam-se diretamente às eficiências de detecção e atividades das amostras analisadas (GILMORE, 2008).

Em relação aos obstáculos apresentados no método quantitativo de análise, a espectroscopia gama possui algumas dificuldades na determinação da eficiência da contagem, pois existem dependências com o tamanho do cristal, localização da fonte e energia da radiação incidente no detector. Porém necessita-se inicialmente que as informações confiáveis em relação ao número de emissões que são detectadas na energia de interesse, a atividade da fonte padrão em termos absolutos, o tempo de contagem do evento e a probabilidade do decaimento gama da energia especificada (GILMORE, 2008) que são informações originárias dos laboratórios primários e/ou secundários.

Este trabalho tem como objetivo criar uma curva de eficiência energética, relacionando os dados de diversos padrões de radionuclídeos emissores gama obtidos por meio de um detector de germânio com alta pureza (HPGe) do Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI) no Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD), verificando as variações nas detecções das amostras com emissões gama em faixas de energia pré-determinadas. Assim executando-se uma das etapas de calibração deste detector.

## 2. FUNDAMENTOS EM DETECTORES DE RADIAÇÃO

Detectores de radiação são dispositivos capazes de indicar e registrar sua presença. São constituídos basicamente por um material sensível à radiação e um sistema capaz de transformar os efeitos da radiação gerados em seu interior numa grandeza possível de ser registrada e medida

Em geral podemos definir um detector como um aparelho que está inserido num campo de radiação e que a indique usando o meio material de que é constituído, transformando os efeitos relacionados à sua constituição num valor mensurável de uma grandeza (TAUHATA, SALATI, PRINZIO e PRINZIO, 2013).

O mecanismo fundamental de funcionamento de todos os detectores de radiação é a dissipação de energia pela partícula incidente no detector. Quando há interação de um feixe de radiação com um detector, dependendo do processo de interação que ocorra (efeitos Fotoelétrico, Compton ou Formação de Pares), toda ou parte de sua energia é absorvida dentro do volume sensível do detector, sendo que a energia transferida pela radiação é utilizada para a geração de luz e dos portadores de cargas,

dependendo do tipo do detector. Para cada fóton detectado é gerado um pulso de carga, cuja altura fornece a energia transferida pelo fóton e a contagem destes pulsos corresponde ao número de interações.

### **2.1. Detectores semicondutores de HPGe**

Um semicondutor é um sólido cristalino cuja resistividade está compreendida entre os condutores ( $10^{-5}$  ohm/cm) e os isolantes ( $10^{12}$  ohm/cm). Estes materiais, tendo em vista as numerosas propriedades, são utilizados tanto na indústria quanto na pesquisa (VARGAS, TIMÓN, DÍAZ e SÁNCHEZ, 2002).

Esquemáticamente, um detector semicondutor pode ser considerado como uma pastilha mono cristalina colocada entre dois eletrodos que são ligados a uma fonte de tensão, a fim de criar um campo suficientemente intenso no interior do cristal. Quando uma radiação ionizante atravessa um sólido perde parcialmente ou totalmente sua energia ao interagir com o meio, com uma probabilidade tão elevada quanto maior for o número atômico do material. Esta perda de energia se faz de maneira direta pelas partículas carregadas e de maneira indireta pelos fótons. Ela se traduz pela movimentação de cada par elétron-lacuna.

A necessidade de resfriamento é uma das desvantagens nas operações com detectores semicondutores com cristais de germânio devido à portabilidade e as dimensões do sistema de arrefecimento que contém Nitrogênio líquido e está acoplado ao detector (VARGAS, TIMÓN, DÍAZ e SÁNCHEZ, 2002).

As principais características de um detector são a repetitividade que é a concordância de resultados, a reprodutibilidade que é o grau de concordância dos resultados, a estabilidade que é a conservação das características ao longo do tempo, a exatidão e a precisão que são os graus de concordância com o valor verdadeiro e entre si respectivamente, a sensibilidade que é a relação entre resposta do instrumento e estímulo e finalmente a importante eficiência que é a capacidade de conversão em sinais ou estímulos e interações entre a radiação e o meio detector (TAUHATA, SALATI, PRINZIO e PRINZIO, 2013).

No presente trabalho destacam-se as propriedades mais relevantes:

#### **i) Eficiência de detecção**

Nem todas as partículas emitidas por uma fonte radioativa atingem o volume sensível do detector, por isso é necessário relacionar o número de impulsos registrados pelo detector com o número de impulsos incidentes no detector. A eficiência de detecção é função das características do sistema de contagem (fonte / detector) e depende da composição do cristal cintilador e de suas propriedades físicas (dimensões, densidade e opacidade do cristal), da geometria de medida e das características da fonte de radiação. Várias definições de eficiência são de uso comum para os detectores de raios gama:

- Eficiência absoluta: é a razão entre o número de sinais registrados pelo detector e o número de raios gama emitido pela fonte;
- Eficiência intrínseca: é a razão entre o número de sinais registrados pelo detector e o número de raios gama que incidem sobre ele;

As eficiências ainda podem-se subdividir em Total e de Fotopico, e nesta, somente serão considerados os pulsos relativos à absorção total da energia do fóton incidente, enquanto na primeira são considerados todos os pulsos registrados pelo detector.

Quando uma fonte de radiação é posicionada próxima a um detector, a eficiência absoluta de fotopico pode ser calculada a partir da (1).

$$\varepsilon(E) = \frac{C}{t \cdot A \cdot P \cdot k_c} \quad (1)$$

Onde:

C – número de contagens registradas no detector na região fotoelétrica;

t – tempo de contagem (s);

A – atividade da fonte radioativa (Bq);

P – probabilidade de emissão para raios gama na energia “E”;

$k_c$  – constante de correção de decaimento.

A incerteza padrão relativa da eficiência é dada pela (2), desconsiderando as incertezas do tempo de contagem e da constante de correção de decaimento, pois são valores muitos pequenos.

$$\sigma\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial C} \cdot \sigma C\right)^2 + \left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial A} \cdot \sigma A\right)^2 + \left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial P} \cdot \sigma P\right)^2} \quad (2)$$

Onde:

$\sigma C$  – incerteza associada às contagens;

$\sigma A$  – incerteza associada à atividade;

$\sigma P$  – incerteza associada à probabilidade de emissão.

## 2.2. Eletrônica de detecção

A saída de um detector, em síntese, apresenta uma quantidade de carga elétrica que é proporcional à quantidade de energia da radiação por ele absorvida. O papel do sistema eletrônico é recolher aquela carga, medi-la e armazenar a informação. Assim sendo, quando em operação, o sinal na saída do cristal deve ser tratado de maneira que os fótons detectados possam ser distribuídos segundo sua energia.

A informação primária obtida é uma distribuição da energia depositada e com isso, após um tratamento, é possível obter informações do espectro de energia. Para efetuar a espectrometria, o sinal proveniente do detector necessita ser processado. Um esboço representativo de um sistema de medição para os detectores semicondutores HPGe é ilustrado na *Figura 1*.

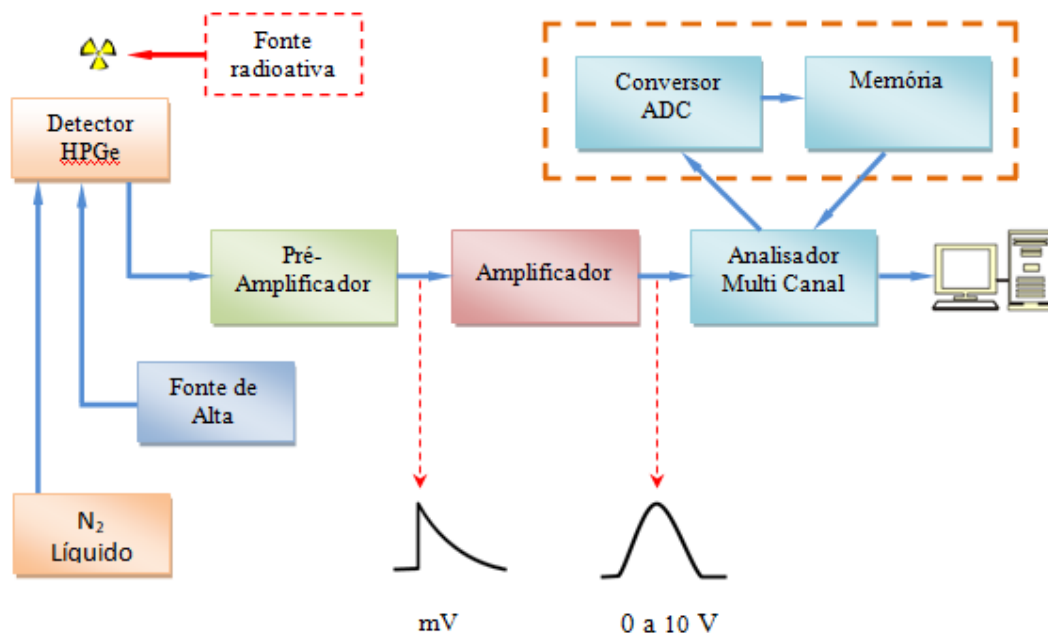


Figura 1: Sistema em espectrometria gama com detector de germânio.

### i) Pré-amplificador e Amplificador

O pré-amplificador e amplificador têm o papel de conformar o sinal de saída do detector para que com isto se possa medir facilmente a sua amplitude. Sendo assim, estes equipamentos devem atuar sincronizados de modo que se permita manter a linearidade entre a amplitude do sinal e a energia depositada no detector.

O pré-amplificador representa o elo entre o detector e a eletrônica para conformação do sinal. Isto é, ele deve integrar ao mesmo tempo a coleta de cargas e adaptar a alta impedância de saída do detector com a baixa impedância do cabo que o liga ao restante da eletrônica. Enquanto que o amplificador deve fazer a conformação do sinal entregue pelo pré-amplificador e aumentar a amplitude do sinal proveniente do pré-amplificador (normalmente menor que 1,0 V) para faixas de tensão mais convenientes (normalmente de 0 a 10 V) para análise posterior.

### ii) Analisador multicanal (AMC):

O processador AMC classifica e conta os pulsos conforme suas amplitudes. Os valores possíveis para a altura do sinal são armazenados de forma discreta num conjunto de canais. A relação altura de impulso versus canal deve ser linear. Como a incerteza sobre a medida da amplitude do sinal afeta a resolução do detector, é necessário ter um tempo de subida do sinal longo o suficiente a fim de integrar corretamente sua amplitude.

### 2.3. *Espectroscopia da radiação gama*

Inicialmente podemos considerar o processo de análise do espectro gama, em linhas gerais, como a interação e a geometria amostra-detector. Como os sinais gerados e atribuídos aos valores de energia são registrados e distribuídos em canais, os eventos ficam discriminados em faixas de energia, sendo que o detector de germânio HPGe fica na faixa entre 30 e 3000keV (GILMORE, 2008).

Quando se analisa um espectro com uma faixa de energia extensa devemos levar em conta que a eficiência da detecção não será constante ao longo desse espectro, sendo que a atmosfera ao redor do detector, número atômico das diferentes amostras emissoras e as geometrias envolvidas devem ser corrigidas através de curvas de eficiência (KNOLL, 2010).

Em conformidade com a estatística do evento e a eficácia do detector para o tipo de amostra de interesse ou interferências do equipamento, podemos escolher o tempo de contagem.

Num modelo teórico com absorção total do fóton pelo material do detector e sem ruídos inerentes aos equipamentos eletrônicos, os registros das aquisições dos espectros são linhas (KNOLL, 2010). Porém devido às imperfeições dos circuitos e perdas na transmissão dos dados ocorre uma dispersão que muda a forma do pico para uma forma gaussiana.

Para decaimentos complexos e com fontes muito próximas do detector é possível observar parte da energia dos fótons, ou toda ela, sendo adicionadas num mesmo fotopico. A esse fenômeno denominamos efeito de soma em cascata (GILMORE, 1995).

A relação entre o número das partículas ou fótons emitidos por segundo, dentro do volume definido ao redor da fonte e pela abertura do detector é denominada ângulo sólido e é expressa pela **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (TSOULFANIDIS,1995).

$$\Omega = \frac{N_p}{N_t} \quad (3)$$

Onde:

$N_p$  – Total de partículas por segundos dentro do espaço definido entre o contorno da fonte e a abertura do detector.

$N_t$  – Total de partículas por segundo provenientes da fonte

Sendo direta a relação entre o ângulo sólido com a distância da fonte ao detector, pode-se calcular este ângulo sólido para uma fonte pontual a certa distância de um detector cilíndrico conforme a (4) (4(KNOLL,2010)).

$$\Omega = 2\pi \left( 1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + a^2}} \right) \quad (4)$$

Onde:

$d$  – Distância da fonte pontual ao detector;

$a$  – Raio da abertura do detector.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Material

i) **Detector:** A aquisição dos dados foram realizados em um detector HPGe modelo GEM-45P4 com eficiência relativa de 45%, diâmetro do cristal de 66,7 mm e comprimento de 49,2 mm, resolução de 0,90 keV a 122 keV e 1,90 keV a 1,33 MeV, relação pico-compton de 64:1, relação FWHM a 1,33 MeV e tensão de operação positiva de 4000 V. O conjunto do detector pode ser visualizado na [Figura 2](#).



Figura 2: Detector de HPGe montado

ii) **Sistema de Espectrometria Baseado em um Detector HPGe:** Foi utilizado um conjunto de módulos eletrônicos usados para obtenção e processamento do sinal gerado pelo detector. As características do sistema espectrométrico utilizado são descritas a seguir:

- Pré-amplificador acoplado ao detector;

- Amplificador fabricado pela empresa ORTEC modelo 572, representado na



- *Figura 3a;*

Fonte de alta tensão fabricada pela empresa ORTEC modelo 659, representada na





- Figura 3
- [Figura 3b](#);

- Analisador MultiCanal (AMC) fabricado pela empresa ORTEC modelo 927, representado na



- *Figura 3c.*



Figura 3: Sistema de espectrometria: a) amplificador; b) fonte de alta tensão; c) analisador multi canal.

i) **Fontes Radioativas:** Foram utilizadas fontes de radiação gama e as suas características seguem na [Tabela 1](#).

Tabela 1: Dados das fontes padrões de radiação.

Fonte	Meia-Vida (anos)	Atividade (Bq/g)*	Massa (g)
<sup>133</sup> Ba	10,539	73118,752	2,579663
<sup>207</sup> Pb	32,900	6482,829	2,624403
<sup>134</sup> Cs	2,064	6975,578	2,643793
<sup>137</sup> Cs	30,050	48180,122	2,674788
<sup>152</sup> Eu	13,522	33162,143	2,495142
<sup>166m</sup> Ho	1,133E3	46775,439	2,633130
<sup>125</sup> Sb	2,758	250,097	2,707271

\*Atividade corrigida para a data de realização do experimento.

ii) **Seção de Teste:** Para a realização das medidas, foi utilizada uma sessão de teste de cloreto de polivinila (PVC) para posicionar as amostras. A seção de testes possui espaçadores que podem variar as distâncias entre 05 cm e 20 cm. A sessão de teste pode ser visualizada na *Figura 4*.



Figura 4: Aparato experimental montado ao redor do detector.

### 3.2. Métodos

Consiste na determinação da atividade de fontes puntiformes e/ou soluções, preparadas pela Divisão DIMET do IRD, a partir de curvas padrões de eficiência de fotopico do sistema de espectrometria gama, na faixa de 200 a 1800 keV, conforme *Tabela 2* ou a partir de um padrão de mesma natureza e geometria do radionuclídeo a ser calibrado.

O detector é colocado dentro de um castelo de forma a atenuar a influência da radiação de fundo sobre as taxas de contagens. As fontes padrões puntiformes, cujas energias cobrem a faixa de investigação, foram posicionadas na seção de teste que por sua vez foi instalado na direção do eixo longitudinal do cristal acima do detector, conforme *Figura 4*Figura 4. Essas fontes foram medidas a uma distância de 20 cm do detector de modo a minimizar as contribuições devidas ao efeito soma e o empilhamento de pulsos. O tempo de medição para cada fonte foi escolhido de modo que os erros associados se mantivessem inferiores a 0,5%, para obter uma boa estatística de contagem.

Tabela 2: Valores da energia com suas probabilidades de emissão.

Radio-nuclídeo	Energia (keV)	Probabilidade de Emissão (%)	Radio-nuclídeo	Energia (keV)	Probabilidade de Emissão (%)
<sup>133</sup> Ba	215,871	2,66	<sup>134</sup> Cs	604,72	97,63
<sup>166m</sup> Ho	244,697	7,55	<sup>125</sup> Sb	635,95	11,32
<sup>152</sup> Eu	259,736	1,08	<sup>137</sup> Cs	661,657	84,99
<sup>125</sup> Sb	276,399	7,13	<sup>166m</sup> Ho	670,526	5,34
<sup>166m</sup> Ho	280,463	29,54	<sup>166m</sup> Ho	691,253	1,32
<sup>166m</sup> Ho	300,741	3,73	<sup>166m</sup> Ho	711,697	54,9
<sup>152</sup> Eu	302,851	18,31	<sup>166m</sup> Ho	752,28	12,2
<sup>166m</sup> Ho	344,279	26,59	<sup>166m</sup> Ho	778,827	3,01
<sup>133</sup> Ba	356,013	62,05	<sup>152</sup> Eu	778,905	12,97
<sup>166m</sup> Ho	365,768	2,46	<sup>134</sup> Cs	795,86	85,47
<sup>166m</sup> Ho	380,452	1,52	<sup>134</sup> Cs	801,95	8,694
<sup>133</sup> Ba	410,956	11,35	<sup>166m</sup> Ho	810,286	57,3
<sup>152</sup> Eu	411,117	2,238	<sup>166m</sup> Ho	830,565	9,72
<sup>133</sup> Ba	427,874	29,55	<sup>152</sup> Eu	867,38	4,243
<sup>166m</sup> Ho	443,965	3,12	<sup>166m</sup> Ho	950,988	2,744
<sup>125</sup> Sb	451,54	2,915	<sup>152</sup> Eu	964,079	14,5
<sup>166m</sup> Ho	463,365	10,48	<sup>207</sup> Bi	1063,66	74,58
<sup>152</sup> Eu	464,798	1,25	<sup>152</sup> Eu	1112,08	13,41
<sup>125</sup> Sb	475,365	1,479	<sup>134</sup> Cs	1167,97	1,791
<sup>152</sup> Eu	529,825	9,4	<sup>152</sup> Eu	1212,95	1,416
<sup>166m</sup> Ho	563,246	8,342	<sup>152</sup> Eu	1299,14	1,633
<sup>125</sup> Sb	569,33	15,368	<sup>134</sup> Cs	1365,19	3,019
<sup>166m</sup> Ho	569,698	97,76	<sup>152</sup> Eu	1408,01	20,85
<sup>134</sup> Cs	570,995	5,43	<sup>207</sup> Bi	1770,23	6,871
<sup>166m</sup> Ho	600,597	17,76			

A expressão que calcula a eficiência de fotopico absoluta de um detector a uma energia é dada pela (1). No cálculo destas eficiências foram consideradas as radiações de fundo e as contribuições devidas às interações por Efeito Compton. Para cumprir este propósito o padrão deve emitir raios gama em energias bem discriminadas, ter conhecidas suas intensidades relativas com incerteza em torno de 1% e ter meia-vida longa.

A obtenção dos espectros para amostra e padrão é feita utilizando-se programa de aquisição de dados, Maestro for Windows, disponível no microcomputador, o qual é previamente calibrado de acordo com Procedimento PT02C-006: Teste de Desempenho para Sistema de Espectrometria Gama com Detector de Germânio.

#### 4. RESULTADOS

A curva de eficiência de fotopico absoluta em função da energia é mostrada na

*Figura 5*. Foi ajustada uma curva segundo a (1) no intervalo de 215,87 a 1770,23 keV, para a geometria de medida.

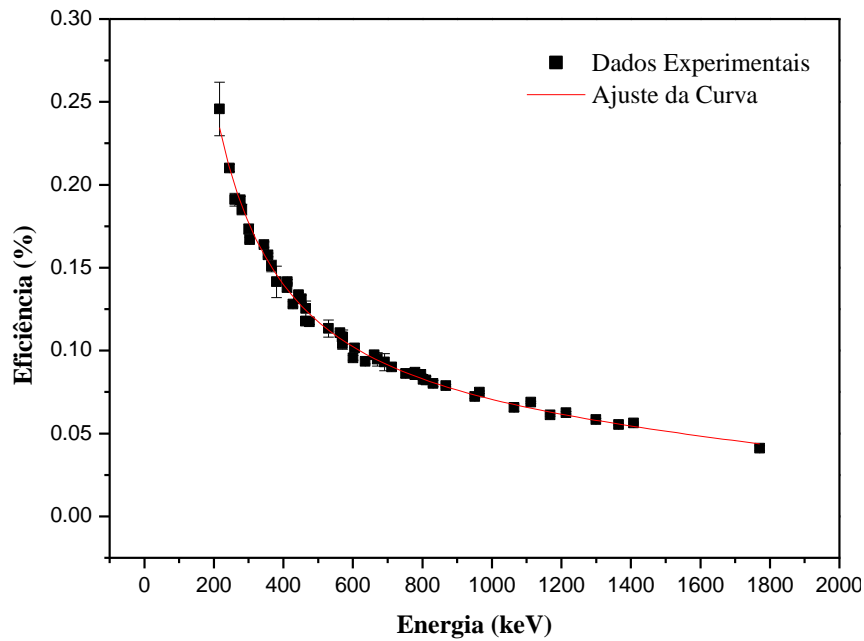


Figura 5: Curva de eficiência experimental.

Os coeficientes da (5) foram obtidos pelo método de mínimos quadrados e seus valores são apresentados na *Tabela 3* com o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) igual a 0,993.

$$\varepsilon = a + b \cdot E^2 + \frac{c}{E} \quad (5)$$

Onde:

$\varepsilon$  – eficiência (%);

$E$  – energia (keV);

$a, b, c$  – coeficientes de ajuste.

Tabela 3: Valores para os coeficientes do ajuste da (5).

COEFICIENTES	VALORES	INCERTEZA (%)
A	0,3297E-01	2,5
B	-0,4490E-08	8,2
C	0,4312E+02	0,9

Os pontos experimentais e os valores obtidos pelo ajuste mostraram boa concordância e apresentam um erro relativo máximo de 4,85% para a energia de 302,85 keV do Ba-133.

## 5. CONCLUSÃO

Os padrões utilizados e seus parâmetros nucleares são listados em Tabelas de Radionuclídeos (NUCLÉIDE, PTB). A DIMET dispõe dos padrões como os citados acima em geometria de ampola e puntiforme, rastreados ao Sistema Internacional de Referência (SIR/BIPM).

A forma da curva de eficiência em função da energia se mostra compatível com a teórica, mesmo utilizando-se apenas sete padrões de amostras foi possível realizar uma curva de eficiência com bom grau de concordância, visto que obtivemos um erro relativo máximo menor que 5%. Isto foi possível, pois amostras como a de Eu-152 que possui 14 emissões com boa probabilidade de emissão e com energias bem distribuídas pelo espectro indo de 121,78 keV até 1408 keV que foram utilizadas na construção da curva.

Este trabalho mostrou que a validade do método se reproduz mesmo que a quantidade de padrões não seja maior do que a utilizada, o que melhoraria a perfeição da curva. A presença de um multi-emissor gama que cobre uma ampla faixa de energia, se distribuindo entre os canais do sistema de detecção, permite que a falta de radionuclídeos com baixas energias de emissão, tal como o Amerício, não altere a curva. O resultado não diverge dos valores esperados, mostrando conformidade e comprovando que a técnica de espectrometria gama por meio de uma curva de eficiência é uma excelente alternativa para uma determinação da atividade de amostras, na mesma geometria de aquisição. Isto sempre deve ser levado em conta, pois pode ser considerado um fator relevante que induz às variações na eficiência do detector.

## REFERÊNCIAS

GILMORE, G.R. Practical Gamma-Ray Spectrometry. 2nd Edition. United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2008.

KNOLL, G. F. Radiation Detection and Measurements. 4th Edition. United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2010.

TAUHATA, L.; SALATI, I. P. A.; PRINZIO, R. D.; PRINZIO, A. R.D. DOSIMETRIA RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA FUNDAMENTOS. Apostila. Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD- CNEN/RJ), Rio de Janeiro, 2013.

TSOULFANIDIS, N. Measurement and Detection of Radiation. 2 ed. Taylor & Francis, 1995.

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, p. 439-443, 2002.