



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**Desenvolvimento de uma metodologia para a caracterização de tambores de rejeitos radioativos**

**Josenilson Barbosa de Lima**

**Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Aplicações**

**Orientador:**

**Prof. Dr. Ademar José Potiens Júnior**

**São Paulo  
2016**



**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
**Autarquia associada à Universidade de São Paulo**

**Desenvolvimento de uma metodologia para a caracterização de tambores de rejeitos  
radioativos**

**Josenilson Barbosa de Lima**

**Dissertação apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau de  
Mestre em Ciências na Área  
de Tecnologia Nuclear - Aplicações**

**Orientador:**

**Prof. Dr. Ademar José Potiens Júnior**

**Versão Corrigida**  
**Versão Original disponível no IPEN**

**São Paulo**  
**2016**

**A meu pai José Barbosa de Lima (em memória)**

**À minha mãe Sebastiana Marcos Ferreira de Lima (em memória)**

**Aos meus irmãos**

## **AGRADECIMENTOS**

*Ao Dr. Ademar José Potiens Júnior pela orientação;*

*À Dr<sup>a</sup>. Solange Kazumi Sakata por todo apoio e incentivo;*

*Ao Dr. José Claudio Dellamano pela orientação no início dos trabalhos;*

*À Dr<sup>a</sup>. Marina Fallone Koskinas pelo auxílio na realização deste trabalho;*

*À Dr<sup>a</sup>. Felicia Del Gallo Rocha por ter me concedido a oportunidade de iniciar os estudos científicos;*

*Ao Dr. Hidetoshi Takiishi pelo incentivo;*

*Aos funcionários da Gerência de Rejeitos Radioativos do IPEN/CNEN-SP por todo apoio e ajuda na realização deste trabalho;*

*Aos funcionários da oficina por terem atendido prontamente as solicitações para confecção de peças e ferramentas para a realização do trabalho;*

*A todo pessoal da Comissão de Pós-Graduação;*

*À minha família pela ajuda e incentivo;*

*Aos meus amigos Genivaldo, Robson e Mauro pelo constante apoio;*

*Aos amigos da Gerência de Rejeitos Radioativos do IPEN/CNEN-SP pelo apoio e ajuda;*

*Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN/CNEN-SP por permitir o desenvolvimento deste trabalho;*

*Ao CNPq pelo auxílio financeiro;*

*À empresa Íon consultoria em proteção radiológica e radiações ionizantes pelo apoio e compreensão nos momentos finais deste trabalho;*

*A todos que contribuíram de forma direta ou indireta na realização deste trabalho;*

*E por fim um agradecimento especial à Cultura Hip-Hop por ter despertado em mim o interesse pelos estudos e busca de conhecimentos e por ter sido importante na formação do meu caráter e personalidade.*

# **DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DE TAMBORES DE REJEITOS RADIOATIVOS**

Josenilson Barbosa de Lima

## **RESUMO**

Rejeitos radioativos são gerados em todas as etapas do ciclo do combustível nuclear e em instituições que fazem uso de elementos radioativos. No Brasil, para que possam atender a legislação vigente, eles devem ser devidamente gerenciados e tratados. A caracterização é a etapa do gerenciamento de rejeitos radioativos que certifica e complementa as informações presentes no documento de identificação fornecido pelo gerador dos rejeitos radioativos. O objetivo desse trabalho foi desenvolver uma metodologia para caracterização de tambores de rejeitos radioativos. Neste trabalho foi utilizada a técnica de espectrometria gama associada ao método de Monte Carlo para obter e estabelecer uma relação entre as eficiências de contagens teóricas e experimentais para quatro tambores de calibração com densidades diferentes, preparados com nove tubos de PVC em seu interior. O detector de HPGe utilizado foi posicionado em três diferentes distâncias em relação a extremidade do tambor de calibração. A utilização do método de Monte Carlo mostrou-se adequado a metodologia proposta neste trabalho.

# **DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR CHARACTERIZATION OF RADIOACTIVE WASTE DRUMS**

Josenilson Barbosa de Lima

## **ABSTRACT**

Radioactive wastes are generated at all stages of the nuclear fuel cycle and institutions that make use of radioactive elements. In Brazil, so that they can meet the current legislation, they must be properly managed and treated. The characterization is the stage of radioactive waste management that certifies and complements the information in the identification document provided by the radioactive waste generator. The aim of this study was to develop a methodology for characterization of radioactive waste drums. In this work we used the gamma spectrometry technique associated with the Monte Carlo method to obtain and establish a relationship between the efficiencies of theoretical and experimental scores for four calibration drums with different densities prepared with nine PVC tubes inside. The HPGe detector used was positioned at three different distances from the end of the calibration drum. Using the Monte Carlo method was appropriate to the methodology proposed in this work.

## Sumário

	<b>Página</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 Generalidades .....	1
1.2 Objetivo .....	4
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>6</b>
2.1 Etapas do gerenciamento de rejeitos radioativos .....	6
2.1.1 Caracterização de rejeitos radioativos .....	7
2.1.2 Ensaios não destrutivos .....	7
2.2 Interação da radiação gama com a matéria .....	8
2.2.1 Espalhamento coerente .....	9
2.2.2 Efeito fotoelétrico .....	9
2.2.3 Efeito Compton .....	10
2.2.4 Produção de pares .....	10
2.3 Eficiência de contagens .....	10
2.4 Método de Monte Carlo .....	12
2.4.1 Arquivo de entrada do software MCNP .....	13
2.4.2 Parâmetro GEB .....	14
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
3.1 Método de Monte Carlo .....	15
3.2 Espectrometria das radiações gama.....	17
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>19</b>

4.1	Simulação .....	20
4.1.1	Modelagem do sistema de análise.....	20
4.1.2	Modelagem do tambor.....	20
4.1.3	Modelagem do detector.....	21
4.1.4	Modelagem do colimador.....	21
4.1.5	Modelagem da fonte.....	22
4.2	Definição das combinações analisadas.....	23
4.3	Arranjo experimental.....	24
4.4	Preparo dos tambores de calibração.....	24
4.5	Preparo das fontes radioativas.....	27
4.6	Validação do método.....	28
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>30</b>
5.1	Definição da quantidade de combinações.....	30
5.2	Combinações utilizando-se uma casca do tambor de calibração.....	31
5.2.1	Estudo de diferentes distâncias tambor - detector.....	34
5.2.2	Estudo de diferentes densidades para a combinação F1C1D15.....	36
5.2.3	Análise por espectrometria gama para a combinação F1C1D15.....	39
5.3	Combinações utilizando-se duas cascas do tambor de calibração.....	41
5.3.1	Primeiro grupo de Combinações utilizando-se duas cascas do tambor de 200 L.....	42

5.3.2	Estudo de diferentes distâncias para o primeiro grupo de combinações com duas cascas do tambor de 200 L.....	45
5.3.3	Estudo de diferentes densidades para a combinação F2C1-2D15.....	47
5.3.4	Análise por espectrometria gama para a combinação F2C1-2D15.....	49
5.4	Combinações utilizando-se três cascas do tambor de 200 L.....	51
5.4.1	Estudo de diferentes distâncias para o primeiro grupo de Combinações utilizando-se três cascas do tambor de 200 L.....	53
5.4.2	Análise por espectrometria gama para a combinação F3C1-2-3D15.....	55
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>57</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>58</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
FIGURA 1. Etapas do gerenciamento de rejeitos radioativos .....	6
FIGURA 2. Probabilidades de interação para três dos mais importantes mecanismos de interação da radiação gama.....	9
FIGURA 3. Possibilidades dos fótons emitidos interagirem com o detector.....	12
FIGURA 4. Visualização de todos os componentes do sistema de análise .....	22
FIGURA 5. Diferentes posições de medidas e distância do tambor em relação ao detector.....	23
FIGURA 6. Detector HPGe, eletrônica e colimador.....	24
FIGURA 7. Preparo do tambor de calibração preenchido com papel compactado .....	25
FIGURA 8. Tambor de calibração preenchido com água .....	26
FIGURA 9. Tambor de calibração preenchido com areia bruta .....	26
FIGURA 10. Tambor de calibração preenchido com argamassa de cimento.....	27
FIGURA 11. Preparo das fontes radioativas de $^{152}\text{Eu}$ .....	28
FIGURA 12. Sistema de caracterização de tambores de rejeito radioativo .....	29
FIGURA 13. Combinações possíveis considerando-se as nove cascas do tambor de calibração.....	32
FIGURA 14. Comportamento das curvas de eficiência.....	34
FIGURA 15. Eficiências teóricas obtidas para as combinações F1C1D15, F1C1D50 e F1C1D100.....	36
FIGURA 16. Eficiências teóricas obtidas para as densidades de $0,5\text{ g.cm}^{-3}$ , $1,0\text{ g.cm}^{-3}$ , $1,25\text{ g.cm}^{-3}$ e $2,0\text{ g.cm}^{-3}$ .....	38

FIGURA 17. Curva de eficiência experimental para o detector de HPGe posicionado a 15 cm de distância da extremidade do tambor de calibração com densidade de $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$ .....	39
FIGURA 18. Espectro de energia experimental da combinação F1C1D15.....	40
FIGURA 19. Comparação das eficiências teóricas e experimentais para a combinação F1C1D15 do tambor de calibração com densidade de $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$ .....	41
FIGURA 20. Primeiro grupo de combinações considerando-se duas cascas do tambor de calibração.....	42
FIGURA 21. Comportamento das eficiências para o primeiro grupo de combinações considerando-se duas fontes de $^{152}\text{Eu}$ .....	44
FIGURA 22. Eficiências teóricas obtidas para as combinações F2C1-2D15, F2C1-2D50 e F2C12D100.....	46
FIGURA 23. Eficiências teóricas obtidas para as densidades de $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$ , $1,0 \text{ g.cm}^{-3}$ , $1,25 \text{ g.cm}^{-3}$ e $2,0 \text{ g.cm}^{-3}$ , utilizando-se a combinação F2C1-2D15.....	48
FIGURA 24. Espectro experimental da combinação F2C1-2D15.....	49
FIGURA 25. Comparação das eficiências teóricas e experimentais para a combinação F2C1-2D15 do tambor de calibração com densidade de $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$ .....	50
FIGURA 26. Primeiro grupo de combinações considerando três cascas do tambor de 200 L.....	51
FIGURA 27. Comportamento das eficiências para algumas combinações do primeiro grupo considerando-se três fontes de $^{152}\text{Eu}$ .....	53
FIGURA 28. Eficiências teóricas obtidas para as combinações F3C1-2-3D15 e F3C1-2-3D50.....	55
FIGURA 29. Espectro experimental da combinação F3C1-2-3D15.....	55
FIGURA 30. Comparação das eficiências teóricas e experimentais para a combinação F3C1-2-3D15 do tambor de calibração de $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$ .....	56

## LISTA DE TABELAS

	<b>Página</b>
TABELA 1. Dimensões do tambor de 200 L .....	20
TABELA 2. Dimensões do detector .....	21
TABELA 3. Dimensões do colimador de chumbo .....	21
TABELA 4. Dimensões da fonte de $^{152}\text{Eu}$ .....	22
TABELA 5. Diferentes distâncias em relação ao centro do tambor.....	25
TABELA 6. Eficiências teóricas obtidas para as nove combinações do tambor de calibração.....	32
TABELA 7. Eficiências experimentais obtidas para as nove combinações do tambor de calibração para as energias consideradas.....	33
TABELA 8. Eficiências experimentais obtidas para as combinações F1C1D15, F1C1D50 e F1C1D100.....	35
TABELA 9. Eficiências teóricas obtidas para as combinações F1C1D15, F1C1D50 e F1C1D100.....	35
TABELA 10. Eficiências experimentais obtidas considerando-se diferentes densidades para a combinação F1C1D15.....	37
TABELA 11. Eficiências teóricas obtidas considerando-se diferentes densidades para a combinação F1C1D15.....	37
TABELA 12. Relação entre as eficiências teóricas e experimentais utilizando-se a combinação F1C1D15.....	40
TABELA 13. Eficiências teóricas obtidas para o primeiro grupo de combinações considerando-se duas cascas do tambor de 200 L.....	43
TABELA 14. Eficiências experimentais obtidas para o primeiro grupo de combinações utilizando-se duas fontes padrão de $^{152}\text{Eu}$ .....	43

TABELA 15. Eficiências teóricas obtidas para as combinações F2C1-2D15, F2C1-2D50 e F2C1-2D100.....	45
TABELA 16. Eficiências experimentais obtidas para as combinações F2C1-2D15, F2C1-2D50 e F2C1-2D100.....	46
TABELA 17. Eficiências teóricas obtidas considerando-se diferentes densidades para a combinação F2C1-2D15.....	47
TABELA 18. Eficiências experimentais obtidas considerando-se diferentes densidades para a combinação F2C1-2D15.....	48
TABELA 19. Relação entre as eficiências teóricas e experimentais utilizando-se a combinação F2C1-2D15.....	50
TABELA 20. Eficiências teóricas obtidas simulando-se as energias de interesse em três diferentes cascas do tambor de calibração.....	52
TABELA 21. Eficiências experimentais obtidas para as combinações utilizando-se três fontes padrão de <sup>152</sup> Eu.....	52
TABELA 22. Eficiências teóricas obtidas utilizando-se as combinações F3C1-2-3D15 e F3C1-2-3D50.....	54
TABELA 23. Eficiências experimentais obtidas para as combinações F3C1-2-3D15 e F3C1-2-3D50.....	54
TABELA 24. Relação entre as eficiências teóricas e experimentais utilizando-se a combinação F3C1-2-3D15.....	56

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Generalidades

O avanço científico e tecnológico observado ao longo de décadas permitiu a utilização da energia nuclear em uma ampla variedade de aplicações, como por exemplo, na pesquisa, medicina, indústria e geração de energia por fissão nuclear. Somada a outras atividades realizadas pelo homem essa prática tem como desvantagem a geração de rejeitos radioativos que devem ser tratados adequadamente e necessitam de um gerenciamento que garanta a proteção da saúde do ser humano e também do meio ambiente atualmente e no futuro.

Conforme o glossário de gerenciamento de rejeitos radioativos publicado pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) (IAEA, 2003), a definição de rejeito radioativo é: “qualquer material que contenha ou esteja contaminado com radionuclídeos em concentrações ou valores de atividade maiores que os limites de isenção estabelecidos pela autoridade competente”. E o gerenciamento de rejeitos radioativos é definido como “todas as atividades, administrativas e operacionais, que estão envolvidas no manuseio, pré-tratamento, tratamento, condicionamento e estocagem e deposição de rejeitos de uma instalação nuclear”.

No Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), é a instituição responsável pelo recebimento, tratamento e armazenamento dos rejeitos radioativos, ela também define o rejeito radioativo como: “qualquer

material resultante de atividades humanas, que contenha radionuclídeos em quantidades superiores aos limites de isenção de acordo com a Norma CNEN-NN-8.01”, substituída em 2014 pela resolução CNEN-Nº167 (CNEN, 2014) “e para o qual a reutilização é imprópria ou ainda não prevista” (CNEN, 1990). Esses rejeitos têm origem em unidades que produzem combustível nuclear, as usinas Angra I e Angra II, e instalações que utilizam materiais radioativos como clínicas médicas, hospitais, indústrias, universidades, centros de pesquisa, etc.

Alguns parâmetros utilizados para a classificação dos rejeitos radioativos são os níveis de atividades e as meias vidas dos radionuclídeos presentes nos rejeitos (IAEA, 2009). Na prática, são diversos os critérios que podem ser empregados para essa classificação, como por exemplo, o estado físico, as características físico-químicas entre outros. No Brasil é comum que estes sejam subdivididos em três classes: rejeitos de alta atividade, rejeitos de média atividade e rejeitos de baixa atividade (Hiromoto et al., 1999). Em 2014 a CNEN publicou a resolução 167/14, em que os rejeitos radioativos são classificados conforme seus níveis e natureza da radiação, bem como suas meias vidas. (CNEN, 2014).

O armazenamento dos rejeitos radioativos gerados no Brasil foi iniciado a aproximadamente 40 anos e uma parcela dos tambores estocados apresentam precariedade em sua caracterização por falta de metodologia (Potiens Júnior, 2005) e equipamentos adequados. Esses tambores vêm sendo armazenados em depósitos intermediários, em alguns institutos da CNEN e nas usinas nucleares de Angra I e Angra II.

A Gerência de Rejeitos Radioativos (GRR) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) é responsável por gerir todos os rejeitos radioativos gerados na instituição e também aqueles provenientes de hospitais, indústrias, universidades, etc. O IPEN possui aproximadamente 1600 tambores com rejeitos já tratados que estão armazenados em dois galpões, onde aproximadamente 50 % são de rejeitos compactáveis, 20 % de rejeitos não compactáveis e os 30 % restantes contendo rejeito líquido, sólido úmido e sólido

biológico immobilizados em uma matriz sólida, além de algumas fontes exauridas encapsuladas (Dellamano, 2005).

Entre as várias etapas que compreendem a gerência dos rejeitos radioativos, a caracterização primária é a etapa em que é produzida a documentação que contém as informações das características físicas, químicas e radiológicas dos rejeitos e de posse dessas informações é possível adotar um método de tratamento adequado para que esses rejeitos possam obedecer aos critérios de aceitação para disposição final (CNEN, 2002).

Métodos não destrutivos utilizando espectrometria gama e modelos estatísticos vêm sendo desenvolvidos na GRR para a caracterização final de tambores de rejeitos radioativos. O programa de caracterização de rejeitos foi iniciado há alguns anos com a implantação do Laboratório de Caracterização de Rejeitos Radioativos (LCRR), que possui equipamentos que permitem a espectrometria gama e análise de emissores alfa e beta. O LCRR desenvolveu recentemente uma metodologia para caracterização de tambores de rejeito radioativo utilizando-se redes neurais artificiais (Potiens Júnior, 2005).

Outra técnica matemática utilizada é o método de Monte Carlo, que simula o transporte de radiação no meio, permitindo que sejam efetuadas simulações de sistemas complexos de maneira considerada simples em que para realizar uma simulação basta que seja feito o uso de números aleatórios (Novo e Dias, 2011).

Um código bem difundido no meio acadêmico que utiliza o método de Monte Carlo para transporte de radiação é o *Monte Carlo N-Particle Transport* (MCNP), que possui bibliotecas de seção de choque para nêutrons, fótons e elétrons (Briesmeister, 2000). Devido a sua simplicidade, alguns autores têm feito uso do método de Monte Carlo como ferramenta de caracterização de tambores de rejeitos radioativos (Savidou et al., 2007).

## 1.2 Objetivo

O objetivo geral desse trabalho é desenvolver uma metodologia para caracterização de tambores de rejeitos radioativos de 200 L, para aplicação na GRR, utilizando-se a técnica de espectrometria gama e simulações pelo método de Monte Carlo para obter as curvas de eficiência do detector de Germânio Hiperpuro do sistema de caracterização de tambores de rejeitos radioativos.

A motivação para o desenvolvimento desse trabalho baseou-se na necessidade de se caracterizar os tambores de rejeitos radioativos sólidos objeto de estudo desse trabalho que encontram-se armazenados no depósito intermediário do IPEN/CNEN-SP.

O desenvolvimento dessa metodologia de análise permite, além do cumprimento das exigências legais de caracterização, a identificação de tambores que contenham rejeitos com níveis de atividade abaixo dos limites de isenção, o que possibilitará sua reclassificação e descarte como resíduo não radioativo, minimizando o volume e reduzindo custos de armazenamento temporário, tratamento e disposição final (IAEA, 1988; IAEA, 1998).

Os objetivos específicos são:

- Efetuar a divisão dos tambores de calibração em nove regiões volumétricas com simetria radial denominadas cascas;
- Obter as eficiências teóricas e experimentais para cada posição de medida;
- Realizar os estudos de diferentes distâncias para as combinações que apresentarem os melhores desempenhos;
- Realizar os estudos de diferentes densidades para as combinações que apresentarem os melhores desempenhos;

- Obter e comparar os resultados teóricos e experimentais e assim estabelecer uma relação entre eles.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Etapas do gerenciamento de rejeitos radioativos

Todas as atividades que envolvem a utilização de materiais radioativos, em alguma etapa do processo, geram rejeitos classificados como radioativos. Esses rejeitos são submetidos a diferentes etapas de gerenciamento e estão armazenados em embalagens que podem ser tambores de aço com capacidade para 200 L.

A FIG.1 foi adaptada de (Hiromoto et al., 1999) e demonstra as etapas do gerenciamento de rejeitos radioativos.

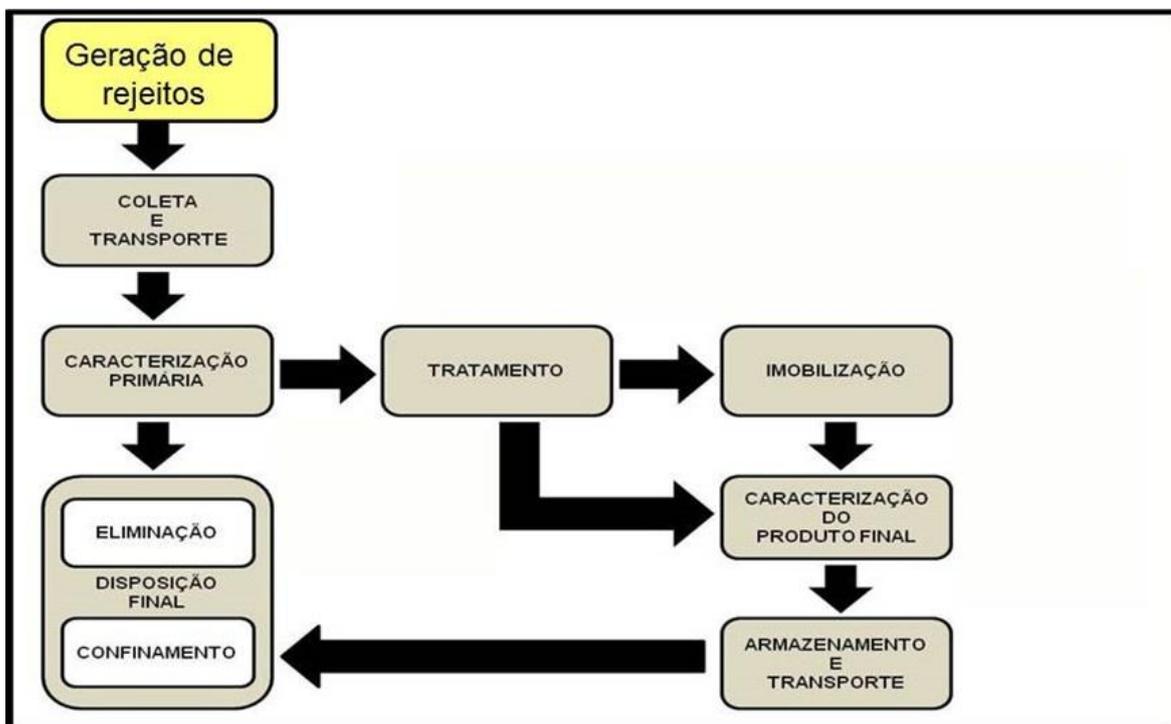


FIGURA 1 - Etapas do gerenciamento de rejeitos radioativos

### **2.1.1 Caracterização de rejeitos radioativos**

A caracterização radioisotópica de rejeitos radioativos pode ser definida como um levantamento de informações, de modo que seja possível certificar e complementar os dados presentes no documento de identificação, fornecido pelo responsável gerador dos rejeitos, e tem por finalidade determinar características importantes como propriedades físicas, químicas, biológicas e radiológicas dos rejeitos (Hiromoto et al., 1999). A Agência Internacional de Energia Atômica, publicou um guia que estabelece métodos de caracterização, recomendando três principais métodos de caracterização de rejeitos radioativos que são: Conhecimento dos processos envolvidos na geração dos rejeitos, ensaios não destrutivos e análise destrutiva (IAEA, 2007).

### **2.1.2 Ensaios não destrutivos**

Ensaios não destrutivos para a caracterização de tambores de rejeitos radioativos vêm sendo desenvolvidos na GRR do IPEN combinando espectrometria das radiações gama com métodos matemáticos e estatísticos. Esses métodos apresentam vantagens se comparados com métodos destrutivos, que apesar de serem mais precisos em seus resultados, são também mais caros e não são considerados fáceis do ponto de vista da proteção radiológica. (Ridikas et al., 2005).

A análise não destrutiva da atividade isotópica contida em tambores de rejeitos radioativos é amplamente obtida por meio de técnicas como escaneamento gama segmentado, onde geralmente assume-se que a matriz e a atividade estão distribuídas de forma uniforme em cada segmento do tambor que é analisado. Alguns autores em um estudo descrevem um método para quantificar a atividade e concentração de isótopos emissores gama em tambores de rejeitos radioativos, com base na análise da taxa de contagem e dependência angular, enquanto o tambor é rotacionado em escaneamento gama segmentado, além de determinar as propriedades de atenuação da matriz do rejeito (Bay et al., 2009).

## 2.2 Interação da radiação gama com a matéria

As radiações caracterizadas como ionizantes estão presentes em nosso dia a dia, sendo utilizadas em diferentes processos de análises na área industrial e também na medicina. A compreensão das diferentes formas de interação e detecção torna-se um fator importante para que esse conhecimento possa ser utilizado de forma segura em benefício dos seres humanos e do meio ambiente. Radiação gama origina-se de processos de desexcitações nucleares, não possuem carga elétrica e em função dessa característica não realiza interações coulombiana com o meio material. As probabilidades de interação dependem das características da radiação e do meio absorvedor e esta probabilidade de interação geralmente é expressa como uma grandeza conhecida como seção de choque.

Existe uma ampla variedade de possibilidades de a radiação gama interagir com o meio, no entanto apenas quatro desses mecanismos de interação têm importância maior para a espectrometria das radiações gama, são eles: espalhamento coerente, efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de pares.

As probabilidades de ocorrência de três desses mecanismos principais de interação da radiação gama estão apresentadas na FIG.2, que relaciona o número atômico  $Z$  do meio absorvedor em função da energia da radiação gama (Knoll, 1999).

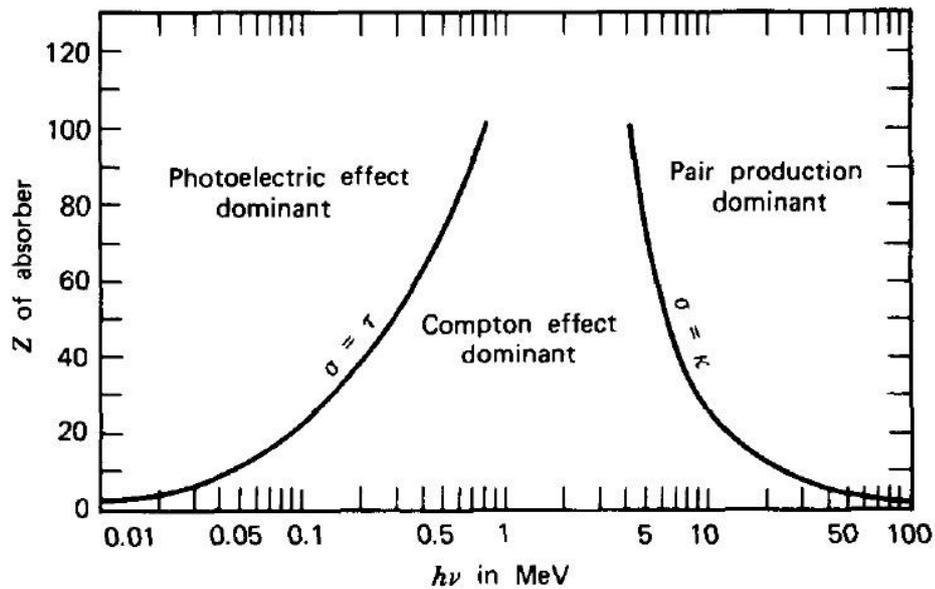


FIGURA 2 - Probabilidades de interação para três dos mais importantes mecanismos de interação da radiação gama

### 2.2.1 Espalhamento coerente

Também conhecido como espalhamento Rayleigh, consiste de um processo de interação em que o fóton interage com um elétron orbital por meio de uma colisão elástica não transferindo energia para o elétron alvo, sofrendo apenas uma mudança em sua trajetória. Esse tipo de interação tem uma maior probabilidade de ocorrer com materiais que possuem um número atômico alto, como por exemplo, o Chumbo (Pb), associados a fótons de baixa energia. Como não há perda de energia do fóton é possível calcular apenas o ângulo de deflexão.

### 2.2.2 Efeito fotoelétrico

No efeito fotoelétrico, o fóton incidente transfere toda a sua energia sendo totalmente absorvido por um elétron orbital fortemente ligado ao átomo.

Esse elétron ao adquirir energia é ejetado com energia cinética correspondente à energia do fóton incidente menos a energia de ligação do elétron orbital ao átomo.

### **2.2.3 Efeito Compton**

O processo de interação da radiação gama conhecido como efeito Compton ou (espalhamento inelástico), consiste da interação de um fóton com um elétron orbital ligado fracamente ao átomo. O fóton ao interagir transfere parte de sua energia ao elétron alvo que é ejetado do átomo, já o fóton incidente continua sua trajetória em outra direção com energia menor.

### **2.2.4 Produção de pares**

Este processo de interação só ocorre se o fóton incidente possuir energia correspondente a 1.022 keV que equivale ao dobro da massa de repouso do elétron. Nesse tipo de interação um fóton incidente interage com o campo elétrico do núcleo do átomo e toda sua energia é convertida em massa de repouso e energia cinética de um par de partículas, (elétron – pósitron). Esse efeito resulta da interação do fóton incidente com o campo eletromagnético do átomo, ocorrendo normalmente nas proximidades do núcleo atômico, esse efeito pode também ser resultante de interações do fóton com o campo eletromagnético de qualquer partícula carregada (Costa, 2010).

## **2.3 Eficiência de contagens**

A obtenção da eficiência de contagem de um detector de radiação constitui uma das principais dificuldades nos sistemas de caracterização de tambores de rejeitos radioativos, por tratar-se de um parâmetro que se relaciona com diferentes variáveis. É conveniente subdividir a eficiência de contagens em

duas categorias: Eficiência absoluta e Eficiência intrínseca. Eficiência absoluta é definida da seguinte forma.

$$\varepsilon_{abs} = \frac{\text{Número de pulsos registrados}}{\text{Número de fótons emitidos pela fonte}} \quad (1)$$

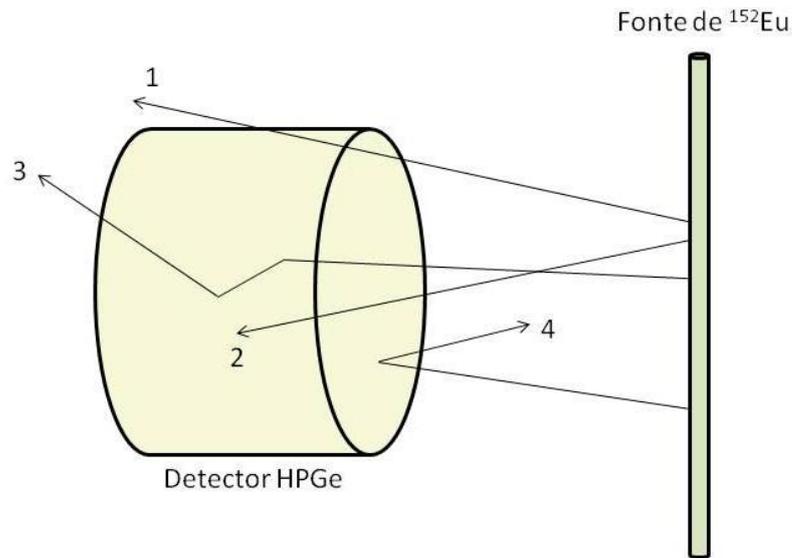
A eficiência absoluta está relacionada com as propriedades do detector, e com a geometria de contagens, como por exemplo, distância fonte detector.

A eficiência intrínseca é definida como:

$$\varepsilon_{int} = \frac{\text{Número de pulsos registrados}}{\text{Número de fótons incidentes no detector}} \quad (2)$$

A eficiência intrínseca de um detector depende principalmente do material do detector, da energia da radiação e da geometria do detector. (Knoll, 1.999).

Não é correto assumir que a radiação gama é registrada quando invade o volume ativo do detector, pelo fato destas radiações percorrerem grandes distâncias entre as interações. A FIG.3 sem a representação da blindagem, exemplifica como que estas radiações podem interagir com o detector.



*FIGURA3 – Possibilidades dos fótons emitidos interagirem com o detector*

A radiação gama pode passar diretamente e não causar interações ao invadir o volume ativo do detector, como no caso do fóton 1 mostrado na FIG.3. Uma situação ideal ocorre com o fóton 2 que interage totalmente com o detector, transferindo toda sua energia para o meio, outra situação ocorre com o fóton 3, que transfere apenas parte de sua energia, produzindo um sinal fraco que pode estar abaixo do nível de discriminação do detector que é ajustado para filtrar o ruído eletrônico e dessa forma não ser registrado pela eletrônica do sistema. Em outra situação a radiação gama pode ser impedida de entrar no volume ativo do detector como no caso do fóton 4, sendo espalhado em outra direção.

## 2.4 Método de Monte Carlo

A corrida por um desenvolvimento bélico nuclear na década de 1940 permitiu o surgimento do método de Monte Carlo, desenvolvido por pesquisadores de Los Alamos. O método ganhou esse nome devido sua familiaridade com jogos de azar exemplificado pela roleta, comum nos cassinos de Mônaco, esse jogo faz uso de uma amostragem aleatória em um determinado espaço amostral.

A simulação pelo método de Monte Carlo é um processo de amostragem que permite a observação do desempenho de uma variável de interesse em função do comportamento de outras variáveis e suas respectivas incertezas. Apesar de ser considerado um conceito simples, sua operacionalização requer o auxílio de métodos matemáticos. O desenvolvimento conceitual do modelo ou do problema a ser estudado é uma etapa do processo de simulação.

Entre os modelos que podem ser simulados utilizando-se o método de Monte Carlo está, por exemplo, o transporte de radiação através de meios materiais, com base em bibliotecas de seções de choque que conceitualizam as probabilidades das radiações estudadas interagirem de determinada maneira com o meio material durante sua trajetória, desde o surgimento por emissão até sua aniquilação ou fuga do sistema de análise.

#### **2.4.1 Arquivo de entrada do software MCNP**

O arquivo de entrada utilizado nas simulações MCNP é basicamente dividido em três diferentes seções. A primeira seção é composta por todas as células volumétricas dos componentes considerados na simulação, a segunda seção é preenchida com os planos e cilindros que definem as células consideradas na seção anterior e a terceira seção é composta pela definição dos materiais dos componentes, as características da fonte radioativa e da simulação.

As características da fonte radioativa como energia e posição são definidas por meio do General Source Card (SDEF), já o cartão E8 relaciona as energias de interesse com os 8.192 canais do sistema de análise. Características especiais podem ser atribuídas às simulações com o uso do cartão Special Treatments for Tallies (FT). Já o número de histórias simuladas é definido no cartão History Cutoff (NPS). O software MCNP simula uma história por vez, lembrando que uma história corresponde a toda a trajetória de uma emissão

radioativa desde o seu nascimento até sua morte por aniquilação total ou fuga do sistema.

### **2.4.2 Parâmetro GEB**

O código MCNP por meio do cartão FT permite a utilização do parâmetro Gaussian Energy Broadening (GEB), que relaciona a energia com o FWHM, que é a medida da largura a meia altura do pico de absorção total de energia. Essa função fornece o formato Gaussiano de cada pico simulado e também permite que os resultados teóricos sejam obtidos utilizando-se a mesma resolução em energia do arranjo experimental.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Método de Monte Carlo

Os avanços ocorridos na área computacional permitiram que o método de Monte Carlo pudesse se tornar uma alternativa importante para complementar a calibração experimental em eficiência de detectores de Germânio Hiperpuro (HPGe). Pode-se considerar que o método foi amplamente testado, pois muitos autores vêm utilizando essa importante ferramenta em seus trabalhos há muitos anos (Laborie et al., 2002) e (Kanawati et al., 2013).

Toma e colaboradores utilizaram o software GESPECOR, em um estudo de calibração de um sistema de análise de rejeito radioativo, e com base em seus resultados concluíram que o software pode ser aplicado com sucesso para a calibração de um sistema de caracterização de tambores de rejeitos radioativos (Toma et al., 2007).

Kalfas e Tsoulou fizeram uso do Programa SIMULATE, como ferramenta de espectrometria das radiações gama, comparando resultados experimentais com teóricos para três tipos de detectores e diferentes fontes radioativas. Para o detector de HPGe e Fluoreto de Bário ( $\text{BaF}_2$ ), foi utilizada uma fonte preparada com (93% de  $^{152}\text{Eu}$  e 7% de  $^{154}\text{Eu}$ ), já para o detector de iodeto de sódio dopado com tálio ( $\text{NaI(Tl)}$ ) foi utilizada uma fonte mista preparada com (21% de  $^{22}\text{Na}$  e 79% de  $^{207}\text{Bi}$ ). Como conclusão observaram que o Programa SIMULATE pode ser utilizado para testar a capacidade de resposta de detectores de HPGe e cintiladores inorgânicos, de modo rápido e de fácil utilização, além de revelar numa fase precoce possíveis danos no detector, e finalmente o programa

de simulação pode ser benéfico para fins educacionais sempre que a utilização de fontes radioativas reais forem indesejadas (Kalfas e Tsoulou, 2003).

Alguns autores obtiveram a eficiência de calibração de um sistema de análise de rejeitos radioativos, fazendo uso de espectrometria das radiações gama e assumindo que a matriz e os elementos radioativos estão distribuídos uniformemente no interior do tambor. Nesse estudo utilizou-se um detector de HPGe colimado, com eficiência relativa de 20% posicionado a 30cm da extremidade do tambor de calibração, preparado com cinco tubos posicionados em diferentes regiões do tambor e preenchido com cimento Portland, também foi utilizada uma fonte radioativa de  $^{152}\text{Eu}$  com atividade de  $91,02 \pm 4,55$  MBq (Dinescu et al., 2002).

Krings e Mauerhofer apresentaram um método para quantificar a atividade isotópica de emissores gama presentes em tambores de rejeitos radioativos, utilizando o software MCNP5 associada à técnica de espectrometria gama considerando a homogeneidade da matriz do rejeito (Krings e Mauerhofer, 2012).

Alguns autores relatam em seus trabalhos que quando comparados os resultados obtidos experimentalmente com os obtidos de maneira teórica existe uma discrepância em que os valores teóricos são em média de 10-20% maiores que os resultados experimentais (Boson et al., 2008). Essa discrepância pode ser atribuída à presença de camada morta no cristal do detector, que nada mais é que uma região inativa do detector onde as interações ocorridas não são registradas pelo sistema de detecção. Em um estudo recente o detector de HPGe utilizado na obtenção das medidas experimentais deste trabalho teve sua espessura de camada morta estimada (Costa, 2014).

### 3.2 Espectrometria das radiações gama

A espectrometria das radiações gama para a Física Nuclear experimental constitui um importante segmento de análise porque a detecção da radiação gama, bem como a obtenção do seu espectro de energia, são aspectos importantes na espectrometria. Considerada uma das mais importantes ferramentas de análise a espectrometria das radiações gama normalmente inclui um detector de HPGe (Ródenas et al., 2003). Fazendo uso dessa técnica muitos autores realizaram diferentes análises e alcançaram bons resultados em seus trabalhos.

A análise qualitativa e quantitativa de rejeitos radioativos de baixo nível de atividade tornou-se uma questão global há muitos anos. Liang e colaboradores fizeram uso dessa técnica associada ao método de Monte Carlo, utilizando um tambor de calibração posicionado em uma plataforma que movimenta o tambor em torno do seu próprio eixo com velocidade constante de 10 rpm, enquanto a medida é realizada, para calibrar um sistema de análise que possui um detector coaxial de HPGe (Liang et al., 1998).

Sarbjit e colaboradores utilizaram a técnica de espectrometria gama associada ao escaneamento gama segmentado em seus estudos para determinar a quantidade de plutônio mesmo que na presença de grandes quantidades de  $^{137}\text{Cs}$  emissor beta gama com atividade superior a 740 MBq presentes em tambores de rejeitos de 200 L, uma fonte radioativa de  $^{152}\text{Eu}$  com aproximadamente 37 MBq foi utilizada para determinar-se o fator de correção da atenuação para tambores com altas taxas de contagens (Singh et al., 2011).

Bruggeman e colaboradores utilizaram um método experimental usando um tambor de calibração dividido em seis regiões concêntricas de igual volume, e fontes radioativas com comprimento igual à altura do tambor de calibração, para determinar a eficiência de detecção e realizar a calibração de um sistema de análise. Considerando a distribuição homogênea da atividade contida no tambor de calibração (Bruggeman et al., 1999).

É comum que a calibração em eficiência de detectores de radiação gama seja realizada utilizando-se diferentes tipos de fontes radioativas, padrões de trabalho de atividades conhecidas são necessárias para a calibração em eficiência de detectores de HPGe. Alguns autores utilizaram uma fonte radioativa produzida a partir de um padrão misto de radionuclídeos para analisar uma ampla faixa do espectro de energia posicionando a fonte em diferentes distâncias em relação ao detector, com base em suas análises concluíram que as técnicas de espectrometria das radiações gama associadas ao método de Monte Carlo é uma ferramenta adequada para a calibração de sistemas de análise de radiação gama (Abbas, 2007).

Rizzo e colaboradores fizeram uso da técnica de espectrometria gama para obter os valores de eficiências realizando medidas experimentais utilizando um detector de HPGe. Em suas análises concluem que a técnica pode ser adotada em diferentes aplicações mesmo que sejam utilizadas fontes com geometrias puntiformes ou volumétricas (Rizzo e Tomarchio, 2010).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A espectrometria gama das radiações é utilizada na GRR para a caracterização radioisotópica de rejeitos radioativos. Os rejeitos radioativos estão armazenados no galpão de rejeitos tratados em tambores de 200 L podendo ter diferentes densidades, dependendo do seu conteúdo bem como podem estar distribuídos de maneira heterogênea no interior do tambor, conseqüentemente, exigindo uma diversificação de padrões para calibrar corretamente o sistema de medição. Além disso, dependendo da atividade dos tambores será necessário que eles sejam colocados em posições mais distantes em relação ao detector. Para a caracterização desses tambores em cada uma dessas situações é necessário obter a curva de calibração em eficiência total de pico em função da energia de emissão gama para cada uma das possíveis situações. Essas eficiências podem ser obtidas por simulação utilizando-se o Método de Monte Carlo por meio do código MCNP.

Assumindo que os tambores possuem distribuição heterogênea dos elementos radioativos em seu interior, a divisão do tambor em regiões volumétricas com simetria radial denominadas cascas, permite que sejam obtidas as eficiências de detecção para cada uma delas. As simulações foram então realizadas pelo Método de Monte Carlo, fazendo-se uso do código MCNP.

## 4.1 Simulação

### 4.1.1 Modelagem do sistema de análise

O sistema de análise é constituído de um detector de HPGe, envolto por um colimador de chumbo e um tambor com capacidade de 200 L. Para realizar a modelagem do sistema de análise, algumas informações a respeito das dimensões geométricas e composições químicas dos componentes são necessárias.

### 4.1.2. Modelagem do tambor

O tambor utilizado para o armazenamento de rejeitos radioativos, cuja parede é de aço carbono com especificação (ASTM A-366, 2011), e densidade de  $7,86 \text{ g.cm}^{-3}$ , possui as seguintes características apresentadas na TAB.1.

Tabela 1 - Dimensões do tambor de 200 L

Altura	860 mm
Diâmetro externo	560 mm
Espessura da parede	1,125 mm
Espessura da tampa	1,125 mm
Espessura da base	1,125 mm

### 4.1.3 Modelagem do detector

O detector foi modelado de acordo com as especificações fornecidas pelo fabricante. As dimensões consideradas são apresentadas na TAB.2 e as densidades do cristal de germânio e do alumínio são  $5,36 \text{ g.cm}^{-3}$  e  $2,7 \text{ g.cm}^{-3}$  respectivamente.

Tabela 2 - Dimensões do detector

	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Espessura (mm)
Cristal de Ge	51,8	36	-
Cavidade do cristal	12	16	-
1ª camada de alumínio	56,6	36	0,8
2ª camada de alumínio	70	39	1

### 4.1.4 Modelagem do colimador

Para completar o arranjo é necessário inserir o colimador. O material do colimador é o chumbo, com densidade de  $11,35 \text{ g.cm}^{-3}$  e suas dimensões são apresentadas na TAB.3.

Tabela 3 - Dimensões do colimador de chumbo

Diâmetro externo		183 mm
Comprimento		280 mm
Cavidade maior	Diâmetro	93 mm
	Comprimento	230 mm
Cavidade menor	Diâmetro	50 mm
	Comprimento	50 mm

### 4.1.5 Modelagem da fonte

As fontes radioativas foram modeladas tomando-se suas medidas geométricas. As densidades do acrílico e do  $^{152}\text{Eu}$  são respectivamente  $1,19 \text{ g.cm}^{-3}$  e  $0,998 \text{ g.cm}^{-3}$ . Elas foram modeladas conforme especificado a seguir na TAB.4.

Tabela 4 - Dimensões da fonte de  $^{152}\text{Eu}$

Altura	860 mm
Diâmetro externo	6,0mm
Espessura da parede	2,0 mm

A FIG.4 vista em um corte longitudinal demonstra como o software MCNP interpreta o conjunto de medidas, composto por: tambor de calibração, fonte radioativa localizada na casca 5, detector HPGe e colimador chumbo.

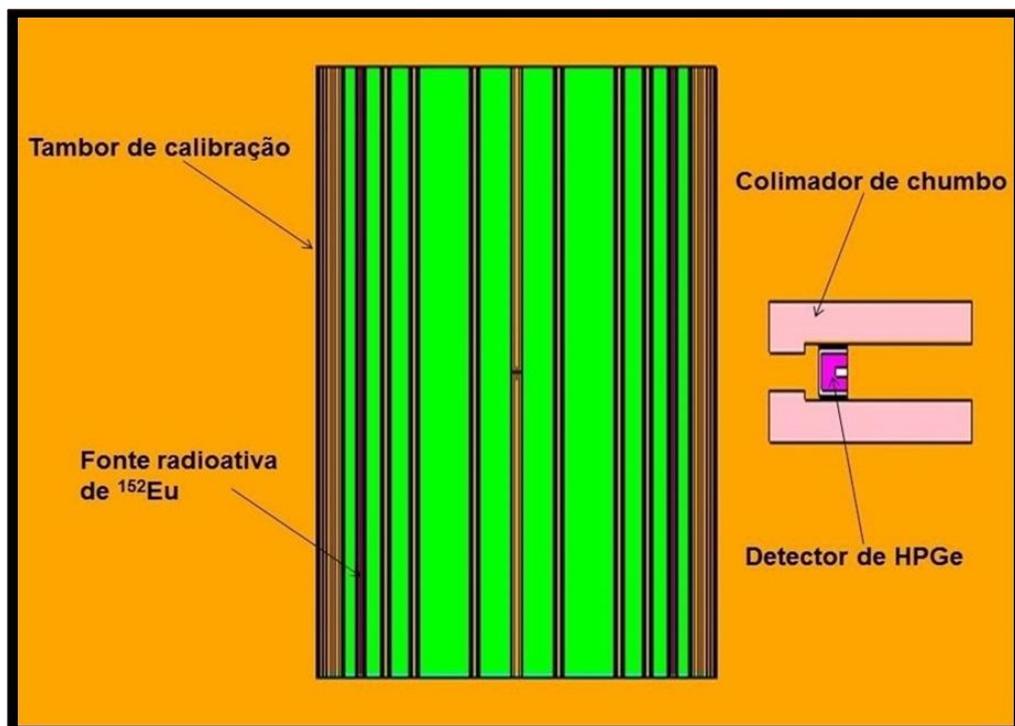


Figura 4—Visualização de todos os componentes do sistema de análise

## 4.2 Definição das combinações analisadas

A nomenclatura adotada para representar graficamente os arranjos de interesse segue a seguinte regra:

FiCnDj

Onde:

F = Fonte.

i = Quantidades de fontes utilizadas no arranjo.

C = Casca.

n = Número da casca.

D = Detector de HPGe.

j = Distância do tambor em relação ao detector.

As diferentes posições em que as fontes de  $^{152}\text{Eu}$  foram inseridas nos tambores de calibração e as diferentes distâncias em que o detector foi posicionado em relação ao tambor de calibração estão representadas na FIG.5.

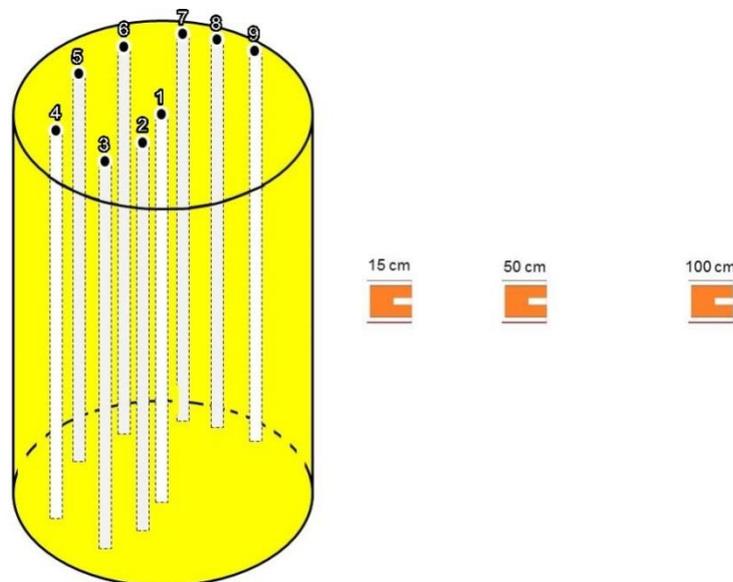


FIGURA 5–Diferentes posições de medidas e distância do tambor em relação ao detector

### 4.3 Arranjo experimental

O arranjo experimental é composto por um detector de HPGe coaxial tipo-P com eficiência intrínseca de 15%, fabricado pela *Eurisys* modelo EGPC-15-190-R. A eletrônica associada consiste de um módulo Multiport II marca Canberra e os ajustes são feitos pelo *software* de aquisição e análise Genie 2000 (Canberra, 2001).

O detector está localizado no interior de um colimador de chumbo e posicionado sobre um carrinho com rodas sobre trilhos, permitindo que o mesmo seja posicionado em diferentes distâncias em relação ao tambor de calibração.

Uma ilustração do detector, colimador e da eletrônica pode ser visto na FIG 6.



*FIGURA 6 - Detector HPGe, eletrônica e colimador*

### 4.4 Preparo dos tambores de calibração

Foram preparados quatro tambores de 200 L, com nove tubos de PVC posicionados em diferentes raios de distância em relação ao centro do tambor, de modo que uma fonte radioativa padrão de  $^{152}\text{Eu}$  possa ser inserida em cada um dos tubos. Os valores dos raios em que os tubos de PVC foram posicionados nos tambores de calibração são apresentados na TAB 5.

Tabela 5 - Diferentes distâncias em relação ao centro do tambor.

Número da Casca	Raio (cm)
1	0
2	5,9
3	14,3
4	18,3
5	21,7
6	24,7
7	25,5
8	26,2
9	27,3

Os tambores foram preenchidos cada um deles com diferentes materiais, na FIG. 7 é possível visualizar o preparo do tambor preenchido com papel compactado com densidade de  $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$ .



*FIGURA 7 - Preparo do tambor de calibração preenchido com papel compactado*

O tambor de calibração preenchido com água e densidade de  $1,0 \text{ g.cm}^{-3}$ , pode ser visualizado na FIG. 8. A água utilizada para o preenchimento desse tambor é potável e foi adquirida da concessionária responsável pelo abastecimento de água na cidade de São Paulo.



*FIGURA 8 - Tambor de calibração preenchido com água*

O tambor de calibração preenchido com areia e densidade de  $1,25 \text{ g.cm}^{-3}$  pode ser visualizado na FIG.9. A areia utilizada para o preenchimento desse tambor é bruta e foi adquirida de um depósito que comercializa materiais para construção civil.



*FIGURA 9 - Tambor de calibração preenchido com areia bruta*

O preparo do tambor de calibração preenchido com argamassa de cimento com densidade de  $2,0 \text{ g.cm}^{-3}$  é apresentado na FIG. 10. A argamassa de cimento utilizada no preparo desse tambor foi preparada seguindo-se a proporção de duas latas com capacidade para 18 litros, de areia bruta, um saco de cimento Portland CP III – 40 – RS – Cauê de 50 Kg e 25 litros de água. Foram utilizados um total de quatro sacos de cimento para preencher todo o interior do tambor.



*FIGURA 10 - Tambor de calibração preenchido com argamassa de cimento*

#### **4.5 Preparo das fontes radioativas**

A calibração em eficiência de um detector HPGe, geralmente é realizada utilizando-se fontes radioativas padronizadas. Padrões radioativos de  $^{152}\text{Eu}$  são preferidos por cobrirem uma ampla faixa de intervalo de energia e por possuírem meia-vida longa (Agarwall et al., 2011). Foram preparadas três fontes radioativas de  $^{152}\text{Eu}$ , com geometria cilíndrica e dimensões apresentadas na TAB.4.

As fontes radioativas foram preparadas preenchendo-se tubos de acrílico com capacidade para 10 ml com uma solução composta por acrilamida e padrão radioativo de  $^{152}\text{Eu}$ . O padrão radioativo líquido foi produzido pelo Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD-CNEN/RJ) e as fontes foram certificadas com uma atividade de  $34,0 \pm 2,5 \text{ kBq.ml}^{-1}$ , pelo Laboratório de Metrologia Nuclear (LMN-IPEN-CNEN/SP). Essas fontes permitiram a análise no intervalo de energia de 121,78 keV até 1.408,01 keV. Uma imagem do preparo das fontes é apresentado na FIG. 11.



FIGURA 11 - Preparo das fontes radioativas de  $^{152}\text{Eu}$

#### 4.6 Validação do método

Para validar a metodologia descrita o tambor de calibração foi posicionado sobre uma plataforma que possui um sistema de movimentação vertical e de rotação gerenciado por um Controlador Lógico Programável (CLP) que é capaz de realizar a movimentação do tambor tanto no modo contínuo quanto no modo segmentado e também realiza o movimento de rotação do tambor, a associação desses movimentos tem o objetivo de diminuir os efeitos da heterogeneidade do conteúdo do tambor de rejeito radioativo (Toma et al., 2007).

A aquisição do espectro de energias foi sincronizado com o movimento vertical do tambor e a velocidade de rotação de 5 rpm, diante do detector, dessa forma foram obtidos espectros de energias para as diversas combinações definidas utilizando-se até três fontes radioativas padrão de  $^{152}\text{Eu}$ , e um tempo de contagem de 21.600 segundos, para cada um dos tambores de calibração produzidos e diferentes distâncias de posicionamento do detector em relação ao tambor de calibração.

No desenvolvimento desta metodologia todas as simulações foram realizadas utilizando o cartão FT com o parâmetro GEB e o cartão NPS com um total de 200.000.000 de histórias, resultando em um erro de medida inferior a 0,5%, valor esse considerado aceitável.

Uma ilustração do sistema completo pode ser visto na FIG.12.



*FIGURA 12 - Sistema de caracterização de tambores de rejeito radioativo*

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Definição da quantidade de combinações

Neste capítulo serão apresentados inicialmente os resultados teóricos obtidos para cada combinação considerada, simulando-se as energias do  $^{152}\text{Eu}$  para cada uma das nove cascas do tambor de calibração. Com base nessa análise será feito um estudo variando-se a distância do detector em relação à parede externa do tambor de calibração. Em seguida será feito um estudo variando-se as densidades dos tambores de calibração e por fim será feita a comparação dos valores teóricos e experimentais para a combinação que apresentar o melhor desempenho nos estudos de diferentes distâncias e densidades. Serão simuladas combinações considerando-se até três cascas simultâneas do tambor.

Inicialmente definiram-se as combinações utilizando-se apenas uma casca do tambor de calibração. A quantidade de combinações possíveis foi obtida conforme EQ.4.

$$C_{n,p} = \frac{n!}{p!(n-p)!} \quad (4)$$

Lê se: Combinação de n elementos tomados p a p.

Onde:

n = Quantidade de cascas do tambor de calibração.

p = Quantidade de cascas consideradas em cada combinação.

## **5.2 Combinações utilizando-se uma casca do tambor de calibração**

Nas combinações iniciais definidas para o desenvolvimento deste trabalho foi considerada a densidade de  $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$  simulando se o tambor de calibração preenchido com papel compactado e distância da parede externa do tambor em relação ao detector de 15 cm. Com base nesta decisão foram analisadas as combinações apresentadas na FIG.13. A vareta na cor vermelha indica a casca em que as energias consideradas estão sendo simuladas.

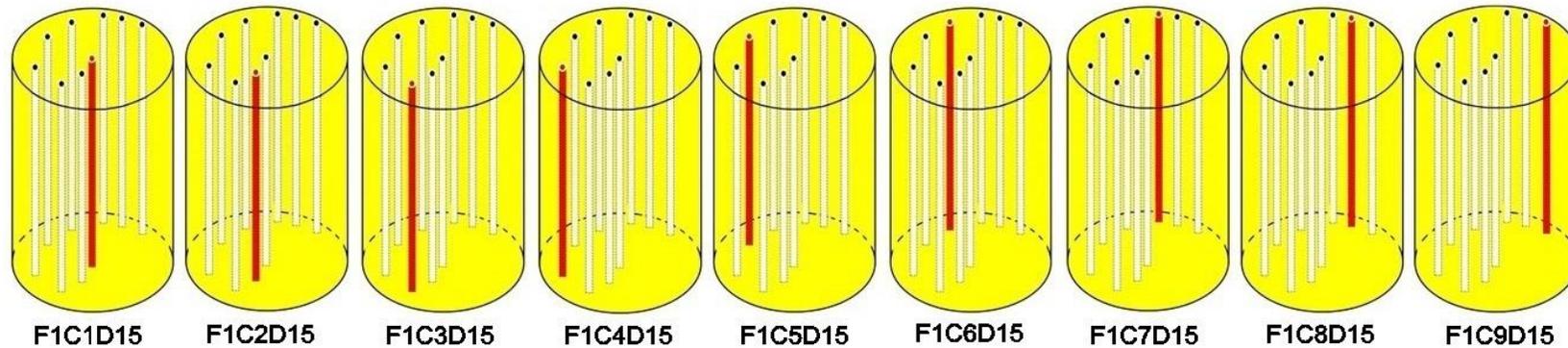


FIGURA 13 - Combinações possíveis considerando-se as nove cascas do tambor de calibração

As eficiências obtidas por meio do código MCNP para as nove combinações consideradas estão apresentadas na TAB.6 para as energias simuladas.

TABELA 6 - Eficiências teóricas obtidas para as nove combinações do tambor de calibração

Energia (KeV)	Y (%) <sup>1</sup>	$\epsilon_{MCNP}$ F1C1D15	$\epsilon_{MCNP}$ F1C2D15	$\epsilon_{MCNP}$ F1C3D15	$\epsilon_{MCNP}$ F1C4D15	$\epsilon_{MCNP}$ F1C5D15	$\epsilon_{MCNP}$ F1C6D15	$\epsilon_{MCNP}$ F1C7D15	$\epsilon_{MCNP}$ F1C8D15	$\epsilon_{MCNP}$ F1C9D15
121,78	28,41 (13)	1,2696E-05	1,2525E-05	1,2782E-05	1,5227E-05	1,4326E-05	1,4241E-05	1,4326E-05	1,4369E-05	1,4841E-05
244,70	7,55 (4)	1,9910E-05	1,9910E-05	1,8100E-05	1,9231E-05	1,7360E-05	1,6064E-05	1,6403E-05	1,6290E-05	1,6516E-05
344,28	26,59 (12)	1,1487E-05	1,1207E-05	1,0206E-05	1,1006E-05	9,7260E-06	8,9200E-06	8,9650E-06	8,8850E-06	9,1650E-06
778,90	12,97 (6)	9,2360E-06	9,0400E-06	7,6969E-06	7,6990E-06	6,8310E-06	5,9650E-06	5,8680E-06	5,9651E-06	5,8680E-06
964,08	14,50 (6)	8,0690E-06	7,9380E-06	6,7400E-06	6,9590E-06	6,0020E-06	5,3060E-06	5,2850E-06	5,1540E-06	5,1760E-06
1.085,84	10,13 (6)	7,8530E-06	7,7780E-06	6,7210E-06	6,7210E-06	5,6600E-06	5,0590E-06	5,0590E-06	4,9840E-06	5,2100E-06
1.112,08	13,41 (6)	7,8340E-06	7,5330E-06	6,2270E-06	6,4280E-06	5,5240E-06	5,0220E-06	4,9210E-06	4,8900E-06	4,9210E-06
1.408,01	20,85 (8)	7,0500E-06	6,8100E-06	5,5300E-06	5,8300E-06	4,7500E-06	4,2400E-06	4,1900E-06	4,0800E-06	4,1100E-06

Fonte<sup>1</sup>[http://www.nucleide.org/DDEP\\_WG/Nucleides/Eu-152\\_tables.pdf](http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nucleides/Eu-152_tables.pdf)

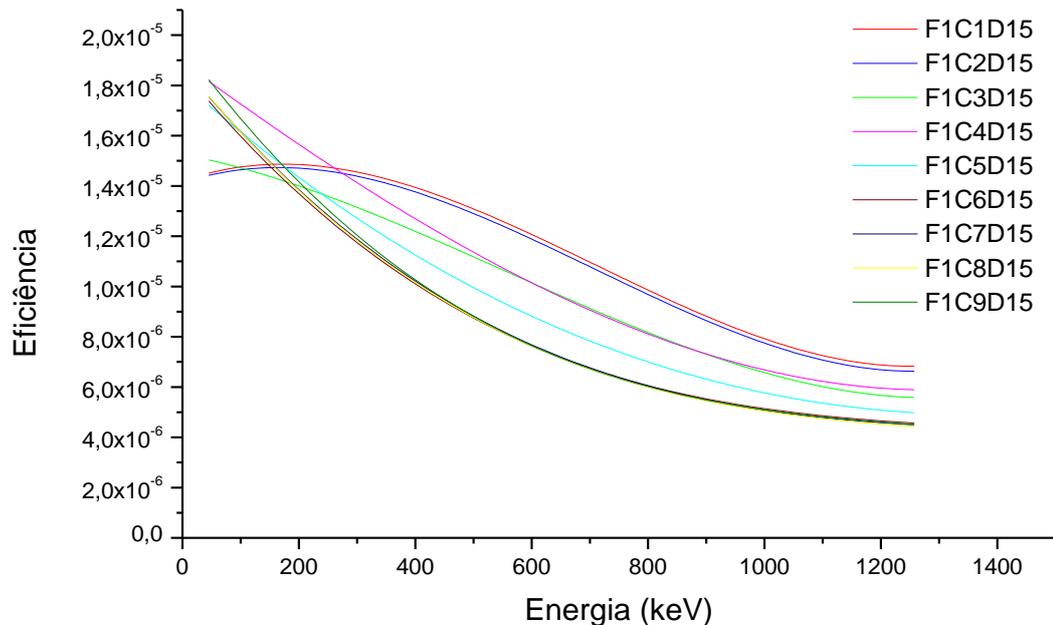
As eficiências experimentais obtidas para as nove combinações consideradas estão apresentadas na TAB.7.

TABELA 7 - Eficiências experimentais obtidas para as nove combinações do tambor de calibração para as energias consideradas

Energia (KeV)	$\epsilon_{EXP}$ F1C1D15	$\epsilon_{EXP}$ F1C2D15	$\epsilon_{EXP}$ F1C3D15	$\epsilon_{EXP}$ F1C4D15	$\epsilon_{EXP}$ F1C5D15	$\epsilon_{EXP}$ F1C6D15	$\epsilon_{EXP}$ F1C7D15	$\epsilon_{EXP}$ F1C8D15	$\epsilon_{EXP}$ F1C9D15
121,78	1,2600E-05	1,2400E-05	1,2600E-05	1,5200E-05	1,4100E-05	1,4100E-05	1,4200E-05	1,4300E-05	1,4800E-05
244,70	1,9600E-05	1,9900E-05	1,8000E-05	1,9100E-05	1,7100E-05	1,5900E-05	1,6400E-05	1,6200E-05	1,6500E-05
344,28	1,1300E-05	1,1100E-05	1,0100E-05	1,0900E-05	9,7100E-06	8,8500E-06	8,9000E-06	8,8200E-06	9,1600E-06
778,90	9,0000E-06	9,0100E-06	7,6600E-06	7,6900E-06	6,7500E-06	5,9500E-06	5,8600E-06	5,9000E-06	5,8400E-06
964,08	8,0400E-06	7,8800E-06	6,7300E-06	6,8900E-06	5,9000E-06	5,2900E-06	5,2700E-06	5,1200E-06	5,1600E-05
1.085,84	7,8300E-06	7,6500E-06	6,5300E-06	6,6600E-06	5,5900E-06	5,0700E-06	5,0200E-06	4,8600E-06	5,1500E-06
1.112,08	7,7400E-06	7,4500E-06	6,2300E-06	6,4300E-06	5,4800E-06	5,0200E-06	4,8800E-06	ND	4,8500E-06
1.408,01	ND	ND	ND	ND	4,7400E-06	ND	4,1800E-06	ND	ND

N D: Valores não disponíveis.

Na FIG.14 são apresentados os valores das eficiências teóricas para cada uma das nove combinações do tambor de calibração preenchido com papel compactado em função da energia.



*FIGURA 14 - Comportamento das curvas de eficiência*

Observa-se na FIG.14 que as combinações F1C1D15 e F1C2D15 apresentaram valores de eficiência ligeiramente superiores aos valores obtidos para as demais combinações. Esse melhor desempenho pode ser atribuído à influência do ângulo sólido onde essas duas cascas apresentam-se uniformemente no campo de “visão” do detector posicionado a distância de 15 cm em relação a parede externa do tambor de 200 L.

### 5.2.1 Estudo de diferentes distâncias tambor - detector

Para obtermos os valores de eficiências em função das diferentes distâncias. As eficiências teóricas foram obtidas posicionando-se a fonte radioativa na casca 1 do tambor de 200 L, com o detector de HPGe posicionado a 15 cm, 50 cm e 100 cm de distância em relação a parede externa do tambor.

As eficiências experimentais e teóricas das combinações F1C1D15, F1C1D50 e F1C1D100, considerando-se a densidade do tambor de  $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$  para as diferentes energias consideradas estão apresentadas respectivamente na TAB.8 e TAB.9.

TABELA 8 - Eficiências experimentais obtidas para as combinações F1C1D15, F1C1D50 e F1C1D100

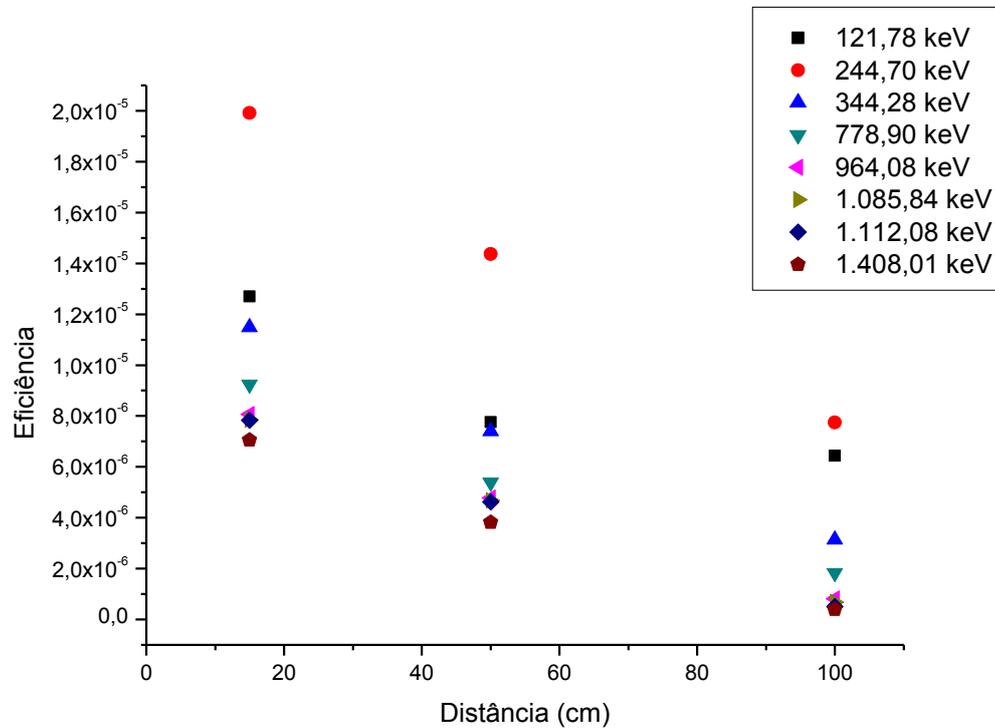
Energia (KeV)	$\epsilon_{\text{EXP}}$	$\epsilon_{\text{EXP}}$	$\epsilon_{\text{EXP}}$
	F1C1D15	F1C1D50	F1C1D100
121,78	1,2600E-05	ND	6,3000E-06
244,70	1,9600E-05	ND	7,7200E-06
344,28	1,1300E-05	ND	3,0800E-06
778,90	9,0000E-06	ND	ND
964,08	8,0400E-06	ND	ND
1.085,84	7,8300E-06	ND	ND
1.112,08	7,7400E-06	ND	ND
1.408,01	ND	ND	ND

ND: Valores não disponíveis.

TABELA 9 - Eficiências teóricas obtidas para as combinações F1C1D15, F1C1D50 e F1C1D100

Energia (KeV)	$\epsilon_{\text{MCNP}}$	$\epsilon_{\text{MCNP}}$	$\epsilon_{\text{MCNP}}$
	F1C1D15	F1C1D50	F1C1D100
121,78	1,2696E-05	7,7630E-06	6,4340E-06
244,70	1,9910E-05	1,4367E-05	7,7490E-06
344,28	1,1487E-05	7,4040E-06	3,1410E-06
778,90	9,2360E-06	5,3870E-06	1,8280E-06
964,08	8,0690E-06	4,7840E-06	8,1500E-07
1.085,84	7,8530E-06	4,6821E-06	6,7900E-07
1.112,08	7,8340E-06	4,6202E-06	5,0200E-07
1.408,01	7,0500E-06	3,8130E-06	4,0100E-07

O comportamento das eficiências teóricas para as combinações apresentadas na TAB.9 estão apresentadas na FIG.15.



**FIGURA 15** – Eficiências teóricas obtidas para as combinações F1C1D15, F1C1D50 e F1C1D100

Observa-se que as eficiências teóricas apresentam um comportamento similar, ocorrendo uma redução dos valores de eficiência em função do aumento da distância de posicionamento do detector de HPGe. Conforme esperado, um melhor desempenho foi alcançado com o detector posicionado a 15 cm de distância em relação à parede externa do tambor de 200 L.

### 5.2.2 Estudo de diferentes densidades para a combinação F1C1D15

Diferentes densidades dos tambores de calibração foram estudadas neste trabalho, com o objetivo de conhecer a variação das eficiências teóricas em função das diferentes matrizes que preenchem o interior dos tambores. As combinações foram então simuladas para a distância de 15 cm do detector em relação à parede externa do tambor, considerando-se a casca 1, conforme os resultados demonstrados na FIG. 15. Para obter-se as eficiências em função das diferentes densidades dos tambores de 200 L, foram consideradas as densidades de  $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$ ,  $1,0 \text{ g.cm}^{-3}$ ,  $1,25 \text{ g.cm}^{-3}$  e  $2,0 \text{ g.cm}^{-3}$ . Os resultados experimentais e

teóricos obtidos tomando-se como base esses parâmetros são apresentados respectivamente na TAB.10 e TAB.11.

TABELA 10 - Eficiências experimentais obtidas considerando-se diferentes densidades para a combinação F1C1D15

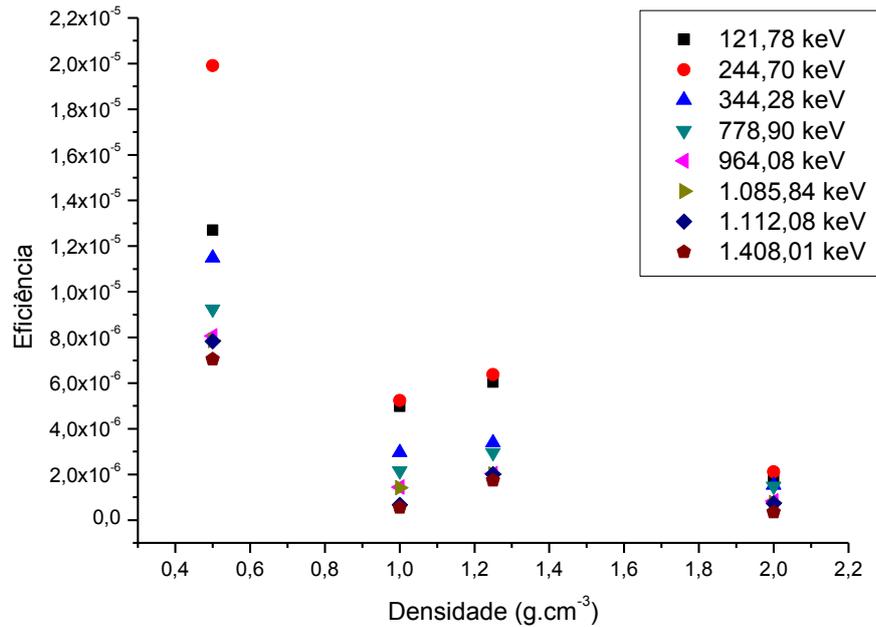
<i>Energia(keV)</i>	$\epsilon_{EXP}$ <b>0,5g.cm<sup>-3</sup></b>	$\epsilon_{EXP}$ <b>1,0g.cm<sup>-3</sup></b>	$\epsilon_{EXP}$ <b>1,25g.cm<sup>-3</sup></b>	$\epsilon_{EXP}$ <b>2,0 g.cm<sup>-3</sup></b>
121,78	1,2600E-05	4,8300E-06	5,9000E-06	ND
244,70	1,9600E-05	ND	6,2700E-06	ND
344,28	1,1300E-05	2,9600E-06	3,3400E-06	7,8300E-06
778,90	9,0000E-06	ND	ND	ND
964,08	8,0400E-06	ND	ND	ND
1.085,84	7,8300E-06	ND	ND	ND
1.112,08	7,7400E-06	ND	ND	ND
1.408,01	ND	ND	ND	ND

ND: Valores não disponíveis.

TABELA 11 - Eficiências teóricas obtidas considerando-se diferentes densidades para a combinação F1C1D15

<i>Energia (keV)</i>	$\epsilon_{MCNP}$ <b>0,5g.cm<sup>-3</sup></b>	$\epsilon_{MCNP}$ <b>1,0g.cm<sup>-3</sup></b>	$\epsilon_{MCNP}$ <b>1,25g.cm<sup>-3</sup></b>	$\epsilon_{MCNP}$ <b>2,0 g.cm<sup>-3</sup></b>
121,78	1,2696E-05	4,9750E-06	6,0330E-06	1,8730E-06
244,70	1,9910E-05	5,2410E-06	6,3720E-06	2,1110E-06
344,28	1,1487E-05	2,9600E-06	3,3880E-06	1,5340E-06
778,90	9,2360E-06	2,1500E-06	2,9500E-06	1,4750E-06
964,08	8,0690E-06	1,4460E-06	2,0290E-06	8,4000E-07
1.085,84	7,8530E-06	1,4090E-06	2,0130E-06	7,5500E-07
1.112,08	7,8340E-06	6,6900E-07	2,0080E-06	7,3600E-07
1.408,01	7,0500E-06	5,5200E-07	1,7400E-06	3,4300E-07

As eficiências teóricas apresentadas na TAB. 11, obtidas utilizando-se o código MCNP, em função das densidades estudadas são apresentadas na FIG.16.



*FIGURA 16 - Eficiências teóricas obtidas para as densidades de  $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$ ,  $1,0 \text{ g.cm}^{-3}$ ,  $1,25 \text{ g.cm}^{-3}$  e  $2,0 \text{ g.cm}^{-3}$*

Na FIG. 16 é possível observar que as eficiências teóricas apresentam um comportamento similar, e conforme esperado, os valores de eficiência tendem a diminuir com o aumento da densidade da matriz que preenche o interior do tambor de 200 L. Um melhor desempenho foi alcançado simulando-se o tambor com densidade de  $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$ , em que os resultados obtidos para as energias de interesse encontram-se em um intervalo superior a  $6,0 \times 10^{-6}$ , já para as demais densidades analisadas, os valores de eficiências obtidos tendem a manter-se em um intervalo inferior a  $6,0 \times 10^{-6}$ , além de demonstrar que nem sempre o meio material menos denso apresenta os maiores resultados de eficiências, já que as eficiências obtidas para a densidade de  $1,00 \text{ g.cm}^{-3}$  são inferiores em todas as energias de interesse, se comparadas com as eficiências obtidas para a densidade de  $1,25 \text{ g.cm}^{-3}$ . Esse comportamento pode ser atribuído a influência da seção de choque característica de cada material.

### 5.2.3 Análise por espectrometria gama para a combinação F1C1D15

Características das fontes radioativas padrão de  $^{152}\text{Eu}$ , presentes no certificado de calibração, foram inseridas no software de aquisição e análise Genie 2000 e um certificado de calibração em eficiência foi criado. Utilizando-se este certificado obteve-se a curva de eficiência do detector de HPGe, apresentada na FIG.17, para a combinação F1C1D15 do tambor de calibração com densidade de  $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$ .

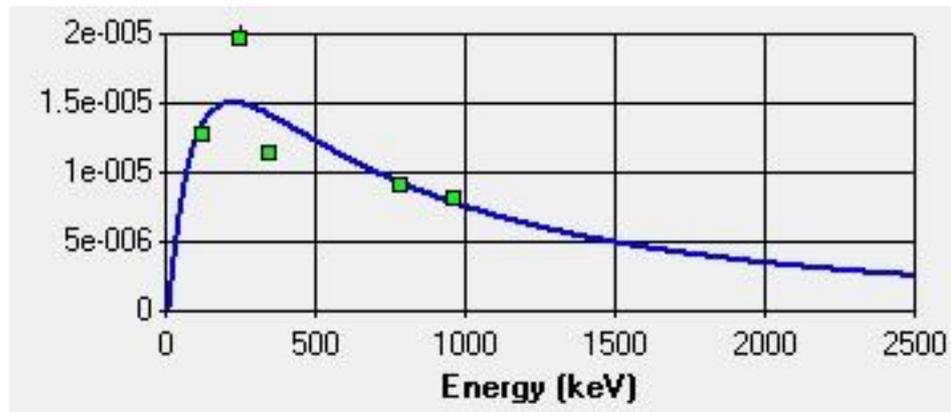


FIGURA 17 – Curva de eficiência experimental para o detector de HPGe posicionado a 15 cm de distância da extremidade do tambor de calibração com densidade de  $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$

Na FIG. 18 está apresentado o espectro experimental, fornecido pelo software de aquisição e análise GENIE 2000, para a combinação F1C1D15, escolhida levando-se em conta o desempenho apresentado nas análises teóricas apresentadas nos itens 5.2.1 e 5.2.2, utilizando-se o tambor de calibração preenchido com papel compactado com densidade de  $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$ . Todas as análises experimentais foram realizadas utilizando-se um tempo de contagem de 21.600 segundos.

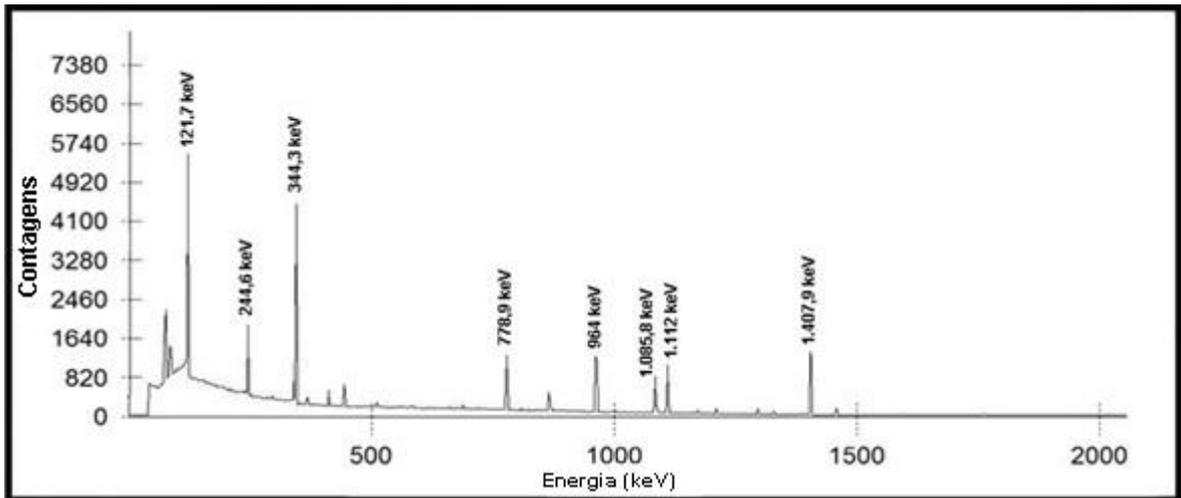


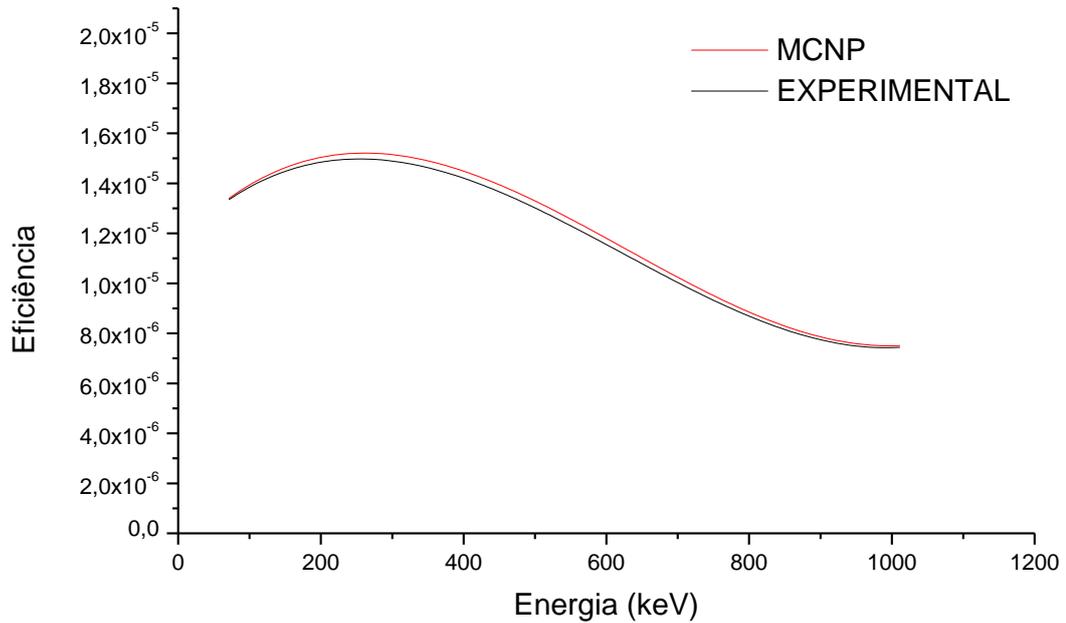
FIGURA 18 – Espectro de energia experimental da combinação F1C1D15

As eficiências obtidas por meio do código MCNP para a densidade de  $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$  demonstradas na TAB.8, foram comparadas com as eficiências experimentais e suas relações são apresentadas na TAB. 12.

TABELA 12 – Relação entre as eficiências teóricas e experimentais utilizando-se a combinação F1C1D15

Energia (keV)	$\epsilon_{MCNP}$	$\epsilon_{EXP}$	Erro $\epsilon_{EXP}$ (%)	$\epsilon_{EXP} / \epsilon_{MCNP}$	Diferença percentual
121,78	1,2696E-05	1,26E-05	2,58	1,0076	0,7561
244,70	1,9910E-05	1,96E-05	2,69	1,0158	1,5570
344,28	1,1487E-05	1,13E-05	2,59	1,0165	1,6279
778,90	9,2360E-06	9,00E-06	2,73	1,0262	2,5552
964,08	8,0690E-06	8,04E-06	2,73	1,0036	0,3594
1.085,84	7,8530E-06	7,83E-06	2,83	1,0029	0,2929
1.112,08	7,8340E-06	7,74E-06	2,76	1,0121	1,1999

Na FIG.19 as eficiências teóricas obtidas por meio do código MCNP e as eficiências experimentais são comparadas para a combinação F1C1D15 do tambor de calibração com densidade de  $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$ .



*FIGURA 19 – Comparação das eficiências teóricas e experimentais para a combinação F1C1D15 do tambor de calibração com densidade de  $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$*

As eficiências apresentadas na TAB. 12 sofreram um ajuste polinomial e conforme a FIG. 19 observa-se que os resultados teóricos e experimentais apresentam resultados bem próximos com diferença percentual inferior a 2,6%.

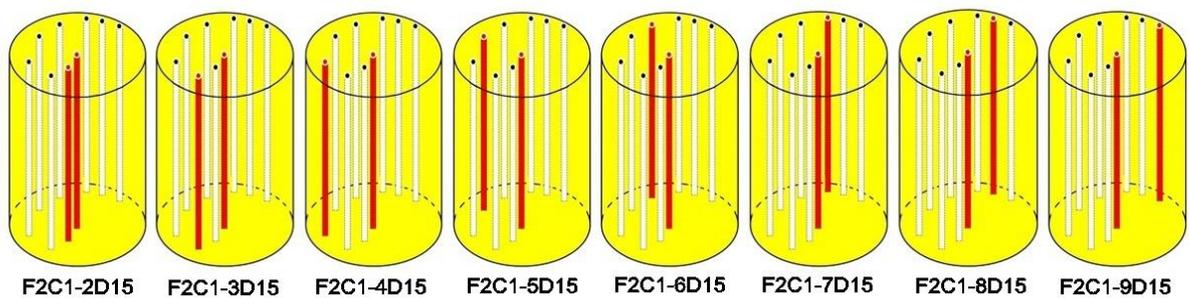
### **5.3 Combinações utilizando-se duas cascas do tambor de calibração**

Utilizando-se duas cascas do tambor de calibração o número total de combinações possíveis em que as fontes podem ser posicionadas no interior do tambor de 200 L é 36.

Apenas por questão de ordem as combinações foram definidas posicionando-se uma das fontes sempre na casca com o raio mais próximo do centro do tambor enquanto a outra fonte é posicionada em uma casca diferente, desse modo às combinações podem ser agrupadas em até oito grupos distintos.

### 5.3.1 Primeiro grupo de Combinações utilizando-se duas cascas do tambor de 200 L

O primeiro grupo de combinações utilizando-se duas cascas do tambor de calibração foi estudado, as varetas na cor vermelha indicam a casca em que as energias consideradas estão sendo simuladas. O conjunto das combinações possíveis para essa configuração está apresentado na FIG.20.



*FIGURA 20 - Primeiro grupo de combinações considerando-se duas cascas do tambor de calibração*

As eficiências teóricas e experimentais foram obtidas para esse primeiro grupo de combinações, definido com duas cascas do tambor de calibração com densidade de  $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$  e distância da parede externa do tambor em relação ao detector de 15 cm. As eficiências obtidas para essas combinações estão apresentadas na TAB.13 e TAB.14.

TABELA13 - Eficiências teóricas obtidas para o primeiro grupo de combinações considerando-se duas cascas do tambor de 200 L

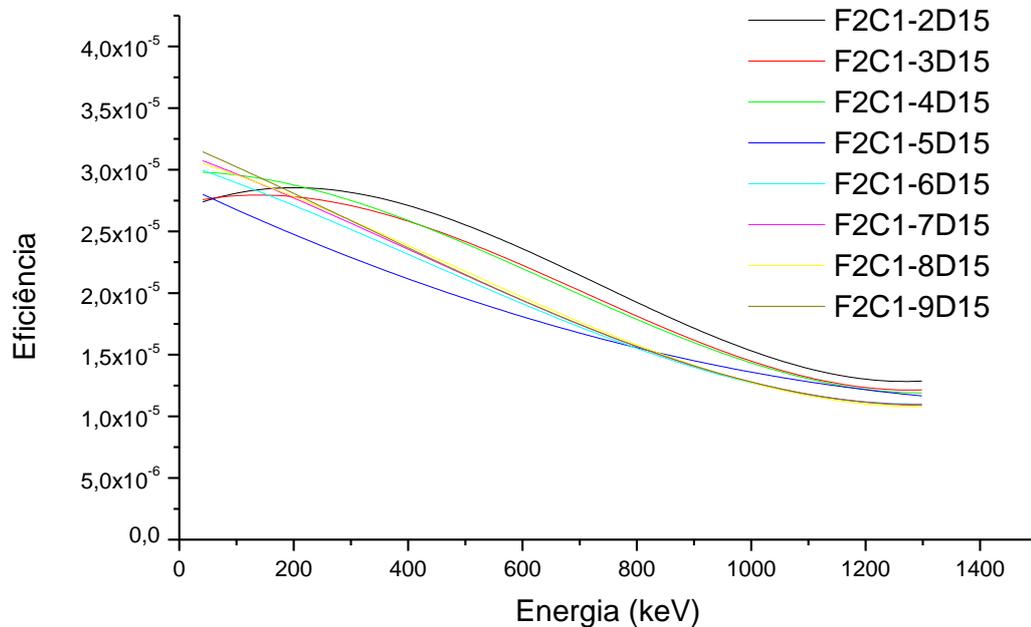
Energia (KeV)	$\epsilon_{MCNP}$ F2C1-2D15	$\epsilon_{MCNP}$ F2C1-3D15	$\epsilon_{MCNP}$ F2C1-4D15	$\epsilon_{MCNP}$ F2C1-5D15	$\epsilon_{MCNP}$ F2C1-6D15	$\epsilon_{MCNP}$ F2C1-7D15	$\epsilon_{MCNP}$ F2C1-8D15	$\epsilon_{MCNP}$ F2C1-9D15
121,78	2,3892E-05	2,4064E-05	2,5736E-05	2,5522E-05	2,5522E-05	2,5951E-05	2,5736E-05	2,6594E-05
244,70	3,9029E-05	3,6992E-05	3,7332E-05	2,6019E-05	3,3938E-05	3,5069E-05	3,5635E-05	3,5028E-05
344,28	2,2053E-05	2,1413E-05	2,1813E-05	2,0813E-05	1,9812E-05	2,0012E-05	2,0132E-05	2,0412E-05
778,90	1,7799E-05	1,6933E-05	1,6740E-05	1,5778E-05	1,4816E-05	1,4912E-05	1,4816E-05	1,4912E-05
964,08	1,5659E-05	1,4898E-05	1,4789E-05	1,3484E-05	1,3158E-05	1,2940E-05	1,3176E-05	1,2940E-05
1.085,84	1,5405E-05	1,4348E-05	1,4272E-05	1,3366E-05	1,2611E-05	1,2838E-05	1,2687E-05	1,2838E-05
1.112,08	1,4865E-05	1,4061E-05	1,3760E-05	1,2856E-05	1,2253E-05	1,2454E-05	1,2354E-05	1,2454E-05
1.408,01	1,2967E-05	1,2193E-05	1,1724E-05	1,1136E-05	1,0942E-05	1,0786E-05	1,0630E-05	1,0630E-05

TABELA14 - Eficiências experimentais obtidas para o primeiro grupo de combinações considerando-se duas fontes padrão de  $^{152}\text{Eu}$ 

Energia (KeV)	$\epsilon_{EXP}$ F2C1-2D15	$\epsilon_{EXP}$ F2C1-3D15	$\epsilon_{EXP}$ F2C1-4D15	$\epsilon_{EXP}$ F2C1-5D15	$\epsilon_{EXP}$ F2C1-6D15	$\epsilon_{EXP}$ F2C1-7D15	$\epsilon_{EXP}$ F2C1-8D15	$\epsilon_{EXP}$ F2C1-9D15
121,78	2,3700E-05	2,3900E-05	2,5600E-05	2,5400E-05	2,5400E-05	2,5800E-05	2,5700E-05	2,6400E-05
244,70	3,8500E-05	3,6800E-05	3,7100E-05	2,5800E-05	3,3600E-05	3,4700E-05	3,5100E-05	3,4700E-05
344,28	2,2000E-05	2,1300E-05	2,1600E-05	2,0200E-05	1,9700E-05	1,9900E-05	1,9900E-05	2,0200E-05
778,90	1,7700E-05	1,6700E-05	1,6600E-05	1,5600E-05	1,4700E-05	1,4800E-05	1,4700E-05	1,4800E-05
964,08	1,5600E-05	1,4800E-05	1,4600E-05	1,3400E-05	1,3100E-05	1,2900E-05	1,3000E-05	1,2900E-05
1.085,84	1,5300E-05	1,4300E-05	1,4200E-05	1,3200E-05	1,2500E-05	1,2700E-05	1,2600E-05	1,2800E-05
1.112,08	1,4800E-05	1,4000E-05	1,3700E-05	1,2700E-05	1,2200E-05	1,2300E-05	1,2200E-05	1,2400E-05
1.408,01	ND	1,2000E-05	1,1600E-05	ND	1,0800E-05	1,0700E-05	1,0600E-05	1,0600E-05

ND: Valores não disponíveis.

O comportamento das eficiências teóricas obtidas para as combinações apresentadas na TAB. 13 está demonstrado na FIG.21.



*FIGURA21 - Comportamento das eficiências para o primeiro grupo de combinações considerando-se duas fontes de <sup>152</sup>Eu*

Observa-se na FIG.21 que a curva de eficiência da combinação F2C1-2D15 apresenta um comportamento diferente das curvas de eficiência das demais combinações, além de, assim como a combinação F2C1-5D15 não demonstram valores de eficiências para a energia de 1.408,01 keV do <sup>152</sup>Eu. O comportamento diferente para a combinação F2C1-2D15 pode estar associado à influência do ângulo sólido, em que essas duas cascas apresentam-se uniformemente no campo de “visão” do detector posicionado a distância de 15 cm em relação a parede externa do tambor de 200 L. No entanto o fato da energia de 1.408,01 keV não ser demonstrada, pode estar atribuído a baixa atividade das fontes radioativas padrão utilizadas nesse trabalho. Observando-se os valores de eficiência apresentados na TAB. 13 percebe-se que a combinação F2C1-2D15 possui valores de eficiência ligeiramente superiores as demais combinações.

### 5.3.2 Estudo de diferentes distâncias para o primeiro grupo de combinações com duas cascas do tambor de 200 L

Conforme o desempenho apresentado na TAB. 13 para conhecermos o comportamento da curva de eficiência em função da distância, as eficiências teóricas foram obtidas considerando-se as cascas 1 e 2 do tambor de 200 L, com o detector de HPGe posicionado em três diferentes distâncias em relação a parede externa do tambor.

As eficiências teóricas obtidas para as combinações F2C1-2D15, F2C1-2D50 e F2C1-2D100, considerando-se a densidade de  $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$ , estão apresentadas na TAB.15.

TABELA 15 - Eficiências teóricas obtidas para as combinações F2C1-2D15, F2C1-2D50 e F2C1-2D100

Energia (KeV)	$\epsilon_{\text{MCNP}}$	$\epsilon_{\text{MCNP}}$	$\epsilon_{\text{MCNP}}$
	F2C1-2D15	F2C1-2D50	F2C1-2D100
121,78	2,3892E-05	1,8873E-05	1,0752E-05
244,70	3,9029E-05	2,1946E-05	1,4932E-05
344,28	2,2053E-05	1,7154E-05	6,0570E-06
778,90	1,7799E-05	1,5836E-05	9,6438E-07
964,08	1,5659E-05	1,5576E-05	8,9345E-07
1.085,84	1,5405E-05	1,4272E-05	8,5500E-07
1.112,08	1,4865E-05	1,3864E-05	7,8036E-07
1.408,01	9,5463E-06	9,4123E-06	7,0543E-07

TABELA 16 - Eficiências experimentais obtidas para as combinações F2C1-2D15, F2C1-2D50 e F2C1-2D100

Energia (KeV)	$\epsilon_{EXP}$	$\epsilon_{EXP}$	$\epsilon_{EXP}$
	F2C1-2D15	F2C1-2D50	F2C1-2D100
121,78	2,3700E-05	1,8800E-05	1,0700E-05
244,70	3,8500E-05	2,1800E-05	1,4800E-05
344,28	2,2000E-05	ND	6,0500E-06
778,90	1,7700E-05	ND	ND
964,08	1,5600E-05	ND	ND
1.085,84	1,5300E-05	1,4000E-05	8,2100E-07
1.112,08	1,4800E-05	ND	ND
1.408,01	ND	ND	ND

ND: Valores não disponíveis.

As eficiências teóricas obtidas para as combinações apresentadas na TAB. 15 para as energias consideradas estão apresentadas na FIG.22.

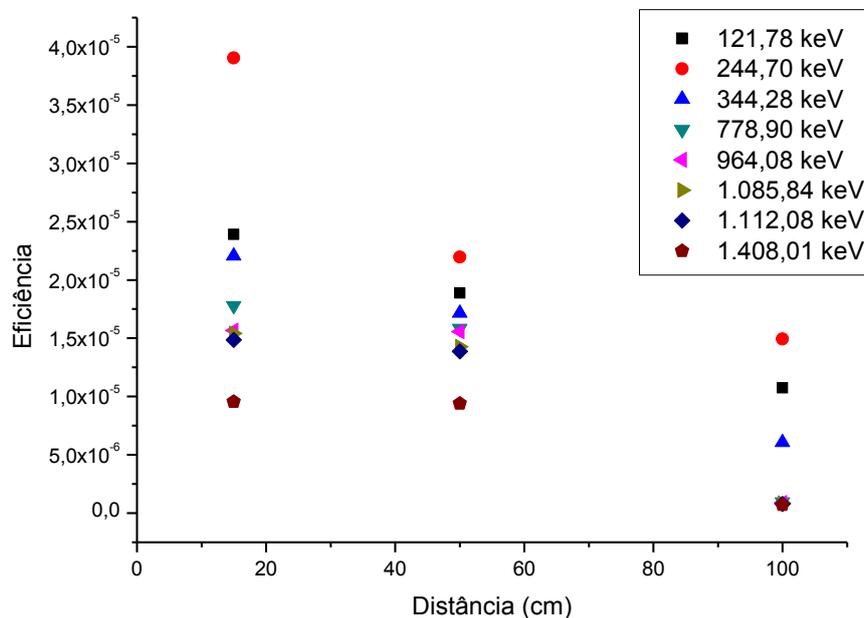


FIGURA 22– Eficiências teóricas obtidas para as combinações F2C1-2D15, F2C1-2D50 e F2C1-2D100

Observa-se que os valores das eficiências apresentam um comportamento similar, diminuindo com o aumento da distancia de

posicionamento do detector de HPGe. Conforme o esperado um melhor desempenho foi alcançado com o detector posicionado a 15 cm de distância em relação a parede externa do tambor de 200 L.

### 5.3.3 Estudo de diferentes densidades para a combinação F2C1-2D15

Para o estudo de diferentes densidades do primeiro grupo de combinações utilizando-se duas cascas do tambor de 200 L, as diferentes densidades foram simuladas por meio do código MCNP considerando-se a distância de 15 cm do detector em relação à parede externa do tambor. A combinação F2C1-2D15 foi utilizada por apresentar um melhor desempenho no estudo apresentado no item 5.3.2. Foram consideradas as densidades de  $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$ ,  $1,0 \text{ g.cm}^{-3}$  e  $1,25 \text{ g.cm}^{-3}$ . Os resultados teóricos obtidos tomando-se como base esses parâmetros estão apresentados nas TAB.17 e TAB.18 respectivamente.

Tabela 17. Eficiências teóricas obtidas considerando-se diferentes densidades para a combinação F2C1-2D15

<i>Energia</i> (keV)	$\epsilon_{\text{MCNP}}$ $0,5\text{g.cm}^{-3}$	$\epsilon_{\text{MCNP}}$ $1,0\text{g.cm}^{-3}$	$\epsilon_{\text{MCNP}}$ $1,25\text{g.cm}^{-3}$
121,78	2,3892E-05	6,9340E-06	1,3560E-06
244,70	3,9029E-05	8,1536E-06	1,2846E-06
344,28	2,2053E-05	6,7986E-06	1,1887E-06
778,90	1,7799E-05	5,3542E-06	1,1395E-06
964,08	1,5659E-05	3,6745E-06	1,0839E-06
1.085,84	1,5405E-05	1,2930E-06	1,0450E-06
1.112,08	1,4865E-05	4,8500E-07	4,5020E-07
1.408,01	9,5463E-06	4,0538E-07	3,8865E-07

Tabela 18. Eficiências experimentais obtidas considerando-se diferentes densidades para a combinação F2C1-2D15

Energia (keV)	$\epsilon_{\text{EXP}}$	$\epsilon_{\text{EXP}}$	$\epsilon_{\text{EXP}}$
	$0,5\text{g.cm}^{-3}$	$1,0\text{g.cm}^{-3}$	$1,25\text{g.cm}^{-3}$
121,78	2,3700E-05	6,8000E-06	1,3490E-06
244,70	3,8500E-05	ND	ND
344,28	2,2000E-05	ND	ND
778,90	1,7700E-05	ND	ND
964,08	1,5600E-05	ND	ND
1.085,84	1,5300E-05	1,2800E-06	1,0386E-06
1.112,08	1,4800E-05	4,7000E-07	4,5020E-07
1.408,01	ND	ND	ND

ND: Valores não disponíveis.

As eficiências apresentadas na TAB. 17 obtidas por meio do código MCNP para as densidades estudadas, estão demonstradas na FIG.23.

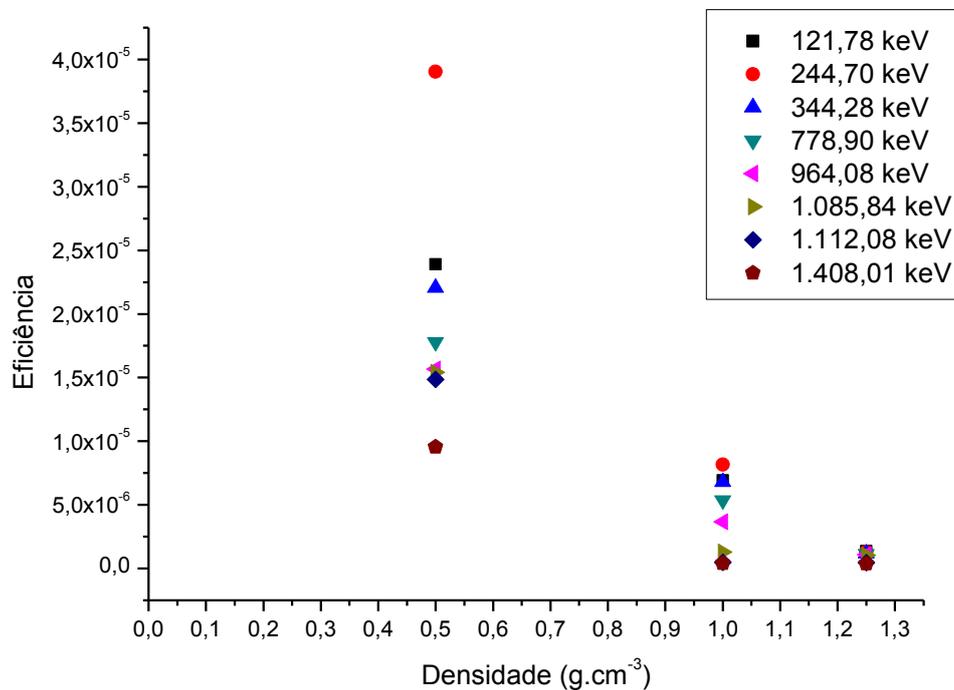


FIGURA 23 - Eficiências teóricas obtidas para as densidades de  $0,5\text{g.cm}^{-3}$ ,  $1,0\text{g.cm}^{-3}$ ,  $1,25\text{g.cm}^{-3}$  e  $2,0\text{g.cm}^{-3}$ , utilizando-se a combinação F2C1-2D15

Na FIG.23 é possível observar que as eficiências apresentam um comportamento similar, diminuindo com o aumento da densidade da matriz que preenche o interior do tambor de 200 L, conforme o esperado os maiores valores de eficiência foram obtidos para a densidade de  $0,5 \text{ g.cm}^3$ .

### 5.3.4 Análise por espectrometria gama para a combinação F2C1-2D15

Na FIG. 24 está indicado o espectro experimental, fornecido pelo software de aquisição e análise GENIE 2000, obtido fazendo-se uso da combinação F2C1-2D15, escolhida levando-se em conta o desempenho demonstrado na análise teórica demonstrado nos itens 5.3.2 e 5.3.3, utilizando-se o tambor de calibração preenchido com papel compactado com densidade de  $0,5 \text{ g.cm}^3$ . As análises experimentais foram realizadas utilizando-se um tempo de contagem de 21.600 segundos.

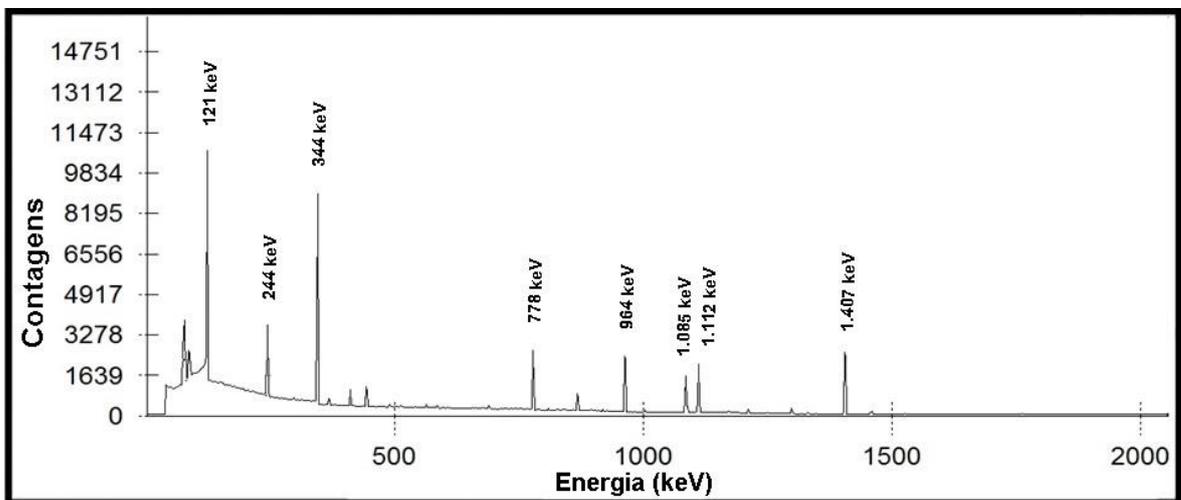


FIGURA 24 – Espectro experimental da combinação F2C1-2D15

Os valores obtidos experimentalmente foram comparados com os valores teóricos e suas relações estão demonstradas na TAB. 19, assim como seus respectivos erros.

TABELA 19 – Relação entre as eficiências teóricas e experimentais utilizando-se a combinação F2C1-2D15

Energia(keV)	$\epsilon_{MCNP}$	$\epsilon_{EXP}$	Erro $\epsilon_{EXP}$	$\epsilon_{MCNP} / \epsilon_{EXP}$	Diferença percentual
121,78	2,3892E-05	2,3700E-05	2,54	1,0081	0,8036
244,70	3,9029E-05	3,8500E-05	2,60	1,0137	1,3554
344,28	2,2053E-05	2,2000E-05	2,55	1,0024	0,2403
778,90	1,7799E-05	1,7700E-05	2,62	1,0056	0,5562
964,08	1,5659E-05	1,5600E-05	2,62	1,0038	0,3768
1.085,84	1,5405E-05	1,5300E-05	2,68	1,0069	0,6816
1.112,08	1,4865E-05	1,4800E-05	2,64	1,0044	0,4373

Na FIG.25 as eficiências teóricas obtidas por meio do código MCNP e experimentais são comparadas para a combinação F2C1-2D15 do tambor de calibração com densidade de  $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$ .

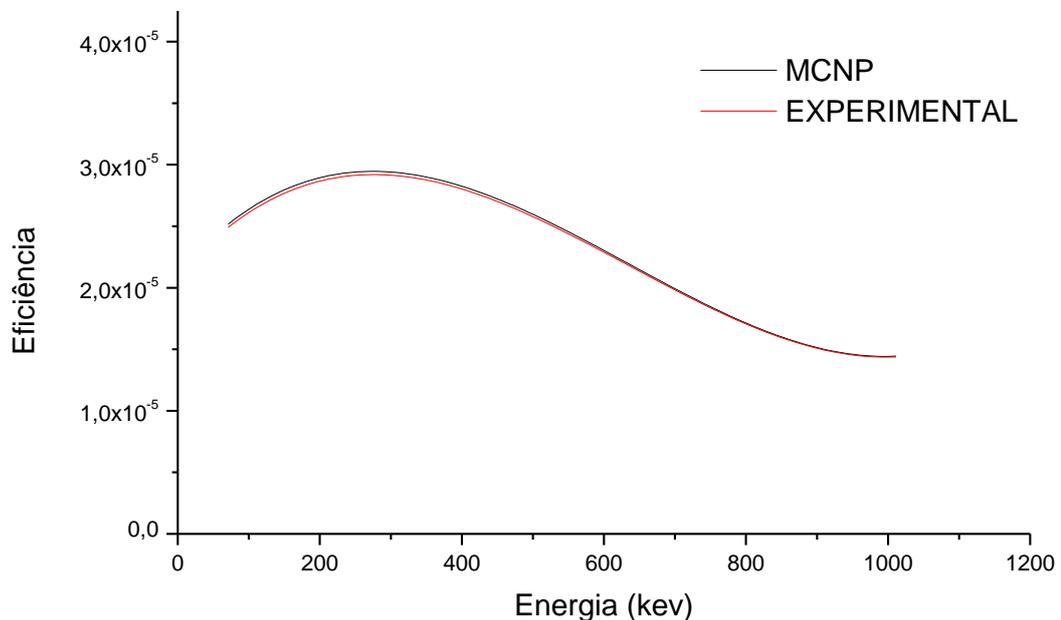
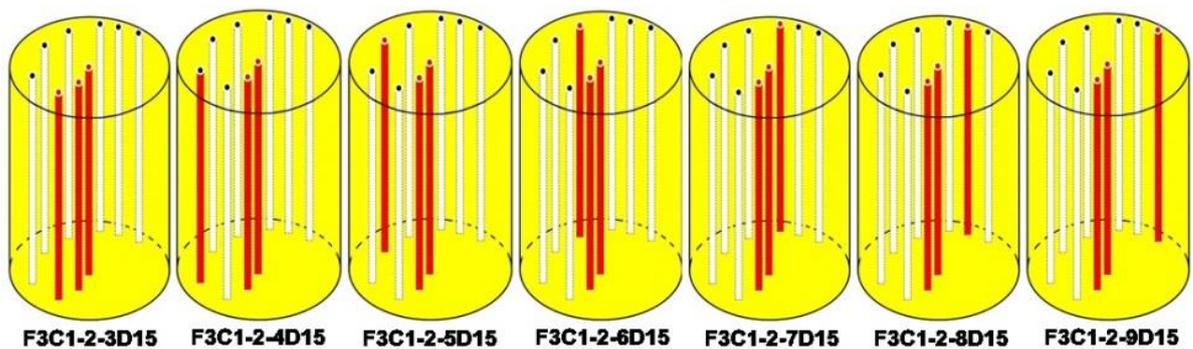


FIGURA 25 – Comparação das eficiências teóricas e experimentais para a combinação F2C1-2D15 do tambor de calibração com densidade de  $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$

#### 5.4 Combinações utilizando-se três cascas do tambor de 200 L

Utilizando-se três cascas do tambor de 200 L, o número de combinações possíveis equivalem a um total de 86.

Apenas por questão de ordem, o primeiro grupo de combinações utilizando-se três cascas do tambor de calibração, foi definido posicionando-se uma das fontes sempre na casca 1, enquanto as outras duas fontes foram posicionadas em cascas diferentes, desse modo às combinações podem ser agrupadas em sete grupos distintos. O primeiro grupo de combinações possíveis para essa configuração está apresentado na FIG. 26.



*FIGURA 26 - Primeiro grupo de combinações considerando três cascas do tambor de 200 L*

Utilizando-se até três cascas simultâneas do tambor de 200 L, o número de combinações possíveis é considerado alto, portanto nem todas as combinações utilizando-se três cascas foram utilizadas nessa análise. As eficiências teóricas e experimentais foram obtidas considerando-se a densidade de  $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$  e distância da parede externa do tambor em relação ao detector de 15 cm. As eficiências teóricas e experimentais obtidas estão apresentadas nas TAB. 20 e TAB. 21.

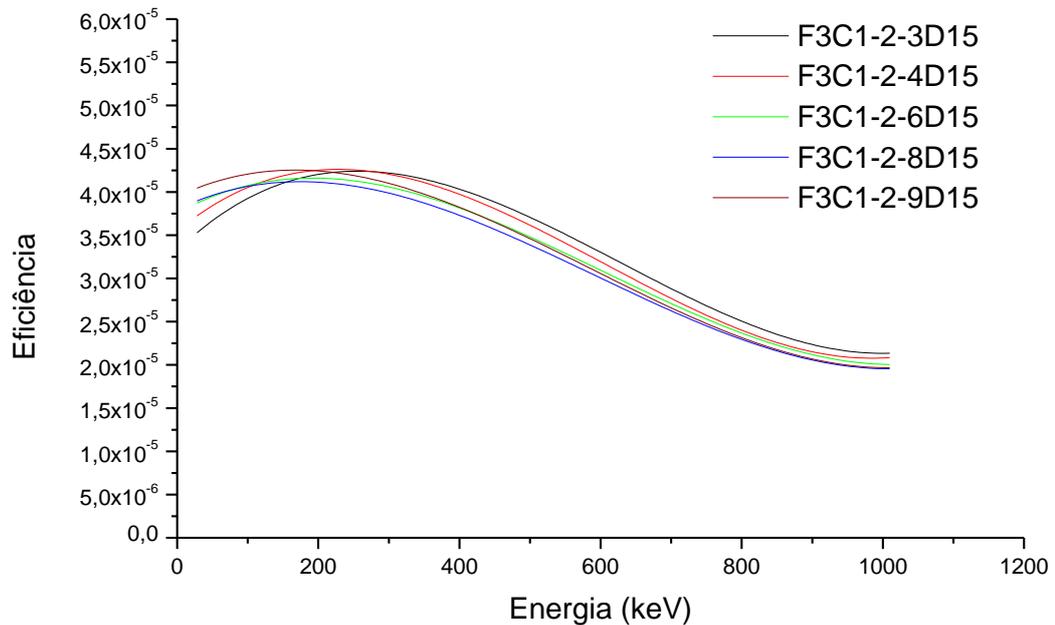
TABELA 20 - Eficiências teóricas obtidas simulando-se as energias de interesse em três diferentes cascas do tambor de calibração

<i>Energia</i> (keV)	$\epsilon_{MCNP}$ <b>F3C1-2-3D15</b>	$\epsilon_{MCNP}$ <b>F3C1-2-4D15</b>	$\epsilon_{MCNP}$ <b>F3C1-2-6D15</b>	$\epsilon_{MCNP}$ <b>F3C1-2-8D15</b>	$\epsilon_{MCNP}$ <b>F3C1-2-9D15</b>
121,78	3,5812E-05	3,7025E-05	3,7432E-05	3,7413E-05	3,8534E-05
244,70	5,5220E-05	5,5127E-05	5,2163E-05	5,1234E-05	5,3321E-05
344,28	3,2217E-05	3,2013E-05	3,1957E-05	3,1267E-05	3,1674E-05
778,90	2,6010E-05	2,5108E-05	2,4110E-05	2,3687E-05	2,3954E-05
964,08	2,3024E-05	2,2052E-05	2,1942E-05	2,1050E-05	2,1235E-05
1.085,84	2,2134E-05	2,2221E-05	2,1123E-05	2,0230E-05	2,0400E-05
1.112,08	2,2111E-05	2,1942E-05	1,9587E-05	1,9740E-05	1,9920E-05

TABELA 21 - Eficiências experimentais obtidas para as combinações utilizando-se três fontes padrão de  $^{152}\text{Eu}$

<i>Energia</i> (keV)	$\epsilon_{EXP}$ <b>F3C1-2-3D15</b>	$\epsilon_{EXP}$ <b>F3C1-2-4D15</b>	$\epsilon_{EXP}$ <b>F3C1-2-6D15</b>	$\epsilon_{EXP}$ <b>F3C1-2-8D15</b>	$\epsilon_{EXP}$ <b>F3C1-2-9D15</b>
121,78	3,5700E-05	3,6300E-05	3,6000E-05	3,6400E-05	3,7500E-05
244,70	5,4600E-05	5,4400E-05	5,1800E-05	5,0200E-05	5,2300E-05
344,28	3,1800E-05	3,1400E-05	3,0200E-05	3,0200E-05	3,0600E-05
778,90	2,5200E-05	2,4100E-05	2,3200E-05	2,2600E-05	2,2900E-05
964,08	2,2100E-05	2,1500E-05	2,0200E-05	1,9900E-05	2,0200E-05
1.085,84	2,1700E-05	2,1100E-05	2,0000E-05	1,9700E-05	1,9800E-05
1.112,08	2,1000E-05	2,0800E-05	1,9200E-05	1,9300E-05	1,9400E-05

Na FIG.27 é possível observar o comportamento das curvas de eficiências teóricas para as combinações consideradas utilizando três fontes radioativas padrão de  $^{152}\text{Eu}$  apresentadas na TAB. 20.



*FIGURA27 - Comportamento das eficiências para algumas combinações do primeiro grupo considerando-se três fontes de  $^{152}\text{Eu}$*

Observa-se na FIG.26 que para todas as combinações os resultados de eficiência seguem o mesmo comportamento com a combinação F3C1-2-3D15 apresentando valores de eficiência ligeiramente superiores aos demais resultados obtidos.

#### **5.4.1 Estudo de diferentes distâncias para o primeiro grupo de combinações utilizando-se três cascas do tambor de 200 L**

Conforme o desempenho apresentado na FIG. 27 para conhecermos o comportamento da curva de eficiência em função da distância, as eficiências experimentais foram obtidas com as fontes padrão de  $^{152}\text{Eu}$  posicionadas nas cascas 1, 2 e 3 do tambor de 200 L com o detector de HPGe posicionado em duas diferentes distâncias em relação a parede externa do tambor.

As eficiências teóricas e experimentais obtidas para as combinações F2C1-2-3D15 e F2C1-2-3D50, considerando-se a densidade do tambor de  $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$ , estão apresentadas na TAB. 22 e TAB. 23.

TABELA 22 - Eficiências teóricas obtidas utilizando-se as combinações F3C1-2-3D15 e F3C1-2-3D50

Energia (KeV)	$\epsilon_{\text{MCNP}}$	
	F3C1-2-3D15	F2C1-2-3D50
121,78	3,5812E-05	2,7235E-05
244,70	5,5220E-05	4,0500E-05
344,28	3,2217E-05	1,6345E-05
778,90	2,6010E-05	1,1538E-05
964,08	2,3024E-05	2,7538E-06
1.085,84	2,2134E-05	2,2700E-06
1.112,08	2,2111E-05	7,1200E-07

TABELA 23 - Eficiências experimentais obtidas para as combinações F3C1-2-3D15 e F3C1-2-3D50

Energia (KeV)	$\epsilon_{\text{EXP}}$		Erro (%)	
	F3C1-2-3D15	F2C1-2-3D50		
121,78	3,5700E-05	2,6200E-05	3,53	2,58
244,70	5,4600E-05	3,9500E-05	2,57	2,64
344,28	3,1800E-05	1,5300E-05	2,53	2,58
778,90	2,5200E-05	ND	-	-
964,08	2,2100E-05	ND	-	-
1.085,84	2,1700E-05	2,2700E-06	2,63	3,65
1.112,08	2,1000E-05	7,1200E-07	2,60	4,71

ND: Valores não disponíveis

As eficiências obtidas para as combinações apresentadas na TAB. 22 para as energias consideradas estão demonstradas na FIG. 28.

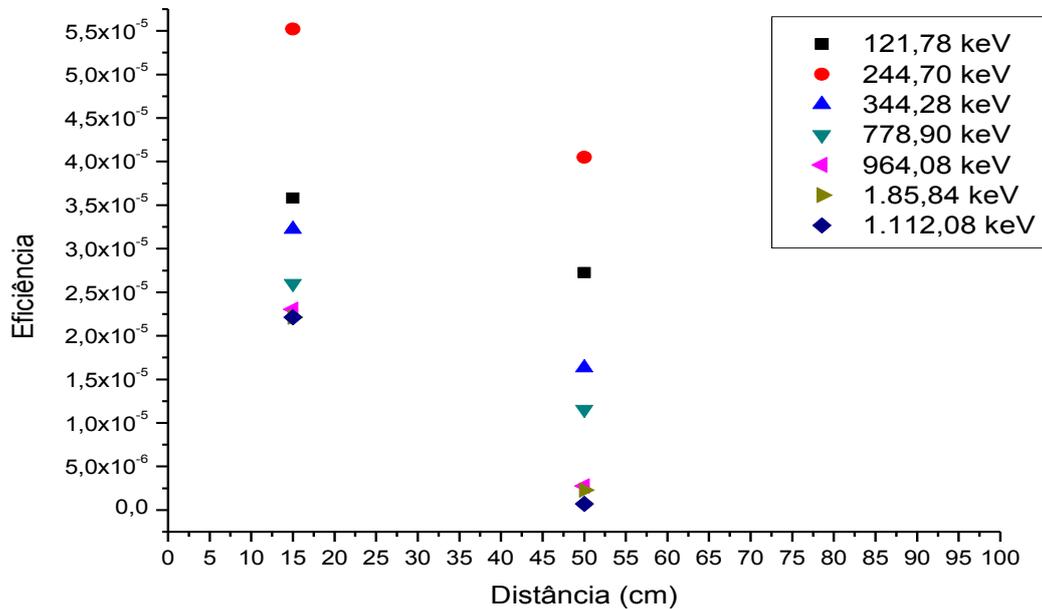


FIGURA 28 – Eficiências teóricas obtidas para as combinações F3C1-2-3D15 e F3C1-2-3D50

#### 5.4.2 Análise por espectrometria gama para a combinação F3C1-2-3D15

Na FIG. 29 observa-se o espectro experimental, obtido utilizando-se o tambor de calibração com densidade de  $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$ . Para essa análise foi utilizado um tempo de contagem de 21.600 segundos.

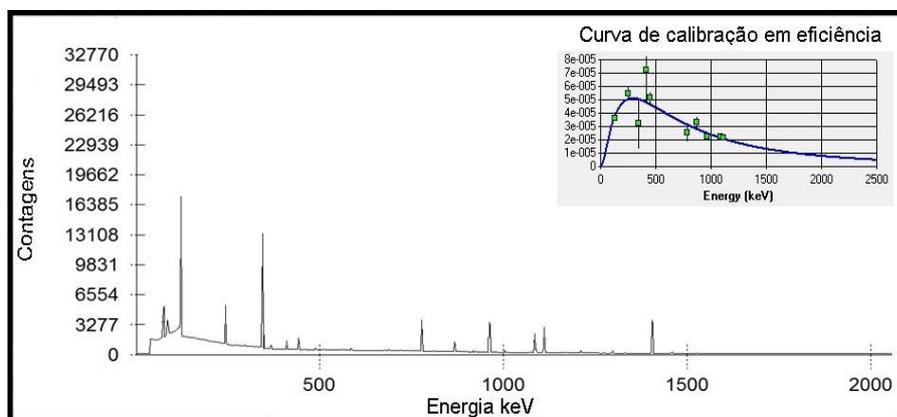


FIGURA 29– Espectro experimental da combinação F3C1-2-3D15

Os valores obtidos experimentalmente foram comparados com os valores teóricos e suas relações estão demonstradas na TAB. 24.

TABELA 24 – Relação entre as eficiências teóricas e experimentais utilizando-se a combinação F3C1-2-3D15

Energia (keV)	$\epsilon_{MCNP}$	$\epsilon_{EXP}$	Erro $\epsilon_{EXP}$	$\epsilon_{MCNP} / \epsilon_{EXP}$	Diferença percentual
121,78	3,5812E-05	3,5700E-05	2,53	1,0033	0,2792
244,70	5,5220E-05	5,4600E-05	2,57	1,2017	1,1228
344,28	3,2217E-05	3,1800E-05	2,53	1,0063	1,2943
778,90	2,6010E-05	2,5200E-05	2,59	1,0155	3,1142
964,08	2,3024E-05	2,2100E-05	2,59	1,0136	4,1745
1.085,84	2,2134E-05	2,1700E-05	2,63	1,0092	1,9608
1.112,08	2,2111E-05	2,1000E-05	2,60	1,0092	5,0246

Na FIG. 30 as eficiências obtidas por meio do código MCNP e experimentais são comparadas para a combinação F3C1-2-3D15 do tambor de calibração com densidade de  $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$ .

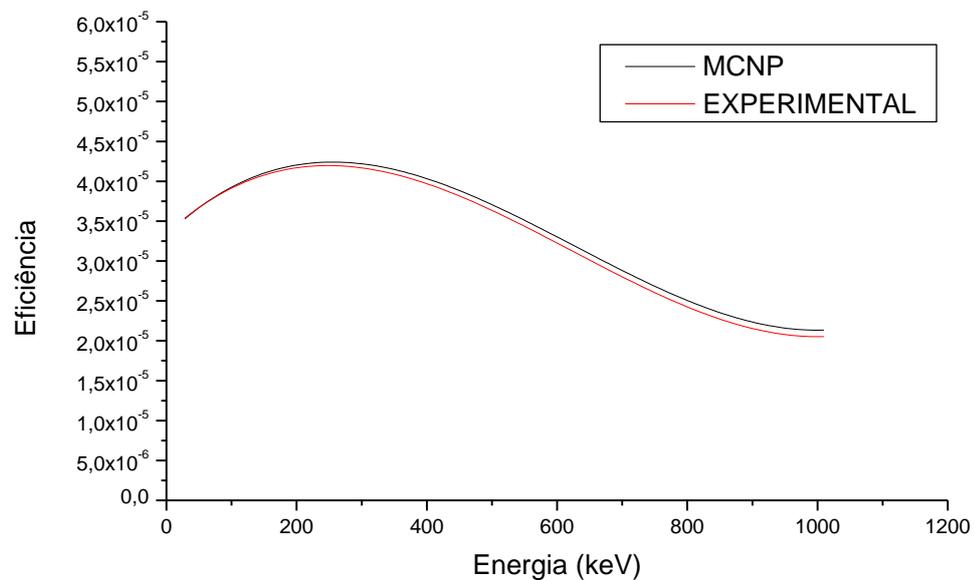


FIGURA 30 – Comparação das eficiências teóricas e experimentais para a combinação F3C1-2-3D15 do tambor de calibração de  $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$

## 6 CONCLUSÕES

A finalidade proposta no objetivo deste trabalho foi atingida alcançando-se os objetivos específicos.

As eficiências obtidas por simulação pelo método de Monte Carlo utilizando-se o software MCNP permitiram observar o quanto a densidade do tambor de calibração e a distância em que o detector foi posicionado em relação ao tambor são importantes bem como a distribuição das fontes padrão em diferentes cascas do tambor influenciam no comportamento dos valores de eficiências.

Considerando-se o desempenho demonstrado nas análises de diferentes distâncias de posicionamento do detector em relação ao tambor de calibração e também das diferentes densidades do conteúdo do tambor, e ainda variando-se a quantidade de fontes radioativas no interior do tambor, verificou-se que a utilização do método de Monte Carlo é adequada na caracterização de tambores de rejeitos radioativos, mesmo que os elementos radioativos estejam distribuídos de forma heterogênea.

A validação do método realizada posicionando as fontes radioativas de <sup>152</sup>Eu nas diferentes cascas dos tambores de calibração, simulando-se diferentes situações, demonstrou que a metodologia desenvolvida para a caracterização de tambores de rejeitos radioativos é adequada para a utilização proposta.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, M. I. ***Direct mathematical method for calculating full-energy peak efficiency and coincidence correction of HPGe detectors for extended sources.*** *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, 256, 554-557, (2008).

AGARWAL, C.; CHAUDHURY, S.; GOSWAMI, A.; GATHIBANDHE, M. ***Full energy peak efficiency calibration of HPGe detector for point and extended sources using Monte Carlo code.*** *J. Radioanal Nucl. Chem*, 287:701-708, (2011).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. Standard A1008 / A1008M - 11, 2011, “***Standard Specification for Steel Sheet, Cold-Rolled, Carbon, Structural, High-Strength Low-Alloy, High-Strength Low-Alloy with Improved Formability, Solution Hardened, and Bake Hard enable***” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, DOI: 10.1520/A1008\_A1008M-11, [www.astm.org](http://www.astm.org)

BAY, Y. F.; MAUERHOFER, E.; WANG, D. Z.; ODOJ, R. ***An improved method for the non-destructive characterization of radioactive waste by gamma scanning.*** *Appl. Radiat. isot.*, 67 1897-1903, (2009).

BOSON, J.; AGREN, G.; JOHANSSON, L. ***A detailed investigation of HPGe detector response for improved Monte Carlo efficiency calculations.*** *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, 587 304-314, (2008).

BRIESMEISTER, J. F. (Ed.). MCNP<sup>TM</sup> – **A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C, LA-13709-M**. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, December, (2000).

BRUGGEMAN, M.; GERITS, J.; CARCHON, R. **A minimum biased shell-source method for the calibration of rad waste assay systems**, *Appl. Radiat. isot.* 51 255-259, (1999).

CANBERRA INDUSTRIES INC. **GENIE 2000 SPECTROSCOPY SOFTWARE CUSTOMIZATION TOOLS Manual**. Meriden CT, (2001).

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN. NE 6.06 **Seleção e escolha de locais para depósitos de rejeitos radioativos**, Resolução CNEN 014/89, Rio de Janeiro, (1990).

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN. CNEN-NN-6.09 **Crerios de Aceitação para Deposição de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação**, Rio de Janeiro, (2002).

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN. NN 8.01 Gerência de Rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação. **Resolução CNEN-Nº167**, Rio de Janeiro, (2014).

COSTA, P. **Desenvolvimento de uma metodologia para a caracterização do filtro cunho do reator de pesquisa IEAR-1**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, (2014).

COSTA, P.R. **Interação da radiação y com a matéria**. Apostila da Disciplina de Laboratório de Física Moderna da Graduação. Instituto de Física (IF/USP), São Paulo, (2010).

Disponível:>[http://web.if.usp.br/ifusp/files/Apostila\\_interação\\_da\\_radiacao\\_com\\_a\\_materia\\_L.pdf](http://web.if.usp.br/ifusp/files/Apostila_interação_da_radiacao_com_a_materia_L.pdf)> Acesso em: 28 outubro, (2015).

DELLAMANO., J. C. **Otimização da etapa de armazenamento de rejeitos radioativos**. 2005. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, (2005).

DINESCU, L.; VATA, I.; CAZAN, I. L.; MACRIN, R.; CARAGHEORGHEOPOL, G. H.; ROTARESCU, G. H. **On the efficiency calibration of a drum waste assay system**. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, 487 661 – 666, (2002).

HIROMOTO, G.; J.C. DELLAMANO.; J.T. MARUMO.; L.S. ENDO.; R. VICENTE e T. HIRAYAMA. **“Introdução à gerência de rejeitos radioativos”**. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Departamento de Rejeitos Radioativos. São Paulo, (1999).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA. **Principles for the Exemption of Radiation Sources and Practices from Regulatory Control**. Vienna, Safety Series No. 89, (1988).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA. **Clearance of Materials Resulting from the Use of Radionuclides in Medicine, Industry and Research.**, Vienna, (IAEA-TECDOC-1000), (1998).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA. **Radioactive waste management glossary**, Vienna, (2003).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA. **Strategy and Methodology for Radioactive Waste Characterization**. IAEA. Vienna: 2007 (TECDOC-15237), (2007).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA. **Classification of Radioactive waste**, IAEA Safety Standards Series No.GSG-1, General Safety Guide. Vienna, (2009).

KALFAS, C. A.; TSOULOU, E. ***Simulate Program a gamma Ray spectroscopy tool***. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, 500 386-390, (2003).

KNOLL, G. F. ***Radiation Detection and Measurement***. 3<sup>rd</sup> edition Willey, New York, (1999).

KANAWATI, W. E.; PÉROT, B.; CARASCO, C. ***Monte Carlo simulation of high-level radioactive waste characterization with the associated particle technique***. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, 705 61-93, (2013).

KRINGS, T.; MAUERHOFER, E. ***Reconstruction of the isotope activity content of heterogeneous nuclear waste drums***. *Appl. Radiat. isot.*, 70 1100-1103, (2012).

LABORIE, J. M.; PETIT, G. L.; GIRARD, D. A. M. ***Monte Carlo calculation of the efficiency response of a low-background well-type HPGe detector***. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, 479618 – 630, (2002).

LIANG, J. H.; JIANG, S. H.; CHOU, J. T.; CHEN, C. C.; LIN, S. W.; LEE, C. H.; and CHIOU, S. T. ***Parametric study of shell-source method for calibrating radwaste radioactivity detection system***. *Appl. Radiat. isot.*, 49. N<sup>o</sup>4, pp 361 – 368, (1998).

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).

POTIENS JR, A. J. ***Aplicação de redes neurais artificiais na caracterização isotópica de tambores de rejeito radioativo***. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, (2005).

RIDIKAS, D.; FERAY, S.; COMETTO, M. and DAMOY, F. ***Non-destructive method of characterization of radioactive waste containers using gamma spectroscopy and Monte Carlo techniques***. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol.115, N<sup>o</sup>1-4, PP. 113-116, (2005).

RIZZO, S.; TOMARCHIO, E. **Numerical expressions for the computations of coincidence- summing correction factors in  $\gamma$ -ray spectrometry with HPGe detectors.** *Appl. Radiat. isot.*, 68 555-560, (2010).

RÓDENAS, J.; PASCUAL, A.; ZARZA, I. SERRADELL, V.; ORTIZ, J.; and BALLESTEROS, L. **Analysis of the influence of germanium dead layer on detector calibration simulation for environmental radioactive samples using the Monte Carlo method.** *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, 496. pp 390-399, (2003).

SINGH, S.; MHATRE, A. and SAGAR, V. **Estimation of plutonium present in 200 litre waste drums containing high amount of beta gamma activity.** *J. Radioanal Nucl. Chem.* Akadémiai Kiadó, Budapest, Hungary, (2011).

SAVIDOU, A.; TZIKA, F. and STAMATELATOS, I. E. **Characterization of radioactive waste drums by non destructive gamma spectrometry.** 4<sup>th</sup> *International Conference on NDT*, Chania , Crete-Greece, (2007).

TOMA, M.; SIMA, O.; OLTEANU, C. O. **Experimental and simulated studies for the calibration of a radioactive waste assay system.** *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, v.580 pp 391-395, (2007).