

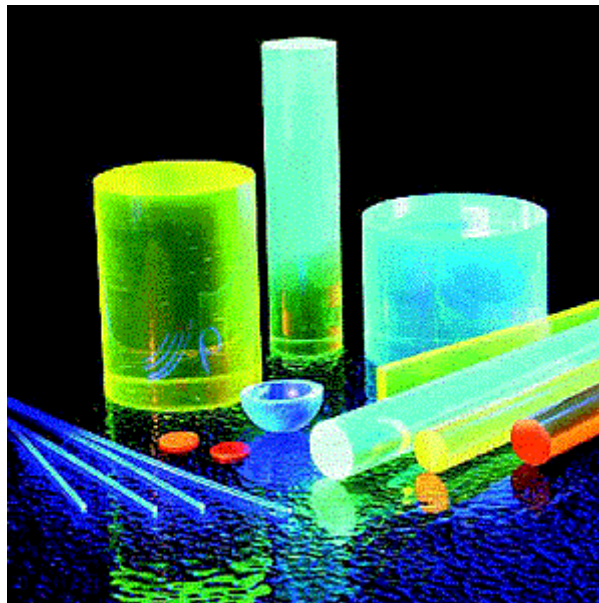


UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS
GRUPO DE FISICA NUCLEAR



Trabajo para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados (DEA) del Programa Interuniversitario de Doctorado en Física Nuclear.

Aplicación de Técnicas Espectrométricas para Caracterizar una Muestra de Cristales Centelladores.



Estudiante: *Esteban Picado Sandí*
Tutor: *Prof. José Manuel Udías Moinelo*

Sevilla, 17 de Diciembre de 2010

INDICE

Sección	Título	Pág.
1	Introducción	
1.1	Motivación	1-4
1.2	Objetivos	1-5
1.3	Agradecimientos	1-6
1.4	Resumen del trabajo	1-7
2	Caracterización del HPGe	
2.1	Instrumentación	2-1
2.1.1	Detector del HPGe	2-2
2.1.2	Filtro de Carbono	2-4
2.1.3	Dewar, Nitrógeno y Extracción	2-5
2.1.4	Preamplificador	2-7
2.1.5	Amplificador	2-8
2.1.6	MCA e Interfase Digital	2-9
2.1.7	Osciloscopio	2-12
2.1.8	Fuente de Alimentación	2-13
2.1.9	Castillo de Plomo	2-14
2.2	Caracterización del sistema de espectrometría gamma HPGe	2-14
2.2.1	Caracterización en Tiempo Muerto	2-15
2.2.2	Caracterización de la Eficiencia con fuentes de ¹³⁷ Cs	2-22
2.3	Determinación de la Eficiencia Absoluta para el HPGe	2-29
3	Caracterización de los PMT	
3.1	Instrumentación	3-1
3.1.1	Fotocátodo y la ventana PMT	3-2
3.1.2	Tubo Fotomultiplicador	3-3
3.1.3	Fuente de Alimentación	3-5
3.1.4	Osciloscopio	3-5
3.1.5	MCA	3-6
3.2	Caracterización óptica y energética de la muestra de cristales centelladores	3-8
3.2.1	Propiedades físicas y ópticas	3-8
3.2.2	Propiedades físicas y Energéticas	3-10
3.3	Caracterización de la resolución en energía	3-11
3.3.1	Medidas con los cristales centelladores empleando los PMT	3-11
3.3.2	Resumen de Resultados y Conclusiones	3-19
4	Caracterización de los SiPM	
4.1	Instrumentación	4-1
4.1.1	APD	4-1
4.1.2	Píxeles APD en modo Geiger	4-2
4.1.3	MPPC	4-3
4.1.4	Montaje de un MPPC	4-4
4.1.5	Módulos para los MPPC	4-7

4.1.6	Eficiencia Óptica	4-8
4.2	Preliminares de la medición con los cristales centelladores	4-9
4.2.1	Acoplamiento del cristal con el MPPC	4-9
4.2.2	Blindaje de la luz exterior	4-10
4.2.3	Posicionamiento	4-10
4.3	Medición de la resolución de los cristales centelladores de la muestra	4-11
4.3.1	Espectros para la muestra de cristales “grandes”	4-11
4.3.2	Resolución para la muestra de cristales “pequeños”	4-13
4.3.3	Corrección de la señal suma para los cristales “grandes”	4-13

5 Resultados

5.1	Muestra: Cristales centelladores	5-1
5.2	Determinación de la Actividad Interna	5-1
5.2.1	Calibración en Energía	5-1
5.2.2	Radiación de Fondo	5-3
5.2.3	Posicionamiento de los cristales	5-4
5.3	Espectros de Actividad Interna de los cristales centelladores	5-5
5.3.1	NaI(Tl)	5-5
5.3.2	CsI(Tl)	5-7
5.3.3	Centelladores a base de Lutecio	5-8
5.3.4	LFS	5-9
5.3.5	MLS	5-11
5.3.6	LYSO	5-15
5.3.7	BGO GSO	5-16
5.3.8	Pr:LuAG	5-18
5.3.9	BaF ₂	5-19
5.3.10	LaBr ₃ (Ce)	5-20
5.4	Determinación de la Actividad Interna Absoluta	5-22
5.4.1	Cristales con ¹⁷⁶ Lu	5-22
5.4.2	Cristales con ¹³⁸ La	5-22
5.5	Concentración de la Actividad Interna	5-24
5.6	Resolución en Energía con los PMT	5-26
5.7	Comparación de los resultados de Resolución en Energía	5-27

1. Introducción

1.1. Motivación

En el contexto de un proyecto de I+D auspiciado por el CSN se pretende desarrollar un dosímetro inteligente. Se quiere construir un dosímetro que supere las funciones tradicionales de un dosímetro de cristal termoluminiscente convencional. En concreto se quiere diseñar un dispositivo que no sólo dé la dosis adquirida durante un cierto intervalo, sino que analice las fuentes emisoras (función de espectrómetro), incorpore un sistema GPS y que esté constantemente enviando sus datos a un ordenador central.

Bajo esos objetivos se inscriben las actividades aquí desarrolladas, concretamente la caracterización de una muestra de cristales de centelleo para una futura incorporación al sistema de adquisición antes descrito.

Durante la caracterización se pretende determinar la concentración de actividad interna mediante un sistema de espectrometría gamma con HPGe y la resolución en energía que pueda obtenerse mediante un tubo fotomultiplicador (PMT) y un fotomultiplicador de silicio (SiPM). Para la puesta en operación de los SiPM se requirió construir un módulo de alimentación y procesamiento de la señal en las primeras etapas.

Mi motivación personal está en el aprendizaje, no sólo de las técnicas convencionales, sino del diseño y manufacturación de un detector. Las potencialidades de poder diseñar o saber discernir entre la instrumentación fue uno de los objetivos que me hicieron querer ingresar al programa de doctorado: Aprender sobre instrumentación para ponerlo al servicio en mi país.

1.2. Objetivos:

1.2.1. General

- Caracterización de detectores de centelleo mediante técnicas de bajo nivel y espectrometría con SiPM.

1.2.2. Específicos

- Determinación de la eficiencia de un detector de HPGe en sistema de bajo nivel mediante medidas con fuentes trazadas.
- Determinar la concentración de actividad interna, en volumen y masa, para una muestra de cristales centelladores.
- Determinación de la resolución de una muestra de cristales centelladores mediante dos PMT y un SiPM en 511 y 661.66 keV.

1.3 Agradecimientos

Agradezco a mis tutores José Manuel Udías y Luis Mario Fraile por sus enseñanzas, cooperación y paciencia. Alcanzar su nivel de conocimiento es el reto profesional más elevado al que puedo aspirar.

A todos mis compañeros de estudios y oficinas, en particular Joaquín, Bruno, Jacobo, Pablo, Khaled, Elena y Esther. Siempre tendieron su mano para ayudarme. Gracias por introducirme en el mundo de las simulaciones y reconstrucciones.

A Eduardo Lage y Alejandro Sisniega del Hospital Gregorio Marañón por sus ganas de ayudar y explicar los temas de electrónica.

A mi madre y abuelita por comprarme libros y revistas mes a mes aunque fuera de cosas que no entendían. Gracias por darme siempre confianza para seguir adelante y regalarme sus bendiciones día a día.

Y particularmente a mi esposa Silvia, su paciencia, cariño y comprensión han sido enormes. Su aliento es mi inspiración de cada mañana, su mirada mi eterno deseo por mejorarme.

1.3. Resumen del trabajo

Se pretende caracterizar la siguiente muestra de cristales centelladores:

Tipo	Estructura	Cantidad
Alcalinos	LaBr ₃ (Ce)	1
	NaI(Tl)	2
	CsI(Tl)	2
	Pr:LuAg	4
No Alcalinos	BaF ₂	1
	GSO	1
	LYSO	1
	BGO	1
	LFS	5
	MLS	62

El trabajo se divide en tres partes, correspondientes a los capítulos 2, 3 y 4 del presente trabajo. Cada parte pretende cumplir un objetivo, a saber:

1. el *capítulo 2* habla primero sobre la caracterización en eficiencia absoluta de un sistema de bajo nivel con detector HPGe (modelo LOAX-60450-30P-CW). Posteriormente se toma un espectro de 2000 segundos de cada cristal, se analiza espectrométricamente para: identificar las especies presentes y la actividad intrínseca que ellas presentan en el cristal.
2. el *capítulo 3* habla sobre las mediciones realizadas con los PMT. Uno de los tubos presenta sensibilidad al UV, gracias a ello también se realizan cálculos de resolución en energía para cristales cuyo pico de emisión está en el UV (por ejemplo: LaBr₃:Ce). Luego se comparan los resultados obtenidos entre los dos PMT para emisiones en el rango visible.
3. el *capítulo 4* versa sobre la operación de los SiPM y los módulos que fueron diseñados para la medición espectral de los cristales centelladores. Finalmente se estima la resolución en energía para cada cristal (individual o matricialmente).

Al final del documento, en el *capítulo 5*, se presentan los resultados de todas las secciones, se analizan y comparan los valores y gráficos obtenidos.

2. Caracterización del HPGe

Se va a caracterizar el sistema de espectrometría gamma de bajo nivel con HPGe. Se describirá el procesamiento de la señal. También se estudiará los fenómenos de tiempo muerto y apilamiento de pulsos. Finalmente se realiza una estimación de la eficiencia absoluta para el rango de energía de 100 a 1408 keV porque es la región de emisión de los trazadores que se buscarán en la muestra de cristales centelladores.

2.1. Instrumentación

El sistema de espectrometría gamma empleado es un LOAX (Low-Energy Photon Detector), el cual está compuesto por un detector semiconductor (HPGe), un preamplificador, un dewar y un criostato (PopTop). (Ver Figura 2.1)

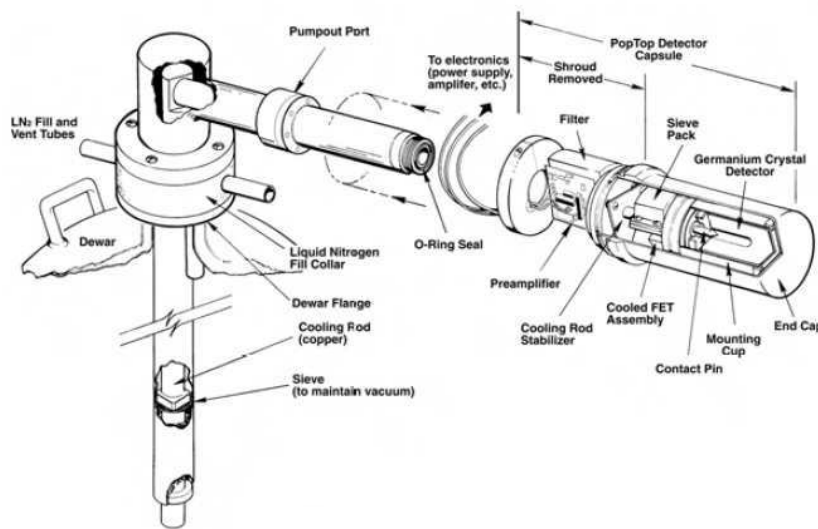


Fig. 2.1: Diagrama del sistema de detección LOAX de Ortec. Esquema del PopTop Detector.

Del preamplificador en el LOAX (ubicado en el PopTop) salen dos señales iguales de energía-tiempo. Una de estas señales se lleva directamente a un osciloscopio (Agilent DSO5014A) y la otra hacia el Amplificador (Módulo NIM: Canberra 2022). De este último sale una señal bipolar que es llevada al osciloscopio y una señal monopolar que es llevada a un analizador multicanal (Atomki PalmTop MCA). Finalmente, la señal del MCA es llevada a una interfaz gráfica (PC) para el análisis espectral. (Ver Figura 2.2)

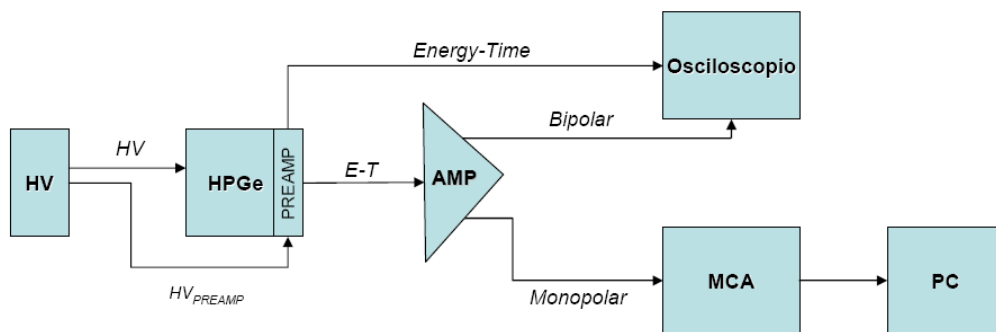


Fig.2.2: Esquema de procesamiento de la señal.

Procedemos a describir cada parte del sistema de adquisición.

2.1.1 Detector de HPGe

Los cristales semiconductores de Ge son utilizados en espectrometría gamma por dos razones: uno es su baja energía entre bandas ($E_G = 0.661 \text{ eV}$)ⁱ, y el otro es que tiene una densidad atómica mayor a la del Silicio¹, lo que implica mayor probabilidad de absorción.

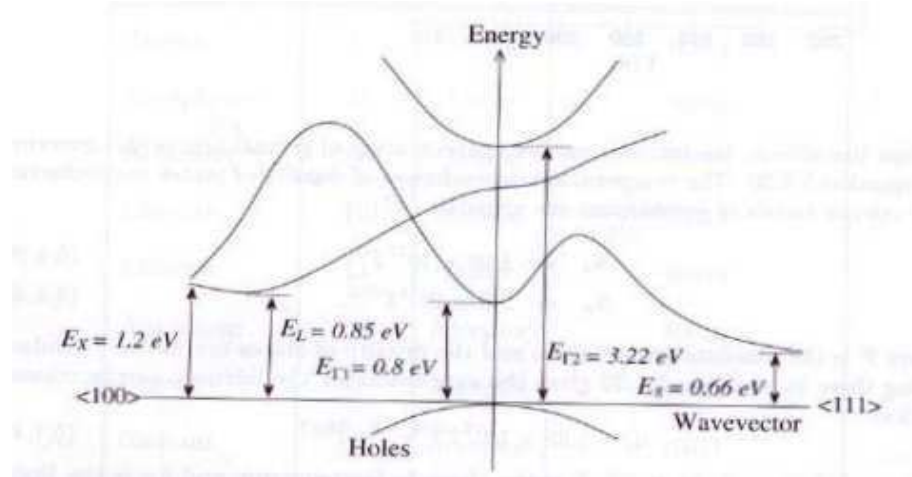


Fig. 2.3: Diagrama de la estructura de bandas del Ge.

En la figura 2.3 apreciamos un diagrama de la estructura de bandas del Ge, donde se dibuja la energía versus el número de onda. Los subíndices de la energía representan los niveles². El número en brackets <100> y <111> son los índices de Millerⁱⁱ.

Esta energía tiene dos efectos estructurales sobre el cristal de Ge: una es su alta concentración intrínseca de portadores de carga, y la otra es la presencia de ruido intrínseco debida a su susceptibilidad térmica (agitación térmica)³. La primera es positiva porque aumenta la eficiencia intrínseca, mientras que la otra es negativa porque plantea requerimientos en la arquitectura del sistema de detección.

La Energía entre bandas presenta dependencia de la temperatura con esta expresión⁴:

$$E_G = 0.742 - 4.8 \times 10^{-4} \frac{T^2}{T + 235}$$

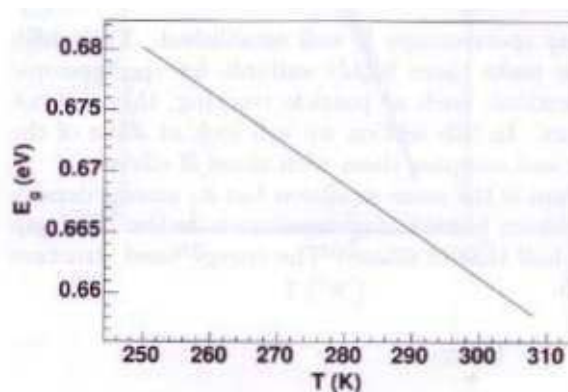


Fig. 2.4: Variación de la E_G con la Temperatura Absoluta.

ⁱ E_G : Band Gap Energy.

ⁱⁱ Los índices de Miller se utilizan para representar la orientación de un plano cristalográfico.

El aumento en la temperatura se asocia directamente con el ruido en la señal. Al aumentar la temperatura se hace más probable que los electrones en la capa de valencia salten a la conducción por agitación térmica⁵.

A diferencia de los cristales de Ge(Li) que no deben calentarse hasta temperatura ambiente, los cristales de HPGe sí pueden estar a temperatura ambiente cuando no se están utilizando. Sin embargo, para ambos casos la temperatura recomendada de operación es que la tiene el nitrógeno líquido almacenado en el dewar (-195.8 °C)⁶.

Otro factor que condiciona las mediciones y las estimaciones de la eficiencia de un detector es su geometría. En nuestro caso se ha utilizado un cristal semiconductor tipo N cerrado de Germanio Hiperpuro (HPGe) integrado a un sistema **LOAX 60450-30P-CW** de la empresa ORTEC. (Ver Figura 2.5.a)

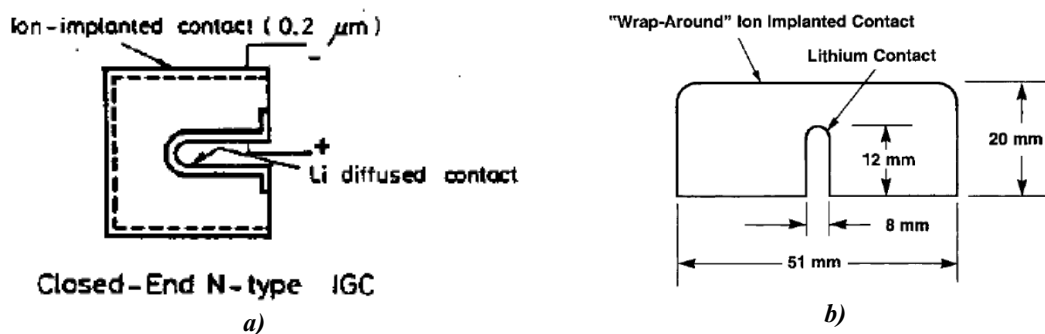


Fig.2.5: Ejemplos de cristales tipo N cerrados. a) Muestra el grosor típico del ión implantado como contacto negativo. b) Muestra las dimensiones típicas de un cristal LOAX.

Los cristales coaxiales cerradosⁱⁱⁱ son los más populares en su fabricación, dado que:

- Evitan las corrientes de fuga que tienen los coaxiales “verdaderos” (“true coaxial”). Estos presentan una forma similar a cilindros huecos.
- Presentan una frontal plana que puede utilizarse como ventana de entrada para radiaciones de baja energía (rayos X y gammas de baja energía).
- Poseen líneas de campo eléctrico que no son completamente radiales, lo que produce regiones con menor intensidad de \vec{E} . Principalmente en las esquinas, donde la velocidad de arrastre puede ser menor⁷.

En nuestro caso el núcleo central tiene forma de ojiva profunda, con lo cual homogeniza la forma radial de las líneas de campo. También se le recortan las esquinas para que se reduzcan las zonas de baja intensidad de campo eléctrico. (Ver Figura 2.5.b) De esta forma se reducen los efectos adversos del inciso c).

En referencia al punto b) el detector tipo **LOAX 60450-30P-CW** tiene una ventana frontal de Carbono (CW), y las dimensiones que se describen a continuación en la figura 2.6.

ⁱⁱⁱ Closed-Ended Coaxial Cristal.

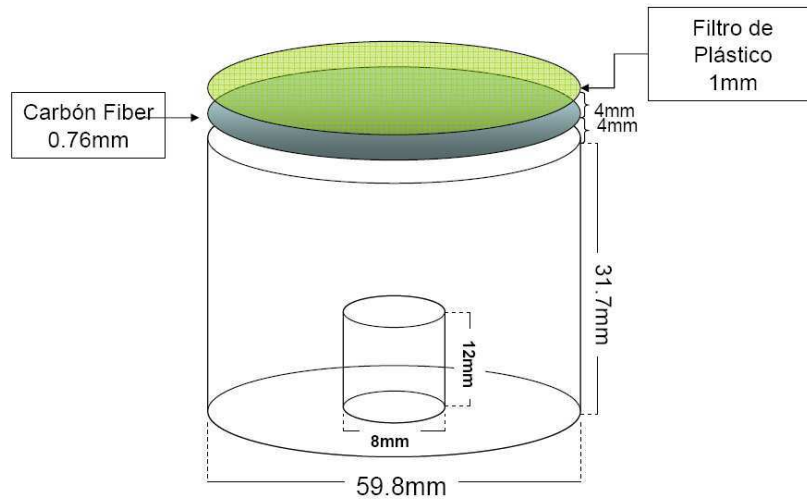


Fig. 2.6: Esquema del detector LOAX, el filtro de C y el plástico protector.

2.1.2 Filtro de Carbono

En el modelo LOAX el detector de HPGe se encuentra encapsulado en un recipiente cilíndrico de aluminio (PopTop Capsule), el cual deja únicamente al descubierto la cara frontal del cristal (por donde incide la radiación). Dicho espacio puede ser cubierto mediante una ventana de carbono o de berilio. Nuestro modelo -CW tiene filtro delgado de carbono. (Ver figura 2.7)

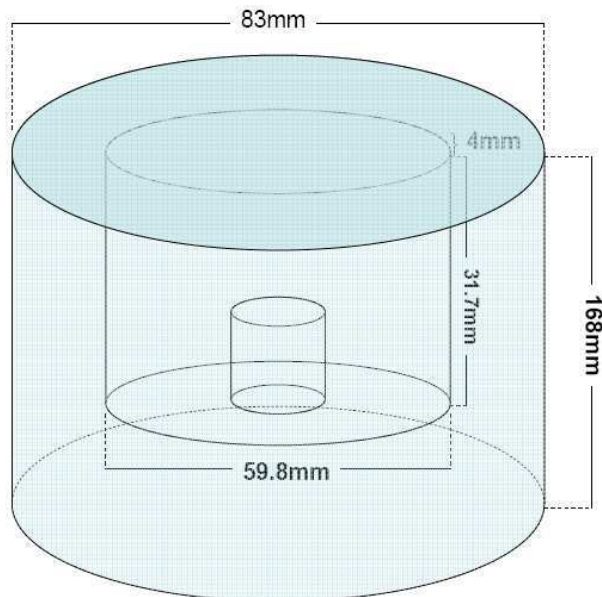


Fig. 2.7: Detector, encapsulado y ventana de Carbón.

En la *Figura 2.7* se observa la geometría del encapsulado de aluminio que protege y blindo al cristal de HPGe. Se aprecia (en un tono más oscuro) que la ventana de carbono cubre la tapa o parte frontal del encapsulado. Dicha ventana se halla 4 mm arriba del cristal con un grosor de 0.76 mm.

Se coloca una ventana de C o Be para permitir el paso de radiación que normalmente sería blindada por la carcasa de Al. Esto es debido al menor valor de Z con respecto al Al.

Las ventanas de Be y C poseen diferentes valores de transmisión para rayos X y gammas de baja energía. (Ver Figura 2.8)

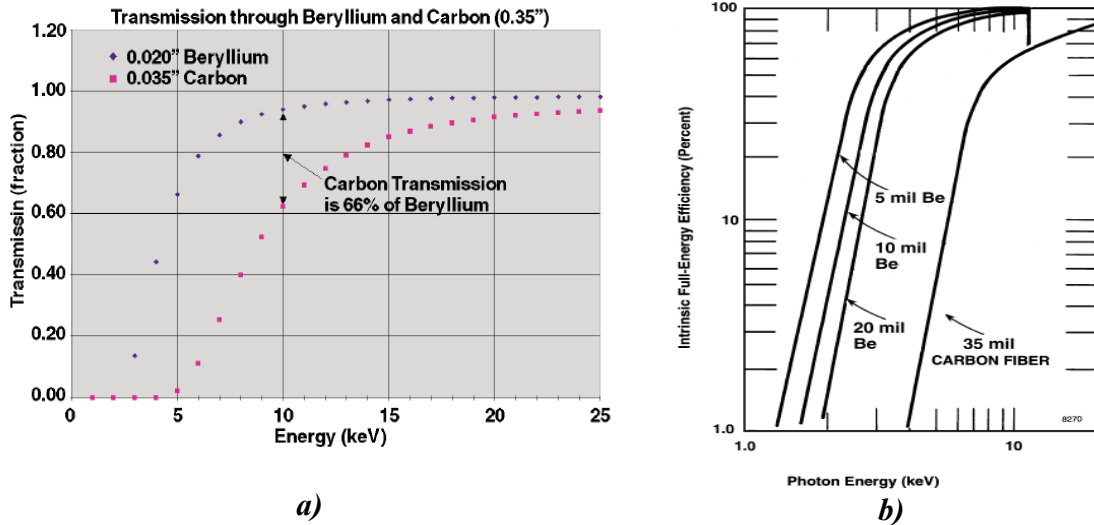


Fig. 2.8: Transmisión de rayos X y gammas de baja energías a través de ventanas de C y Be. a) Transmisión a través de Be y C; b) Eficiencia Total en Energía.

En la Figura 2.8.a se observa que la ventana de C permite el paso de fotones con energías superiores a 5 keV, con lo cual actúa como filtro para energías inferior a ese valor. La empresa de fabricación sugiere que las mediciones se tomen a partir de 8 keV⁸.

La relación costo-beneficio-riesgo hace pensar en el C como la solución óptima. Es más barato, permite medir adecuadamente a partir de 8 keV y no posee los riesgos a salud que tiene el Be^{iv}.

2.1.3 Dewar, Nitrógeno y Extracción

El HPGe es un detector ideal para espectrometría, pero para operar de forma óptima necesita satisfacer ciertas condiciones. La temperatura es uno de los requisitos fundamentales. Entre más frío esté el detector, menor será el efecto del ruido (agitación térmica) y la resolución será optimizada.

Para enfriar el HPGe se utiliza un depósito herméticamente cerrado (dewar) que contiene nitrógeno líquido^v. La introducción de un dedo térmico desde el encapsulado (PopTop) hasta el reservorio permite, mediante conducción y convección, que se reduzca la temperatura interna del cristal semiconductor. (Ver Figura 2.9.a)

En nuestro caso el sistema dewar-criostato-PopTop es el modelo CFG-LP-SH (Ver Figura 2.10). Las dimensiones están representadas en la Figura 2.9.b. Los valores de las constantes son: A= 83(3.25)mm, B=88(3.45)mm, C=168(6.6)mm, D=262(10.3), y F=401(15.8)mm⁹.

^{iv} El Berilio y sus sales son tóxicas y posiblemente cancerígenas. Daña principalmente los pulmones.

^v El nitrógeno líquido es N₂ puro en estado líquido con una temperatura igual o menor a -195.8 °C (temperatura de ebullición) a 1 atm de presión. Es un líquido incoloro e inodoro.

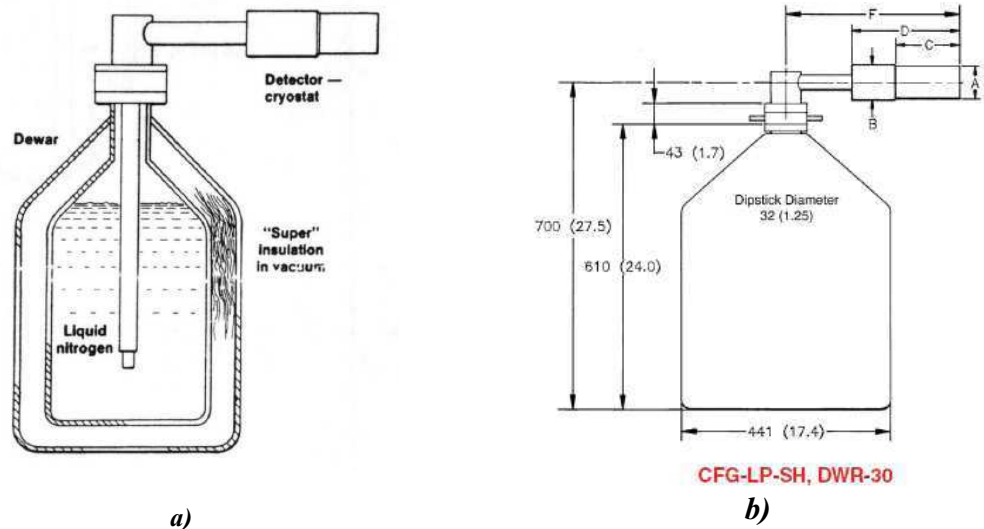


Fig.2.9: Esquemas de dewar: a) Esquema del dedo térmico en contacto con el depósito de Ni-líquido¹⁰; b) Esquema no a escala del dewar modelo CFG-LP-SH.DWR-30. Tiene capacidad de 30 litros¹¹.

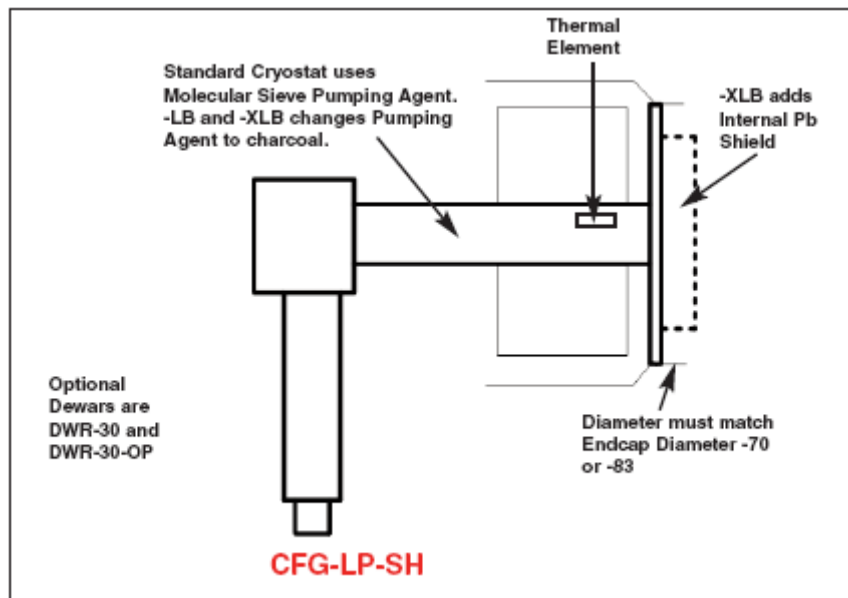


Fig.2.10: Criostato modelo CFG-LP-SH.

En la *Figura 2.10* se muestra el criostato modelo **CFG-LP-SH** que es el dispositivo que conecta el dedo térmico (sumergido en el Ni líquido) con el PopTop. Sus dimensiones son las precisas para acoplarse a la cara posterior del PopTop. Tiene un elemento térmico para controlar la temperatura del sistema. Existe la opción de agregar un pequeño blindaje de Pb, sin embargo el nuestro no lo incluye.

La recarga del Nitrógeno líquido se hace mediante el trasvasado de Nitrógeno de un dewar a otro. En nuestro caso se ha construido un sistema de extracción por ebullición del nitrógeno líquido. (*Ver Figura 2.11*)



Fig. 2.11: Bastón para la extracción del Ni.

La dinámica de operación es la siguiente. Se aplica un voltaje a la resistencia (100V) que se encuentra en la parte inferior del bastón. La resistencia calienta (100W) y pone en ebullición al nitrógeno líquido. La presión de vapor dentro del dewar es mayor que la presente en el dewar a recargar, luego ejerce una fuerza de succión que trasvasa el nitrógeno de un lugar a otro, primero a través del tubo largo en el bastón y luego por las mangueras que conectan ambos recipientes.

2.1.4 Preamplificador

La señal proveniente del HPGe es débil y puede presentar ruido electrónico, por tal motivo la preamplificación es necesaria antes de procesar la señal. El preamplificador amplifica el pulso, conforma la señal y filtra el ruido¹².

Dado que la capacitancia del semiconductor cambia con los parámetros de operación (principalmente por la temperatura) es necesario utilizar un preamplificador sensitivo a la carga (charge-sensitive). Este tipo de preamplificador garantiza que el voltaje de salida sea proporcional a la carga total recolectada en el pulso¹³.

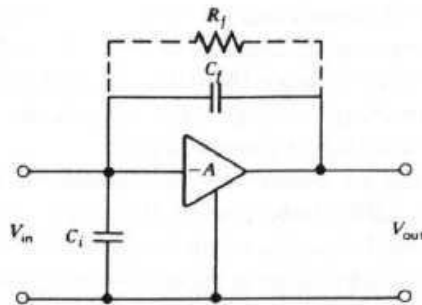


Fig. 2.12: Esquema de un preamplificador sensitivo a la carga¹⁴.

Este tipo de preamplificadores presenta un ruido asociado a la retroalimentación de la resistencia^{vi} R_f (Ver Figura 2.12). El efecto se traduce en apilamiento y distorsión de pulsos para tasas altas, aumentando la probabilidad de que las señales superen el nivel de saturación del preamplificador¹⁵.

En primera instancia el ruido podría reducirse aumentando el valor de la resistencia R_F , sin embargo esto aumentaría las constantes temporales del circuito RC, lo que implica que se crearían colas muy largas para cada pulso^{vii}. Por tal motivo el preamplificador contendrá más elementos para corregir este efecto. Además, el preamplificador debe estar lo más cerca

^{vi} Este fenómeno es conocido como Ruido de Johnson.

^{vii} Existen dos tipos de preamplificadores (p.e. “reset transistor” y “pulsed optical feedback”) que optan por eliminar la R_F . Estos descargan el capacitor de diferentes maneras.

posible del HPGe para reducir el ruido y la pérdida que pueda producirse al ser conducida la señal.

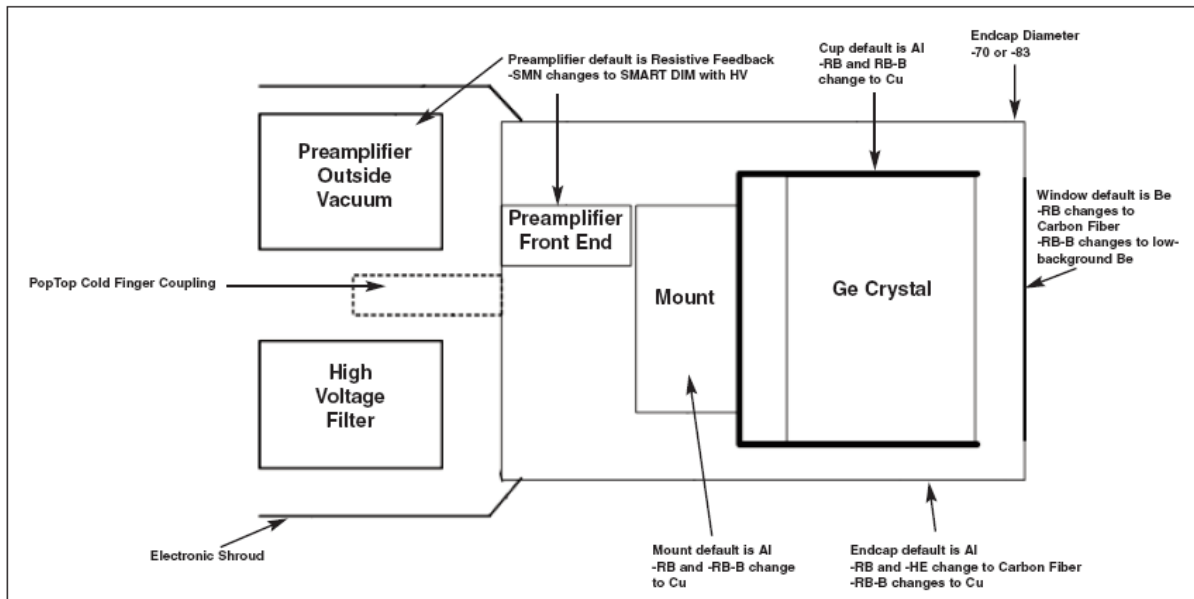


Fig. 2.13: Esquema del encapsulado PopTop¹⁶.

Los preamplificadores son modelo AMPTEK A259 (Ver Figura 2.14) pertenecientes a la serie de modelos AMPTEK A250. Lo distintivo de esta serie es que colocan un condensador de muy baja capacitancia para disminuir el ruido y un FET para controlar la conductividad. Ambos pueden someterse a fríos importantes sin introducir ruido o deformar la señal antes de llegar al preamplificador como tal¹⁷.

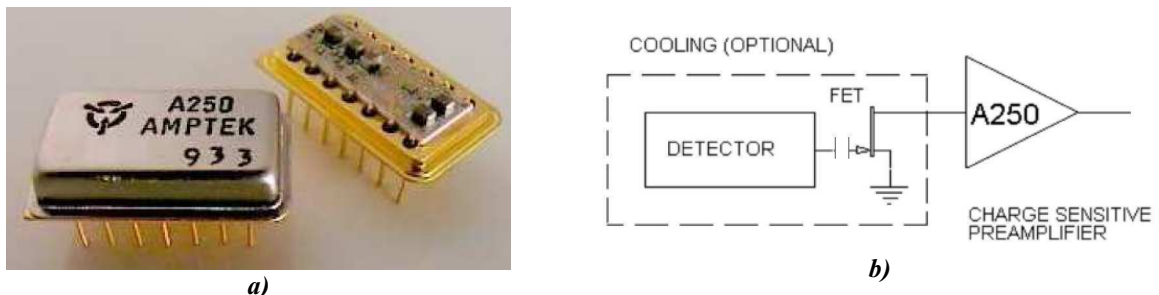


Fig. 2.14: Preamplificadores serie A250. a) Ejemplar de AMPTEK A250; b) Diagrama donde se muestra que el FET y capacitor de entrada puede estar enfriados.

2.1.5 Amplificador

Una de las señales de energía-tiempo proveniente del preamplificador es llevada al Amplificador (Canberra 2022) para su procesamiento. (Ver Figura 2.15).

Este amplificador es un módulo NIM (Nuclear Instrument Module) que cuenta con un filtro conformador tipo gaussiano de 6 pasos (shapping time: 0.5, 1, 2, 4, 8 y 12), un selector de ganancia gruesa de 6 pasos (coarse gain: 10, 30, 100, 300, 1K, 300K), un selector de ganancia fina (fine gain: 0.3 – 1.3), un selector de polaridad del pulso entrante, un restaurador de línea base (manual o automático), una fuente de alimentación para preamplificador tipo Amphenol (17-10070) y conectores BNC en la cara frontal y posterior¹⁸.

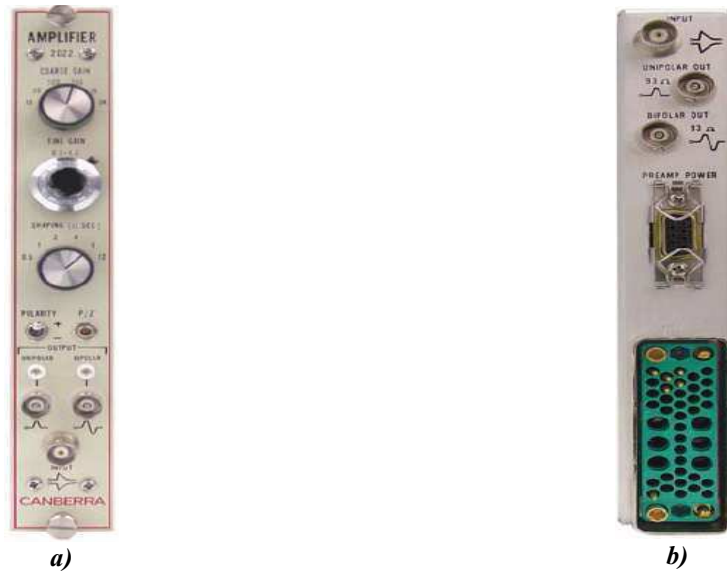


Fig. 2.15: Amplificador Canberra 2022. a) Cara Frontal; b) Cara Posterior.

Las entradas del amplificador (INPUTS) soportan señales negativas o positivas, con amplitudes que no superen los ± 12 V. A la entrada presenta una impedancia de: $Z_{in} \approx 1K\Omega$. En nuestro caso, las señales provenientes del preamplificador no superaron los +10V.

El Amplificador tiene dos salidas (OUTPUTS): una unipolar y una bipolar^{viii}. Ambas con una impedancia de salida comparativamente pequeña: $Z_{out} \approx 1\Omega$. En nuestro caso, la señal unipolar es llevada al analizador multicanal (MCA) y la bipolar la llevamos al osciloscopio para corroborar los ajustes en los parámetros de ganancia, tiempo de conformación y ajuste del polo cero (fix the pole zero P/Z)^{ix}.

2.1.6 MCA e Interfase Digital

La señal unipolar del amplificador es llevada al analizador multicanal (MCA8K-01 PalmTop). Dentro del cual el ADC^{ix} convierte la señal analógica entrante (pulso) en una señal digital (un número digital equivalente a la amplitud del pulso), luego almacena esta información en una memoria (en nuestro caso hay disponibles 8192 canales)²⁰. (Ver Figura 2.16)

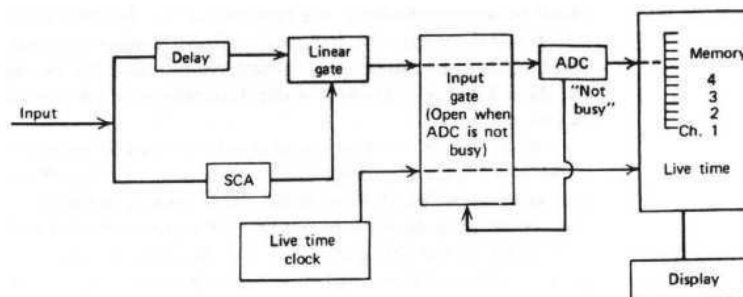


Fig. 2.16: Diagrama de bloques de un MCA típico.

^{viii} Las señales unipolares son usadas para espectrometría. Las bipolares usualmente se usan para conteo, cronometraje (timing), o “gating”.

^{ix} ADC: analogic-to-digital converter.

Antes de llegar la señal al ADC debe pasar una “puerta de entrada” (input gate), la cual permite o bloquea el paso de pulsos hacia el ADC en caso de estar este ocupado digitalizando un pulso previo.

Una etapa anterior a esta discriminación por actividad o inactividad del ADC, existe un criterio de paso que se aplica en una puerta lineal (linear gate). Esta puerta se va a abrir sí y sólo si el pulso está en el rango que el SCA tenga configurado (Single-Channel Analyzer). Estos límites se asocian a los límites inferior (LLD) y superior (ULD)^x, tomados para excluir pulso de ruido o mayores al rango de interés de la medición²¹.

En nuestro caso el MCA no es un módulo NIM ni se encuentra integrado al ordenador. Es un dispositivo independiente (*Ver Figura 2.17*) que en adición al diagrama convencional para un MCA (*Ver Figura 2.16*) incluye un circuito de corrección por pérdidas de tiempo muerto y apilamiento (pile-up).



Fig. 2.17: MCA PalmTop de Atomki.

El PalmTop MCA posee 8192 canales, tres puertos lemo hembra para coincidencias, anticoincidencias y la señal unipolar del amplificador (INPUT). Además, tiene un selector de 3 pasos para el voltaje mínimo y máximo de entrada (0-2.5V, 0-5V, 0-10V). La conexión al ordenador se da por un USB. No requiere alimentación adicional. Es destacable que sólo acepta señales positivas con tiempo de conformación (shapping time) superior a 100 ns²².

Interfase Digital

Los datos digitales provenientes del ADC se almacenan en la memoria en ficheros con extensión *.mcd*. Estos pueden ser leídos por programas o interfases gráficas. Dichos programas abren los ficheros y crean histogramas pintando el número de cuentas por canal, reproduciendo los parámetros predefinidos durante la medición. Usualmente poseen varias herramientas para facilitar el análisis espectrométrico.

En nuestro caso el programa utilizado se llama PalmTop MCA de Atomki²³. Esta interfase no sólo permite actuar sobre datos previamente almacenados, también se puede observar la toma de datos *in-vivo*. Además, permite identificar si el MCA está correctamente conectado al PC.

La pantalla que despliega el programa presenta información sobre los espectros adquiridos. Por tal motivo mantendremos impresiones de pantalla en el trabajo y no el mero espectro. Un ejemplo de impresión de pantalla es la *Figura 2.18*.

^x LLD: Lower-level discriminator. ULD: upper-level discriminator.

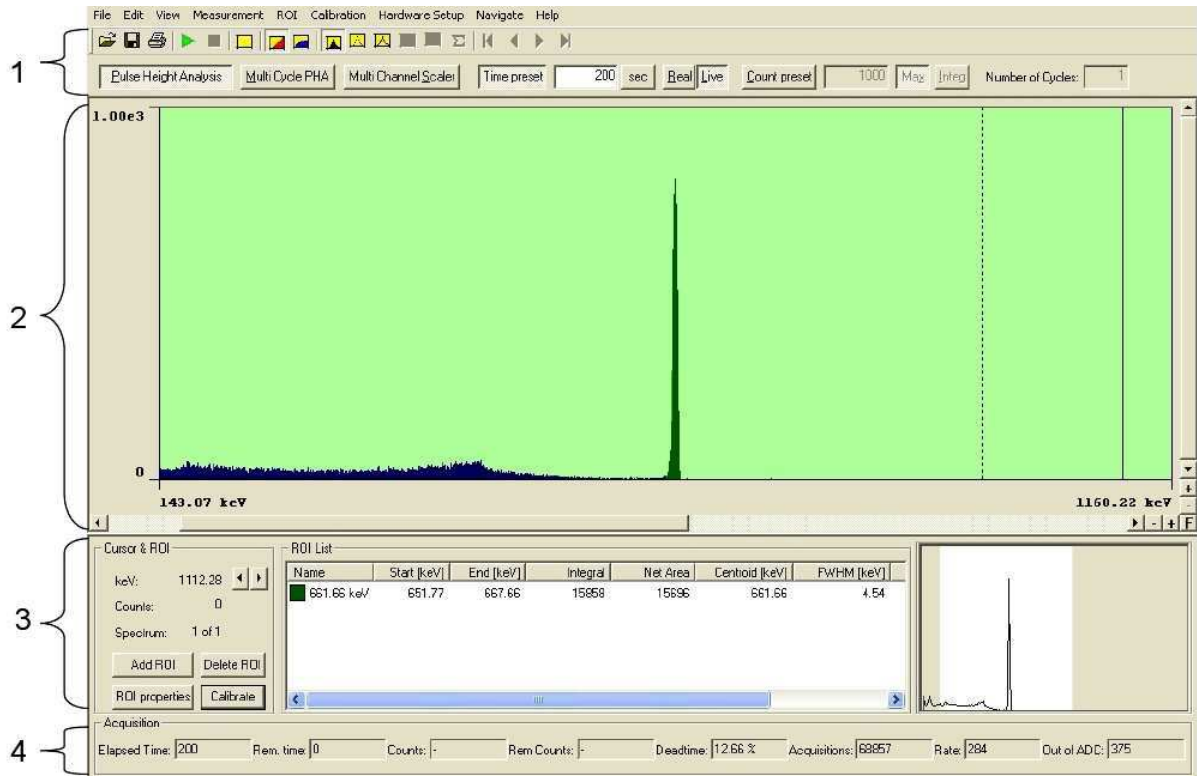


Fig. 2.18: Impresión de pantalla de un espectro de ^{137}Cs tomado por el programa PalmTop de Atomki.

En la Figura 2.18 se marcan 4 zonas de la pantalla de la interfase gráfica. Procederemos a comentar la selección de esta medición²⁴:

- REGION 1: se ha tomado un histograma para análisis de altura de pulsos (espectro) durante un tiempo vivo de 200 segundos para un único ciclo de medición. No hay límite de conteo activado.
- REGION 2: se pinta el número de cuentas por canal. En este caso se ha calibrado en energía y apreciamos únicamente el rango de 143.07 a 1160.22 keV. En el eje vertical apreciamos el valor máximo de escala: 1000 cuentas. Además, tenemos a disposición los botones para hacer zoom digital horizontal y vertical (botones + y -). Vemos dos líneas: la continua es el cursor actual y la punteada la anterior posición del cursor.
- REGION 3: a la izquierda tenemos un recuadro con datos sobre el cursor y las Regiones de Interés. Muestra que la actual posición del cursor está en 1112.28 keV. Al centro tenemos los datos de la ROI seleccionada. Se aprecia la energía de inicio y final del ROI, el área (total y neta) del pico, el FWHM, el centroide y el error (este no se aprecia en la figura). A la derecha se aprecia el espectro a escala. El recuadro el blanco muestra la región que estamos mirando en la región 2.
- REGION 4: nos dice que el tiempo transcurrido es de 200 segundos. No queda tiempo por contar (remain time = 0). También nos dice que el tiempo muerto instantáneo es de 12.66%, que el número total de cuentas es 68857, la tasa de conteo instantánea es 284 y el número de eventos fuera del rango del ADC: 375 (out of ADC).

Este programa también crea ficheros tipo ASCII con extensión *.mca*. La estructura de estos archivos tiene un encabezado y un final con información referente a los parámetros y condiciones de la medición. En medio está el número de cuentas por canal. (Ver Figura 2.19)

```

<<PMCA SPECTRUM>>
TAG - Test
DESCRIPTION - Atomki MCA Record
GAIN
THRESHOLD
LIVE_MODE
PRESET_TIME
LIVE_TIME
REAL_TIME
START_TIME
SERIAL_NUMBER - 0
<<CALIBRATION>>
LABEL
Calibration points (channel value)
<<ROI>>
Regions of Interest ranges (start channel end channel)
<<DATA>
...
<<END>
<<HARDWARE SETUP>>
FIRSTPEAK -
PROTECTTIMEENABLE -
PILEUPLLOSSCORRECTION -
PILEUPREJECTION -
PEAKINGTIME -
<<END>>

```

Fig. 2.19: Código de los archivos .mca creados por el programa PalmTop de Atomki

2.1.7 Osciloscopio

El osciloscopio es una herramienta fundamental en varias etapas del presente trabajo. En esta etapa nos concentraremos en los aspectos generales del osciloscopio empleado y su utilidad en espectrometría gamma con HPGe. Las demás aplicaciones se verán más adelante.

Una de las señales de energía-tiempo del preamplificador y la señal bipolar del amplificador son llevadas al osciloscopio durante las mediciones. Esto se realiza para corroborar que las etapas de preamplificación y amplificación están trabajando adecuadamente. Además, que no hay corrientes parasitarias ni ruido excesivo introducido por la electrónica.

Durante la subida o bajada del voltaje la línea base de la señal del preamplificador debe seguirse cuidadosamente. Nunca debe subirse el voltaje rápidamente sin mirar el nivel en que se encuentra la línea base. Otra aplicación son las estimaciones del tiempo de subida y bajada de los pulsos. La definición de los pulsos, la presencia de pile-up y ruido pueden determinarse también.

En nuestro caso el osciloscopio utilizado es un Agilent DSO6104A²⁵. Este dispositivo cuenta con 4 canales o puertos de adquisición simultánea. Tiene un ancho de banda en DC de hasta 1 GHz. Puede recibir señales con un máximo de $\pm 75V$. La impedancia de entrada puede seleccionarse entre 50Ω ó $1 M\Omega$. Presenta un tiempo de ascenso de hasta $350 ps$ ²⁶. (Ver Figura 2.20)



Fig. 2.20: Osciloscopio Agilent DSO6104A. a) Cara Frontal; b) Cara Posterior.

2.1.8 Fuente de Alimentación

La alimentación del HPGe y del “shutdown” son proporcionados por una fuente de alimentación NIM de ORTEC modelo 459. (*Ver Figura 2.21*)



Fig. 2.21: Fuente de Alimentación ORTEC 459.

Este módulo NIM suministra voltaje continuo (DC) en ambas polarizaciones (negativa o positiva). Posee dos rangos de aplicación de voltaje: 0-500V y 0-5KV. Ambas escalas responden al selector de voltaje en la parte frontal. Su activación está en función del interruptor de Alto Voltaje (High Voltage) en la parte inferior de la misma cara²⁷.

En nuestro caso, el HPGe requiere -3500 V, por lo cual debemos primero conectar el cable BNC de alimentación del HPGe en el SHV^{xi} (0-5KV) superior de la cara posterior, y luego poner en “ON” el interruptor de Alto Voltaje.

El voltaje debe suministrarse únicamente cuando el equipo esté frío. La razón de alimentación debe ser lenta y partir de 0V. El ritmo puede estimarse siguiendo el comportamiento de la línea base de la señal proveniente del preamplificador. Cuando esta línea no presenta pulsos (señales del cristal) significa que se ha superado el voltaje que puede tolerar el semiconductor en ese momento. En caso de superarlo se deberá esperar a que la línea base vuelva a su estado de equilibrio. Este proceso debe repetirse hasta alcanzar el valor óptimo de voltaje (-3500 V).

Además, en la parte inferior de la cara posterior, tiene un conector para el shutdown. Su función es reducir el voltaje de salida a cero (Z_{MAX} del circuito a tierra), esto porque hace cortocircuito con el contacto central del BNC a tierra²⁸.

^{xi} SHV: Safe High Voltage. Es un tipo de conector usado para terminar las conexiones coaxiales que tienen alto voltaje.

2.1.9 Castillo de Plomo

Durante todas las mediciones el detector de HPGe ha estado blindado del fondo natural por un castillo de plomo. La geometría del montaje se aprecia en la *Figura 2.22*.

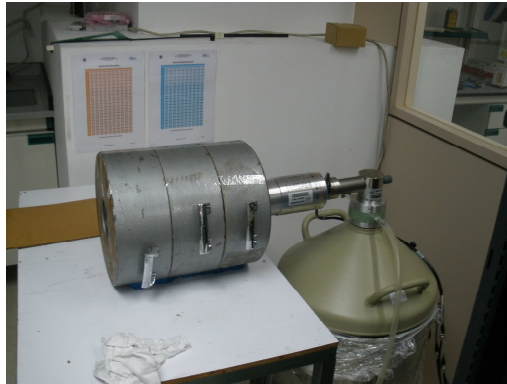


Fig. 2.22: Castillo de Plomo.

El plomo es utilizado para blindar porque atenúa de manera eficiente debido a su alta densidad y número atómico. Sin embargo, esas mismas cualidades hacen que las fuentes a caracterizar dentro del castillo ionicen al Pb, lo cual generará cascadas de rayos X característicos del Pb. (Ver *Figura 2.23*) Este efecto debe tomarse en cuenta a la hora de analizar los espectros adquiridos.

Energía (keV)

XR 1	10.6
XR $k\alpha_2$	72.805
XR $k\alpha_1$	74.969
XR $k\beta_3$	84.45
XR $k\beta_1$	84.938
XR $k\beta_2$	87.3

Fig. 2.23: Rayos X del Plomo.

2.2 Caracterización del sistema de espectrometría gamma HPGe

La caracterización del HPGe y las muestras puede realizarse después del procesamiento de la señal^{xii}. La interfase gráfica toma los ficheros creados y genera un histograma del número de cuentas por canal^{xiii}. Con esta información podemos realizar calibraciones en energía, resolución y eficiencia. Y a su vez la identificación de emisores y estimaciones de sus actividades mediante la eficiencia relativa y absoluta.

^{xii} Se ha digitalizado la señal proveniente del cristal de HPGe.

^{xiii} Se puede estudiar esto porque se programó el MCA para realizar un análisis de altura de pulsos. Ver la sección 2.1.1.6. Región 1.

2.2.1 Caracterización en Tiempo Muerto

Para el cálculo de la eficiencia del HPGe se requiere primero caracterizar el comportamiento del **Tiempo Muerto** del MCA PalmTop para el procesamiento de la señal del HPGe.

Tiempo Muerto

El tiempo muerto es el intervalo temporal que un sistema de detección requiere para poder procesar dos sucesos consecutivos. Cuando un suceso llega al ADC mientras éste está ocupado, entonces no queda registrado en la memoria²⁹. De esta forma existe una fracción de pulsos que no se contarán debido al tiempo que tarda el sistema en procesar un suceso anterior.

El número total de partículas que depositan energía en el detector (N_{TOT}) es igual a la suma de las partículas que llegan a convertir en cuentas (N_{ACQ}) más las que no se pudieron contar porque interactuaron durante el intervalo de tiempo muerto (N_{LOST}).

$$N_{TOT} = N_{ACQ} + N_{LOST} \rightarrow N_{LOST} = N_{TOT} - N_{ACQ}$$

La razón de partículas no contadas del total que interactúan, define una **Razón o Fracción de Tiempo Muerto**:

$$\tau = \frac{N_{LOST}}{N_{TOT}} = \frac{N_{TOT} - N_{ACQ}}{N_{TOT}} = 1 - \frac{N_{ACQ}}{N_{TOT}} \rightarrow \boxed{N_{TOT} = \frac{N_{ACQ}}{1 - \tau}} \quad (Eq. 2.1)$$

En este punto debemos recordar que la *Fracción de Tiempo Muerto* se asocia con el tiempo real total de medición (T) y el número de eventos procesados (k)³⁰:

$$\boxed{\tau = \frac{k \tau}{T}}$$

Este es el concepto que utiliza el programa MCA PalmTop para corregir por Tiempo Muerto.

Caracterización del campo de radiación

Para obtener un campo de radiación uniforme dentro del castillo de plomo se toman dos fuentes de ^{137}Cs (0.25 uCi/Feb-10 y 5 uCi/Ago-00) y se posicionan en diferentes posiciones frente $(0, 0, z)^{xiv}$ al HPGe. De esta forma se varía la tasa de gammas que llegan al detector. Luego se estudia las variaciones que presenta el Tiempo Muerto (τ) frente al número de *cps*, y la variación de la información espectral cuando la adquisición se hace con intervalos de tiempos Vivo (TV) y tiempo Real (TR).

Objetivos

- Determinar el máximo número de CPS para no superar el 10% de Tiempo Muerto.
- Determinar una función para el Tiempo Muerto en función del número de CPS.

^{xiv} Ponemos el sistema de coordenadas en la cara frontal del detector. Ponemos el plano xy sobre la superficie del filtro plástico a 1 cm delante del cristal. Ver figura 2.6.

- Comparación de medidas con Tiempo Real (TR), Corregido (TC) y Tiempo Muerto (TM) para un espectro completo
- Comparación de medidas con TR, TC y TM para cuentas en el fotopico característico de 661.62 keV.

Resultados:

- **PARTE 1: *Tiempo Muerto vrs CPS***

Se desea observar la forma cómo varía la Fracción de Tiempo Muerto (τ') con respecto al número de CPS. Las medidas se hicieron durante 100 segundos de *tiempo real*. En primero lugar no corregimos por tiempo muerto (*Ver Figura 2.24*), luego corregimos las cps por la Fracción de Tiempo Muerto (τ'). (*Ver Figura 2.25*)

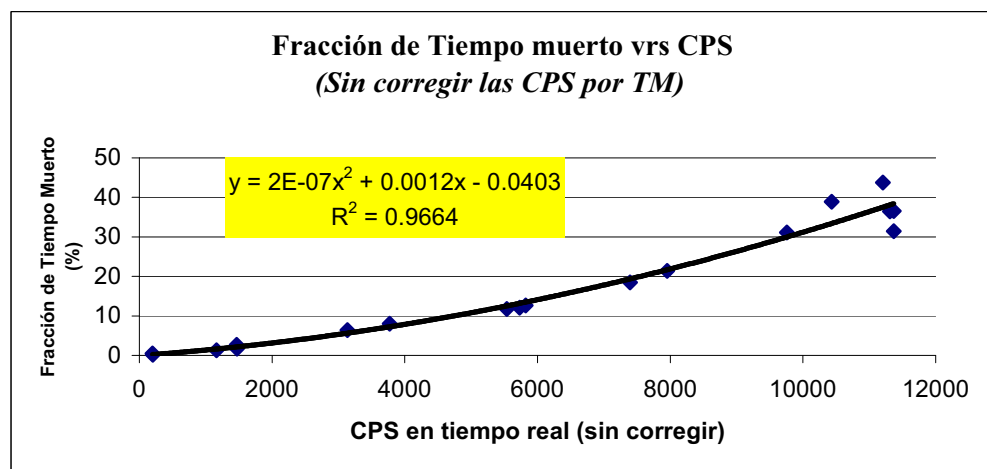


Fig. 2.24: Fracción de Tiempo Muerte vrs CPS sin corrección de tiempo muerto.

En la *Figura 2.22* se aprecia que para altas tasas de conteo la dispersión de puntos es mayor que en el resto de la curva. Para bajas tasas el ajuste es mucho mejor. Para tasas superiores a 10 kcps el tiempo muerto supera el 30% y el número total de pulsos procesados no puede definirse.

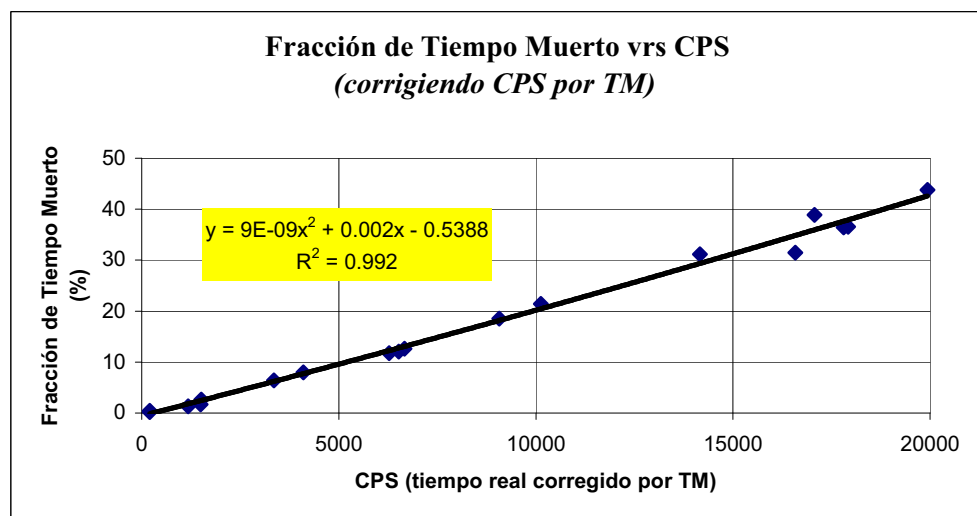


Fig. 2.25: Fracción de tiempo muerto vrs CPS corregidas por la fracción de Tiempo Muerto.

En la *Figura 2.25* se ha corregido el número de cps por la fracción de tiempo muerto. En este caso el ajuste tiene un coeficiente de correlación mejor (0.996) que en sin corregir (0.983). El efecto de corregir por τ' se aprecia a altas tasas (sobre 10 kcps), se ajustan mejor a la línea de tendencia. Sin embargo, su dispersión es mayor que a bajas tasas. En particular, se puede calcular (o mirar en el gráfico) cómo valores inferiores a 5 kcps tienen un tiempo muerto inferior al 10 %^{xv}.

■ PARTE 2: CPS VRS Posición

Se colocan las fuentes de ^{137}Cs frente al HPGe en posiciones de 1, 2, 4, 6, y 8 cm. Luego se estudian las variaciones en el número total de cuentas adquiridas cuando el intervalo de medición es 100 segundos de Tiempo Vivo (TV) o 100 segundos de Tiempo Real (TR). También se comparó con las cuentas corregidas por concepto de la Fracción de Tiempo Muerto (τ').

Para analizar mejor el comportamiento a altas y bajas tasas, se optó por dividir el proceso en dos mediciones. La primera con la fuente de ^{137}Cs de 0.25 uCi; y la segunda, repitiendo posiciones, con la fuente de ^{137}Cs de 5 uCi.

Para la fuente de 0.25 uCi se obtuvo:

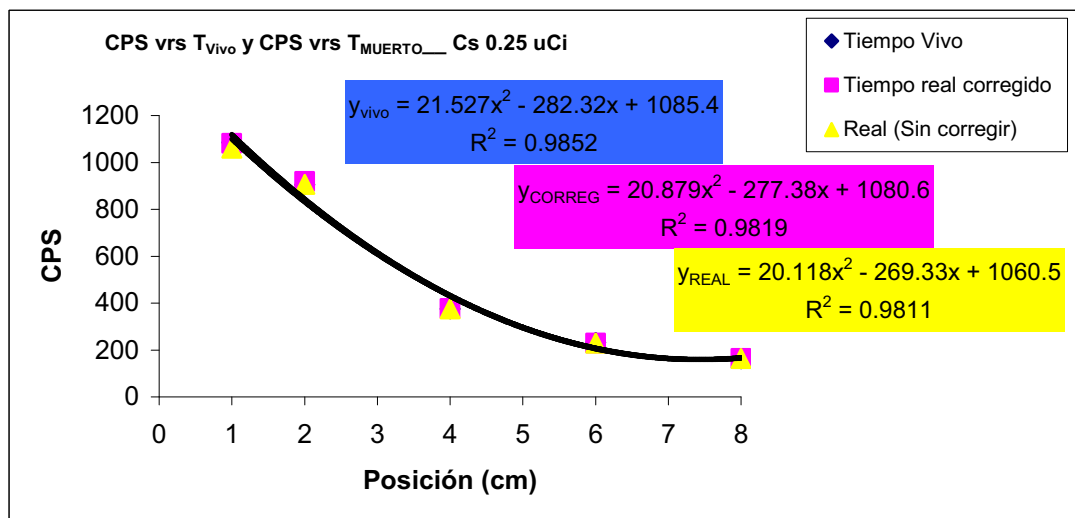


Fig. 2.26: Se pinta el número de CPS en función de la posición y el tiempo empleado.

En la *Figura 2.26* se observa cómo a bajas tasas (<1100 cps) la diferencia entre un espectro tomado con Tiempo Vivo (TV = 100 s) y uno tomado con Tiempo Real (TR = 100 s) es despreciable, esto debido al pequeño valor de Fracción de Tiempo Muerto en estos casos. Una extensión útil de este hecho es que si se desea, por ejemplo, tomar un espectro de larga duración para una muestra de baja tasa, no se introduce mayor error si se toma el intervalo de medición como tiempo Real o como Tiempo Vivo.

Para la fuente de 5 uCi se obtuvo:

^{xv} El cálculo nos dice que por debajo de 4694.3 cps la fracción de tiempo muerto es inferior a 10%.

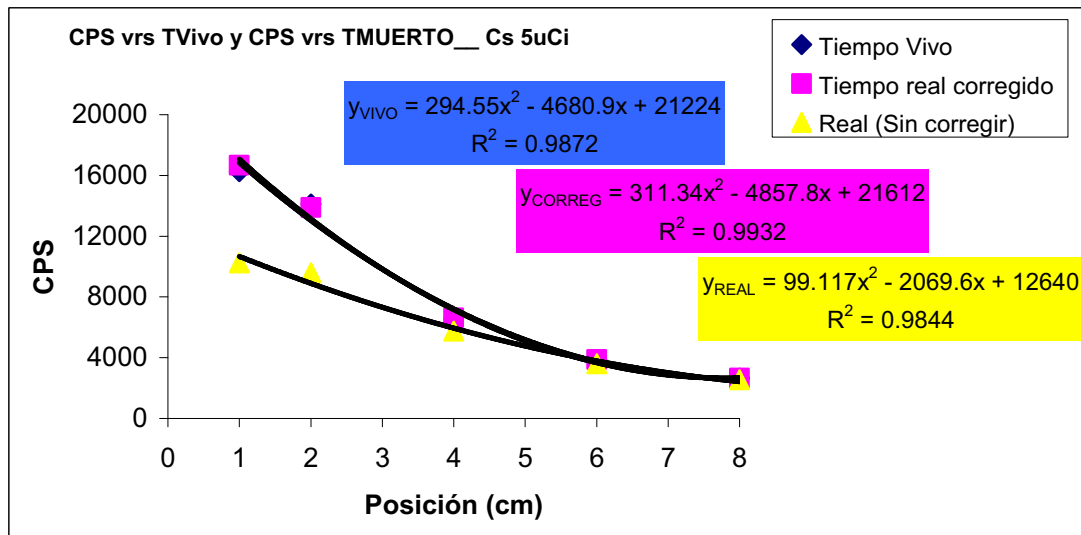


Fig. 2.27: Se pinta el número de CPS en función de la posición y el tiempo empleado.

En la *Figura 2.27* se observa que a altas tasas (> 5000 cps) las mediciones con intervalos a Tiempo Real se separan de las medidas hechas a Tiempo Vivo. A su vez, cuando las medidas a Tiempo Real se corrigen por la *ecuación 2.1* vemos cómo se reproduce bastante bien el comportamiento del MCA cuando captura con Tiempo Vivo.

Los gráficos arriba presentados no pintan la zona de $1200 - 2500$ cps. Sin embargo, es esperable, dada la curva de fracción tiempo muerto (τ') vs CPS, que el comportamiento mantenga suavemente unidas a las tres curvas.

▪ **PARTE 3: Área Neta del pico a 662 keV, Apilamiento y Tiempo Muerto**

En esta parte se realizan dos estudios sobre el número de cuentas en el área de un fotopico “extendido” (se define un ROI que abarque tanto el fotopico como la cola superior). (Ver *Figura 2.28*) En primer lugar cómo varía el FWHM con el CPS, y luego cómo cambia el centroide que estima el PalmTop en función del CPS.

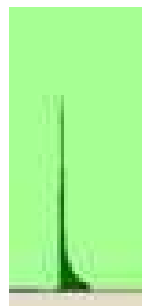


Fig. 2.28: ROI de fotopico extendido: fotopico de interés más la cola superior.

3.a) FWHM vs CPS

Se estudia el FWHM que tiene el pico en función del número de CPS. En esta parte el efecto dominante es el de pile-up. Dicho efecto crece con el número de CPS, se aprecia

el aumento de la cola^{xvi}. De esta forma el FWHM aumenta con el número de CPS. Además, es notorio que el efecto es independiente de si la muestra es tomada con el Tiempo Vivo o Real.

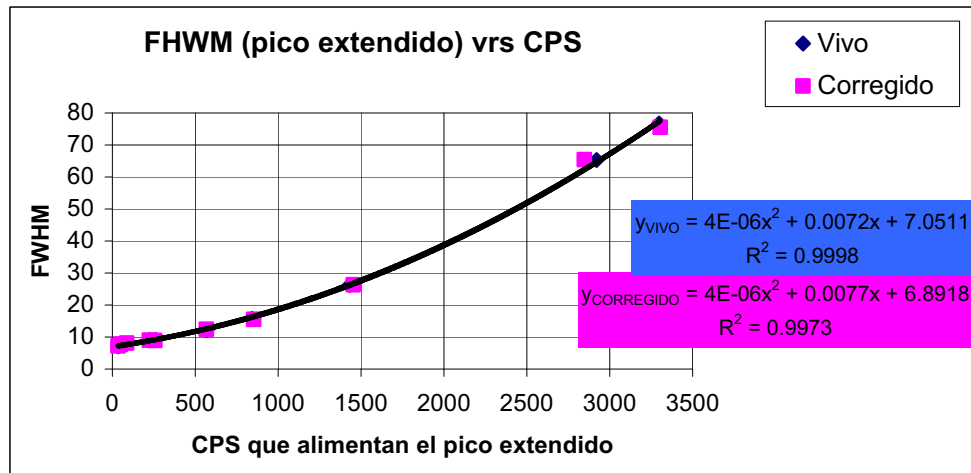


Fig. 2.29: Se aprecia cómo cambia el FWHM del pico extendido en función del número de CPS que alimentan el pico de 661.66 keV.

En la *Figura 2.29* observamos como el FWHM crece con el número de CPS que alimentan el ROI del pico extendido. El aumento se asocia al número de eventos suma o efecto de apilamiento de pulsos.

Si bien el FWHM es un concepto aplicable a picos gaussianos, aquí nos interesó extender la noción a picos extendidos. De los resultados, a parte de la notoria presencia de apilamiento (pile-up), se quiere resaltar la dificultad de poner los límites del ROI que contiene el fotopico de interés.

3.b) CENTROIDE VRS CPS

Otro de los efectos de la presencia del apilamiento es el corrimiento del centroide cuando se estudia una región de interés para un pico extendido. En nuestro caso el centroide (el canal) se traslada hacia arriba.

^{xvi} Se descartan ensanchamientos por efectos de calentamiento en el detector.

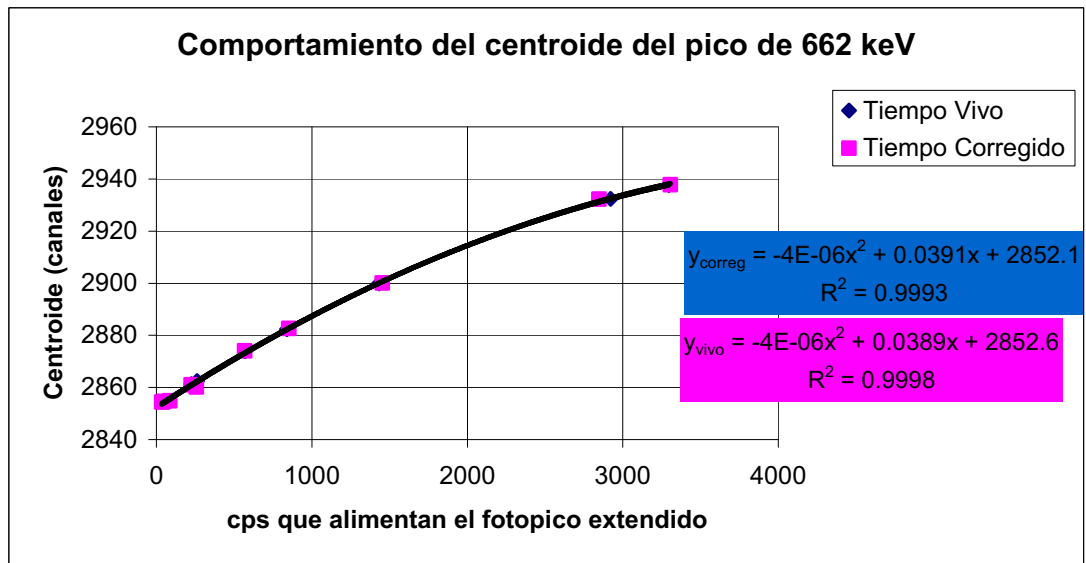


Fig. 2.30: Variación del centroide del fotopico extendido en función del número de cps.

En la *Figura 2.30* se aprecia que el corrimiento del centroide del fotopico extendido es un efecto del apilamiento de pulsos y no del tiempo muerto. El número de cuentas que alimentan el fotopico está correlacionado con el tiempo muerto del MCA, tal como se demostró en la sección anterior. Sin embargo, la traslación hacia arriba del centroide muestra que hay muchos pulsos que entran^{xvii} en la ventana temporal del MCA para el procesamiento de un pulso acompañando el gamma característico del ^{137}Cs . Todos estos pulsos se presentan como la cola superior (al lado derecho) del fotopico.

Otra forma de visualizar el proceso es comparando los picos extendidos en escala logarítmica para las dos fuentes de ^{137}Cs en distintas posiciones frente al HPGe. Con esto podremos comparar dos tasas de emisión diferentes ante una misma posición. (*Ver Figura 2.31*)

Posición (cm)	0.25 μCi	5 μCi
1		
2		

^{xvii} Estos pulsos de poca energía provienen fundamentalmente del fondo, de rayos X del blindaje, o de aquellas gammas cuya energía depositada es menor a 661.66 keV ya que tuvieron interacción Compton con el HPGe.

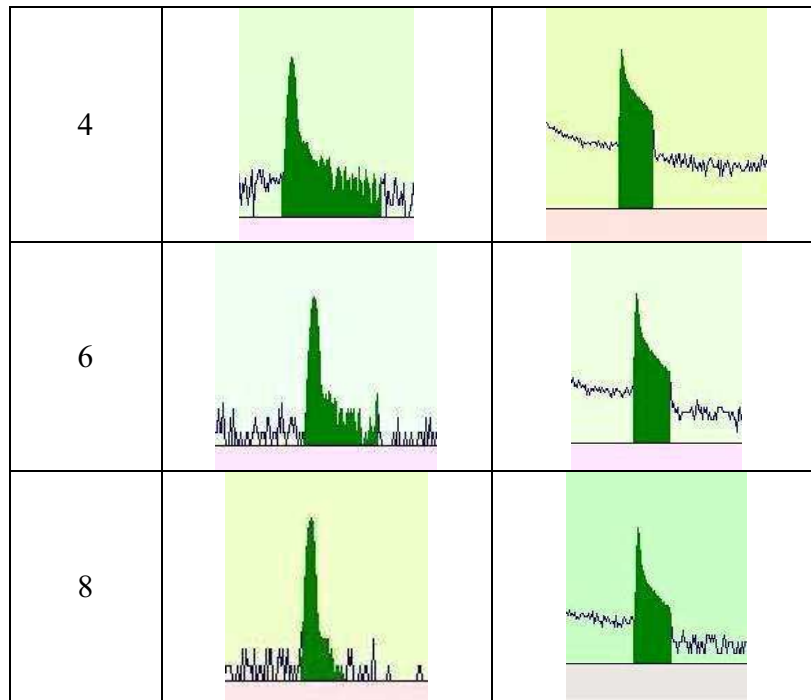


Fig. 2.31: Comparación de la forma del fotopico extendido para los dos fuentes de ^{137}Cs en las mismas posiciones frente al HPGe.

Para las posiciones a 1 y 2 cm se observa cómo la cola, en los casos de alta tasa, es muy grande. Esto ocurre por el efecto de apilamiento que acompaña una alta actividad tan cerca del detector. Hay muchos fotones de 661.66 keV que entran en coincidencia con fotones de menor energía, haciendo que el detector no pueda diferenciarlos, creando el efecto “summing” de pulsos. También es notable lo alto que está el fondo en los espectros de la fuente de 5 mCi.

Para la posición de 4 cm el efecto de apilamiento todavía está presente pero ya se logra resolver mucho mejor el pico y el centroide.

A 5 y 7 cm la cola sigue siendo significativa, pero es claro que la forma de ambos tiende a parecerse. Nuevamente el número de cuentas y el fondo son diferentes por las distintas actividades. En estos puntos la disminución de la cola se debe al aumento en la distancia (factor geométrico) entre la fuente y el HPGe^{xviii}.

Este fenómeno es importante a la hora de realizar calibraciones con fuentes que generen alta tasa de conteo (que tengan alta tasa o que estén muy cerca de la fuente). En la *Figura 2.31* cuantificamos el porcentaje de error de los centroides tomando como verdadero el fotopico a mayor distancia (8 cm) ya que este es el que tiene menor cola superior es decir: canal 2854.53 para 34.91 cps.

^{xviii} Al aumentar la distancia disminuye la probabilidad de que dos eventos entren en coincidencia.

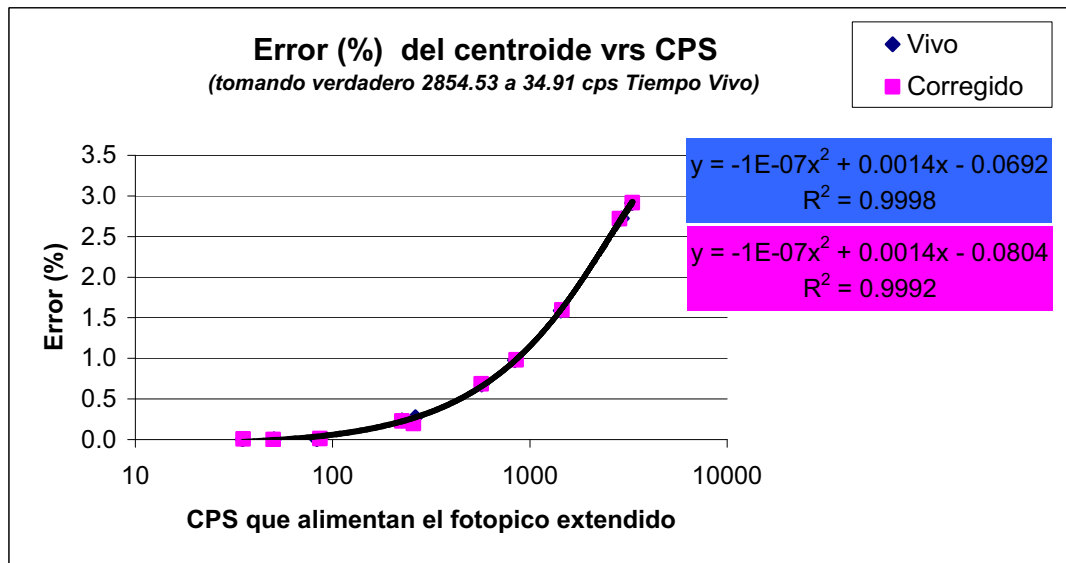


Fig. 2.32: Porcentaje de error del centroide del fotopico extendido con respecto al canal y cps de la medida a mayor distancia (8 cm) y menor cps (fuente de 0.25 μ Ci)

De la *Figura 2.32* vemos que el mayor porcentaje de error es del 3%. Tasas superiores a 1000 cps tenemos un porcentaje superior al 1%.

Conclusiones:

- Las tomas espectrales con el MCA se pueden realizar tanto en formato de *Tiempo Vivo*, o en *Tiempo Real*, siempre y cuando se recuerde corregir este por el factor de *Fracción de Tiempo Muerto* (τ).
- Para tasas inferiores a **5000 cps** se obtienen valores de *Fracción de Tiempo Muerto* inferiores al 10%.
- El centroide se desplaza con el número de cps. Sin embargo, para bajas tasas (> 1000 cps al pico extendido) el error en la identificación del canal del centroide es inferior al 1%.
- La resolución se empobrece ante altas tasas para el HPGe (< 1000 cps tiene menos de 20 de FWHM) por la presencia de apilamiento. A su vez se dificulta la demarcación de la Región de Interés (**ROI**).

2.2.2 Caracterización de la Eficiencia con fuentes de ^{137}Cs

Para el cálculo de la eficiencia del HPGe se utiliza una fuente trazada de ^{137}Cs de 0.25 μ Ci, con la cual se hacen mediciones a diferentes posiciones. Se utiliza otra fuente monoenergética de ^{137}Cs de mayor actividad (5 μ Ci) para estudiar los efectos para altas tasas de conteo (*fracción de tiempo muerto y pile-up*). En el proceso se va a calibrar ésta última con la primera.

Para obtener un campo de radiación uniforme dentro del castillo de plomo se posicionan las fuentes en diferentes sitios frente (0, 0, z) al HPGe. De esta forma se varía la tasa de gammas que llegan al detector.

Eficiencia

La eficiencia nos relaciona el número de pulsos registrados con el total de emisiones de la fuente durante el intervalo de medición. Una eficiencia del 100% quiere decir que el total de las emisiones es registrado en el sistema (cosa que se alcanza para partículas α y β en detectores de centelleo líquido). Sin embargo, para fotones y neutrones la eficiencia no suele ser tan elevada.

La eficiencia depende de la forma de los detectores y el emisor, posicionamiento de los agentes, tipo de emisión y energía a caracterizar. Cuando se toman en cuenta todos estos factores se dice que se trabaja con la **Eficiencia Total**³¹. (Ver Figura 2.31.a)

Una componente es la **eficiencia geométrica**. Esta depende de la configuración (forma y posicionamiento) del detector y de la fuente. En nuestro caso, al tener fuentes puntuales frente a un detector fijo, entonces la única variable es la posición frente al detector de cristal. Este factor se refiere a la razón de partículas emitidas que llegan al volumen útil del detector.

La **eficiencia intrínseca** del detector depende de la energía de la radiación incidente. En nuestro caso se usan dos fuentes monoenergéticas de gammas (661,66 keV). Esto hace que este parámetro sea una constante. Esta se refiere a la razón entre el número de partículas que llegan al detector que son registradas por el sistema.

La **eficiencia de la fuente** se refiere a la razón entre las partículas creadas en las desintegraciones y las que logran salir de la fuente. En nuestro caso, al estudiar gammas este favor puede aproximarse a 1 (100% de las partículas creadas salen de la fuente)³².

Otra forma de estudiar la Eficiencia Total es dividiendo todos los factores por un intervalo temporal en segundos, de esta forma los factores serán razones de tasas de cambio en el número de partículas. Al final tendremos CPS sobre Actividad de la fuente. (Ver Figura 2.33.b)

$$\underbrace{\left(\frac{\text{salen}_{Fuente}}{\text{Creadas}} \right)}_{1 \text{ porque son } \gamma} \cdot \underbrace{\left(\frac{\text{llegan}_{detector}}{\text{salen}_{Fuente}} \right)}_{\mathcal{E}_{geométrica}} \cdot \underbrace{\left(\frac{\text{cuentas}_{registradas}}{\text{llegan}_{detector}} \right)}_{\mathcal{E}_{intrínseca \ detector}} = \left(\frac{\text{cuentas}_{registradas}}{\text{Crea}} \right) = \mathcal{E}_{TOTAL}$$

a)

$$\underbrace{\left(\frac{P_{salen \ ps}}{A_{fuente}} \right)}_{1 \text{ porque son } \gamma} \cdot \underbrace{\left(\frac{P_{llegan \ ps}}{P_{salen \ ps}} \right)}_{\mathcal{E}_{geométrica}} \cdot \underbrace{\left(\frac{CPS}{P_{llegan \ ps}} \right)}_{\mathcal{E}_{intrínseca \ detector}} = \left(\frac{CPS}{A_{fuente}} \right) = \mathcal{E}_{TOTAL}$$

b)

Fig. 2.33: Esquema de la definición de Eficiencia Total dividiendo arriba y abajo por tiempo en segundos. **a)** La definición estática; **b)** La definición empleado tasas de conteo o emisión.

Para estudiar la emisión en un canal específico de energía se hace lo siguiente:

$$A(t_{\text{medición}}) \cdot I_{\text{Intensidad}(\%)} \cdot \Delta t_{\text{VIVO}} = \text{Cuentas en fotopico}$$

Objetivos

- Determinar un factor de escala entre las fuentes de ^{137}Cs .
- Estimar la actividad actual (al momento de la medición) de la fuente de ^{137}Cs de Febrero del 2000.
- Comparar si el factor de escala suaviza resultados para CPS para tiempo vivo (TV) y tiempo real (TR).
- Determinar el rango de confianza de la corrección por TM en función del número de cuentas por segundo.
- Calcular la eficiencia en función de la posición (eficiencia geométrica).

Resultados

▪ PARTE 1: Escalamiento entre fuentes de Cs-137

Tomando la fuente de ^{137}Cs de $0.25 \mu\text{Ci}$ como patrón^{xix}, podemos trazar a la otra fuente de $5 \mu\text{Ci}$, reescalando con la media de la razón entre ellas a larga distancia. Se utilizaron las cuentas adquiridas con el intervalo de **Tiempo Vivo**.

Posición	Cuentas (T vivo)		Razón
x (cm)	0.25 μCi	5 μCi	(5 / 0.25)
0	108540.3	1625007.7	15.0
1	90579.0	1411172.0	15.6
3	37478.3	656902.7	17.5
5	23215.7	387182.7	16.7
7	16259.7	265755.3	16.3

Tabla 2.1: Obtención de la razón entre fuentes de ^{137}Cs .

En este caso estimamos el factor de escala en **16.5**. Si dividimos las cuentas de la fuente de $5 \mu\text{Ci}$ por el factor, obtenemos unos valores de “ratio” cercanos a 1.

Posición	REESCALANDO		
x (cm)	0.25	5	(5 / 0.25)
0	108540.3	98485.3	0.9
1	90579.0	85525.6	0.9
3	37478.3	39812.3	1.1
5	23215.7	23465.6	1.0
7	16259.7	16106.4	1.0

Tabla 2.2: Reescalado entre fuentes de ^{137}Cs .

El factor de escala también implica que la fuente de $5 \mu\text{Ci}$ (A_{01}) tiene una actividad 16.5 veces la actividad de la fuente patrón ($A_{02} = A_{\text{julio-2}} = 0.247 \mu\text{Ci}$). Asumiendo la geometría del campo análoga para ambas fuentes obtendríamos:

$$A_{\text{julio-1}} = A_{\text{julio-2}} \times 16.5 = 4.07 \mu\text{Ci}$$

^{xix} Esta fuente fue trazada en el activímetro Curiemontor4 (PTW) del Hospital Gregorio Marañón.

Propiamente hablando el factor de escala nos dice la razón de cuentas que el detector procesa para cada fuente, hacemos la extensión a la actividad. Es decir, no es un factor de eficiencia geométrica, pero puede fungir como una buena aproximación.

▪ **PARTE 2: Efecto del Factor de Escala sobre medidas a TV y TR.**

Se compara el efecto que tiene escalar las CPS de la fuente mayor (5 uCi) sobre la razón entre medidas realizadas a TV y TR. Es decir, se pretende responder a la pregunta: ¿Se puede aplicar el factor indistintamente para medidas tomadas a TV o TR?

Posición x (cm)	0.25 uCi		5 uCi		Ratio V	0.25 uCi		5 uCi		Ratio R
	Vivo	Reescala	Vivo	Reescala		Real	Real	Reescala		
1	1085.40	984.85	16250.08	984.85	0.91	1060.49	10239.08	620.55	0.59	
2	905.79	855.26	14111.72	855.26	0.94	906.89	9590.49	581.24	0.64	
4	374.78	398.12	6569.03	398.12	1.06	375.40	5752.52	348.64	0.93	
6	232.16	234.66	3871.83	234.66	1.01	229.26	3608.89	218.72	0.95	
8	162.60	161.06	2657.55	161.06	0.99	163.38	2541.06	154.00	0.94	

Tabla 2.3: Obtención de la razón entre fuentes de ^{137}Cs considerando el TV y TR.

Pintando las razones a TV y a TV corregidas por el factor de escala en función de la posición se obtiene:

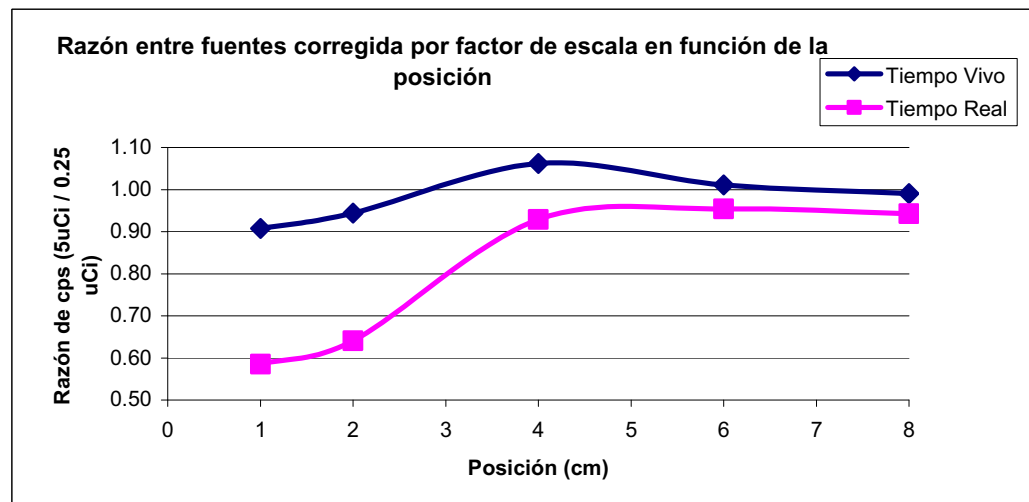


Fig. 2.34: Razón entre fuentes corregida por el factor de escala en función de la posición.

En la *Figura 2.34* se observa cómo el factor de escala no ajusta adecuadamente la razón entre CPS para posiciones cercanas a la fuente, es decir para altas tasas o fracciones elevadas de tiempo muerto. Sin embargo, para largas distancias (5 y 7 cm) se aprecia como ambas curvas se acercan, lo que quiere decir que el factor sí aplica para medidas con baja fracción tiempo muerto (< 5000 cps).

▪ **PARTE 3: Corrección por Tiempo Muerto de las Medidas en Tiempo Real.**

Se corrigen las medidas en TR por la fracción de tiempo muerto. Luego se calcula el porcentaje de error con las medidas de cps en TV.

Posición (cm)	0.25 uCi				5 uCi			
	CPS (Vivo)	CPS (Cor TM)	Error Corregido		CPS (Vivo)	CPS (Cor TM)	Error Corregido	
			Δ	%			Δ	%
1	1085.40	1080.62	4.79	0.44	16250.08	16679.14	-429.06	-2.64
2	905.79	918.77	-12.98	-1.43	14111.72	13887.47	224.25	1.59
4	374.78	377.38	-2.60	-0.69	6569.03	6613.84	-44.82	-0.68
6	232.16	229.76	2.39	1.03	3871.83	3883.36	-11.54	-0.30
8	162.60	163.82	-1.23	-0.76	2657.55	2653.31	4.24	0.16

Tabla 2.4: Estimación del porcentaje de error entre fuentes de ^{137}Cs reescaladas.

Se pinta el porcentaje de error en relación al número de cuentas por segundo tomadas a intervalo de Tiempo Vivo.

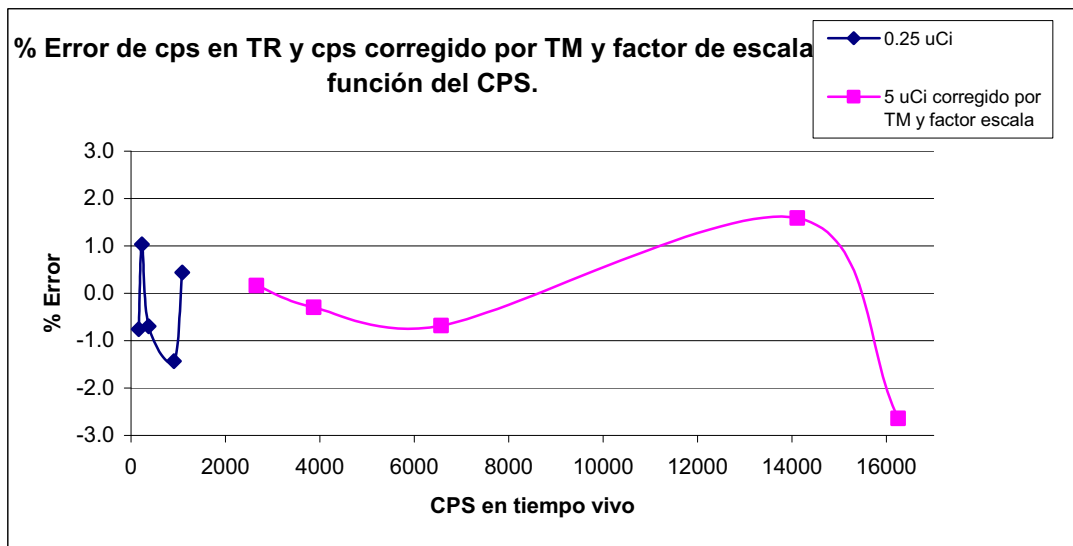


Fig. 2.35: Razón entre fuentes corregida por el factor de escala en función de la posición.

De la Figura 2.35 se observa que la corrección no sobrepasa el 3% de error en sus medidas para tasas de conteo entre 0 y 17000 cps, de esta forma el error al corregir por TR no sobrepasa el 3%. Dado estos resultados es confiable hasta valores de 17000 cps.

▪ **PARTE 4: Comparación de la forma y efectos del apilamiento en los picos de 662 keV.**

Primero comparamos el número de cuentas obtenido con TV que van al fotopico extendido. Para ello aplicamos el factor de escala que obtuvimos en la sección anterior.

Posición	0.25 μCi		5 μCi			
x (cm)	cuentas	FWHM	cuentas	FWHM	F. Escala	Error (%)
0	26244.0	9.1	329645.0	76.7	19978.5	23.9
1	22469.0	9.1	292080.3	65.3	17701.8	21.2
3	8592.5	8.0	143310.7	26.3	8685.5	-1.1
5	5119.3	7.9	84081.3	15.7	5095.8	0.5
7	3530.3	7.2	56975.3	12.2	3453.1	2.2

Tabla 2.5: Cálculo del FWHM en función de la distancia entre fuentes de ^{137}Cs reescaladas.

En la Figura 2.36 se representa el error en función de la posición, notamos cómo a largas distancias (> 3 cm) el ajuste hecho por el factor de escala es adecuado. El error es menor al $\pm 3\%$ cuando estamos en presencia de bajas tasas (baja fracción de tiempo muerto y poco pile-up). Por el contrario, en posiciones cercanas al detector (contacto y 1 cm) el error crece sobre 20%. Esta zona se asocia a altas tasas, alta fracción de tiempo muerto y fuerte contribución de pile-up.

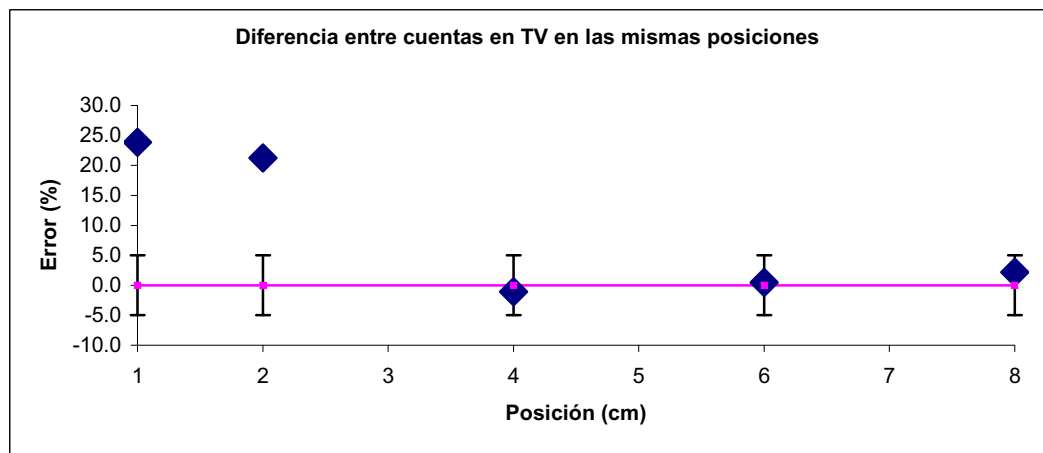


Fig. 2.36: Error en el número de cuentas en función de la posición.

PARTE 5: Eficiencia.

Se toma la fuente de ^{137}Cs de $0.25 \mu\text{Ci}$ (1) como patrón. Esta fue trazada recientemente con un activímetro en el HGGM (Curiementor4 PTW). Se obtuvo una actividad de $0.247 \mu\text{Ci}$ (9139 Bq).

Se procede a calcular el decaimiento de las fuentes usadas:

Fecha Hoy	jul-10	Intervalo de medición T_{vivo} (s)	100
-----------	--------	---	-----

Fuente	A_0 (μCi)	A_0 (Bq)	$T_{1/2}$ (años)	T_0	Δt (meses)	A_{HOY} (Bq)
^{137}Cs (1)	0.25	9250	361.2	feb-10	5.00	9161.7
^{137}Cs (2)	5	185000	361.2	sep-00	118.00	147512.4

Tabla 2.6: Estimación de la actividad al momento de las mediciones.

Se observa que hay gran acuerdo en las estimaciones ($> 1\%$ error) entre la medición de actividad y el decaimiento. Esto puede interpretarse como una corroboración de la medición en el HGGM.

Para determinar el número de gammas con energía de 661.66 keV (Cs-137) que son emitidos por la fuente en el intervalo de TV de medición se aplica lo siguiente:

$$A(t_{\text{medición}}) \cdot I_{\text{Intensidad}(\%)} \cdot \Delta t_{\text{VIVO}} = \text{Cuentas en fotopico}$$

Fuente	Picos	Intensidad	cuentas
	E (keV)	%	(c)
Cs-137 (1)	661.66	85.10%	7.797E+05

Tabla 2.7: Número de cuentas para en 661.66 keV para la fuente de ^{137}Cs (1).

Tomamos el área neta del pico y la del pico extendido (pico + cola) para compararlos. Luego, el cálculo de la **Eficiencia Total** viene dado por la división del área neta sobre el número de cuentas emitidas con energía de 661.66 keV. En este caso: 7.797E+05.

x (cm)	Area (0.25 uCi)		Eficiencia	
	Pico	Pico Ext.	$\epsilon(x)$	$\epsilon(x) \{\text{Ext}\}$
1	22090.3	26244.0	2.833E-02	3.366E-02
2	20251.0	22469.0	2.597E-02	2.882E-02
4	8244.7	8592.5	1.057E-02	1.102E-02
6	5088.7	5119.3	6.527E-03	6.566E-03
8	3497.8	3530.3	4.486E-03	4.528E-03

Tabla 2.8: Número de cuentas en 661.66 keV y su fotopico extendido para las dos fuentes de ^{137}Cs .

Se grafica la eficiencia en función de la posición (cm):

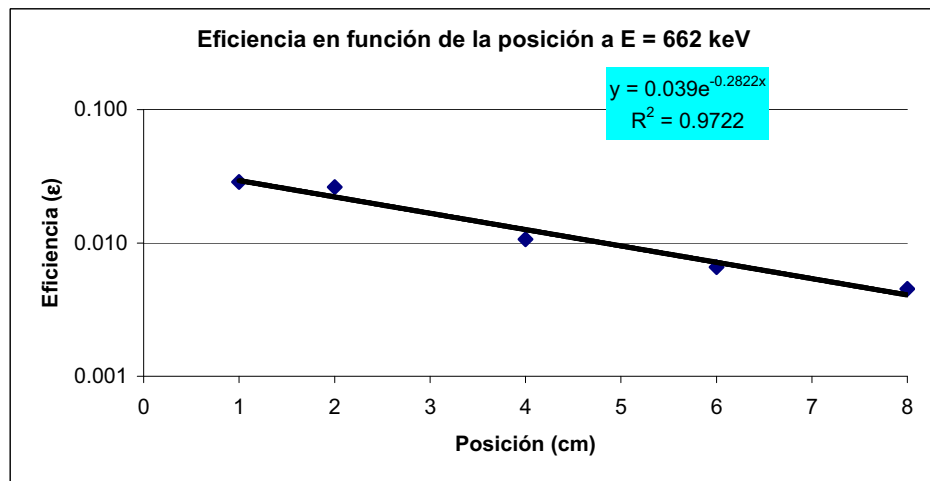


Fig. 2.37: Eficiencia en función de la posición para la energía.

En la Figura 2.37 se observa cómo la eficiencia decrece exponencialmente con la distancia. Esto implica que la expresión: $\epsilon(x) = 0.039e^{-0.2822x}$ está relacionado con la eficiencia geométrica del sistema de detección para esa energía (661.66 keV).

Conclusiones:

- La actividad de una fuente puede ser estimada si se determina un factor de escala con respecto a una fuente trazada para bajas tasas (< 5000 cps). El factor de escala (16.5) no sólo relaciona las cps en el fotopico, sino que se puede extender para la actividad.
- El factor de escala no ajusta adecuadamente la razón entre cps para posiciones cercanas a la fuente (1 y 2cm), o lo que es lo mismo para altas tasas (>5000 cps) o fracciones elevadas de tiempo muerto ($>10\%$).
- La corrección por el factor de escala no supera el 3% de error en sus medidas para tasas de conteo entre 0 y 17000 cps, de esta forma el error al corregir por TR no sobrepasa el 3%.
- La eficiencia decrece con la distancia ($\varepsilon(x) = 0.039e^{-0.2822x}$) de modo exponencial. Este resultado está relacionado con la eficiencia geométrica del sistema fuente-detector.

2.3 Determinación de la Eficiencia Absoluta para el HPGe

Para la determinación de la Eficiencia Absoluta del detector HPGe en diferentes posiciones se utilizaron 5 fuentes diferentes (*Ver Tabla 2.9*) posicionándolas a 1, 5 y 25 cm frente al detector.

La actividad de las fuentes se estimó para el día de la medición:

Fuente	A_0 (μCi)	$T_{1/2}$ (años)	T_0	Δt (años)	A_{HOY} (Bq)
Ba-133	1	10.5	ene-06	4.83	2.689E+04
Eu-152	1	13.54	ene-06	4.83	2.889E+04
Cs-137	0.25	30.1	feb-10	0.75	9.092E+03
Na-22	1	2.6	ene-06	4.83	1.020E+04
Co-60	1	5.27	ago-00	10.25	9.610E+03

Tabla 2.9: Fuentes que se utilizaron para el estudio de la eficiencia.

Para la estimación de la Eficiencia Absoluta hemos seguido uno de los procesos normalizados para caracterizar un HPGe que se describen en el ANSI325-1986 (IEEE 325-1996). Si bien nuestra muestra de fuentes de pruebas no es la descrita en la Tabla 6.1 de dicho documento³³, tenemos muchas energías características para elaborar la estimación para cubrir un rango amplio de energías: sobre 40 hasta 1400 keV.

La citada norma ANSI325 propone un método que consiste en colocar fuentes puntuales trazadas a **25 cm** de la cara frontal del detector³⁴. Nosotros decidimos agregar dos posiciones más: a **1 cm** del HPGe para reproducir la posición en que fueron colocados los cristales centelladores que se van a caracterizar; y a 5 cm para tener un punto con menor tiempo muerto y pile-up que estuviera dentro del castillo de plomo. (*Ver Figura 2.38*)

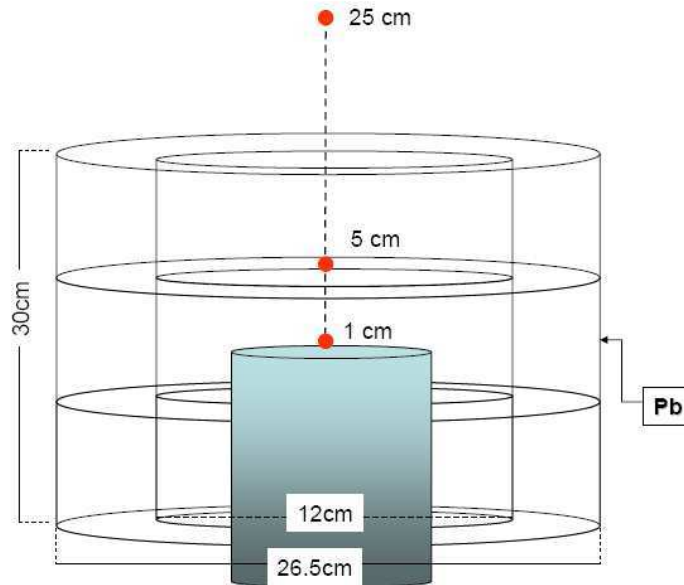


Fig. 2.38: Esquema del castillo de Pb y el PopTop. En rojo los puntos donde se posicionaron las fuentes de prueba. Las distancia está referida al HPGe y no al PopTop.

En la *Figura 2.38* se observa que las dos posiciones interiores están dentro del castillo de plomo, mientras que a 25 cm la fuente estaba fuera del blindaje. Los puntos interiores tienen en sus espectros los picos característicos del plomo (*Ver Figura 2.23*). El punto exterior tiene también los presenta, pero su eficiencia geométrica implica una baja probabilidad de que estos aparezcan notablemente en el espectro.

El método del ANSI requiere que todas las fuentes a utilizar estén trazadas. Sin embargo, al momento de las mediciones únicamente el ^{137}Cs estaba trazado por un activímetro (Curiómetro del HGGM). Por tal motivo debemos corregir todas las curvas para normalizarlo con la actividad y eficiencia del ^{137}Cs .

A continuación describiremos el procedimiento para los datos a 5 cm del HPGe. Se aplicará algo análogo para 1 y 25 cm.

En primer lugar tenemos los datos por fuente en la misma posición:

Fuente	E(keV)	Eficiencia
Ba-131	30.9	5.18E-02
	35.1	5.77E-02
	276.4	2.21E-02
	302.9	2.15E-02
	356.0	1.88E-02
Eu-152	39.9	8.17E-02
	45.6	8.46E-02
	121.8	7.57E-02
	244.7	3.67E-02
	344.3	2.94E-02
	778.9	1.05E-02
	964.1	7.76E-03

	1112.1	7.06E-03
	1408.0	5.30E-03
Cs-137	661.7	1.02E-02
Na-22	511.0	1.33E-02
	1274.5	4.73E-03
Co-60	1173.2	4.43E-03
	1332.5	3.96E-03

Tabla 2.10: Fuentes, energía y Eficiencias a 5 cm.

Estos datos se grafican en la *Figura 2.39*. Cada punto corresponde a un valor de eficiencia para una energía dada. Los puntos que corresponden a una misma fuente están agrupados por una línea continua (no de tendencia). El código de colores se presenta en un recuadro a la derecha.

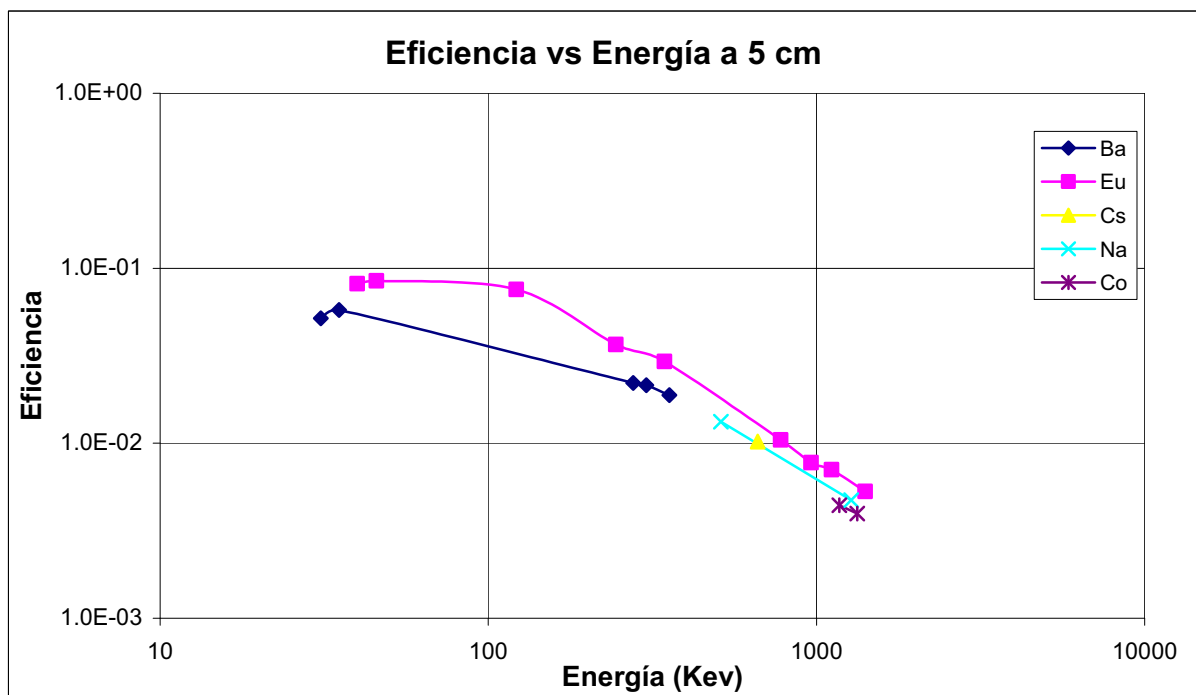


Fig. 2.39: Curvas de eficiencia vrs energía según la fuente.

Dado que todos los puntos fueron tomados en la misma posición, los únicos efectos que pueden modificar la eficiencia son: efecto apilamiento o suma en un mismo pico (mayor o menor número de cuentas del que debería haber por la única contribución de la transición energética propuesta) o que la actividad de la fuente esté mal estimada.

Para fines prácticos tomamos como verdadera la eficiencia del ^{137}Cs dado que es la única recientemente trazada. En nuestro caso la **Eficiencia Absoluta** del ^{137}Cs a 5 cm es 1.0248×10^{-2} .

La estimación del factor de ajuste se debe hacer secuencialmente, se ajusta una fuente a la vez.

El primer ajuste lo hacemos con la fuente de ^{152}Eu dado que es la que tiene puntos en un amplio rango. De hecho, la estimación se hace interpolando la energía del ^{137}Cs .

- **Paso 1:** se pintan la curva de ^{152}Eu para valores superiores a 100 keV y se ajusta mediante una función de la siguiente forma:

$$\ln(\varepsilon) = A \ln(E_\gamma) + B(\ln(E_\gamma))^2 - \frac{C}{\ln(E_\gamma)^3}$$

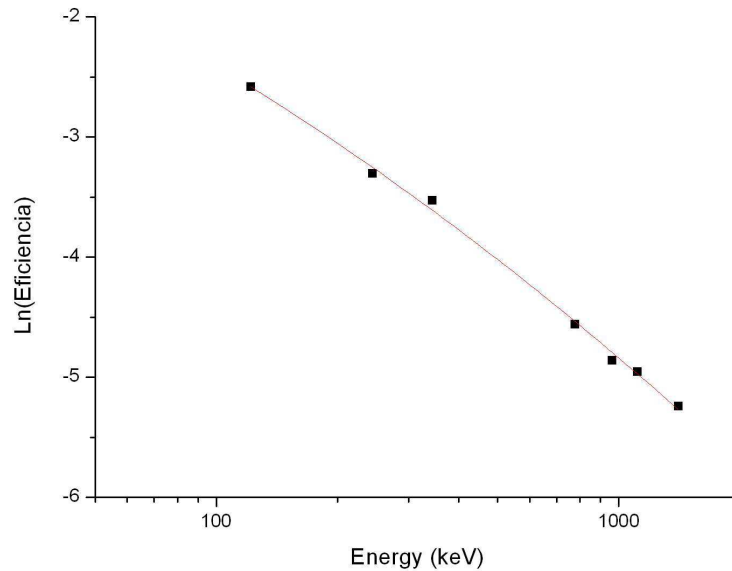


Fig. 2.40: Curva logarítmica de la eficiencia vs la energía para ^{152}Eu con $E > 100 \text{ keV}$.

En este caso, los parámetros obtenidos por el programa ORIGIN³⁵ son: $A = -0.16569$, $B = -0.07746$, $C = 2554.39512$.

- **Paso 2:** se interpola el valor de **Eficiencia** a una Energía de 661.66 keV, correspondiente a la energía característica de la fuente de ^{137}Cs trazada.

$$\frac{\varepsilon_{\text{Cs}}|_{661.62\text{keV}}}{\varepsilon_{\text{Eu}}|_{661.62\text{keV}}} = 0.790$$

Este factor se utiliza para “corregir/normalizar” hacia el ^{137}Cs . Se multiplican todos los valores de la curva de ^{152}Eu por 0.790.

De esta forma obtenemos los nuevos parámetros de la curva, desplazada para pasar por ^{137}Cs : $A = -0.23943$, $B = -0.07174$, $C = 27287.3745$.

El siguiente paso consiste en repetir el proceso para hallar los factores de ajuste para las demás fuentes utilizadas.

La curva del ^{133}Ba la aproximamos análogamente con el programa ORIGIN. El factor de ajuste obtenido es 1.086. Se debe multiplicar cada punto por dicho factor. (Ver Tabla 2.11)

Curva	Ajustado con la curva ¹⁵² Eu corregida				
Fuente	ANTES		Factor	DESPUES	
¹³³ Ba	A	-0.69817	1.086	A	-0.66411
	B	0.00398		B	5.48487E-4
	C	18029.58931		C	17844.71662

Tabla 2.11: Constantes de la curva de eficiencia vrs energía para el ¹³³Ba estimadas con ORIGIN.

Para las fuentes de ⁶⁰Co y ²²Na, dado que tienen sólo dos puntos, no pueden aproximarse analíticamente por el ORIGIN. Pero si pueden interpolarse a la curva de ¹⁵²Eu corregida.

Energía (keV)	Fuente	Eficiencia Estimada	Ln(ε)	Ln(ε) ¹⁵² Eu	Factor	Eficiencia Corregida
511	²² Na	1.33E-02	-4.32083	-4.28472	1.032	1.37E-02
1274.54	²² Na	4.73E-03	-5.35479	-5.38341		4.88E-03
1173.23	⁶⁰ Co	4.43E-03	-5.41975	-5.27657	1.154	5.11E-03
1332.49	⁶⁰ Co	3.96E-03	-5.53182	-5.43397		4.57E-03

Tabla 2.12: Constantes de la curva de eficiencia vrs energía para el ⁶⁰Co y ²²Na.

Con estos últimos resultados ya se han normalizado todos los valores a la Eficiencia Absoluta del ¹³⁷Cs trazado. De esta forma tenemos:

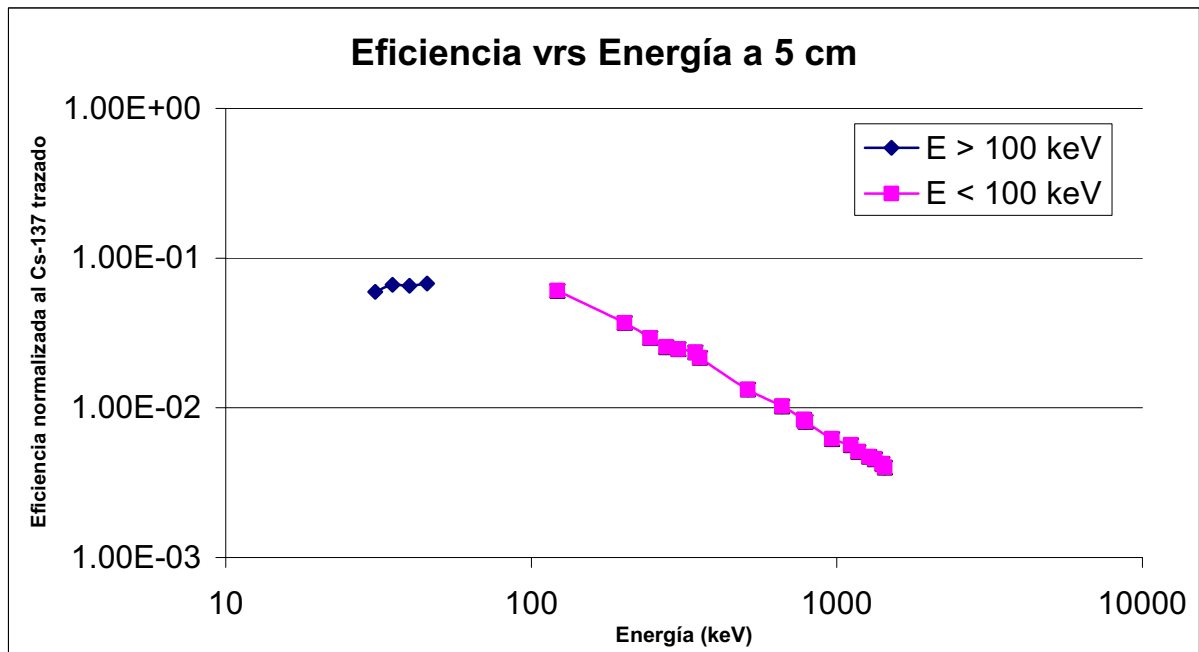


Fig. 2.41: Curva logarítmica de la eficiencia vrs la energía a 5 cm.

En la Figura 2.41 tenemos la curva de eficiencia dividida en dos rangos de energía. Uno inferior a 100 keV y el otro superior a 100 keV. Nos concentramos en el rango superior de energía dado que los valores de energía que nos interesa identificar son superiores a 100 keV.

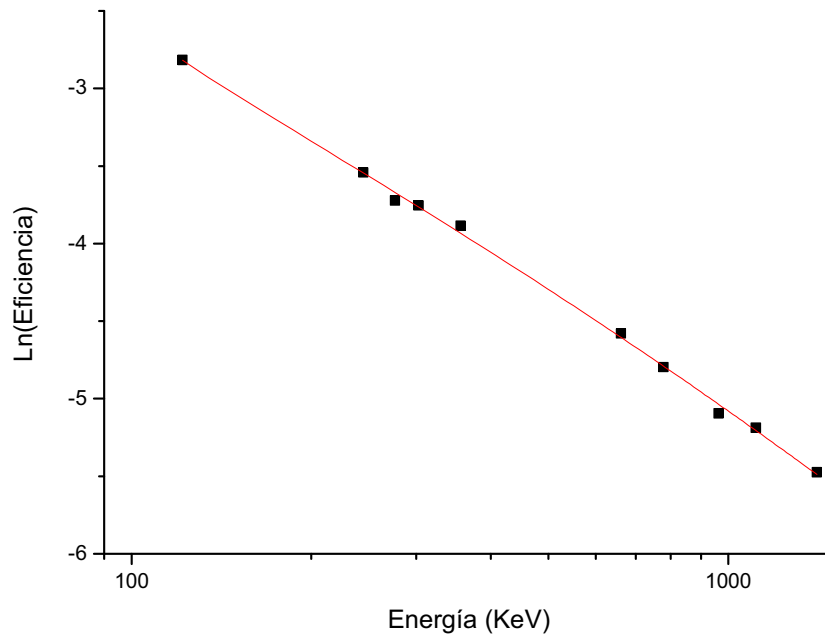


Fig. 2.42: Curva logarítmica de la eficiencia vrs la energía a 5 cm.

En la *Figura 2.42* tenemos una curva de **Eficiencia Absoluta** que va de 100 a 1408 keV, cuyos parámetros de ajuste son: $A = -0.29778$, $B = -0.06335$, $C = -131794.777$.

Los residuos son la diferencia que hay entre el valor ingresado (punto coordinado) y el valor ajustado (curva de tendencia). En nuestro caso sería:

$$\text{Res}(E) = \ln(\text{Punto}) - \ln(\text{Curva}) = \ln\left(\frac{\text{Punto}}{\text{Curva}}\right)$$

Los residuos de esta aproximación se representan en la *Figura 2.43*:

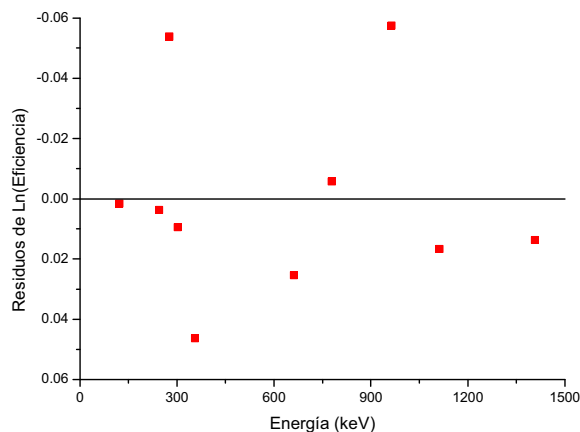


Fig. 2.43: Residuos de la Eficiencia en función de la Energía.

En la *Figura 2.43* se observan que los residuos fluctúan entre 0.06 y -0.06. Con base en la anterior definición de Residuo, interpretamos los valores límites de los Residuos:

$$\text{Res} = 0.06 = \ln(\text{Punto}) - \ln(\text{Curva}) = \ln\left(\frac{\text{Punto}}{\text{Curva}}\right)$$

$$\text{Luego: } \left(\frac{\text{Punto}}{\text{Curva}}\right) = e^{0.06} \approx 1.061$$

Esto quiere decir que el error máximo (o diferencia entre el punto dado y el ajuste de la curva) a una energía determinada es menor al 6%.

Procediendo de la misma manera para las otras dos posiciones obtenemos:

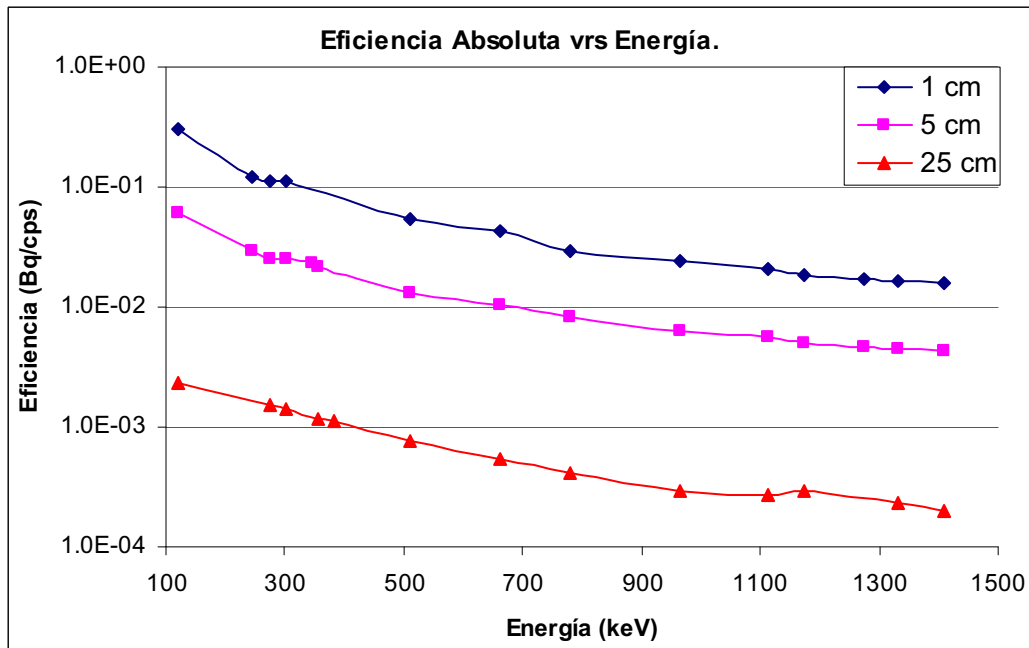


Fig. 2.44: Eficiencia Absoluta en función de la Energía para las posición 1, 5 y 25 cm frente al HPGe.

En la Figura 2.44 se observa como la **Eficiencia Absoluta** decrece con la distancia, tal como es esperable por la definición de eficiencia geométrica.

Para 25 cm obtenemos:

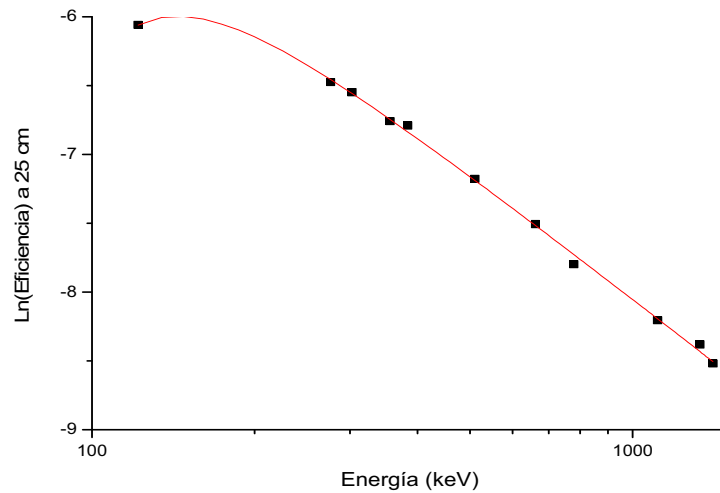


Fig. 2.45: Curva logarítmica de la eficiencia vrs la energía a 25 cm

En la *Figura 2.45* tenemos una curva de **Eficiencia Absoluta** que va de 100 a 1408 keV, cuyos parámetros de ajuste son: $A = -0.29778$, $B = -0.06335$, $C = -131794.777$.

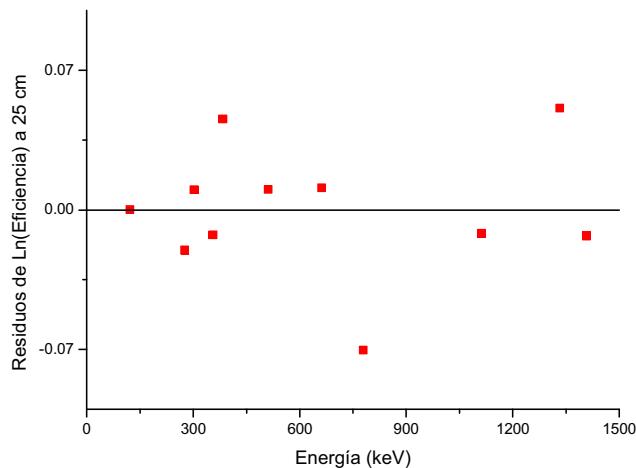


Fig. 2.46: Residuos de la Eficiencia en función de la Energía a 25 cm.

Los residuos fluctúan entre 0.07 y -0.07. Interpretemos el valor de residuo de: 0.06. Primero, la definición de Residuo podemos darla como:

$$\text{Res} = 0.07 = \ln(\text{Punto}) - \ln(\text{Curva}) = \ln\left(\frac{\text{Punto}}{\text{Curva}}\right)$$

$$\text{Luego: } \left(\frac{\text{Punto}}{\text{Curva}}\right) = e^{0.07} \approx 1.072$$

Esto quiere decir que el error máximo (o diferencia entre el punto dado y el ajuste de la curva) a una energía determinada es menor al 7%.

Para 1 cm obtenemos:

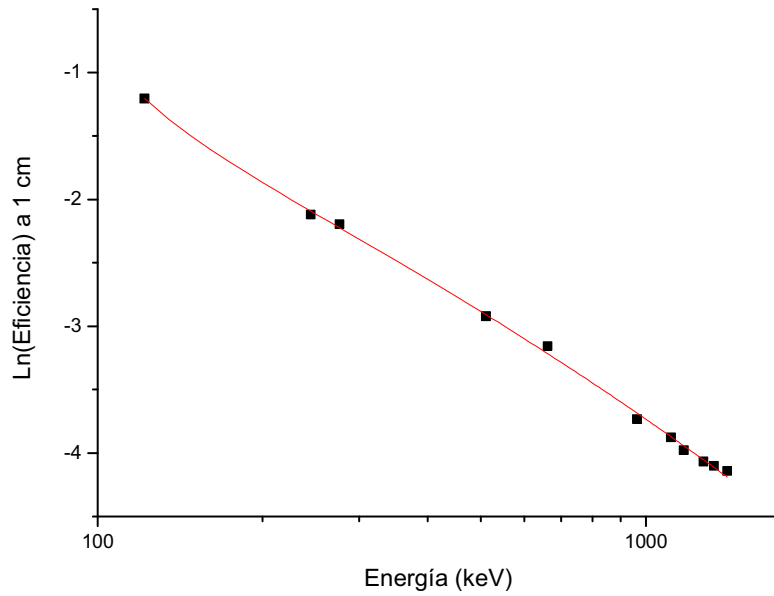


Fig. 2.47: Curva logarítmica de la eficiencia vrs la energía a 1 cm

En la *Figura 2.47* tenemos una curva de **Eficiencia Absoluta** a 1 cm para la ventana de energía de 100 a 1408 keV, cuyos parámetros de ajuste son: $A = 0.21463$, $B = -0.10932$, $C = -513173.53776$.

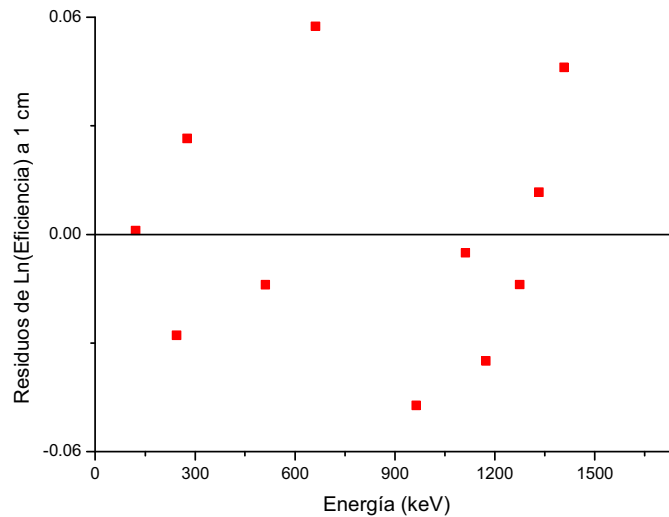


Fig. 2.48: Residuos de la Eficiencia en función de la Energía.

Los residuos fluctúan entre 0.06 y -0.06. Interpretamos el valor de residuo de: 0.06. Primero, la definición de Residuo podemos darla como:

$$\text{Res} = 0.06 = \ln(\text{Punto}) - \ln(\text{Curva}) = \ln\left(\frac{\text{Punto}}{\text{Curva}}\right)$$

$$\text{Luego: } \left(\frac{\text{Punto}}{\text{Curva}} \right) = e^{0.06} \approx 1.061$$

Esto quiere decir que el error máximo (o diferencia entre el punto dado y el ajuste de la curva) a una energía determinada es menor al 6%.

El resumen de los parámetros es:

Posición (cm)	A	B	C
1	0.21463	-0.10932	-513173.53776
5	-0.29778	-0.06335	-131794.777
25	-1.01651	-0.02161	1.22715x10 ⁶

Tabla 2.13: Resumen de los parámetros para las curvas de Eficiencia a 1, 5 y 25 cm..

Bibliografía Capítulo 2

-
- ¹ Naeem, Ahmed. *Physics & Engineering of Radiation Detection*. Elsevier: London, 2007. Pág. 275.
- ² Idem.
- ³ Naeem. Op. Cit. Pág. 276.
- ⁴ Naeem. Op. Cit. Pág. 277.
- ⁵ Idem.
- ⁶ S/A. Nitrógeno Líquido en página web: http://es.wikipedia.org/wiki/Nitr%C3%B3geno_l%C3%ADquido
- ⁷ Knoll, Glenn. *Radiation Detection and Measurement*. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc.: New York, 1989. Pág. 390-391.
- ⁸ ORTEC. *LO-AX Low-Energy Photon Detector. Product Configuration Guide*. Pág. 3.
- ⁹ ORTEC. Op. Cit. Pág. 9.
- ¹⁰ Knoll. Op. Cit. Pág. 397.
- ¹¹ ORTEC. Op. Cit. Pág. 7.
- ¹² Leo. *Techniques on Nuclear and Particles Physics*. Berlin: Springer-Verlag, 1987. Pág. 244.
- ¹³ Knoll. Op. Cit. Pág. 590.
- ¹⁴ Knoll. Op. Cit. Pág. 591.
- ¹⁵ Idem.
- ¹⁶ ORTEC. Op. Cit. Pág. 4.
- ¹⁷ AMPTEK. *Charge Sensitive Preamplifier A250*. Pág. 1.
- ¹⁸ Canberra. *Spectroscopy Amplifier. Model 2022*. Pág. 1
- ¹⁹ Idem.
- ²⁰ Atomki. *PalmTop MCA. Multichannel Analyzator and Scaler. User's Manual*. Pág. 2.
- ²¹ Knoll. Op. Cit. Pág. 661.
- ²² Atomki. Op. Cit. Pág. 4.
- ²³ Idem. Pág. 10.
- ²⁴ Atomki. Op. Cit. Pág. 8-9.
- ²⁵ Agilent Technologies *InfiniiVision. 6000 series Oscilloscopes. Data Sheet*. Pág. 15
- ²⁶ Idem. Pág. 17.
- ²⁷ ORTEC. 5 KV *Detector Bias Supply. Model 459. Operating and Service Manual*. Pág. 1
- ²⁸ Idem.
- ²⁹ Cal, Jacobo. *Aplicación de Simulaciones Montecarlo para el Análisis de información CT y su uso en PET y Dosimetría*. Trabajo para la obtención del DEA, junio, 2010.
- ³⁰ Atomki. Op. Cit. Pág. 15.
- ³¹ Knoll. Op. Cit. Pág. 117.
- ³² Idem.
- ³³ ANSI. IEEE Standard Test Procedures for Germanium Gamma-Ray Detectors. Pág. 28.
- ³⁴ Ibid. Pág. 42.
- ³⁵ Origin en <http://www.originlab.com/>

3. Caracterización de los PMT

Se caracterizarán dos tubos fotomultiplicadores convencionales (PMT) utilizados. Se presenta una caracterización bibliográfica de la muestra de cristales centelladores. Finalmente se presentan los resultados de resolución en energía para cada cristal.

3.1. Instrumentación

Los tubos fotomultiplicadores empleados son de la marca PHOTONIS modelos XP20D0/B y XP2020Q. (Ver Figura 3.1 a y b)

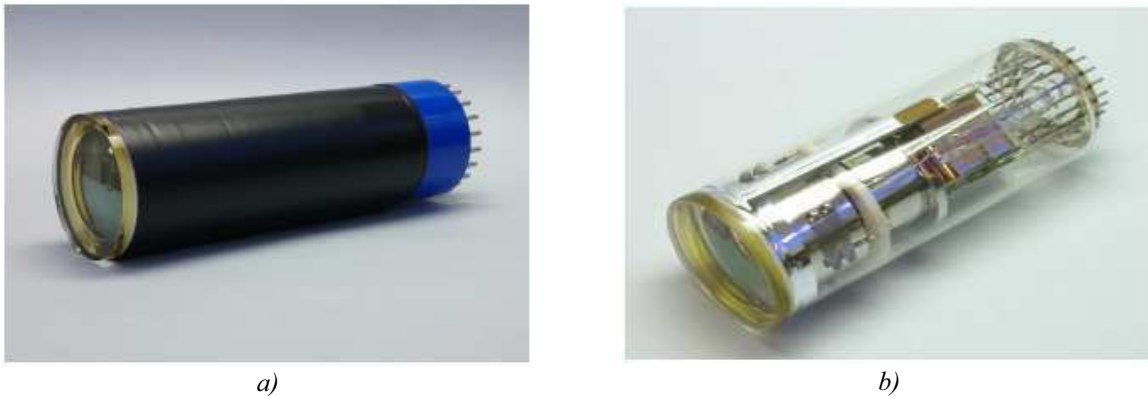


Fig. 3.1: Tubos fotomultiplicadores de PHOTONIS. **a)** PMT modelo XP2020Q; **b)** PMT modelo XP20D0

En la base (socket FE1120) del fotomultiplicador hay dos salidas. Una es la correspondiente al último dínodo, la cual es llevada al osciloscopio (Agilent DSO5014A) para corroborar la correcta conformación de los pulsos. La otra es el ánodo, la cual es llevada directamente al MCA (CassyLab). También en la base está el puerto para suministrar el voltaje de operación (NQH203M FAST iseg). Finalmente, la señal del MCA es llevada a una interfaz gráfica (PC) para el análisis espectral. (Ver Figura 3.2)

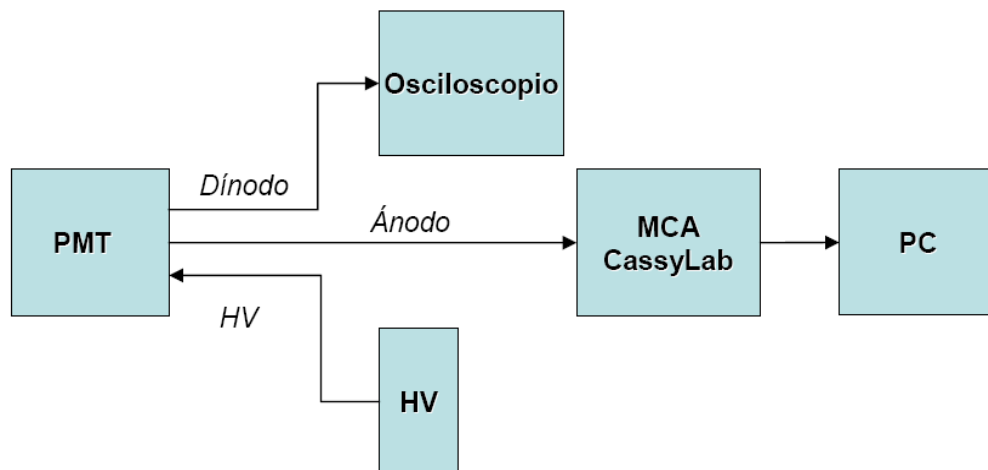


Fig.3.2: Esquema de procesamiento de la señal.

Procedemos a describir cada parte del sistema de adquisición.

3.1.1 Fotocátodo y la ventana del PMT

El fotocátodo es un material semiconductor capaz de liberar electrones ante la incidencia de fotones provenientes de cristales centelleadores¹. Estos fotones deben transportar una energía superior a la energía entre bandas (E_g), de tal manera que los electrones puedan pasar de la capa de valencia a la capa de conducción¹.

El proceso se podría describir en 3 etapas: 1) el fotón incidente es absorbido y su energía se transfiere a un electrón del material fotosensible; 2) el electrón migra por la superficie del fotocátodo; 3) el electrón sale del fotocátodo. Si los fotones constituyen un pulso de centelleo, como en el caso que nos ocupa, los fotoelectrones producidos por el fotocátodo formarán un pulso de duración similar².

En nuestro caso, ambos fotomultiplicadores tienen el mismo tipo de fotocátodo (Bi-Alkali) pero diferente ventana de entrada. (Ver Tabla 3.1) Este hecho hace que la sensibilidad (S_k) de uno tenga un rango espectral mayor que el otro. Inclusive, uno es sensible al UV y el otro no³. (Ver Figura 3.3)

	XP2020Q	XP20D0
Ventana	Sílice Fundida	Cristal de Borosilicato
Fotocátodo	Bi-Alkali	
Rango Espectral	150-650 nm	270-650 nm
Máximo S_k	420	

Tabla 3.1: Comparación de ventana y fotocátodo.

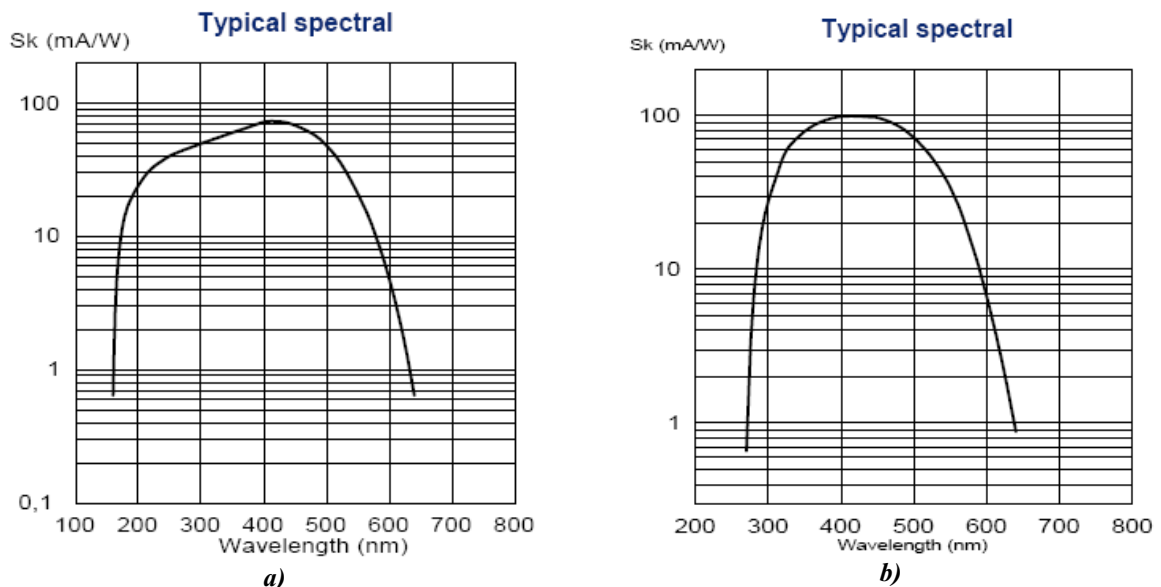


Fig. 3.3: Sensibilidad del fotocátodo Bi-Alkali. **a)** Con ventana de Sílice Fundida. Este presenta sensibilidad al ultravioleta; **b)** Con ventana de cristal de borosilicato. Este no presenta sensibilidad al ultravioleta.

En la Figura 3.3 observamos cómo el sistema óptico de entrada del fototubo con ventana de sílice fundida tiene una sensibilidad superior a 10 mA/W entorno a los 200 nm de longitud de onda, mientras que la ventana de cristal de borosilicato no presenta sensibilidad en la misma región. Este hecho hace que el a) tenga sensibilidad ante el ultravioleta, mientras b) que no.

ⁱ Los fotones provenientes de centelleadores usualmente están en los rangos del visible, ultravioleta e infrarrojo.

3.1.2 Tubo Fotomultiplicador

Ambos tubos tienen una arquitectura de *centrado lineal*ⁱⁱ. Esto es que la estructura del multiplicador procura posicionar los dínodos de tal manera que se minimice el tiempo de tránsito de los electrones entre dínodos. Su particularidad es que son el tipo de fotomultiplicador más rápido⁴. (Ver Figura 3.4) Su defecto es que son sensibles a campos magnéticos externos.

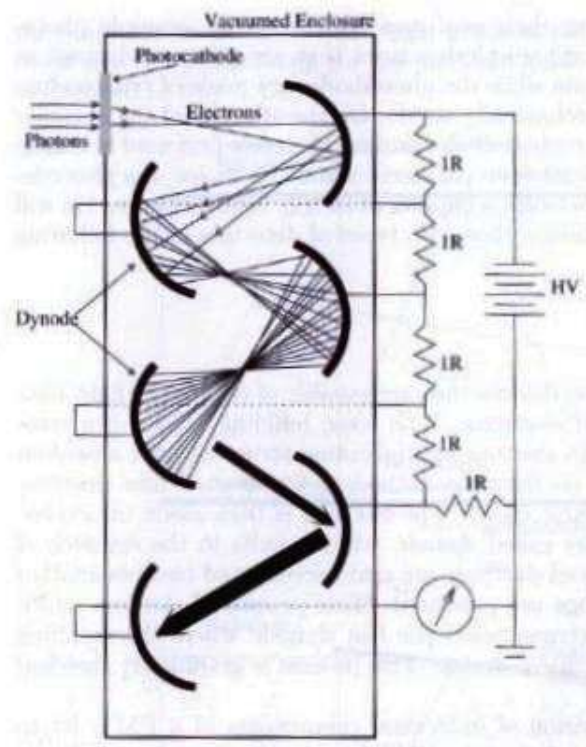


Fig. 3.4: Fotomultiplicador de centrado lineal.

Los electrones que dejan el fotocátodo son atraídos hacia el primero dínodo y producen δ electrones por cada fotoelectrón. Los electrones liberados en ese dínodo son guiados por un campo eléctrico hasta el segundo dínodo. Allí se liberarán δ electrones por cada electrón incidente. Este proceso se repite hasta llegar al ánodo (última etapa). De esta forma la ganancia total puede estimarse como: $\mu = \delta^n$ Donde μ es la ganancia, δ la razón de emisión secundaria, y n el número de etapas⁵.

En nuestro caso, el modelo XP2020Q tiene 12 etapas mientras que el XP20D0 únicamente 8. Esto implica que la ganancia del primero será mayor que la del segundo si se toman los δ iguales. De hecho, la pendiente de ganancia del primer modelo en escala doblemente logarítmica es 9, mientras que el segundo tiene 5.6⁶. (Ver Figura 3.5)

ⁱⁱ Linear Focused: Centrado Lineal.

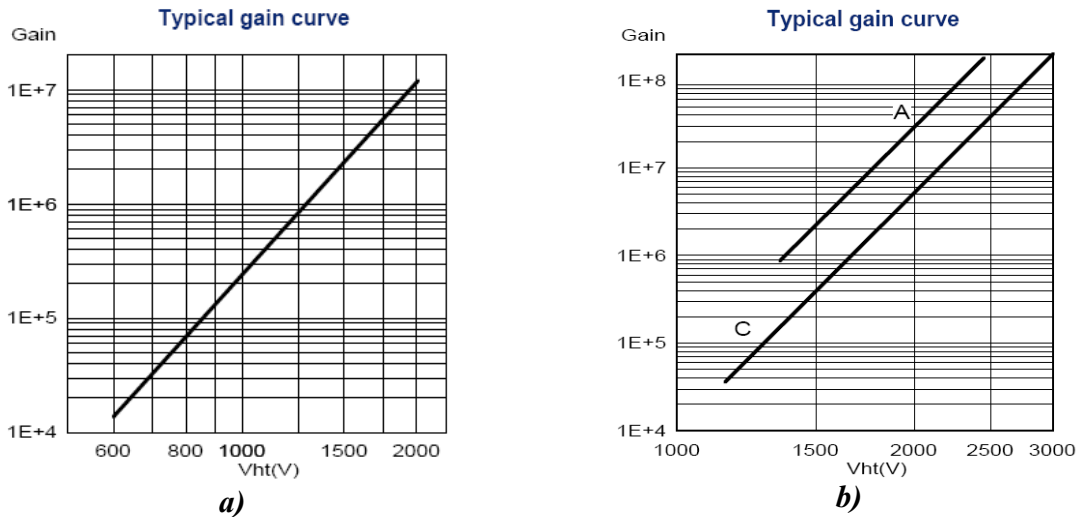


Fig. 3.5: Ganancia versus Voltaje para un fotomultiplicador de centrado lineal **a)** Modelo XP20D0 con 8 pasos. Pendiente 5.6; **b)** Modelo XP2020Q con 12 pasos. Pendiente 9.

En la *Figura 3.5* vemos en escala logarítmica el aumento de la ganancia en función del voltaje para un fotomultiplicador de 8 pasos (*Fig. 3.5.a*) y uno de 12 pasos (*Fig.3.5.b*). En la gráfica (b) observamos que hay dos curvas. La curva C es una modalidad de conexión entre pines para aumentar la linealidad de la señal. La curva A, en el mismo gráfico, procura aumentar la ganancia del fototubo.

Las dimensiones de ambos fototubos se presentan a continuación:

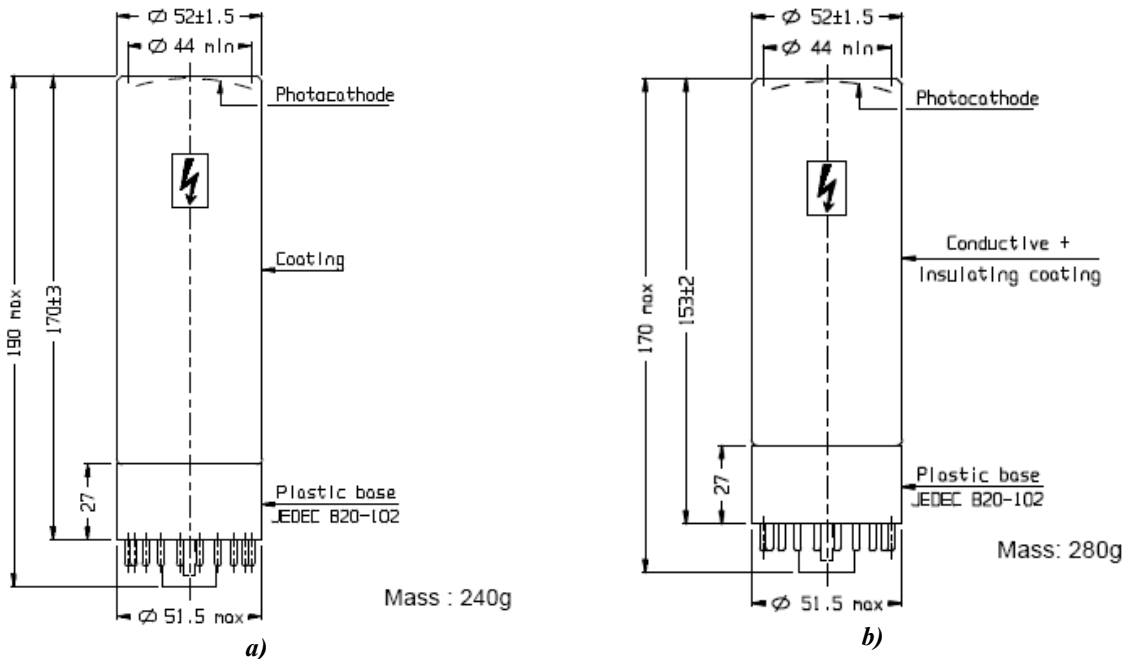


Fig. 3.6: Esquema de los tubos fotomultiplicadores. **a)** Modelo XP2020Q (12 pasos); **b)** XP20D0 (8 pasos)

De la *Figura 3.6* observamos dos cosas: 1) la diferencia en el tamaño responde al diferente número de etapas o pasos. 2) Ambos utilizan la misma base plástica de 20 pines tipo JEDEC B20-102. Es un zócalo modelo FE 1120.

3.1.3 Fuente de Alimentación

La alimentación del PMT son proporcionados por una fuente de alimentación NIM NQH 203M de FAST iseg (GmbH). (Ver Figura 3.7) Este dispositivo pertenece a la serie NQH x0xx.



Fig. 3.7: Fuente de Alimentación de la serie NQH de Fast Iseg.

Este módulo NIM posee 2 canales para suministrar voltaje continuo (DC) en ambas polarizaciones (negativa o positiva). El selector de polaridad está a un costado. El voltaje máximo de salida es 3 kV. Cada canal regula su voltaje con un selector de voltaje que está en la parte frontal⁷.

En la parte posterior tiene un puerto SHVⁱⁱⁱ para conectar el cable BNC de la alimentación del PMT. En nuestro caso, para ambos fotomultiplicadores utilizamos 800 V en polaridad negativa.

3.1.4 Osciloscopio

Refiérase a la sección **2.1.7 Osciloscopio** del capítulo anterior.

En nuestro caso, la señal del último dínodo es llevada al osciloscopio para garantizar la correcta conformación del pulso, la amplitud y la polaridad del pulso. También, antes de llevar el ánodo al MCA, tomamos medidas con él. (Ver Figura 3.8)

ⁱⁱⁱ SHV: Safe High Voltage. Es un tipo de conector usado para terminar las conexiones coaxiales que tienen alto voltaje.

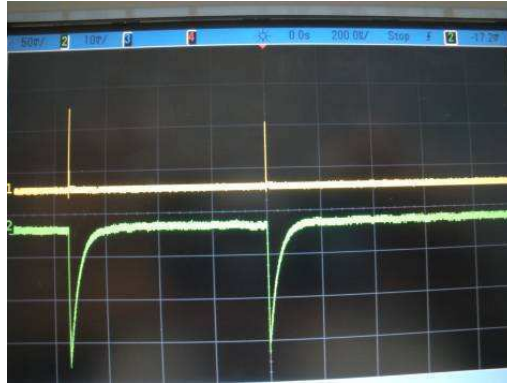


Fig. 3.8: Pulso del ánodo y dínodo del PMT Photonis XP20D0/B.

En la *Figura 3.8* vemos en la parte superior el pulso del último dínodo, y en la parte inferior un pico con polaridad invertida con mayor amplitud y mejor conformación, cuya señal proviene del ánodo del PMT.

3.1.5 MCA

La señal del ánodo es llevada directamente al puerto BNC de entrada (INPUT) del MCA (MCA Box LD 524 058). Este se encarga de convertir los pulsos analógicos en valores numéricos equivalentes que se almacenan y ordenan en la interfase de grabado (Pocket Cassy 524 006)⁸.

Adicionalmente, el MCA tiene un puerto en la cara frontal destinado a alimentar el preamplificador. En nuestro caso se deja libre porque no se utiliza en los PMT.



Fig. 3.9: Sistema de Adquisición de datos. a) MCA box de CassyLab; b) Pocket box

El MCA (*Ver Figura 3.9.a*) tiene una resolución máxima de 2048 canales (11 bits) por experimento. El tiempo muerto es aproximadamente 60 μ s, la ventana de coincidencia es de 4 μ s. El voltaje límite que recibe es 5 V, no importa la polaridad. Requiere un dispositivo adicional para procesar los valores digitales que ha creado.

El Pocket Cassy (*Figura 3.9.b*) toma la señal digitalizada del MCA y la envía por USB al ordenador. El Pocket Cassy tiene una resolución de 12 bit, con una tasa de escaneo de hasta 7.8 kcps. Su resolución temporal es de 1 μ s.

Interfase Gráfica

El MCA tiene una interfase gráfica que permite no sólo mirar los espectros individuales (Ver Figura 3.10) o en conjunto de varias mediciones. (Ver Figura 3.11) También permite modificar los parámetros de la medición. (Ver Figura 3.12)

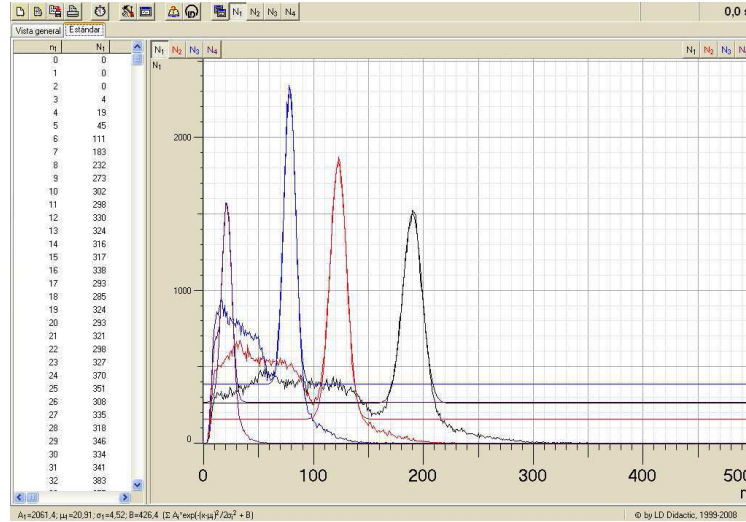


Fig. 3.10: Captura de pantalla del análisis de cuatro espectros tomados independiente. Superpuesto por el programa Cassy Lab.

En la Figura 3.10 observamos 4 espectros de una fuente de ^{137}Cs tomados a diferentes ganancias. A la izquierda se observa los datos de la adquisición por canales. Si se realiza una calibración en energía cambiarán el número de canal por el valor correspondiente de energía. Los recuadros con Ni son para trabajar por separado sobre cada uno de los espectros. El número es un consecutivo de la medición. Las demás funciones son para el tratamiento de los datos.

Los datos se almacenan en dos tipos de ficheros: *.lab* y *.txt*. Los primeros son propios del programa, guarda la información referente a la adquisición en columnas: datos de ganancia, tiempo de medición, canales y calibraciones realizadas. El segundo es un fichero ASCII con los datos por canal, el tiempo de medición y ganancia, pero no guarda la calibración.

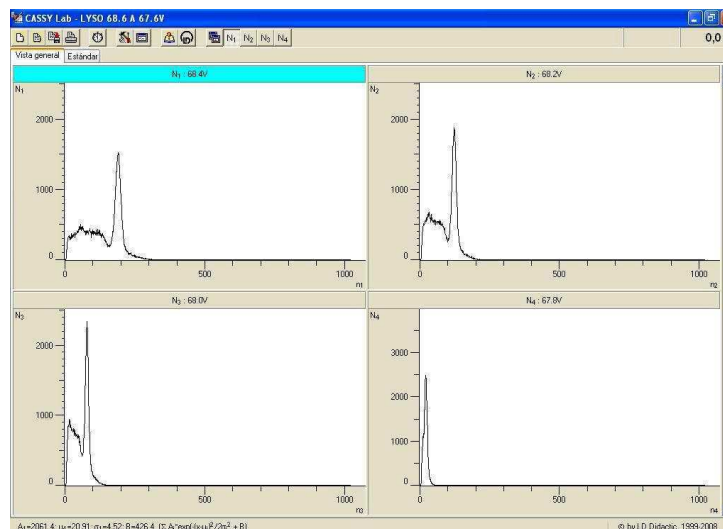


Fig. 3.11: Captura de pantalla de los espectros individuales. Este caso son espectros para una fuente de ^{137}Cs a diferentes voltajes con un centellador LYSO.

En la *Figura 3.11* tenemos la captura de pantalla de la vista individual de cada espectro. En esta ventana no se pueden definir ROIs o realizar calibraciones. Sin embargo, si permite eliminar, combinar o realizar operaciones entre los espectros. Por ejemplo: tomar un fondo y luego restárselo a una medición en particular.

Este programa permite modificar los parámetros de la medición. (*Ver Figura 3.12*) Se puede modificar la ganancia, el número de canales, el intervalo de la medición, la polaridad de los pulsos recibidos y si la medición es en coincidencia o medición multicanal o monocanal.

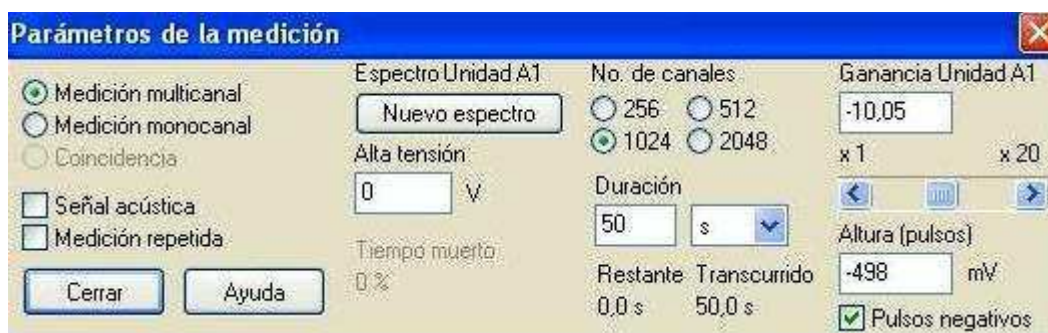


Fig. 3.12: Captura de pantalla del menu para modificar los parámetros de la medición.

3.2 Caracterización óptica y energética de la muestra de cristales centelladores

La muestra consiste un conjunto de centelladores haluros tipo cristal inorgánico. Los agrupamos si son alcalinos o no:

Tipo	Estructura	Cantidad
Alcalinos	LaBr ₃ (Ce)	1
	NaI(Tl)	2
	CsI(Tl)	2
	Pr:LuAg	4
No Alcalinos	BaF ₂	1
	GSO	1
	LYSO	1
	BGO	1
	LFS	5
	MLS	64

Tabla 3.2: Muestra de cristales centelladores.

Las características físicas de estos cristales determinaran el instrumental adecuado para su medición. Procedemos a describir algunas de sus propiedades:

3.2.1 Propiedades físicas y ópticas

Para nosotros es imprescindible conocer la densidad másica y el pico de emisión de los cristales. La densidad la necesitamos para la futura estimación de actividad interna por masa o por volumen para cada cristal. El pico de emisión lo necesitamos para escoger cuál PMT utilizaremos. Por ejemplo, una parte de la muestra emite en UV y el resto en visible.

Tipo	Cristal	Densidad (g/cm^3)	Constante de Decaimiento τ (ns)	Higroscópico	Pico de Máx. Emisión λ (nm)	Espectro de Emisión
Alcalinos	NaI(Tl)	3.7	250	Sí	415	Visible
	CsI: Tl	4.5	800	No	550	
	LaBr ₃ (Ce)	5.1	16	No	380	UV
	Pr:LuAG	6.7	25	No	310	
No Alcalinos	BaF ₂	4.9	620	No	220	Visible
	GSO	6.7	65	No	430	
	LYSO	7.3	42	No	420	
	BGO	7.1	300	No	480	
	LFS-3	7.35	35	No	425	
	LFS-7	6.1	30	No	425	
	MLS	7.35	37	No	419	

Tabla 3.3: Propiedades físicas y ópticas de los cristales de la muestra.

En la *Tabla 3.3* se observan algunas de las propiedades más importantes de la muestra de cristales a caracterizar. Es notable que tres de ellos (*LaBr₃(Ce)*, *Pr:LuAG*, *BaF₂*) tengan su pico de máxima emisión en el rango del ultravioleta (UV). Esto quiere decir que sólo podrán caracterizarse con el PMT sensible al UV.

También es notable el rango de constantes de decaimiento temporal. El cristal más rápido es el *LaBr₃(Ce)* con 16 ns, mientras que el más lento es el *CsI(Tl)* cercano a 800 ns. El *BaF₂* es un caso especial, dado que su espectro de radioluminiscencia tiene dos componentes: una “rápida” en el rango de 175-250 nm con un tiempo de emisión corto: 0.6 ns, y una componente “lenta” en el rango de 250-400 nm con un tiempo de emisión de 620 ns. (*Ver Figura 3.13*) Nosotros trabajaremos con la componente lenta⁹.

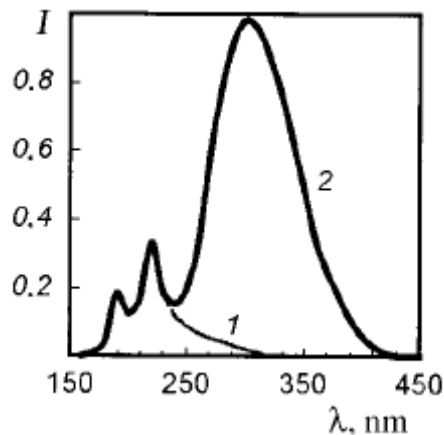


Fig. 3.13: Espectro de radioluminiscencia del BaF₂. La curva (1) es la componente rápida y la (2) la lenta.

Esta característica es fundamental para experimentos de “timing”, coincidencias y en general todo que requiere definir ventanas temporales. Sin embargo, no va a ser tomada en consideración.

De esta forma, podemos decir que tres cristales centelladores se pueden caracterizar sólo con el PMT sensible al UV y el resto con cualquiera de ellos. (*Ver Tabla 3.4*)

PMT	Sensible	Cristal
XP2020Q	UV + visible	LaBr ₃ (Ce), Pr:LuAG, BaF ₂
XP20DO	Visible	NaI(Tl), CsI(Tl), GSO, LYSO, BGO, LFS, MLS

Tabla 3.4: Asociación de cristales y PMT que optimizan su medida.

Finalmente los valores de densidad están en el rango de 3.7 a 7.35 g/cm³. Estos valores unidos al volumen o peso registrados para cada cristal nos permiten determinar la cantidad de sustancia (de centellador) que estamos caracterizando. Además, esta información permite elaborar las estimaciones para aquellos casos en que el cristal está dentro de una carcasa (“housing”) de la que no se recomienda extraerlos.

Cristal	Densidad (g/cm ³)	Geometría (cm)	Volumen Medido (cm ³)	Masa Medida (g)
NaI(Tl)	3.7	2.54x2.54	13.20	48.84
	3.7	2.54x2.54	12.90	47.73
CsI: Tl	4.5	0.9x0.9x2	1.62	7.30
	4.5	1.2x1.2x2	2.88	12.96
LaBr ₃ (Ce)	5.1	R:2.1,r:1.3,h:4.5	41.61	212.2
Pr:LuAG	6.7	0.1x0.1x1.2	0.1/cristal	0.47/cristal
	6.7	0.5x0.5x0.5	0.125	0.84
BaF ₂	4.9	2.5x2.5	12.27	60.1
GSO	6.7	2.9x0.5x2	2.9	20.6
LYSO	7.3	1x1x2	2	14.5
BGO	7.1	2.9x0.6x2	3.48	23.3
LFS-3	7.35	0.145x0.145x0.7	0.0147	0.3
LFS-7	6.13	0.145x0.145x0.7	0.0147	0.2
MLS	7.35	0.15x0.15x1.2	0.027	0.2/cristal

Tabla 3.5: Densidad, volumen y masa de los cristales de la muestra.

3.2.2 Propiedades físicas y Energéticas

En la *Tabla 3.6* listamos la resolución en energía reportada para los cristales de la muestra.

Cristal	Resolución (%) ^{iv}	
	511 keV	661.66 keV
NaI(Tl)	7 ^a	5.6 ^a
CsI: Tl	10 ^e	8.7 ^e
LaBr ₃ (Ce)	3.6 ^f	3.2 ^f
Pr:LuAG	6.7 ^a	5 ^a
BaF ₂	15.5 ^d	13.7 ^d
GSO	12 ^b	10 ^a
LYSO	20 ^b	10 ^a
BGO	16 ^b	12 ^a
LFS	12 ^d	10 ^d
MLS	20 ^c	16 ^d

Tabla 3.6: Porcentaje de Resolución en Energía por cristal.

^{iv} **a)** Furukawa. PR:LuAG Scintillator cristal. **b)** Sinocera: scintillators BGO, LYSO, GSO. **c)** Miyaoka, et al. Performance Characteristics of Micro Crystal Element (MiCE) Detectors. **d)** Characteristics of BaF₂ scintillation Crystals. Atomic Energy. Vol 90. # 1, 2001. **e)** Saint-Gobain. Crystals. 9X9X29 (CsI). **f)** Shah et al. LaBr₃:Ce Scintillators for Gamma Ray Spectroscopy. Submitted to IEEE Transactions on Nuclear Science.

3.3 Caracterización de la resolución en energía.

Se tomaron tres espectros por cristal en cada PMT variando el voltaje y la fuente (662 keV - ^{137}Cs y 511 keV - ^{22}Na). Bajo condiciones geométricas idénticas y factores de ganancia y “shapping” constantes en todas las mediciones.

Se toma como ejemplar los espectros obtenidos para un cristal centellador de NaI(Tl). (Ver Figura 3.14) En el gráfico se aprecia el desplazamiento del pico característico (511 keV o 662 keV) en función del voltaje aplicado. Además, la diferencia en la altura de los picos muestra que se utilizaron fuentes con distinta actividad ($A_{\text{Cs}} > A_{\text{Na}}$).

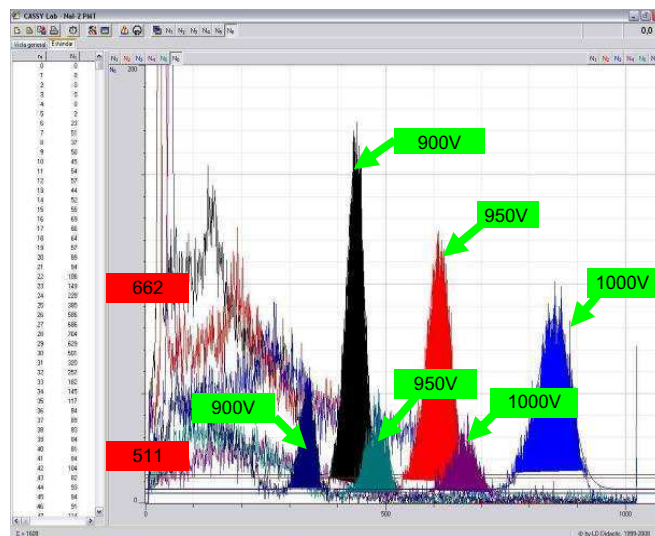


Fig. 3.14: Desplazamiento del pico de 622 y 511 keV con respecto al voltaje para una cristal de NaI(Tl).

La resolución del detector la estimamos para picos gaussianos mediante la definición que involucra la desviación estándar y el centroide¹⁰.

$$R = \frac{FWHM}{\mu_0} = \frac{2.35\sigma}{\mu_0}$$

3.3.1 Medidas con los cristales centelladores empleando los PMT

a) Medidas realizadas con el cristal de NaI(Tl)

Para los 2 cristales de NaI(Tl) se obtuvieron espectros con resolución en energía entre 7.1 y 8.5 %.



a)



b)

Fig. 3.14: Cristales de NaI(Tl). **a)** NaI(Tl)-1; **b)** NaI(Tl)-2.

PMT	Cristal Centellador	Energía (keV)	V	Pico		Resolución	
			V < 0	μ	σ	(%)	<R>
XP2020B	NaI(Tl)-1	662	900	495.1	16.0	7.6	7.5
			950	698.3	23.1	7.8	
			1000	944.9	28.9	7.2	
		511	900	391.7	13.5	8.1	8.0
			950	557.7	18.2	7.7	
			1000	748.3	26.1	8.2	
	NaI(Tl)-2	662	900	437.0	14.6	7.8	7.8
			950	610.9	19.9	7.7	
			1000	850.5	28.9	8.0	
		511	900	337.0	12.7	8.8	8.5
			950	481.7	18.6	9.1	
			1000	662.7	21.8	7.7	

Tabla 3.7: Porcentaje de Resolución para los NaI(Tl) con el PMT XP2020B.

PMT	Cristal Centellador	Energía (keV)	V	Pico		Resolución	
			V < 0	μ	σ	(%)	<R>
XP20D0	NaI(Tl)-1	662	900	494.3	15.2	7.2	7.1
			950	702	22.6	7.5	
			1000	949.5	26.8	6.6	
		511	900	371	13.5	8.6	7.8
			950	557.7	18.2	7.7	
			1000	748.3	23.1	7.2	
	NaI(Tl)-2	662	900	494.3	15.2	7.2	7.4
			950	702	22.6	7.5	
			1000	949.5	26.8	6.6	
		511	1000	860.5	29.8	8.1	8.0
			900	340	11.7	8.1	
			950	495	18.2	8.6	

Tabla 3.8: Porcentaje de Resolución para los NaI(Tl) con el PMT XP20D0.

b) Medidas realizadas con el cristal de LYSO

Para el cristal de LYSO se obtuvieron valores de resolución entre 9.0 y 12.5%.

PMT	Cristal Centellador	Energía (keV)	V	Pico		Resolución	
			V < 0	μ	σ	(%)	<R>
XP2020B	LYSO	662	900	295.2	12.3	9.8	9.5
			950	422.3	17.3	9.6	
			1000	590.3	23.1	9.2	
		511	900	228.8	10.6	10.9	9.9
			950	327.3	13.9	10.0	
			1000	457.6	17.4	9.0	

Tabla 3.9: Porcentaje de Resolución en Energía para el LYSO con el PMT XP2020B.

PMT	Cristal Centellador	Energía (keV)	V	Pico		Resolución	
			V < 0	μ	σ	(%)	<R>
XP20D0	LYSO	662	900	290.1	12.6	10.2	10.4
			950	419.8	19.9	11.1	
			1000	583.4	24.8	10.0	
		511	900	215.8	11.5	12.5	11.1
			950	328.1	15.1	10.9	
			1000	440.5	18.8	10.0	

Tabla 3.10: Porcentaje de Resolución para el LYSO con el PMT XP20D0.

c) Medidas realizadas con el cristal de $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$

Para el cristal de bromuro de lantano ($\text{LaBr}_3(\text{Ce})$), cuyo pico de emisión está en el UV únicamente se obtuvieron espectros del PMT sensible a radiación en UV (XP2020B). Los valores de resolución en energía están entre 2.8 y 3.7 %.

PMT	Cristal Centellador	Energía (keV)	V	Pico		Resolución	
			V < 0	μ	σ	(%)	<R>
XP2020B	LYSO	662	800	464.0	6.0	3.1	3.0
			850	663.7	8.8	3.1	
			900	927.7	11.0	2.8	
		511	800	359.5	5.2	3.4	3.5
			850	520.7	8.2	3.7	
			900	737.8	10.5	3.3	

Tabla 3.11: Porcentaje de Resolución para el $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ con el PMT XP2020B.

Se muestran dos espectros obtenidos con el $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$. El primero (Ver Figura 3.15) es un espectro de una fuente de ^{137}Cs a 850V. Se aprecia el pico característico a 662 keV, el pico Compton y demás efectos típicos de este emisor.

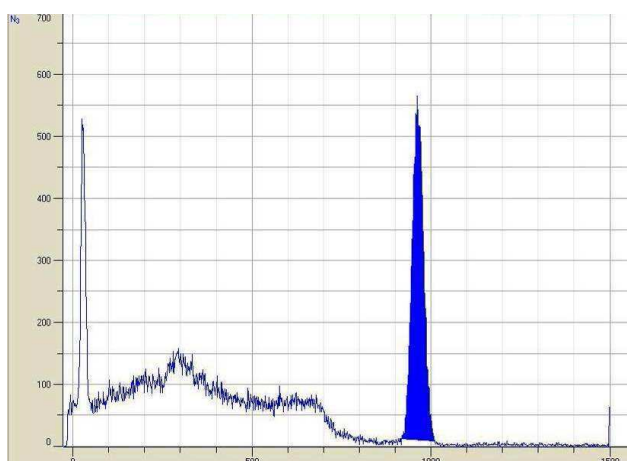


Fig. 3.15: Espectro de ^{137}Cs tomado con el $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ a 850 V con el PMT XP2020B.

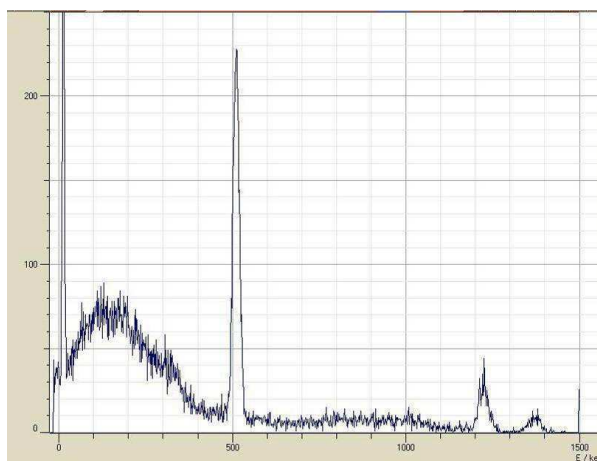


Fig. 3.16: Espectro de ^{22}Na tomado con el $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ a 850 V con el PMT XP2020B.

En la *Figura 3.16* se observa el espectro de una fuente de ^{22}Na , se identifican correctamente los fotopicos de 511 y 1274.54 keV. También se aprecia el tercer pico entorno a 1450 keV, el cual corresponde a la suma del pico de 1460.82 keV del ^{40}K (fondo natural) y el 1435.8 keV del ^{138}La .

d) Medidas realizadas con el cristal de Pr:LuAG

Para el cristal de Pr:LuAG, cuyo pico de emisión máxima está en el UV, únicamente se obtuvieron espectros del PMT sensible a radiación en UV (XP2020B). Los valores de resolución en energía están entre 5.4 y 7.8 %.

PMT	Cristal Centellador	Energía (keV)	V V < 0	Pico		Resolución	
				μ	σ	(%)	<R>
XP2020B	Pr:LuAG	662	900	361.4	8.6	5.6	5.2
			950	583.4	13.4	5.4	
			1000	793.3	16.1	4.8	
		511	900	303.4	10.1	7.8	7.0
			950	459.4	14.0	7.1	
			1000	622.9	15.7	5.9	

Tabla 3.12: Porcentaje de Resolución para el Pr:LuAG con el PMT XP2020B.

e) Medidas realizadas con el cristal de BaF₂

Para el cristal de BaF₂, cuyo pico de emisión máxima está en el UV, únicamente se obtuvieron espectros del PMT sensible a radiación en UV (XP2020B). Los valores de resolución en energía están entre y %.

PMT	Cristal Centellador	Energía (keV)	V V < 0	Pico		Resolución	
				μ	σ	(%)	<R>
XP2020B	BaF ₂	662	900	364.4	19.1	14.4	14.5
			950	409.4	21.8	14.7	
			1000	485.7	25.4	14.5	
		511	900	215.8	12.9	16.4	16.1
			950	328.1	19.7	16.5	
			1000	434.2	24.2	15.4	

Tabla 3.13: Porcentaje de Resolución para el BaF₂ con el PMT XP2020B.

f) Medidas realizadas con el cristal de CsI(Tl)

Para los 2 cristales de CsI(Tl) se obtuvieron espectros con resolución entre 8.7 y 14.7%. El cristal denotado por CsI(Tl)-1 corresponde al cristal con dimensiones 12x12x20 (Fig. 3.17.a) y el CsI(Tl) al cristal con dimensiones 9x9x20 (Figura 3.17.b)

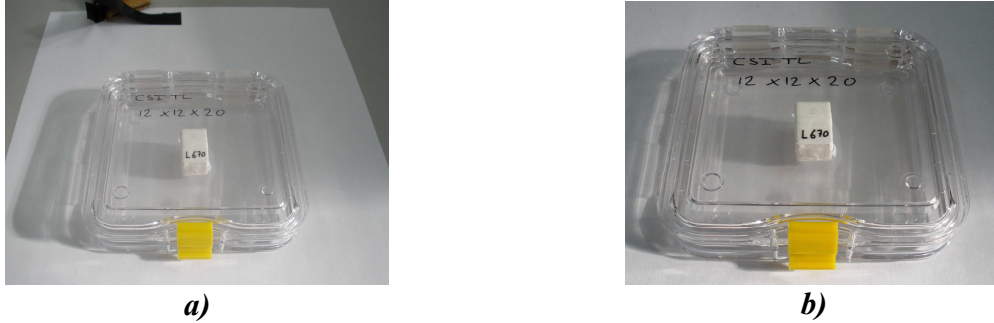


Fig. 3.17: Cristales de CsI(Tl). a) CsI(Tl)-1 con 9x9x20 mm; b) CsI(Tl)-2 con 12x12x20 mm

PMT	Cristal Centellador	Energía (keV)	V		Pico		Resolución	
			V < 0		μ	σ	(%)	<R>
XP2020B	CsI(Tl)-1	662	900	279.9	12.2	10.2	9.5	
			950	368.7	15.1	9.7		
			1000	457.9	16.9	8.7		
		511	900	279.4	11.5	9.7		10.2
			950	328.1	15.1	10.9		
			1000	440.5	18.8	10.0		
	CsI(Tl)-2	662	900	283.4	11.7	9.7	9.8	
			950	369.8	15.9	10.1		
			1000	460.5	19.1	9.7		
		511	900	268.9	13.9	12.1	10.9	
			950	375.8	16.3	10.2		
			1000	460.5	20.2	10.3		

Tabla 3.14: Porcentaje de Resolución para los cristales de CsI(Tl) con el PMT XP2020B.

PMT	Cristal Centellador	Energía (keV)	V		Pico		Resolución	
			V < 0		μ	σ	(%)	<R>
XP20D0	CsI(Tl)-1	662	900	300.1	12.6	9.9	9.8	
			950	383.7	15.7	9.6		
			1000	477.6	20.3	10.0		
		511	900	268.9	16.9	14.7	13.0	
			950	375.8	20.3	12.7		
			1000	460.5	22.9	11.7		
	CsI(Tl)-2	662	900	295.4	11.4	9.1	9.7	
			950	355.7	15.9	10.5		
			1000	465.8	18.6	9.4		
		511	900	265.4	14.6	12.9	12.2	
			950	368.9	19.3	12.3		
			1000	458.4	22.5	11.5		

Tabla 3.15: Porcentaje de Resolución para los cristales de CsI(Tl) con el PMT XP2020B.

g) Medidas realizadas con el cristal de GSO.

Para el cristal de GSO se obtuvieron resoluciones entre 12.5 y 19.7%.

PMT	Cristal Centellador	Energía (keV)	V	Pico		Resolución	
			V < 0	μ	σ	(%)	<R>
XP2020B	GSO	662	900	288.7	17.8	14.5	13.1
			950	354.7	19.8	13.1	
			1000	445.9	22.2	11.7	
		511	900	235.8	19.7	19.7	18.0
			950	303.4	23.5	18.2	
			1000	396.4	27.1	16.1	

Tabla 3.16: Porcentaje de Resolución en Energía para el LYSO con el PMT XP2020B.

PMT	Cristal Centellador	Energía (keV)	V	Pico		Resolución	
			V < 0	μ	σ	(%)	<R>
XP20D0	GSO	662	900	295.8	16.8	13.3	12.9
			950	365.7	20.3	13.0	
			1000	445.3	23.7	12.5	
		511	900	250.9	20.5	19.2	17.8
			950	310.9	24.1	18.2	
			1000	405.6	27.7	16.0	

Tabla 3.17: Porcentaje de Resolución para el LYSO con el PMT XP20D0.

h) Medidas realizadas con el cristal de BGO

Para el cristal de BGO se obtuvieron resoluciones entre 16.1 y 20.3%.

PMT	Cristal Centellador	Energía (keV)	V	Pico		Resolución	
			V < 0	μ	σ	(%)	<R>
XP2020B	BGO	662	900	285.9	22.5	18.5	17.3
			950	356.4	25.4	16.7	
			1000	448.9	31.7	16.6	
		511	900	241.5	22.8	22.2	20.0
			950	305.9	25.0	19.2	
			1000	397.9	31.4	18.5	

Tabla 3.18: Porcentaje de Resolución en Energía para el LYSO con el PMT XP2020B.

PMT	Cristal Centellador	Energía (keV)	V	Pico		Resolución	
			V < 0	μ	σ	(%)	<R>
XP20D0	BGO	662	900	275.9	23.7	20.2	17.9
			950	350.3	26.0	17.4	
			1000	454.3	31.1	16.1	
		511	900	238.5	21.4	21.0	20.2
			950	295.7	25.5	20.3	
			1000	375.9	30.7	19.2	

Tabla 3.19: Porcentaje de Resolución para el LYSO con el PMT XP20D0.

i) Medidas realizadas con el cristal de LFS.

Para los 2 cristales de LFS se obtuvieron espectros con resolución entre 12.2 y 17.9%. Los cristales utilizados se puede ver en la *Figura 3.18*.



Fig. 3.18: Cristales de LFS. A la izquierda se aprecia el LFS-7, y la derecha el LFS-3.

PMT	Cristal Centellador	Energía (keV)	V V < 0	Pico		Resolución	
				μ	σ	(%)	<R>
XP2020B	LFS-3	662	900	285.9	18.6	15.3	14.1
			950	353.7	21.0	14.0	
			1000	456.4	25.3	13.0	
		511	900	238.7	17.4	17.1	15.9
			950	305.6	20.2	15.5	
			1000	371.5	23.7	15.0	
	LFS-7	662	900	280.5	19.1	16.0	14.3
			950	360.1	22.7	14.8	
			1000	460.9	23.9	12.2	
		511	900	240.8	17.0	16.6	16.1
			950	295.7	20.5	16.3	
			1000	365.9	24.2	15.5	

Tabla 3.20: Porcentaje de Resolución para los cristales de CsI(Tl) con el PMT XP2020B.

PMT	Cristal Centellador	Energía (keV)	V V < 0	Pico		Resolución	
				μ	σ	(%)	<R>
XP20D0	LFS-3	662	900	283.4	19.3	16.0	15.0
			950	345.6	22.5	15.3	
			1000	455.9	26.7	13.8	
		511	900	233.9	16.5	16.6	16.3
			950	299.7	20.9	16.4	
			1000	374.8	25.4	15.9	
	LFS-7	662	900	285.4	20.3	16.7	15.4
			950	349.8	23.5	15.8	
			1000	459.8	26.6	13.6	
		511	900	235.7	17.4	17.4	16.8
			950	300.1	22.8	17.9	
			1000	380.4	24.4	15.1	

Tabla 3.21: Porcentaje de Resolución para los cristales de CsI(Tl) con el PMT XP2020B.

j) Medidas realizadas con el cristal de MLS

Las medidas se realizaron con 3 matrices de 4x4 de cristales de MLS. Para cada matriz se obtuvieron fotopicos con resoluciones entre: 17.1 y 25.5%.

PMT	Cristal Centellador	Energía (keV)	V V < 0	Pico		Resolución	
				μ	σ	(%)	<R>
XP2020B	MLS-1	662	900	279.4	25.0	21.0	20.3
			950	340.9	30.0	20.7	
			1000	455.9	37.0	19.1	
		511	900	229.7	22.0	22.6	21.7
			950	297.4	27.1	21.5	
			1000	374.3	33.5	21.1	
	MLS-2	662	900	283.9	24.5	20.3	19.0
			950	346.1	29.1	19.8	
			1000	456.9	33.1	17.0	
		511	900	233.4	21.6	21.8	21.0
			950	299.3	26.0	20.4	
			1000	374.8	33.1	20.8	
	MLS-3	622	900	285.9	21.6	17.8	17.5
			950	346.6	26.5	17.9	
			1000	452.3	32.3	16.8	
		511	900	231.9	21.6	21.9	21.1
			950	297.4	26.0	20.5	
			1000	371.9	33.1	20.9	

Tabla 3.22: Porcentaje de Resolución para matrices de MLS con el PMT XP2020B.

PMT	Cristal Centellador	Energía (keV)	V V < 0	Pico		Resolución	
				μ	σ	(%)	<R>
XP20D0	MLS-1	662	900	278.6	25.4	21.4	19.9
			950	341.3	30.3	20.9	
			1000	456.7	33.9	17.4	
		511	900	230.9	25.4	25.9	23.4
			950	294.8	27.8	22.2	
			1000	376.8	35.2	22.0	
	MLS-2	662	900	285.4	23.9	19.7	18.9
			950	345.1	29.1	19.8	
			1000	455.7	33.1	17.1	
		511	900	233.4	24.4	24.6	22.6
			950	297.4	28.4	22.5	
			1000	374.8	32.9	20.7	
	MLS-3	622	900	284.1	25.3	20.9	19.8
			950	343.3	29.2	20.0	
			1000	449.9	35.4	18.5	
		511	900	233.3	25.4	25.5	24.0
			950	298.7	29.5	23.2	
			1000	368.4	36.3	23.1	

Tabla 3.23: Porcentaje de Resolución para matrices de MLS con el PMT XP20D0.

3.3.2 Resumen de Resultados y Conclusiones

En la *Tabla 3.24* se presenta un resumen de las resoluciones obtenidas por los cristales centelladores según el PMT.

Cristal Centellador	Energía (keV)	Resolución (%)		
		Literatura	XP2020B	XP20D0
NaI(Tl) - 1	511	7	8	7.9
	661.66	5.6	7.5	7.1
NaI(Tl) - 2	511	7	8.5	8
	661.66	5.6	7	7.4
CsI(Tl)-1	511	10	12	12.1
	661.66	8.7	9.5	9.8
CsI(Tl)-2	511	10	13	12.8
	661.66	8.7	9.8	9.7
LaBr ₃ (Ce)	511	3.6	3.5	*
	661.66	3.2	3	*
Pr:LuAG	511	6.7	7	*
	661.66	5	5.2	*
BaF ₂	511	15.5	16.1	*
	661.66	13.7	14.6	*
GSO	511	12	18	17.8
	661.66	10	13.1	12.9
LYSO	511	20	9.9	11.1
	661.66	10	9.5	10.9
BGO	511	16	21	20.2
	661.66	12	17.3	17.9
LFS-7	511	12	16.1	16.8
	661.66	10	14.3	15.4
LFS-3	511	12	15.9	16.3
	661.66	10	14.1	15
MLS-1	511	20	21	23.4
	661.66	16	20.3	19.9
MLS-2	511	20	21	22.6
	661.66	16	19	18.9
MLS-3	511	20	21.1	25.1
	661.66	16	17.5	19.8

Tabla 3.24: Tabla Resumen de Resolución por cristal centellador y PMT.

Observaciones

- Tres cristales centelladores (*LaBr₃:Ce*, *Pr:LuAG*, *BaF₂*) no pudieron medirse con el **XP20D0** porque su pico de emisión está en el UV, y este PMT no tiene sensibilidad a ese rango de energía.
- El LFS-3 tiene un 5% mejor resolución que el LFS-7.
- Las resoluciones hechas con matrices de cristales (MLS) presentan peor resolución que las registradas por cristales continuos.
- El PMT XP2020B presenta 4% (de media) resolución que el XP20D0.
- El LYSO presenta una resolución mejor (50%) que la reportada en la literatura.

- El $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ tiene la mejor resolución (*3.5% en 511 keV y 3% en 661.66 keV*) de toda la muestra, incluso comparado con el valor de la literatura (hasta un 6.3% mejor).
- El promedio del error, tomando como verdaderos los valores reportados en la literatura, es de un 20.9% para el XP2020B y un 22.5% para el XP20D0.
- La resolución a 661.66 keV es 20% mejor (en promedio) que en 511 keV.

Bibliografía Capítulo 3

¹ Knoll, Glen. *Radiation Detection and Measurement*. 2da Edición. New York: John Wiley & Sons, 1989. Pág. 253.

² Pinto, María. *Evaluación de semiconductores como detectores de radiación para PET. Detectores CZT*. Master en Física Biomédica (UCM). Junio 2009. Pág. 39.

³ Photonis. *Photomultiplier XP2020Q*. (2007) Pág. 1. Y Photomultiplier. XP20D0. (2008) Pág. 1.

⁴ Ahmed, Syed. *Physics & Engineering of Radiation Detection*. London: Elsevier, 2007. Pág. 375.

⁵ Ahmed. Op. Cit. Pág. 387.

⁶ Photonis. Op. Cit. Pág. 1 y Pág. 2. Respectivamente.

⁷ Iseg. *NHO x0xx Precision NIM High Voltage Supply NHO STANDARD series*. (2002) Pág. 2

⁸ LD Didactic. *MCA Box (524 058). Data Sheet*. Y Pocket-Cassy (524 006).

⁹ Vladimirov et al. *Characteristics of BaF2 Scintillation Crystals*. Atomic Energy: Vol 90, # 1, 2001. Pág. 55.

¹⁰ Knoll. Op. Cit. Pág. 117.

4. Caracterización de los SiPM

Se caracterizarán MPPC (*Multi-Pixel Photon Counter*) que son arreglos de SiPM. Se estudiará el montaje y el procesamiento de la señal. Finalmente, se presentan los resultados de la resolución en energía de los cristales centelladores de la muestra.

4.1. Instrumentación

Los MPPC (*Multi-Pixel Photon Counter*) son un tipo de SiPM (*Silicon PhotoMultiplier*). Es un dispositivo para el conteo de fotones constituido por pixeles APD (*Avalanche PhotoDiode*) operando en modo Geiger¹. En nuestro caso utilizaremos un grupo de SiPM patentados y comercializados por Hamamatsu. (*Ver Tabla 4.1*)

Categoría	Tipo	Cantidad	Imagen
Área activa (1x1 mm ²)	Metálico	1	
	Cerámico	2	
	SMD	3	
MPPC Array	2x2 canales	2	

Tabla 4.1: Tipos de MPPC utilizados en el experimento.

Las características más destacables de estos dispositivos son las siguientes²:

- Excelente eficiencia de detección frente al número de fotones incidentes.
- Operan a temperatura ambiente.
- Operan a voltajes pequeños (<100V)
- Alta ganancia (10^5 - 10^6)
- Son insensibles a los campos magnéticos.
- Tienen una excelente resolución temporal (200-300 ps)
- Tienen un tamaño pequeño en comparación con los fotomultiplicadores convencionales.
- El circuito de adquisición de datos es muy sencillo.

Procedemos a describir cada parte del dispositivo:

4.1.1 APD

Los APD son fotodiodos de alta velocidad y sensibilidad que internamente amplifican la corriente cuando un voltaje inverso es aplicado. En particular los APD de Hamamatsu presentan una alta eficiencia de detección para fotones³.

En la *Figura 4.1* se muestra el esquema de operación de un APD en modo Geiger o avalancha. Un fotón incidente transmite su energía a un electrón en la banda de valencia, este absorbe la

energía y pasa a la banda de conducción. Luego, dirigido por el campo eléctrico externo, este fotoelectrón genera a su paso una cascada de pares ión-hueco⁴.

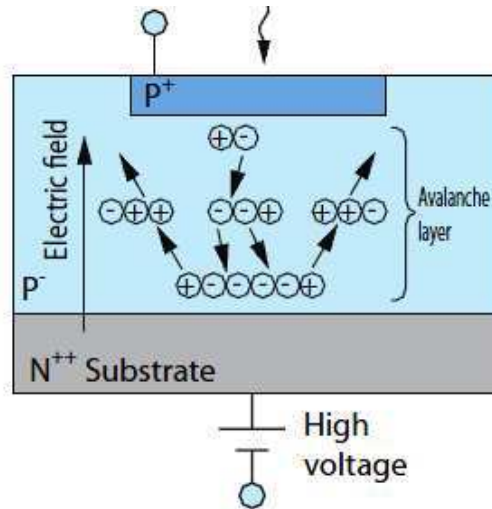


Fig. 4.1: Esquema de funcionamiento de un APD.

4.1.2 Píxeles APD en modo Geiger

El modo Geiger consiste en operar el APD a un voltaje inverso (V_R) superior al voltaje de corte (V_{BR} : breakdown voltage). (Ver Figura 4.3) En esta modalidad el APD crea una descarga cada vez que llega luz al píxel (Input). Este fenómeno es llamado “descarga Geiger”.

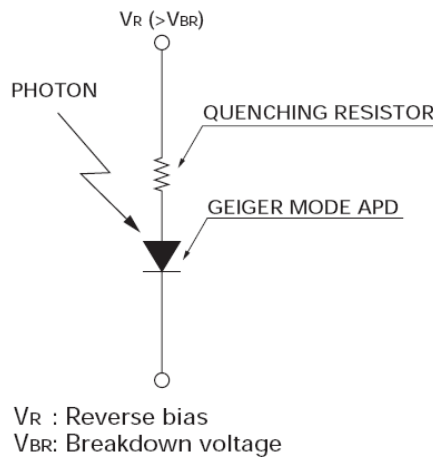


Fig. 4.2: Circuito para el píxel APD en modo Geiger.

Al operar el APD en modo Geiger la ganancia puede ser tan grande como 10^5 o 10^6 , en contra de la ganancia obtenida con alimentación normal que llega a algunos cientos. Sin embargo, la salida de estos píxeles se desea que sea constante. Por tal motivo se usa una resistencia de extinción (quenching)⁵. (Ver Figura 4.3)

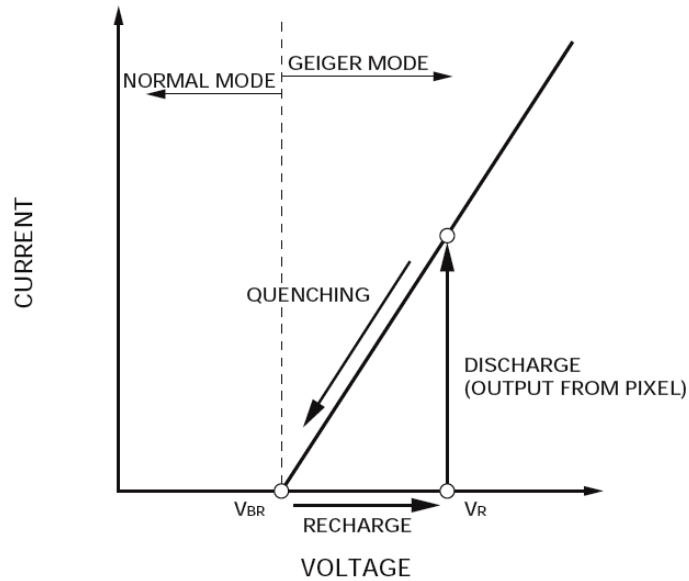


Fig. 4.3: Operación de un APD en modo Geiger.

La resistencia de extinción (quenching) reduce el voltaje inverso (V_R) al de corte (V_{BR}) para detener la descarga Geiger. De este modo se configura un circuito cuya salida es siempre un pulso de nivel constante⁶.

Cuando un fotón incide sobre un píxel APD operando en modo Geiger, el pulso de salida desde el píxel es constante sin importar el número de fotones. Esto quiere decir que el APD solamente da información sobre la interacción o no de uno o más fotones.

4.1.3 MPPC

Un MPPC está compuesto de píxeles APD conectados en paralelo y operando en modo Geiger. Cuando un fotón incide en un APD en modo Geiger genera una avalancha. Esta descarga es conducida a través de la resistencia de extinción, la cual está conectada, junto con otras resistencias, a un único canal de lectura⁷. (Ver Figura 4.4)

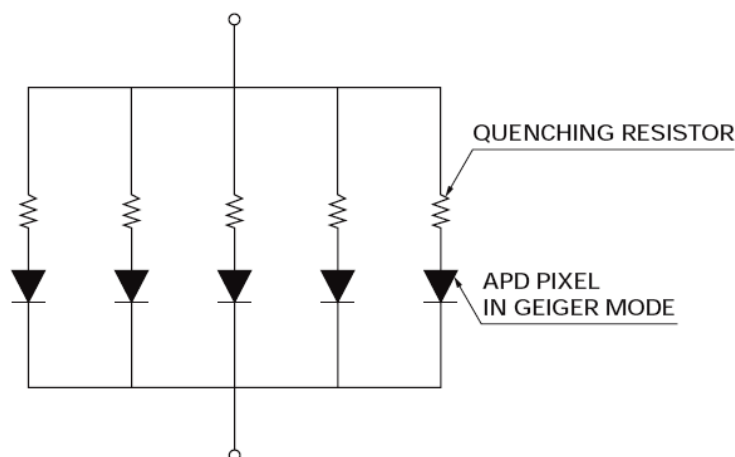


Fig. 4.4: Arreglo de varios APD en paralelo con un único canal de salida. Representación de un MPPC.

En la Figura 4.4 se aprecia que todos los pulsos creados en los píxeles salen a través de un mismo canal de lectura, lo que implica que la señal de salida es una superposición de los

pulsos. Este hecho permite estimar el número de fotones detectados por el MPPC simplemente midiendo la altura o la carga eléctrica de este pulso de salida⁸.

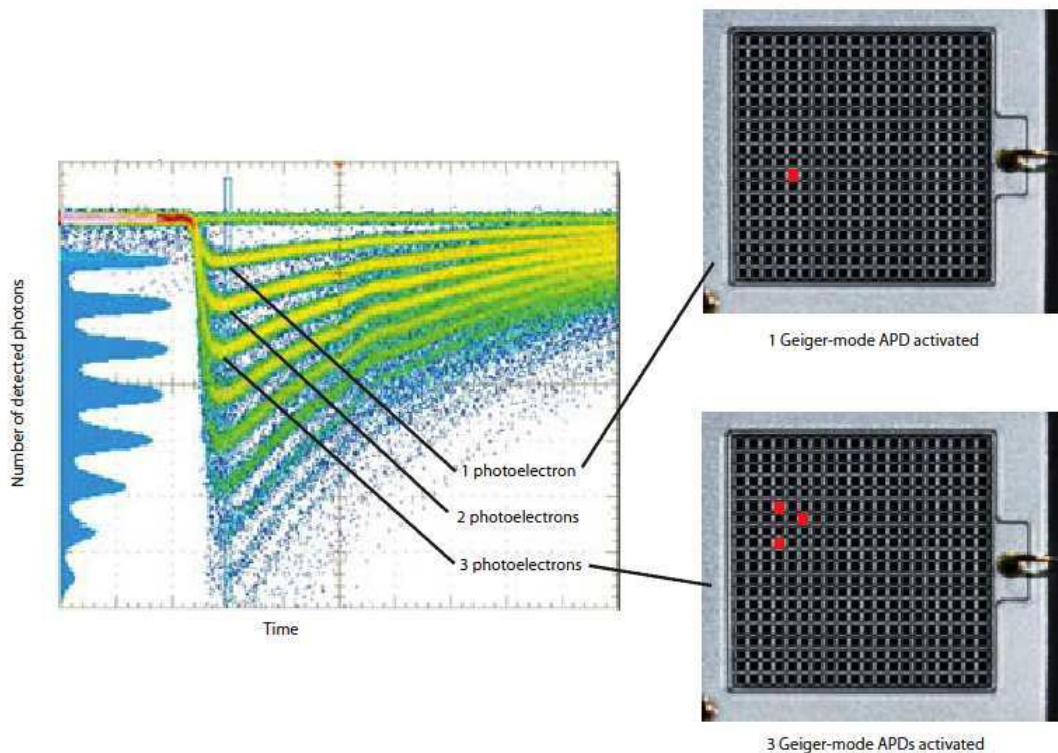


Fig. 4.5: Pulsos de los canales de lectura en el osciloscopio cuando interacciona 1, 2 o 3 fotones en el MPPC.

En la *Figura 4.5* tenemos dos MPPC de 20x20 píxeles APD operando en modo Geiger. Se muestra la forma de onda de la señal de salida. Los píxeles en rojo representan la descarga del cuando un fotón incidente es detectado. En el caso superior tenemos un único APD activado por la detección de un fotón, lo que genera una onda de un fotoelectrón. En el caso inferior tenemos tres APD activados, lo que genera una onda de 3 fotoelectrones⁹.

4.1.4 Montaje de un MPPC

El montaje típico de un MPPC debe tomar en consideración dos factores:

- Suministrar el Voltaje Inverso (V_R) para instaurar el modo geiger en los APD, y
- Extraer la señal de todos los canales de lectura que tenga el MPPC.

Tomemos el caso del modelo **MPPC-33-2X2-50 5900** de Hamamatsu. (*Ver Tabla 4.1*) Este dispositivo tiene 2x2 canales, lo que implica que tiene 4 señales diferentes de lectura. También quiere decir que la superficie activa está dividida en 4 regiones de detección. (*Ver Figura 4.6*)

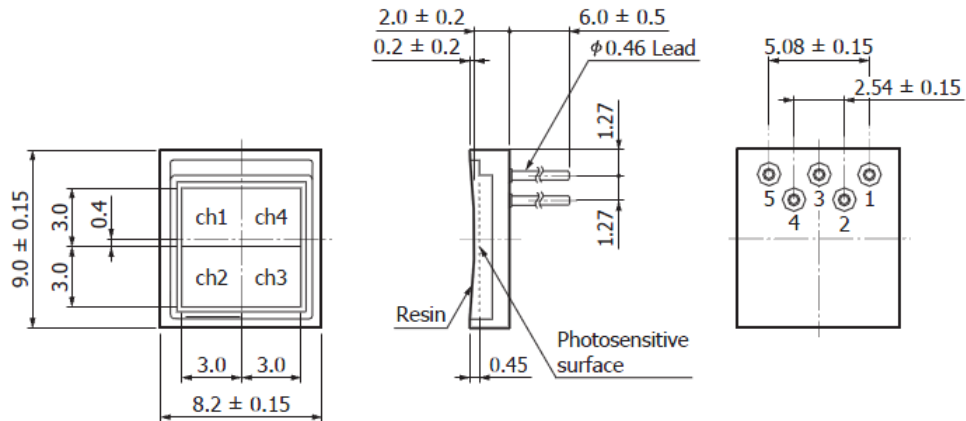


Fig. 4.6: Esquema del MPPC-33-2X2-50 5900

En la *Figura 4.6* vemos que un MPPC de 4 canales (2x2) tiene 5 pines en su parte posterior. El pin # 1 corresponde al ánodo del canal 1, el pin # 2 del se asocia al ánodo del canal 2, el pin # 3 es el cátodo (común), el pin # 4 y 5 se asocian a los canales 3 y 4.

Cada canal del MPPC debe estar conectado tal como se muestra en la *Figura 4.7*. Básicamente es la misma conexión para un APD tal como se comentó en la sección anterior. Sin embargo, la señal de salida, la tierra y un amplificador¹⁰. Para obtener todas las señales de los canales habría que repetir el montaje para cada pin-canal.

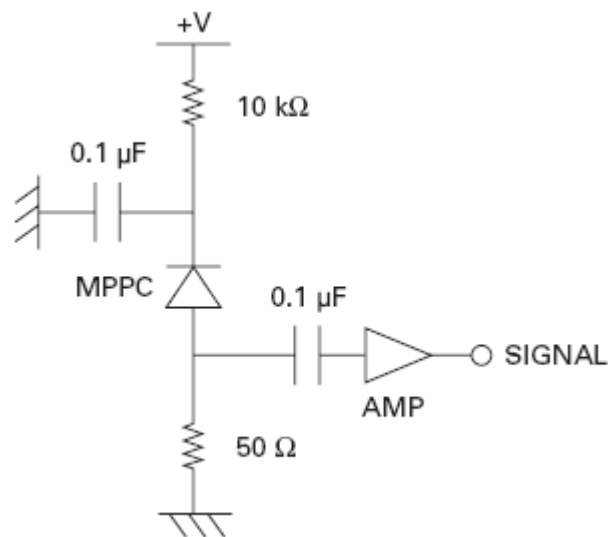


Fig. 4.7: Diagrama para conectar un canal del MPPC.

En nuestro caso particular, el circuito utilizado se presenta en la *Figura 4.8*. Se observa que el diagrama es el mismo para cada señal, salvo que todas las señales comparten la tierra. Y que tiene una resistencia y un potenciómetro adicional para la protección contra las descargas o retroalimentación (“feedbacks”).

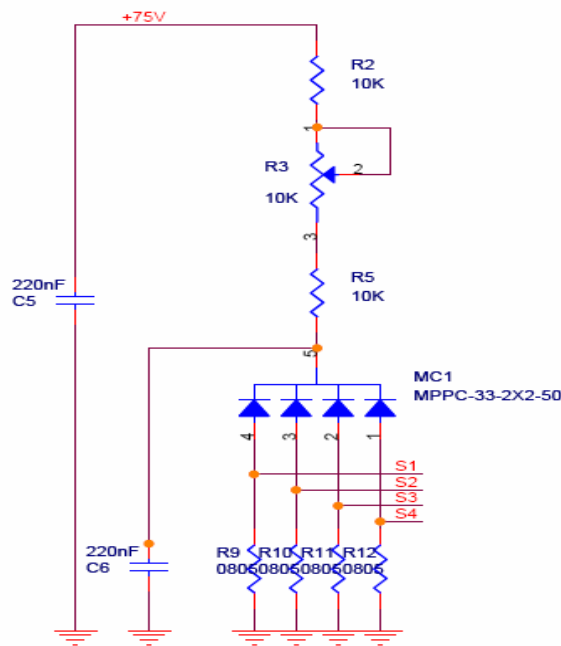


Fig. 4.8: Circuito para el montaje de los MPPC.

Posteriormente, la señal debe ser preamplificada (amplificada y conformada). Para eso se utiliza una configuración de doble preamplificador. (Ver Figura 4.9) Adicionalmente se aprecia que los preamplificadores requieren una alimentación de +5 y -5 V.

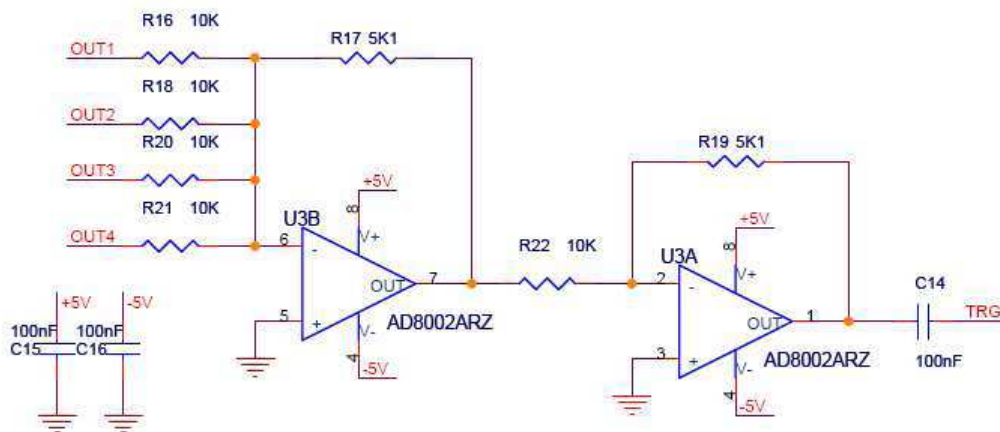


Fig. 4.9: Preamplificador del MPPC.

Con esta arquitectura se presentan dos problemas prácticos a la hora de realizar la medición:

- Se aplica el mismo voltaje de operación a todas las celdas.
- No es posible corregir por efecto de la temperatura la ganancia del SiPM.

Sobre el primer punto se debe señalar que el fabricante acostumbra suministrar información detallada sobre el voltaje de operación (V_{OP}) adecuado y la ganancia esperada a una

temperatura de referencia. (Ver Tabla 4.2). Este efecto sólo podrá corregirse al momento de procesar la señal digitalmente.

Type No.	Serial No.	Chanel	Vop (V)	Gain	0.5 p.e. dark (Mcps)	1.5 p.e. dark (Mcps)
MPPC-33-2x2-50 5900	2	1	68.57	7.50e5	4.59	0.76
		2	68.54	7.50e5	4.62	0.75
		3	68.53	7.47e5	4.16	0.94
		4	68.50	7.47e5	4.18	1.02
At 25 °C						

Tabla 4.2: Especificaciones para el MPPC-33-2x2-50 5900.

El efecto de la temperatura en la ganancia debe corregirse analíticamente durante el procesamiento digital de la señal, ya que no se tiene ningún elemento que corrija por temperatura.

La ganancia de los MPPC es dependiente de la temperatura¹¹. Cuando la temperatura aumenta, las vibraciones en el cristal se vuelven mayores. Esto dificulta el libre tránsito de los portadores de carga en la capa de conducción, lo que implica una reducción de la ganancia. Dicho en otras palabras, si la temperatura aumenta, mientras el voltaje inverso (V_R) se mantiene constante, entonces la ganancia decrece. (Ver Figura 4.10)

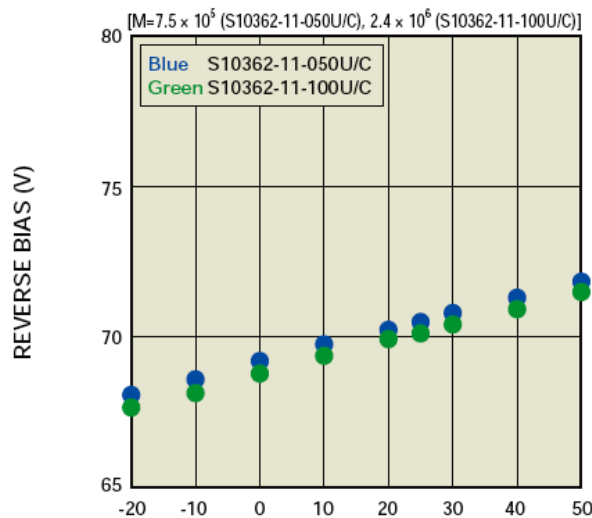


Fig. 4.10: Voltaje Inverso (V_R) en función de la temperatura a una ganancia constante para un MPPC con APD en modo Geiger.

4.1.5 Módulos para los MPPC

Hasta ese momento se ha dicho que cada píxel APD del MPPC emite una señal pulsada cuando detecta un fotón. Por lo cual a los MPPC se les considera dispositivos de conteo de fotones. Sin embargo, requieren estar unidos a algún dispositivo o módulo que brinde la correcta alimentación y procesamiento de la señal.

Para tal fin se han construido dos tipos de módulos. (Ver Tabla 4.3)

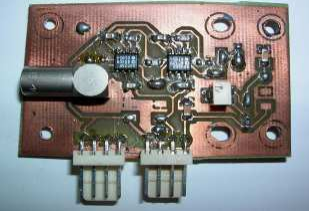
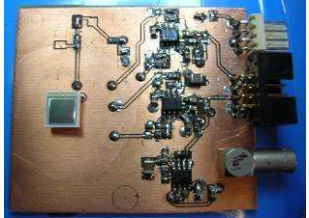
SiPM	Tipo	Módulo
Individual	Metálico	
	Cerámico	
	SMD	
Matriz	2x2 canales	

Tabla 4.3: Módulos para los MPPC.

En la *Tabla 4.3* se clasifican los SiPM en *individuales* y *matriciales*. Cuando hay una única celda o canal de salida se dice que es individual. Cuando se tiene más celdas o canales de salidas (en nuestro caso sólo hay 2x2) entonces se dice que es un SiPM matricial.

La *señal de salida* de estos dispositivos es de dos tipos: *por celda* o *en modo suma*. Con el primero se obtiene información de una celda en particular, mientras que el otro se muestra como la integración de todas las señales creadas en la superficie de la matriz. Ambas pueden ser llevadas a un osciloscopio o a un MCA.

En la *Figura 4.11* tenemos el montaje de un MPPC de 2x2. A la derecha de la imagen se aprecian 3 tipos de puertos. El superior (*blanco*) corresponde a la alimentación (V_R y V_{Pream}); en medio (*negro*) corresponde a las 4 salidas de los canales de la matriz (esta señal puede ser llevada al osciloscopio o directamente al MCA); y en la parte inferior (*plateado*) es la salida del canal suma, es decir la suma de los pulsos de las 4 celdas.

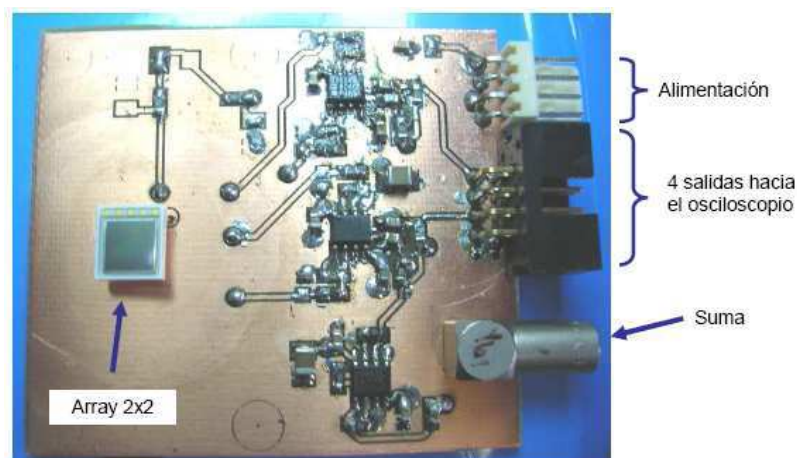


Fig. 4.11: Puertos de un módulo para MPPC.

4.1.6 Eficiencia Óptica

Por definición los APD son dispositivos sensibles a la luz. Sin embargo, no a todo el rango de luz. Presentan un pico de eficiencia en el rango de luz visible. Por ejemplo el **MPPC-33-2x2-50 5900** tiene su pico entorno a los 450 nm. (Ver *Figura 4.12*) En nuestro caso ningún SiPM

tiene capacidad para detectar fotones en el rango del ultravioleta (UV), lo cual excluye las medidas con varios centelladores de la muestra.

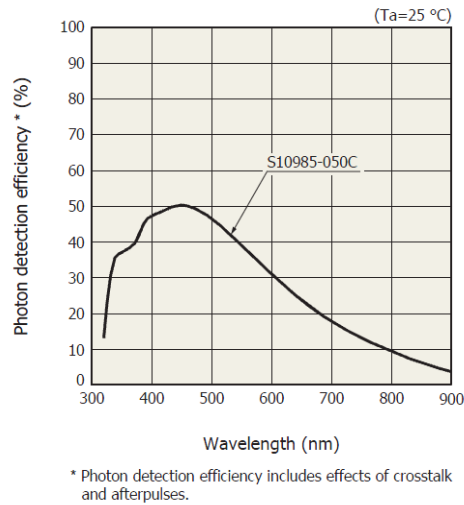


Fig. 4.12: Eficiencia de detección para fotones en función de la longitud de onda para el MPPC.

4.2 Preliminares de la medición con los cristales centelladores

4.2.1 Acoplamiento del cristal con el MPPC

El cristal centellador debe estar tan cerca como sea posible del SiPM. Se recomienda no ponerlos en contacto directo porque se podrían rayar. Por tal motivo se coloca una grasa óptica de silicio para acoplar física y ópticamente el sistema¹². (Ver Figura 4.13)

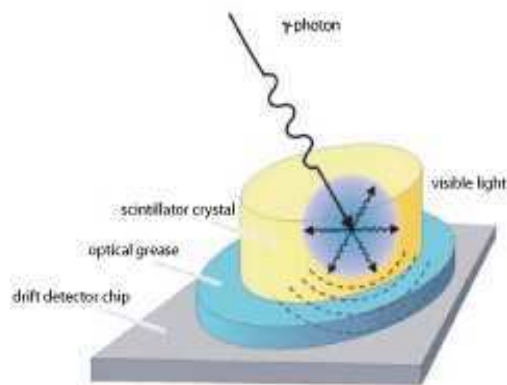


Fig.4.13: Uso de la grasa óptica para el posicionamiento del centellador en contacto con el SiPM.

El ajuste óptico se da a través de un material maleable que tenga un índice de refracción similar al del cristal o el PMT. La grasa óptica de silicio es la más popular para acoplar cristales centelladores inorgánicos¹³.

4.2.2 Blindaje de la luz exterior

Dado que los SiPM son dispositivos sensibles a la luz visible, todas las mediciones deberán realizarse en espacios lo más oscuros posibles. Para tal fin se han diseñado diversas cajas oscuras para limitar el acceso luminoso del exterior. En la *Figura 4.14* tenemos un bloque de delrinⁱ no sólo para blindar de la luz, sino para posicionar el cristal centellador en el SiPM.

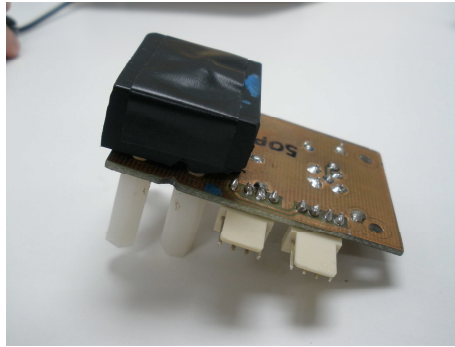


Fig.4.14: Caja Oscura diseñada para los experimentos..

Además, se utiliza teflón y cinta oscura como material reflectante. Este minimiza las pérdidas de señal y evita el ingreso de fotones luminosos desde el exterior. Permitiendo que únicamente los provenientes del cristal centellador lleguen a los APD¹⁴.

4.2.3 Posicionamiento

El cristal centellador, luego de aplicarle grasa óptica, se coloca sobre el SiPM. Acto seguido se introduce el blindaje contra la luz. Finalmente, se coloca la fuente de ^{137}Cs o ^{22}Na a 1 cm sobre la cobertura del cristal. (Ver *Figura 4.15*)

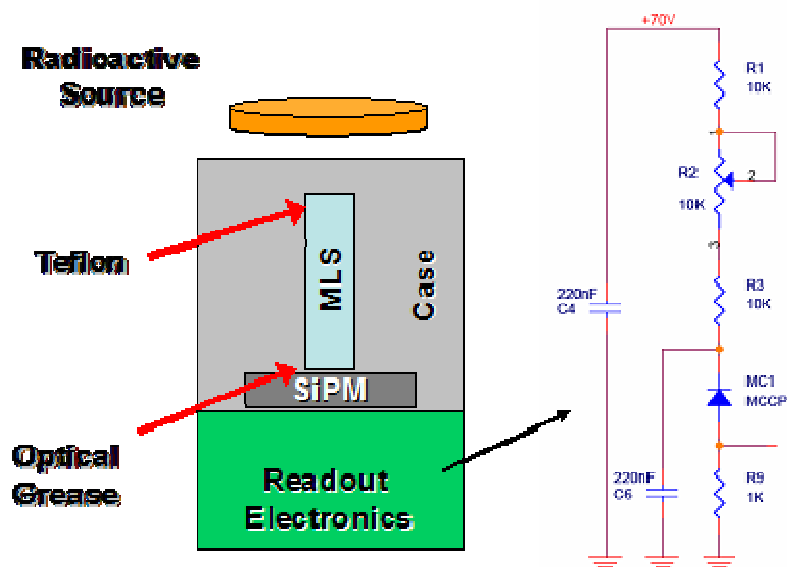


Fig.4.15: Posicionamiento del sistema SiPM+cristal+fuelle.

ⁱ El delrin es el nombre comercial de la marca DuPont para referirse a un material termoplástico de poliacetal.

4.3 Medición de la resolución de los cristales centelladores de la muestra

En primer lugar, para fijar el voltaje óptimo para realizar las mediciones se comparó el número de cuentas por segundo que llegaban al MCA en función del voltaje que se le aplicaba al MPPC a 25°C. Para la prueba se usó un cristal de LYSO y una fuente de ^{137}Cs de 5 μCi .

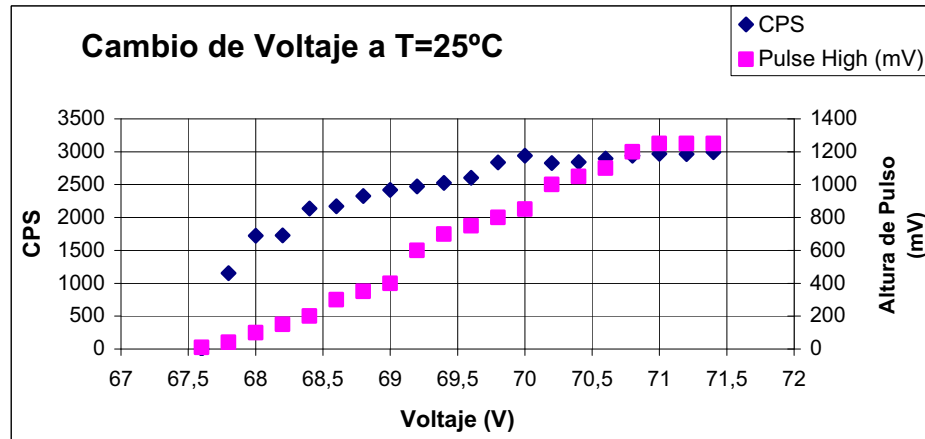


Fig. 4.16: CPS en función del voltaje

En la *Figura 4.16* se observa que por debajo de 67.5 V no hay pulsos, y sobre los 71.5 V se tiene el SiPM funcionando en modo descarga continua. Por tal motivo se opta por trabajar con 69.5 V a 25°C.

En la misma figura se observa la altura de los pulsos (escalas al eje de la derecha). Vemos que al pasar los 71.5 V la amplitud no crece más, por lo que se ha llegado al límite de saturación, antes de la descarga continua.

4.3.1 Espectros para la muestra de cristales “grandesⁱⁱ”

Estos espectros se han obtenido de la señal SUMA de los módulos para el MPPC. No se han realizado correcciones de ganancia por canal. (*Ver Tabla 4.4*)

ⁱⁱ Grande o pequeño se refiere a que si la cara frontal del cristal es mayor o menor a la superficie activa del MPPC. De ser mayor se dice que es un cristal grande, si la cara es menor se le dice pequeño. Únicamente el cristal de LYSO tiene una cara que casi se ajusta al área activa, sin embargo es un poco más grande.

Cristal	E (keV)	σ	μ	R(%)
LYSO	662	6.8	160.5	10.0
	511	6.4	127.3	11.8
LaBr ₃ :Ce	662	6.4	154.5	9.7
	511	6.2	126.8	11.5
NaI(Tl) - 1	662	12.5	145.8	20.1
	511	9.9	114.6	20.3
NaI(Tl) - 2	662	10.9	118.6	21.6
	511	9.5	102.4	21.8
CsI(Tl) (12*12*20)	662	7.8	131.3	14.0
	511	5.6	76.8	17.1
CsI(Tl) (9*9*20)	662	10.1	173.7	13.7
	511	8.4	139.1	14.2
MLS (matriz 4x4 cristales)	662	12.6	160.5	18.4
	511	11.2	141.2	18.6

Tabla 4.4: Resolución en energía para cristales “grandes” en módulos MPPC.

El elevado porcentaje de resolución se debe en parte a que estos cristales centelladores “grandes” tienen una superficie mayor que el área activa del SiPM de modo que puede haber pérdidas a través del material reflector. Por otra parte, la salida SUMA aumenta ya que no se corrige o ajusta el voltaje aplicado a cada celda del MPPC.

Se presenta un espectro de ¹³⁷Cs obtenido con el cristal de LYSO a 69.6V y 25°C.

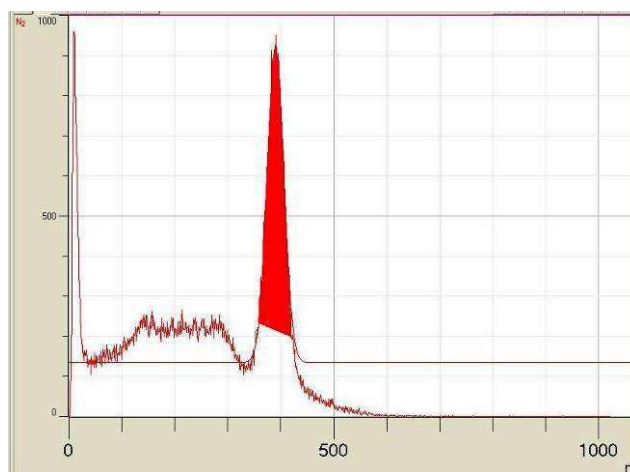


Fig. 4.17: Espectro ¹³⁷Cs con un cristal de LYSO a 69.6V y 25 °C.

4.3.2 Resolución para la muestra de cristales “pequeños”

Se tomaron espectros con los cristales “pequeños” (MLS y LFS) en el montaje para SiPM individuales SMD (*SI0362-11-050U*) a 25°C.

Cristal	E (keV)	μ	σ	R(%)
LFS-3	662	75.1	6.8	18.1
	511	51	7.1	27.8
LFS-7	662	73	6.5	17.8
	511	49.8	7.2	28.9
MLS	662	76.1	4.4	11.6
	511	62.6	4.9	15.7

Tabla 4.5: Resolución en energía para cristales “pequeños” en módulos SMD.

4.3.3 Corrección de la Señal Suma para los cristales “grandes”

La señal *Suma* de los cristales toma las señales de todos los canales y la superpone. Sin embargo, al estar estos con ganancias diferentes (dado que requieren diferentes voltajes, pero se les aplica el mismo) entonces su picos pueden aparecer desplazados, aumentando así la resolución del fotopico “suma”. (Ver Figura 4.18)

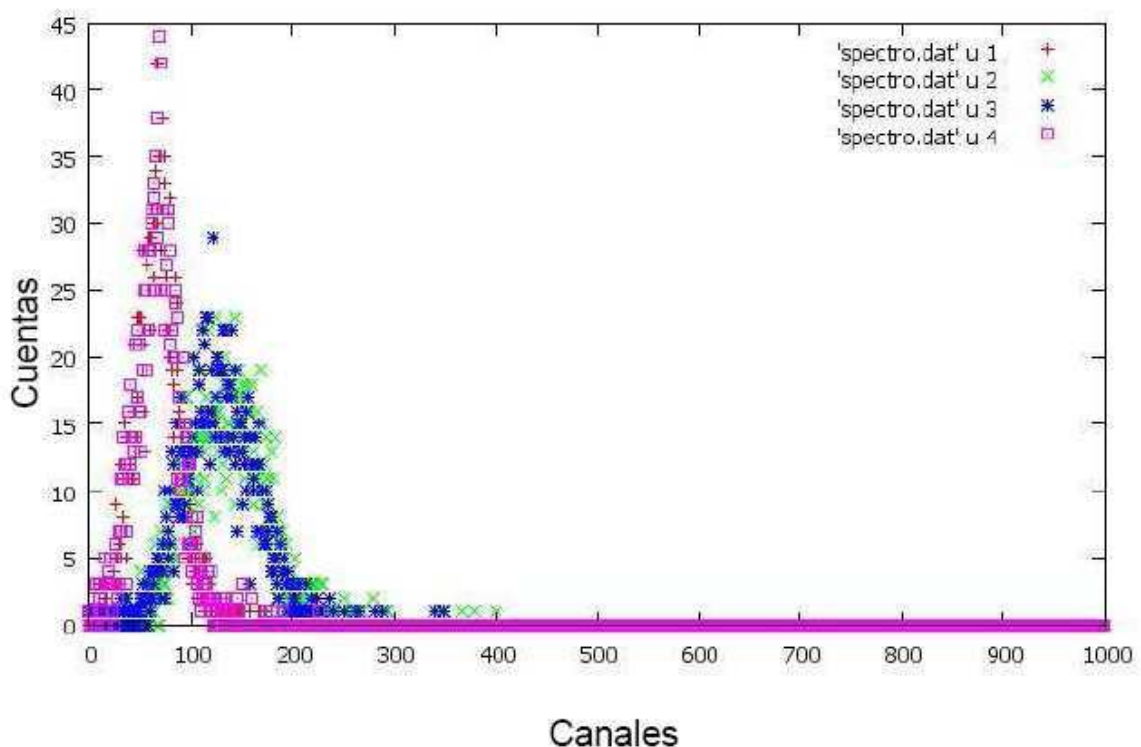


Fig. 4.17: Histograma de las cuatro señales provenientes del SiPM matricial.

En la Figura 4.17 vemos 4 histogramas correspondientes a la señal proveniente de cada celda. Se observa cómo los canales 4 y 1 tienen mejor resolución, mientras que los canales 2 y 3 tienen mayor ganancia.

Por esta razón se estudia la salida de cada canal por separado a través de un osciloscopio (AGILENT) el cual permite digitalizar la señal para luego llevarla al ordenador. La información de cada canal es almacenada en ficheros.

Con un programa escrito en Python (Anexo 1) se puede procesar la información de los ficheros para:

- a) Mejorar la resolución espectral ajustando la ganancia de cada canal de modo que los centroides coincidan. Luego reconstruir la señal suma.
- b) Estimar la posición de interacción de los fotones estimados (*Ver Figura 4.18*)

Se deben optimizar los métodos de corrección por temperatura y ganancia selectiva para los canales, a raíz de lo cual se espera una mejora de la resolución a niveles similares a los obtenidos por los cristales con el PMT.

En la *Figura 4.18* se muestra la imagen de llenado de campo de la matriz de 4x4 (16 cristales) de MLS. Se aprecian 16 regiones densamente pobladas de puntos correspondientes a los 16 cristales MLS. La separación entre las dos primeras filas es menor que la de las dos segundas filas, este hecho puede deberse a dos causas: la primera es que la matriz no esté correctamente posicionado o que haya una capa mayor de grasa óptica en la segunda lo que dispersa más los fotones. La segunda razón es que la fuente no esté correctamente posicionada, haciendo que una zona reciba más fotones que otro (el campo de irradiación no es homogéneo).

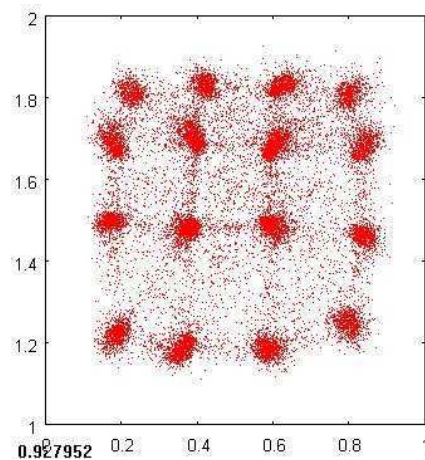


Fig. 4.18: Llenado de campo de la matriz 4x4 de cristales MLS.

Nosotros nos vamos a concentrar en los resultados de resolución en energía, para eso hemos corregido por temperatura y por ganancia para cada canal. De esta forma obtenemos para los cristales “grandes” la siguiente tabla comparativa. (*Ver Tabla 4.6*)

Centellador	Energía (keV)	Resolución (%)	
		Suma	Ganancia corregida
LYSO	662	10.0	9.5
	511	11.8	10.7
LaBr ₃ :Ce	662	9.7	9.5
	511	11.5	10.9
NaI(Tl) - 1	662	20.1	19.2
	511	20.3	19.4
NaI(Tl) - 2	662	21.6	19.8
	511	21.8	20.3
CsI(Tl) (12*12*20)	662	14.0	13.5
	511	17.1	15.9
CsI(Tl) (9*9*20)	662	13.7	12.1
	511	14.2	12.9
MLS (4x4 cristales)	662	18.4	16.9
	511	18.6	17.8

Tabla 4.6: Resolución en energía para cristales “grandes” en módulos MPPC.

Bibliografía del Capítulo 4

- ¹ Hamamatsu. *MPPC: Multi-Pixel Photon Counter*. Abril 2010. Pág. 1
- ² Idem. Pág. 2
- ³ Hamamatsu. Op. Cit. Pág. 6.
- ⁴ Hamamatsu. Op. Cit. Pág. 2
- ⁵ Hamamatsu. Op. Cit. Julio 2007. Pág. 7
- ⁶ Hamamatsu. Op. Cit. Enero 2008. Pág. 11
- ⁷ Idem. Pág. 3.
- ⁸ Ibid.
- ⁹ Hamamatsu. Op. Cit. Abril 2010. Pág. 23.
- ¹⁰ Idem. Pág. 17.
- ¹¹ Hamamatsu. Op. Cit. Julio 2007. Pág. 9.
- ¹² Leo, W.R. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments. A How-to Approach*. Pág. 193-194.
- ¹³ Idem.
- ¹⁴ Idem.

5. Resultados

Se presentan los resultados de concentración de actividad interna obtenidos con el HPGe. También las resoluciones obtenidas con los PMT y los MPPC. Finalmente, se dan las conclusiones de cada sección.

5.1 Muestra: Cristales centelladores

Para el estudio se utilizan centelladores haluros tipo cristal inorgánico.

Tipo	Estructura	Cantidad
Alcalinos	LaBr ₃ (Ce)	1
	NaI(Tl)	2
	CsI(Tl)	2
	KI(Tl)	1
	Pr:LuAg	4
No Alcalinos	BaF ₂	1
	GSO	1
	LYSO	1
	BGO	1
	LFS	5
	MLS	64

Tabla 5.1: Muestra de cristales centelladores

5.2 Determinación de la Actividad Interna

5.2.1 Calibración en Energía

Para la determinación de la actividad interna se utilizó un sistema de espectrometría gamma de bajo nivel (HPGe). (Ver Capítulo 2)



Fig. 5.1: Castillo de Pb y HPGe.

La **Calibración en Energía** se realizó con una fuente patrón de ¹⁵²Eu. Se ajustaron las ganancias en un Amplificador (CANBERRA 2022). Las curvas de ajuste son:

- Para G = 30: $E(keV) = 0.1734 * canal + 17.86$.
- Para G = 100: $E(keV) = 0.05526 * canal + 5.858$.

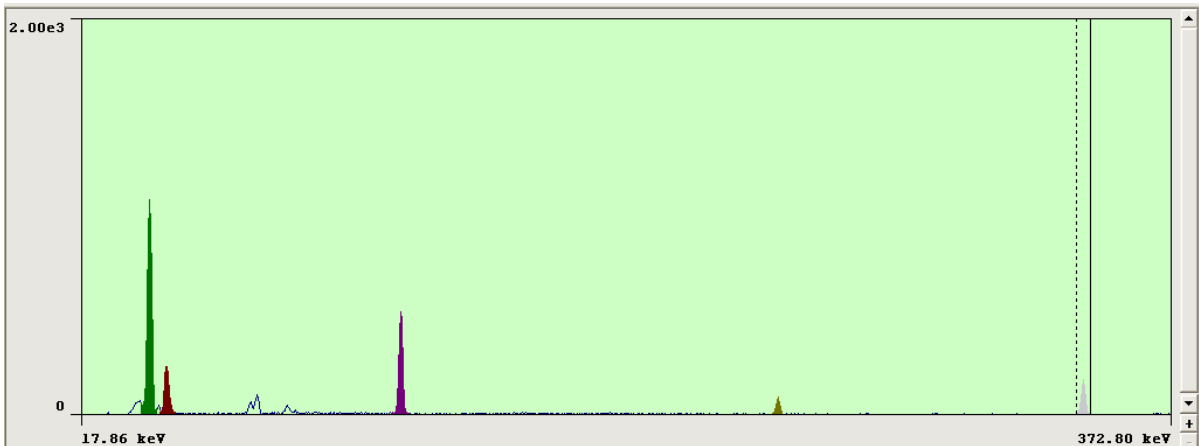


Fig. 5.2: Espectro de la fuente de ^{152}Eu con una ganancia de 30.

En la *Figura 5.2* se observan algunos de los principales fotopicos de una fuente de ^{152}Eu . La ganancia era de 30. Tenemos en la captura de pantalla de la ventana de 17.86 a 372.80 keV. En la *Tabla 5.2* tenemos el ajuste en energía aplicado a los fotopicos característicos para esa ganancia.

	Picos		Centroide	Error
	(keV)	Intensidad (%)	(keV)	(%)
Eu-152	39.91	58.9	39.89	0.05
	45.59	13.47	45.59	0.01
	121.78	28.67	121.80	0.02
	244.7	7.61	244.72	0.01
	344.28	26.6	344.26	0.01

Tabla 5.2: Ajuste con fuente de ^{152}Eu .

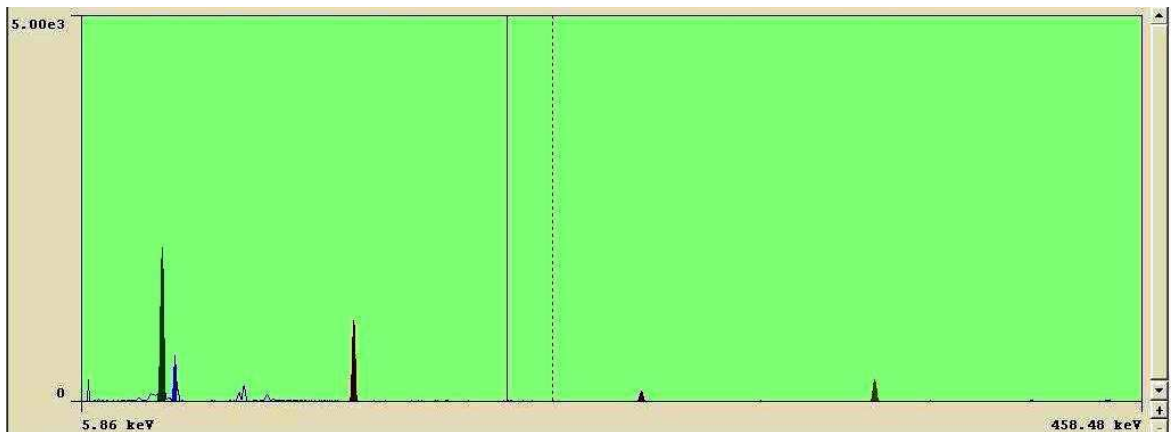


Fig. 5.3: Espectro de la fuente de ^{152}Eu con una ganancia de 100.

En la *Figura 5.3* se observan algunos de los principales fotopicos de una fuente de ^{152}Eu . La ganancia era de 100. Tenemos en la captura de pantalla de la ventana de 17.86 a 372.80 keV. En la *Tabla 5.3* tenemos el ajuste en energía aplicado a los fotopicos característicos para esa ganancia.

	Picos		Centroide	Error
	(keV)	Intensidad (%)	(keV)	(%)
Eu-152	39.91	58.9	40.01	0.25
	45.59	13.47	45.46	0.29
	121.78	28.67	121.82	0.03
	244.7	7.61	244.71	0.01
	344.28	26.6	344.27	0.01

Tabla 5.3: Ajuste con fuente de ^{152}Eu .

5.2.2 Radiación de Fondo

Se capturan dos espectros para caracterizar la radiación de fondo durante 2000 segundos manteniendo el HPGe dentro del castillo de Pb. El primero se tomó para una ganancia de 30 (Ver Figura 5.4) y el segundo para 100 (Ver Figura 5.5).

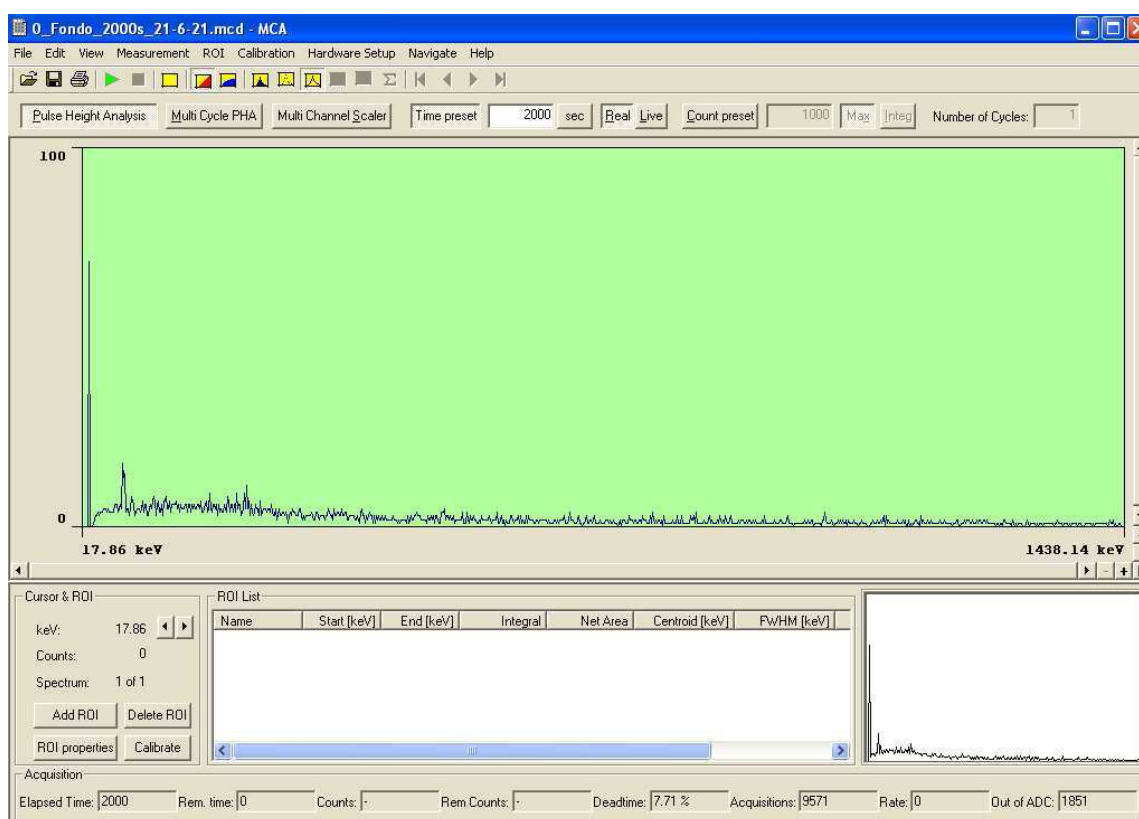


Fig. 5.4: Radiación de Fondo durante 2000s para una ganancia de 30.

En la Figura 5.4 observamos una ventana de energía de 17.86 a 1438.14 keV, usando la calibración en energía para ganancia 30. Este ajuste está bien para fotopicos superiores a 30 keV.

En la Figura 5.5 observamos una ventana de energía de 5.06 a 450.40 keV, usando la calibración en energía para ganancia 100. Recordamos que por la ventana de Carbono del HPGe las mediciones tienen eficiencia asociada a partir de 8 keV. Además, la calibración a esta ganancia puede tomarse como lineal con los puntos dentro de la curva de ajuste del ^{152}Eu . En otras palabras, se puede utilizar adecuadamente para fotopicos sobre 30 keV.

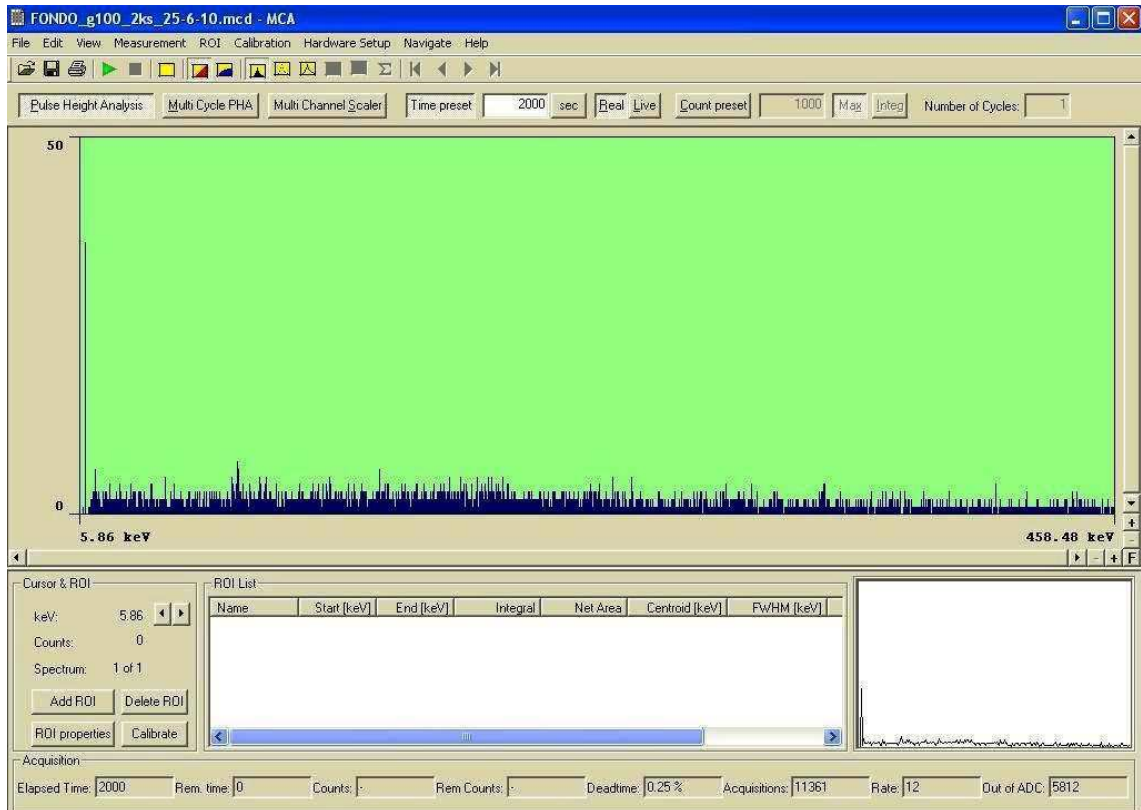


Fig. 5.5: Radiación de Fondo durante 2000s para una ganancia de 100.

5.2.3 Posicionamiento de los cristales

Para optimizar la medida de los cristales centelladores se colocó la muestra justo al frente del detector de HPGe a 1 cm (justo delante del filtro/protector plástico). Sin embargo, dadas las diferencias geométricas entre los cristales, se decide habilitar un dispositivo que soporte cada cristal y que no introduzca ruido en la medición.

En función de si la cara superficial es igual o superior al área activa del MPPC se define el cristal centellador como *grande*. En caso de ser inferior se define como *pequeño*. Como excepción, una matriz o arreglo de varios cristales de MLS en conjunto poseen un volumen *grande*, es decir superior al área del MPPC.

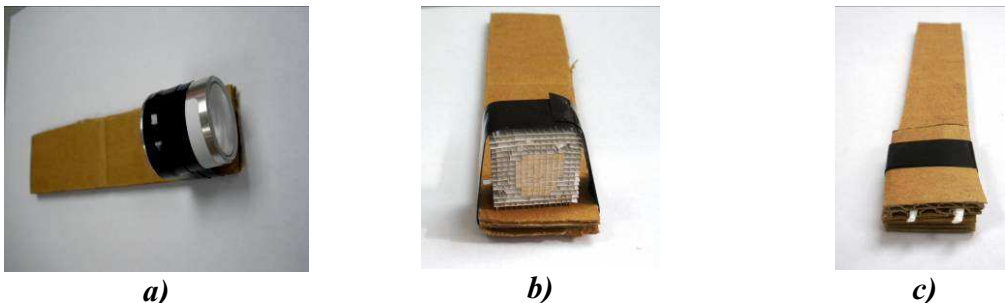


Fig. 5.6: Posicionamiento de los cristales. **a)** Para cristales grandes; **b)** Para matrices de cristales (en este caso MLS); **c)** Cristales pequeños.

En general la categorización tomada fue: $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, $\text{NaI}(\text{Tl})$, $\text{CsI}(\text{Tl})$, $\text{KI}(\text{Tl})$, BaF_2 , GSO, LYSO, BGO, y las matrices de MLS y Pr:LuAG forman el conjunto de los **Grandes**. Mientras que los cristales individuales de LFS y MLS conforman los **Pequeños**.

5.3 Espectros de Actividad Interna de los cristales centelladores

Se tomaron dos espectros por cristal, uno con ganancia 30 y el otro de 100. El intervalo de medición fue 2000 s. Cada espectro fue corregido restando el fondo natural.

5.3.1 NaI(Tl)

Se tienen dos cristales cilíndricos de $\text{NaI}(\text{Tl})$ de 1" x 1". (Ver Figura 5.7)

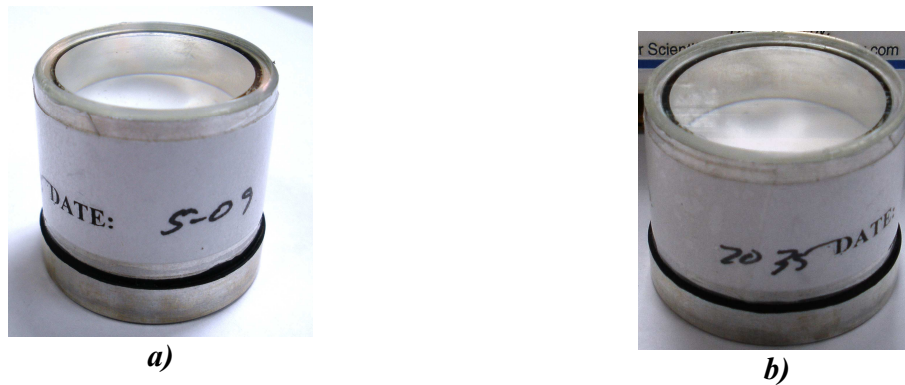


Fig. 5.7: Cristales de NaI(Tl). a) Cristal de 1" x 1"; b) cristal de 1" x 1.5"

Para cada uno se tomó un espectro gamma durante 2000 segundos a ganancia 30 y 100.

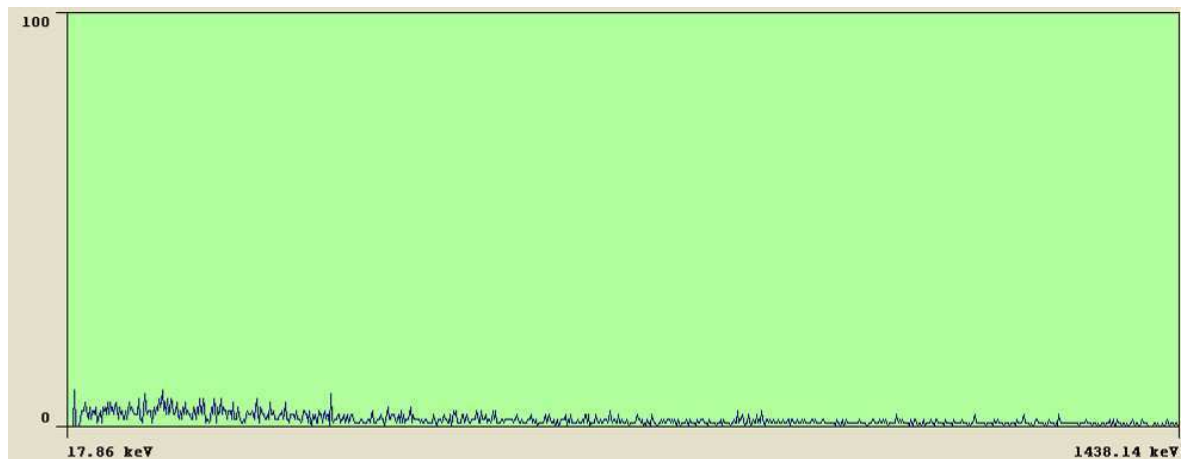


Fig. 5.8: Espectro gamma de la Actividad Interna del primer NaI(Tl) de 1" x 1" con G=30.

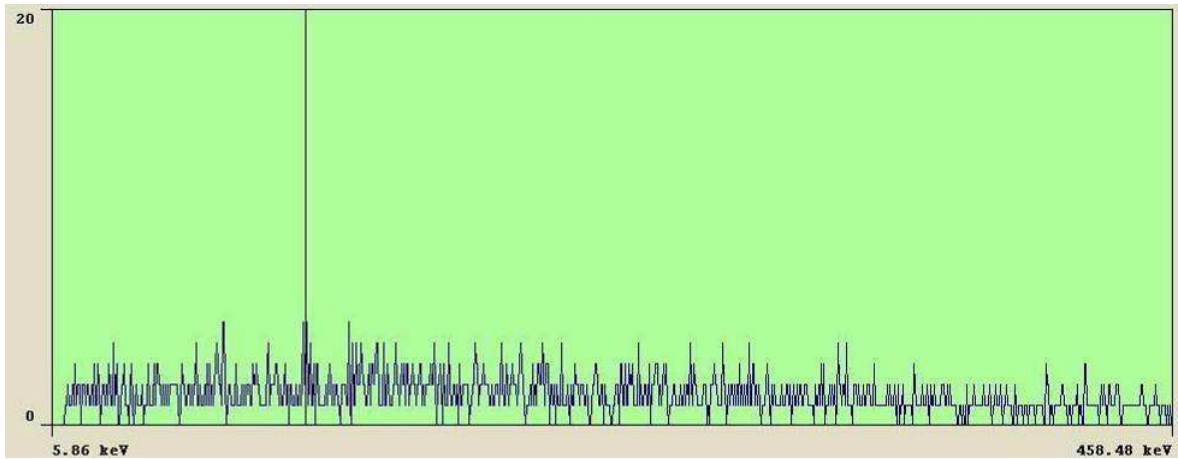


Fig. 5.9: Espectro gamma de la Actividad Interna del primer NaI(Tl) de 1" x 1" con G=100.

En las Figuras 5.8 y 5.9 tenemos el espectro gamma de la actividad interna del primer cristal de NaI(Tl) de 1" x 1". No se identificaron especies que contribuyeran al espectro gamma.

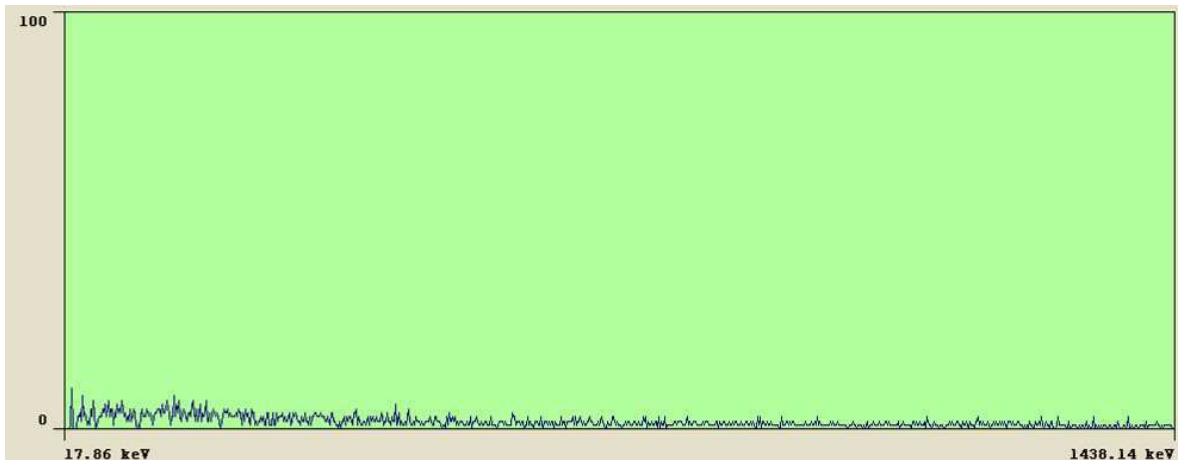


Fig. 5.10: Espectro gamma de la Actividad Interna del segundo NaI(Tl) de 1" x 1" con G=30.

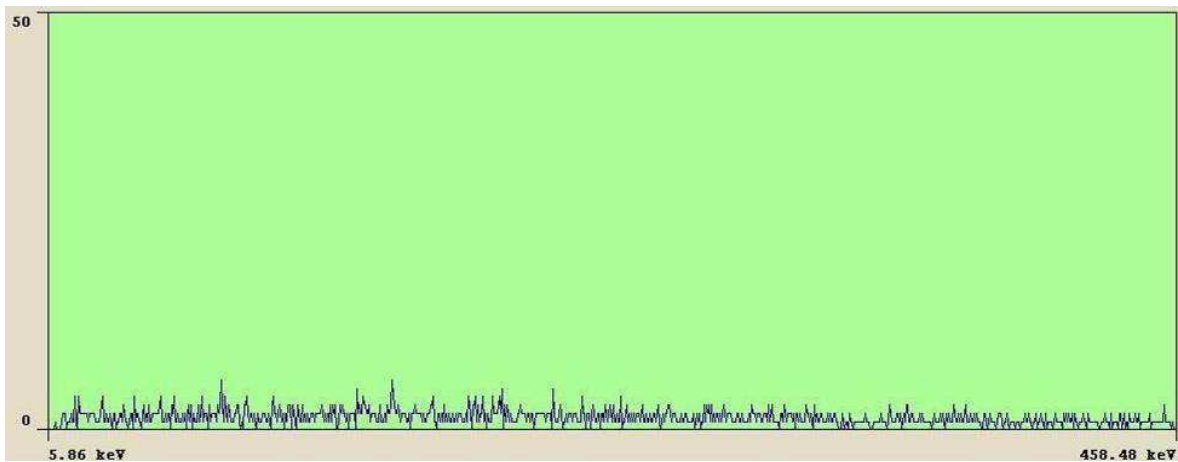
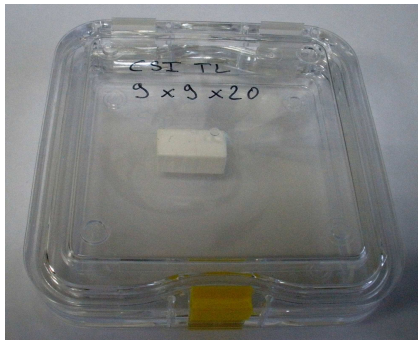


Fig. 5.11: Espectro gamma de la Actividad Interna del segundo NaI(Tl) de 1" x 1" con G=100.

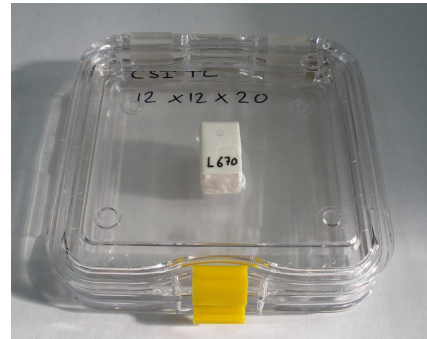
En las Figuras 5.10 y 5.11 tenemos el espectro gamma de la actividad interna del segundo cristal de NaI(Tl) de 1" x 1". No se identificaron especies que contribuyeran al espectro gamma.

5.3.2 CsI(Tl)

Se tienen 2 cristales paralelepípedos de CsI(Tl) de 20 mm de alto: uno de cara frontal 9 x 9 mm y el otro de 12 x 12 mm. (Ver Figura 5.12)



a)



b)

Fig. 5.12: Cristales de CsI(Tl): **a)** cristal de 9 x 9 x 20 mm; **b)** 12 x 12 x 20 mm

Para cada uno se tomó un espectro gamma durante 2000 segundos a ganancia 30 y 100.

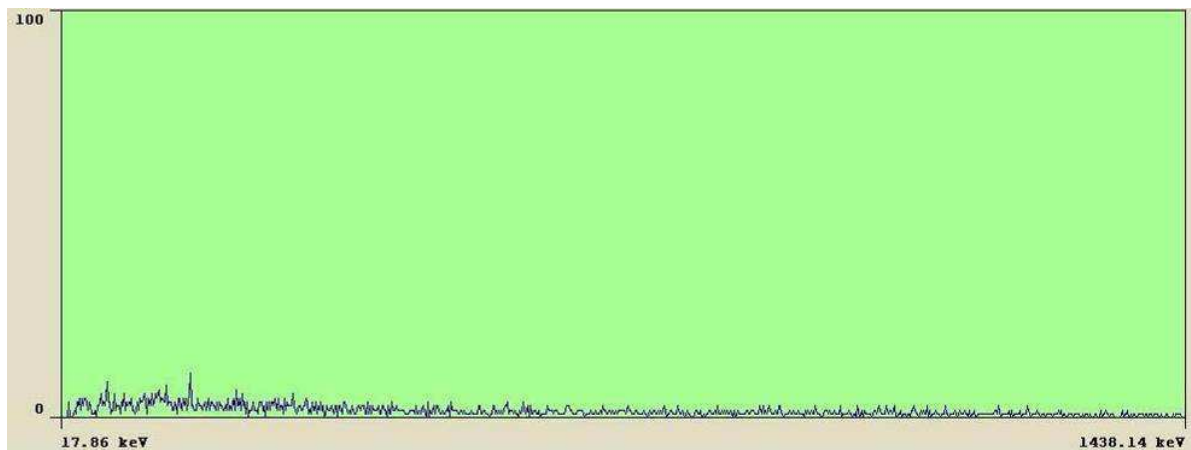


Fig. 5.13: Espectro gamma de la Actividad Interna del CsI(Tl) de 9x9x20mm con G=30.

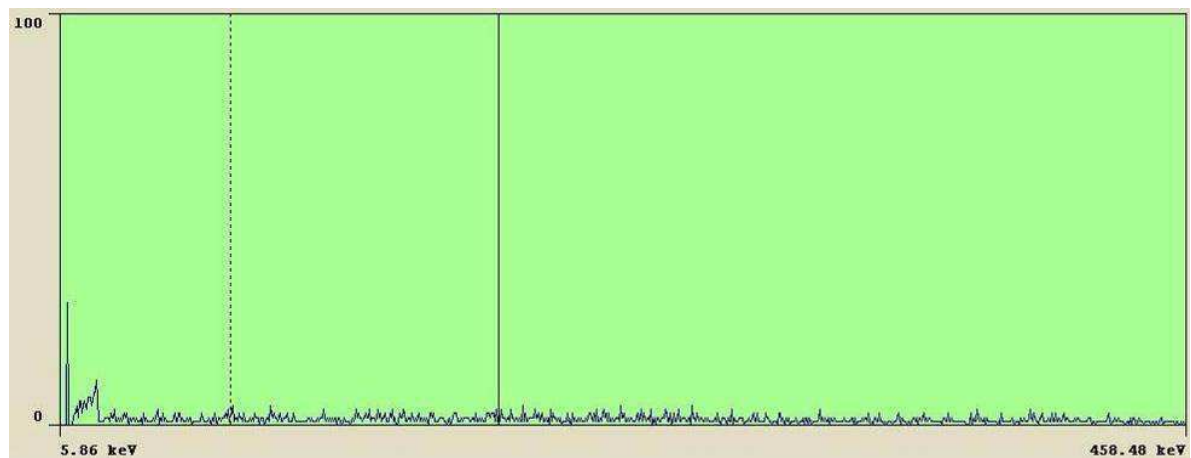
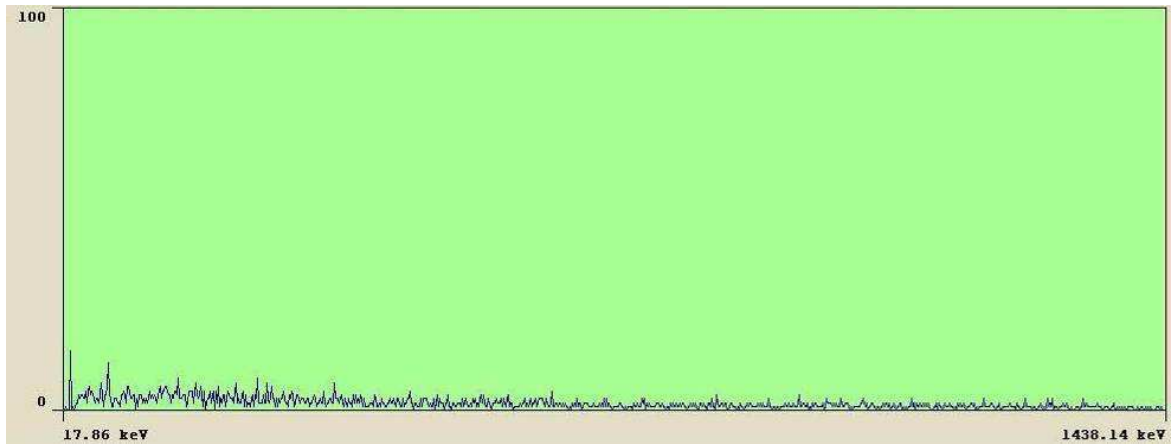
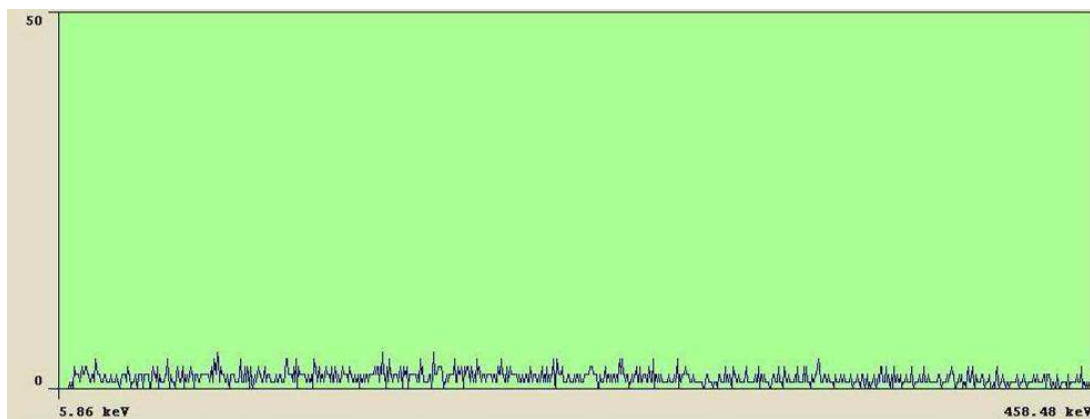


Fig. 5.14: Espectro gamma de la Actividad Interna del CsI(Tl) de 9x9x20mm con G=100.

En las Figuras 5.13 y 5.14 tenemos el espectro gamma de la actividad interna del cristal de CsI(Tl) de 9x9x20 mm. No se identificaron especies que contribuyeran al espectro gamma.



5.15: Espectro gamma de la Actividad Interna del CsI(Tl) de 12x12x20mm con G=30.



5.16: Espectro gamma de la Actividad Interna del CsI(Tl) de 12x12x20mm con G=100.

En las Figuras 5.15 y 5.16 tenemos el espectro gamma de la actividad interna del cristal de CsI(Tl) de 12x12x20 mm. No se identificaron especies que contribuyeran al espectro gamma.

5.3.3 Centelladores a base de Lutecio

Todos los siguientes cristales centelladores tienen en su constitución al Lutecio, el cual tiene sí tiene contribución gamma. Por eso dedicamos un apartado a su estudio.

La abundancia natural de los isótopos más estables del Lutecio es:

Isótopo	Abundancia	Vida Media
^{175}Lu	97.41%	Estable con 104 neutrones.
^{176}Lu	2.59%	$T_{1/2}$: 3.78×10^{10} años (β^-)

Tabla 5.4: Abundancia natural del Lutecio.

Las transiciones del ^{176}Lu de mayor contribución las resumimos en el siguiente cuadro:

<p>Por cada 100 desintegraciones de ^{176}Lu se emiten:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 0,37 gammas de 401 keV ▪ 93,6 gammas de 306,8 keV ▪ 78 gammas de 201,8 keV ▪ 13,5 de 88,3 keV
--

Tabla 5.5: Gammas de mayor intensidad del ^{176}Lu .

El siguiente esquema de la transición del ^{176}Lu al ^{176}Hf mediante las gammas de mayor intensidad:

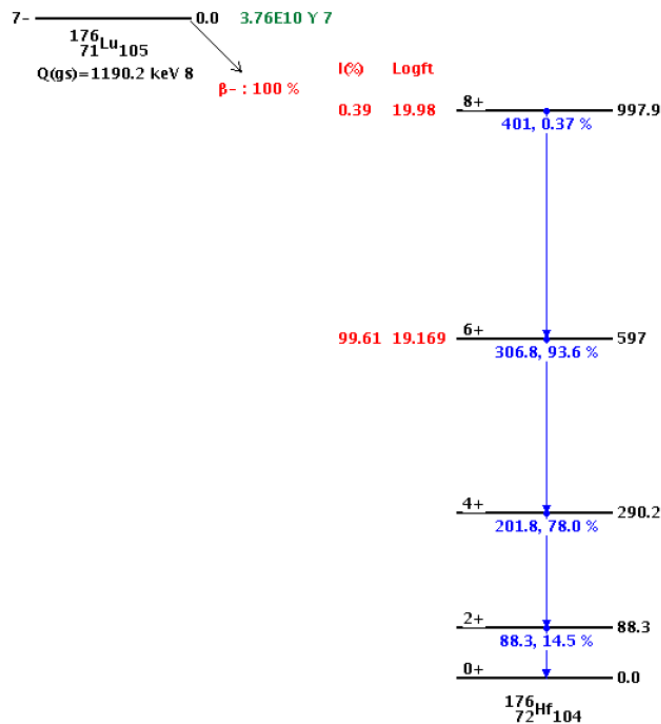


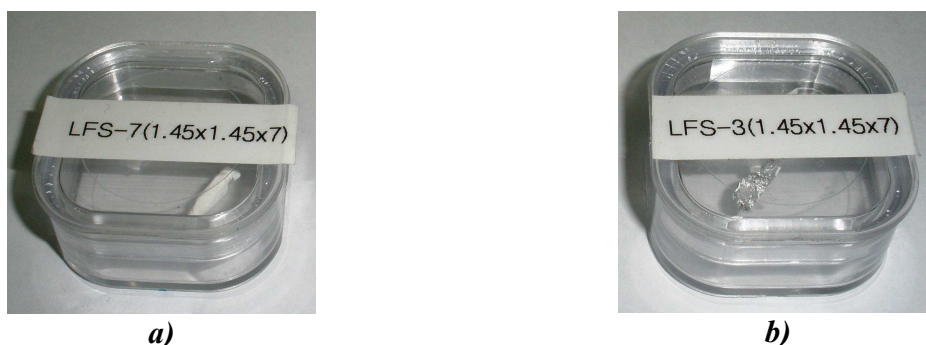
Fig. 5.17: Transición del ^{176}Lu al ^{176}Hf a través de los canales más abundantes.

Además, el ^{176}Lu presenta dos rayos X: el primero proviene de la transición $K\alpha_1$ con una energía 54.07 keV y una intensidad de 16.7%. El otro tiene 54.611 keV con un intensidad de 9.6%. Al tener energías muy cercanas ambos fotopicos superpuestos, con lo cual buscaremos un fotopicos con centroide a 54.27 keV e intensidad del 26.3%.

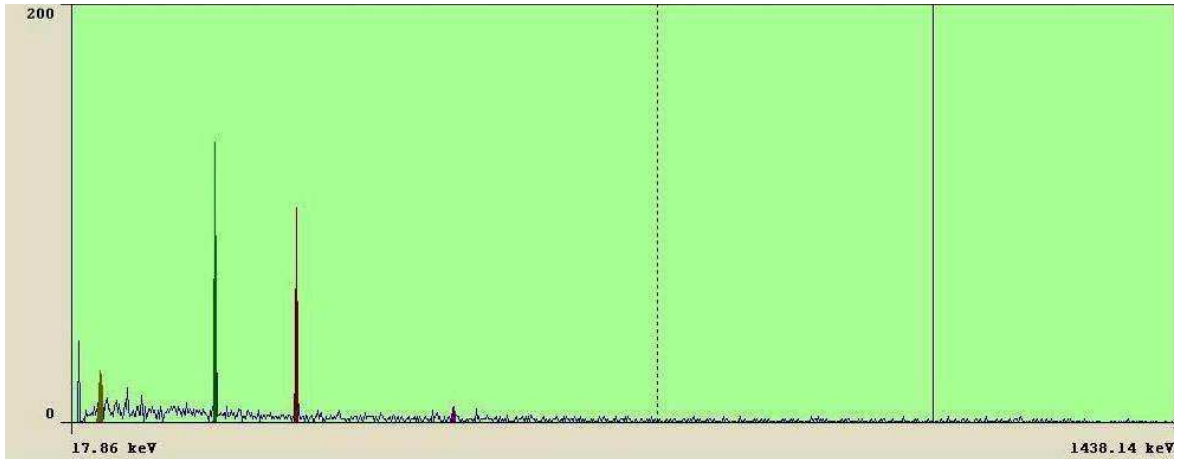
5.3.4 LFS

Los cristales de “Lutetium Fine Silicate” (LFS) son patentados y comercializados por Zecotek. En su constitución tienen Lu_2O_3 , SiO_2 y el dopante centellador CeO_2 .

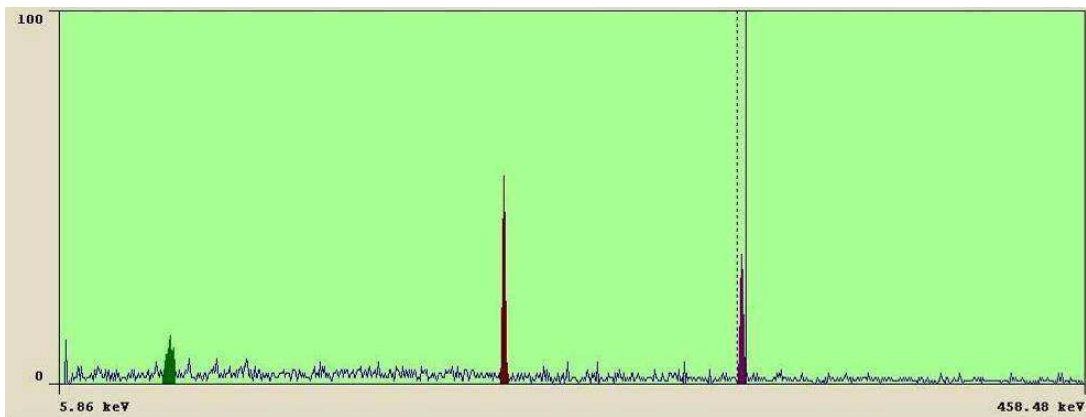
En nuestro caso se tienen 2 cristales paralelepípedos de LFS de 7 mm de alto y de cara frontal 1.45 x 1.45 mm. (Ver Figura 5.18) La salvedad es que uno es serie 7 y el otro serie 3.



5.18: Espectro gamma de la Actividad Interna del $\text{CsI}(\text{Tl})$ de 12x12x20mm con $G=100$.

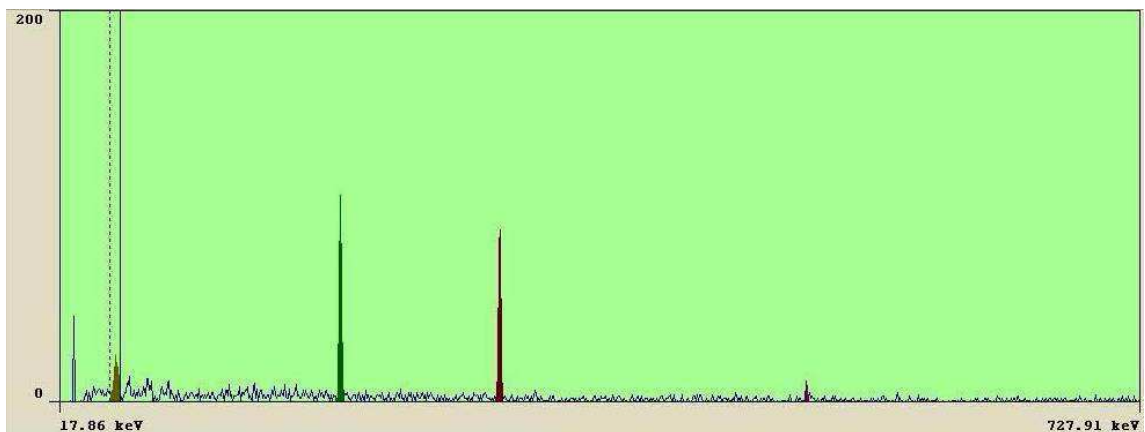


5.19: Espectro gamma de la Actividad Interna del LFS-3 de 1.45x1.45x7mm con G=30.

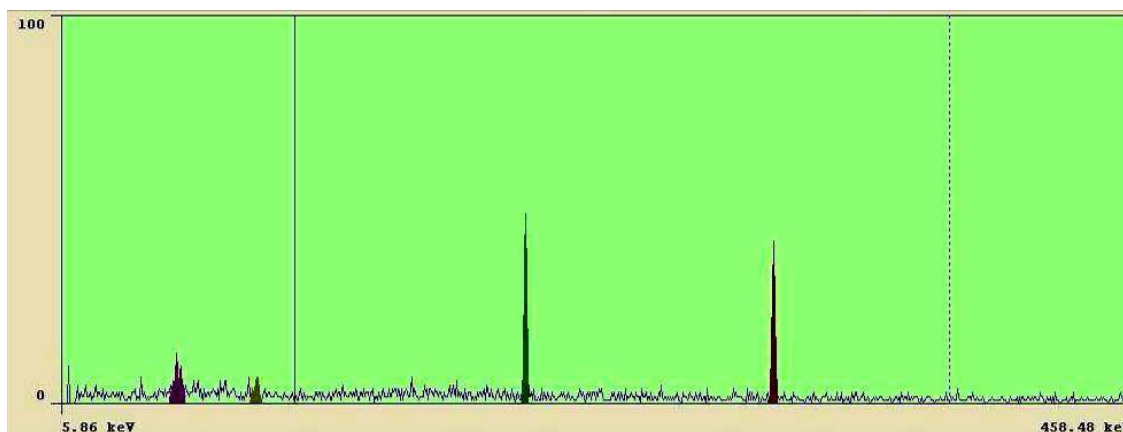


5.20: Espectro gamma de la Actividad Interna del LFS-3 de 1.45x1.45x7mm con G=100.

En las Figuras 5.19 y 5.20 tenemos el espectro gamma de la actividad interna del cristal de LFS-3 de 1.45x1.45x7 mm. Se identifican los dos fotopicos más intensos en la ventana de energía de 5.06 a 458.40 keV. En la ventana de 17.86 a 1438.14 keV se aprecia el pico “suma” de las dos gammas más intensas. En ambas ventanas se observa el pico de 88.3 keV, sin embargo este no se va a analizar porque está en la zona de los RX del Pb del castillo.



5.21: Espectro gamma de la Actividad Interna del LFS-7 de 1.45x1.45x7 mm con G=30.



5.22: Espectro gamma de la Actividad Interna del LFS-7 de 1.45x1.45x7 mm con $G=100$.

En las Figuras 5.21 y 5.22 tenemos el espectro gamma de la actividad interna del cristal de LFS-7 de 1.45x1.45x7 mm. Se identifican notoriamente dos picos en la ventana de energía de 5.06 a 458.40 keV. En la ventana de 17.86 a 727.91 keV se aprecia el pico “suma” de las dos gammas más intensas. En ambas ventanas se observa el pico de 88.3 keV, sin embargo este no se va a analizar porque está en la zona de los RX del Pb del castillo.

Analizando los picos corroboramos que la fuente emisora es ^{176}Lu :

Detector	Picos (keV)	^{176}Lu		Error (%)
		Medición	Intensidad	
LFS-7	201.93	201.83	78	0.050
	306.8	306.78	93.6	0.007
	508.31	508.61	SUMA	0.059
LFS-3	201.88	201.83	78	0.025
	306.82	306.78	93.6	0.013
	507.93	508.61	SUMA	0.134

Tabla 5.5: Identificación del ^{176}Lu en cristales de LFS-3 y -7.

Dada la posición de los cristales (1 cm), se aumenta la probabilidad de que un gamma de 201.93 keV entre en coincidencia con uno de 306.8 keV. Por eso se observa el pico “Suma” de ambos en 508.31 keV.

5.3.5 MLS

Los cristales de “Mixed Lutetium Silicate” (MLS) son patentados y comercializados por Proteus Inc. En su constitución también tienen lutecio ^{176}Lu , y aplico lo dicho en la sección 5.4.3.

En nuestro caso tenemos varios cristales MLS (de 1.5x1.5x12 mm) formando 4 matrices: la primera es una matriz “vieja” de un PET con 62 cristales, y tres matrices de 4x4 cristales. (Ver Figura 5.23)



Fig. 5.23: Matrices de cristales de MLS de 1.5x1.5x12 mm. **a)** Matriz “vieja” de PET (62 cristales); **b)** Matriz 4x4 de cristales.

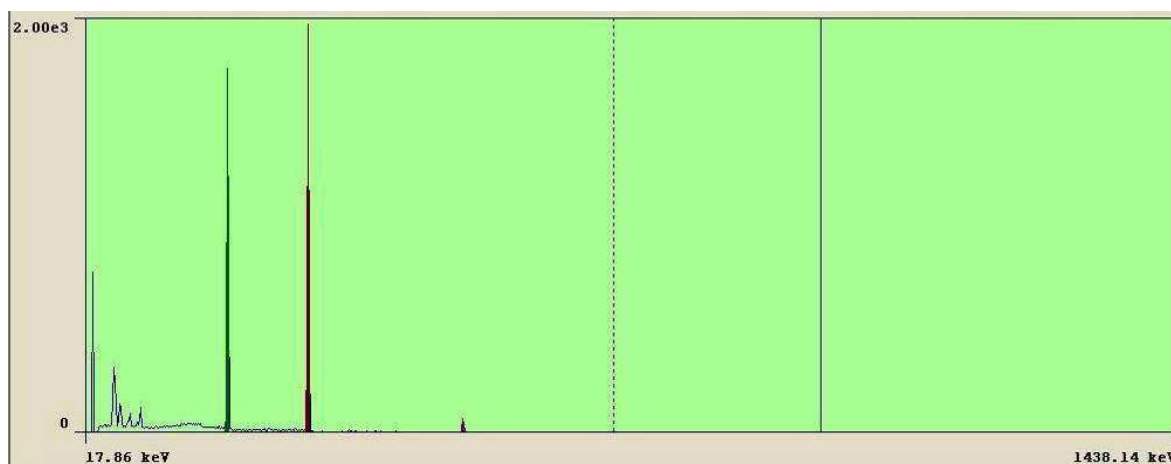


Fig. 5.24: Matriz “vieja” de PET de cristales de MLS de 1.5x1.5x12 mm con $G = 30$.

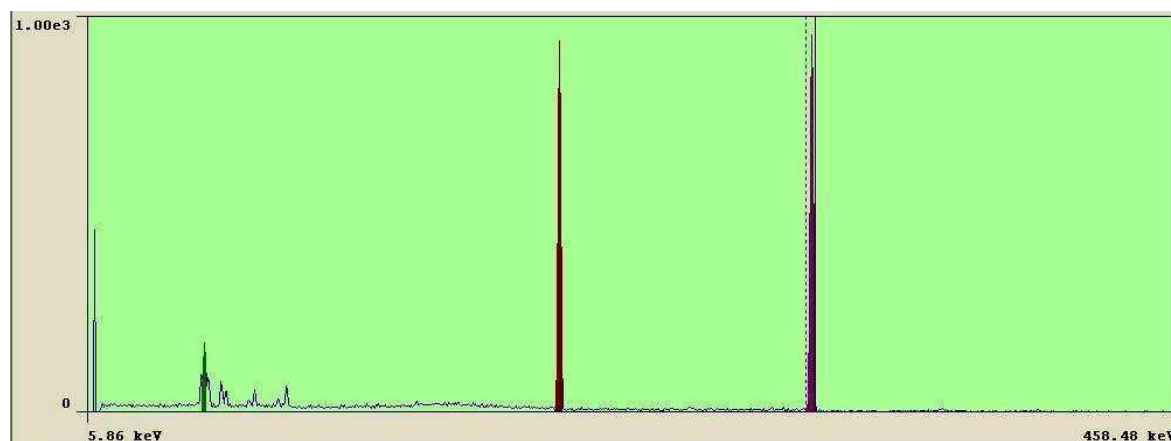


Fig. 5.25: Matriz “vieja” de PET de cristales de MLS de 1.5x1.5x12 mm con $G = 100$.

En las Figuras 5.24 y 5.25 tenemos el espectro gamma de la actividad interna del cristal de la matriz vieja de PET conformada por cristales MLS de 1.45x1.45x7 mm. Se identifican notoriamente dos picos en la ventana de energía de 5.06 a 458.40 keV. En la ventana de 17.86 a 1438.14 keV se aprecia el pico “suma” de las dos gammas más intensas. En ambas ventanas se observa el pico de 88.3 keV, sin embargo este no se va a analizar porque está en la zona de los RX del Pb del castillo.

Luego las matrices de 4x4 cristales de MLS. Se tienen 3 matrices de 16 cristales, se diferencian por un número de identificación.

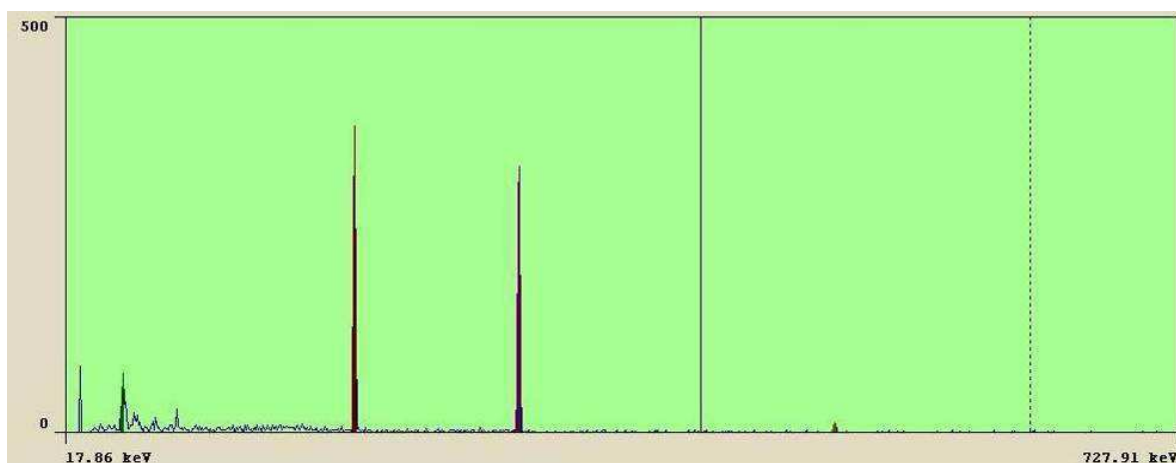


Fig 5.26: Primera matriz 4x4 de cristales de MLS de 1.5x1.5x12 mm con $G = 30$ (MLS-1)

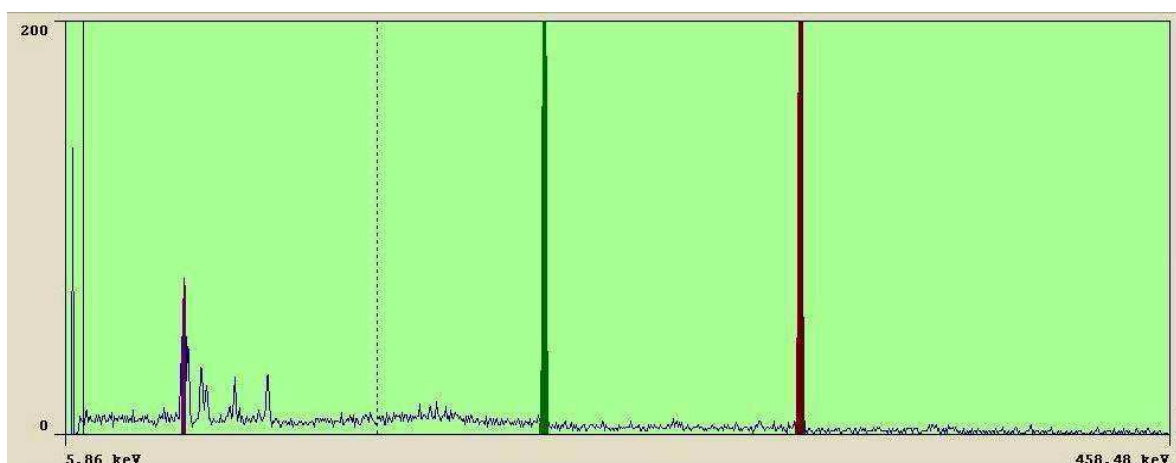


Fig 5.27: Primera matriz 4x4 de cristales de MLS de 1.5x1.5x12 mm con $G = 100$. (MLS-1)

En las Figuras 5.26 y 5.27 tenemos el espectro gamma de la actividad interna de la primera matriz 4x4 (MLS-1) conformada por cristales MLS de 1.45x1.45x7 mm. Se identifican notoriamente dos picos en la ventana de energía de 5.06 a 458.40 keV. En la ventana de 17.86 a 727.91 keV se aprecia el pico “suma” de las dos gammas más intensas. En ambas ventanas se observa el pico de 88.3 keV y el fotopicos de rayos X de 54.27 keV.

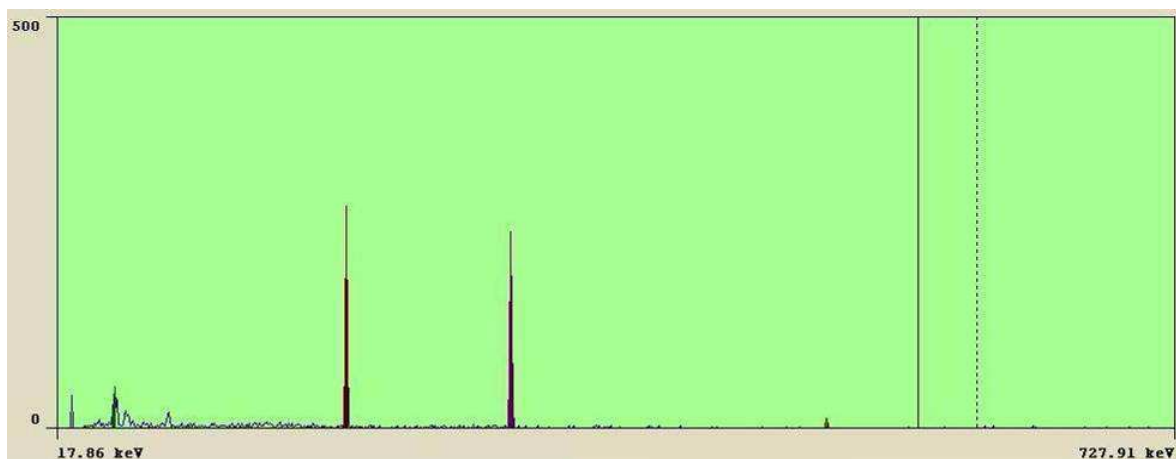


Fig 5.28: Segunda matriz 4x4 de cristales de MLS de 1.5x1.5x12 mm con $G = 30$. (MLS-2)

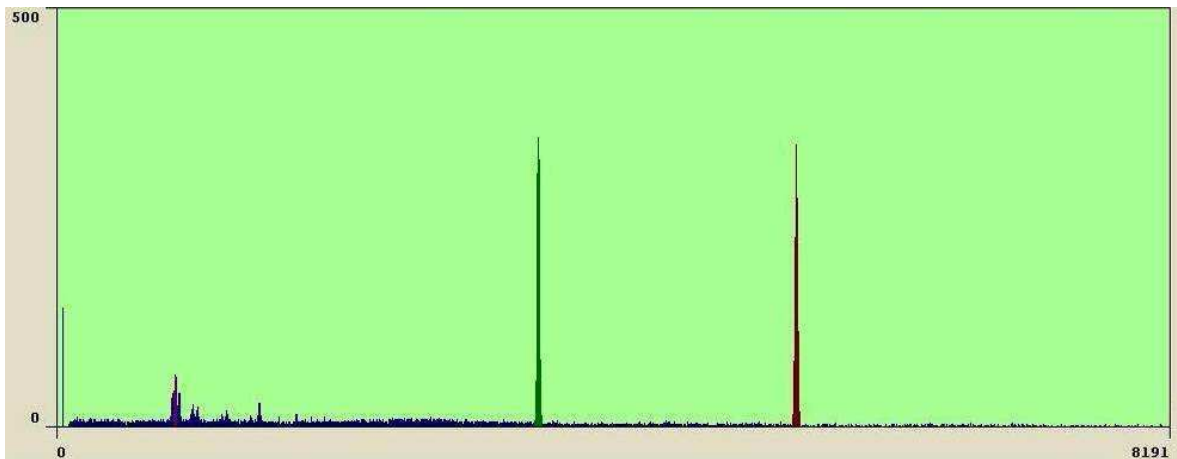


Fig 5.29: Segunda matriz 4x4 de cristales de MLS de 1.5x1.5x12 mm con $G = 100$. (MLS-2)

En las Figuras 5.28 y 5.29 tenemos el espectro gamma de la actividad interna de la segunda matriz 4x4 (MLS-2) conformada por cristales MLS de 1.45x1.45x7 mm. Se identifican notoriamente dos picos en la ventana de energía de 5.06 a 458.40 keV. En la ventana de 17.86 a 727.91 keV se aprecia el pico “suma” de las dos gammas más intensas. En ambas ventanas se observa el pico de 88.3 keV y el fotopico de rayos X de 54.27 keV.

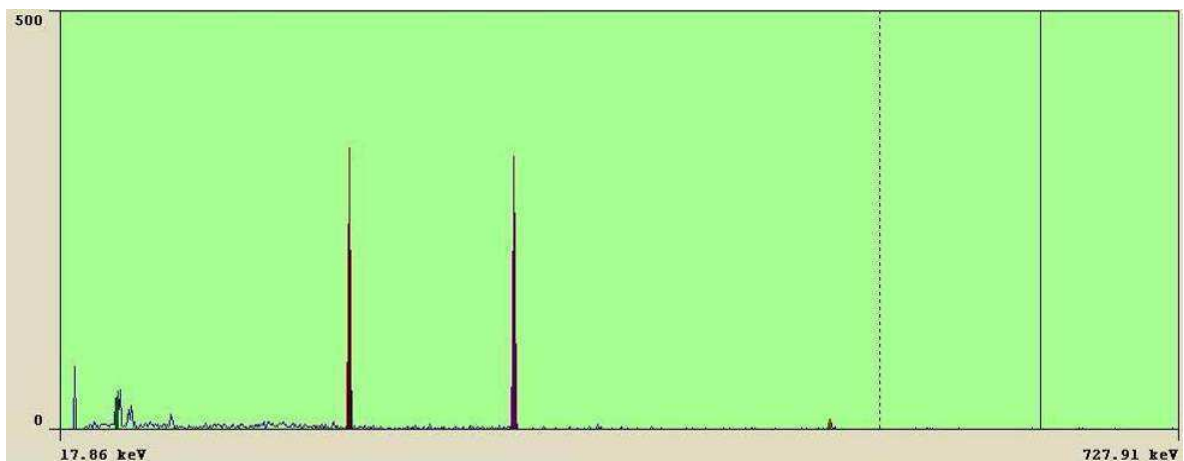


Fig 5.30: Tercera matriz 4x4 de cristales de MLS de 1.5x1.5x12 mm con $G = 30$. (MLS-3)

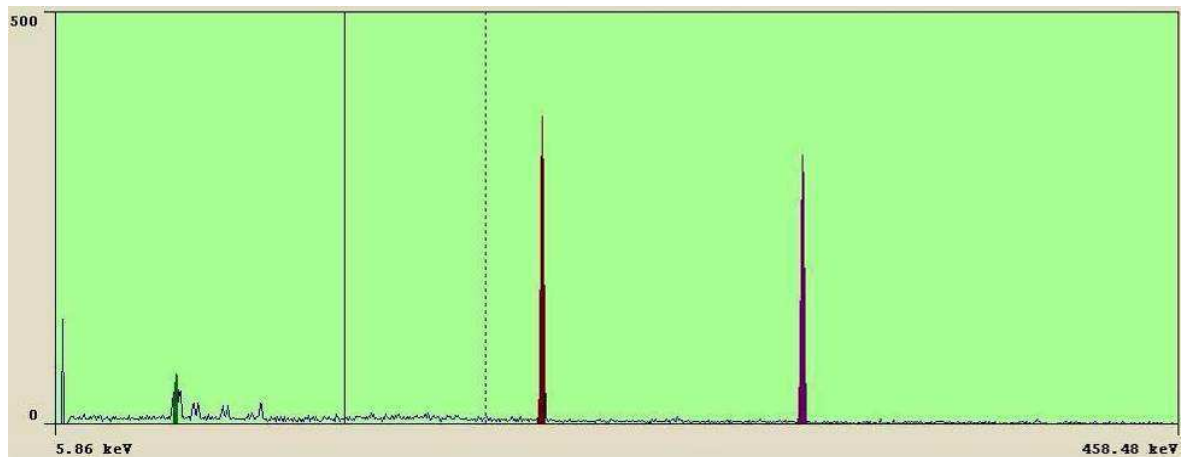


Fig 5.31: Tercera matriz 4x4 de cristales de MLS de 1.5x1.5x12 mm con $G = 100$. (MLS-3)

En las *Figuras 5.30* y *5.31* tenemos el espectro gamma de la actividad interna de la tercera matriz 4x4 (*MLS-3*) conformada por cristales MLS de 1.45x1.45x7 mm. Se identifican notoriamente dos picos en la ventana de energía de 5.06 a 458.48 keV. En la ventana de 17.86 a 727.91 keV se aprecia el pico “suma” de las dos gammas más intensas. En ambas ventanas se observa el pico de 88.3 keV y el fotopico de rayos X de 54.27 keV.

La identificación ha sido realizada por:

Detector	Picos (keV)	¹⁷⁶ Lu		Error (%)
		Teoría	Intensidad	
Matriz PET MLS	54.34	54.27	26.3	0.129
	201.85	201.83	78	0.010
	306.8	306.78	93.6	0.007
	508.4	508.61	SUMA	0.041
MLS-1	54.25	54.27	26.3	0.0
	201.88	201.83	78	0.0
	306.82	306.78	93.6	0.0
	508.57	508.61	SUMA	*
MLS-2	54.1	54.27	26.3	0.3
	201.2	201.83	78	0.3
	305.78	306.78	93.6	0.3
	506.54	508.61	SUMA	*
MLS-3	54.01	54.27	26.3	0.5
	201.15	201.83	78	0.3
	305.72	306.78	93.6	0.3
	506.56	508.61	SUMA	*

Tabla 5.6: Identificación del ¹⁷⁶Lu en matrices de MLS.

5.3.6 LYSO

Los cristales de “Lutetium Mixed Silicate” (LYSO) son patentados y comercializados por Photonic Materials. En su constitución también tienen lutecio ¹⁷⁶Lu. En nuestro caso tenemos un bloque continuo de LYSO. (*Ver Figura 5.32*)



Fig. 5.32: Bloque continuo de LYSO (1 x 1 x 2 cm)

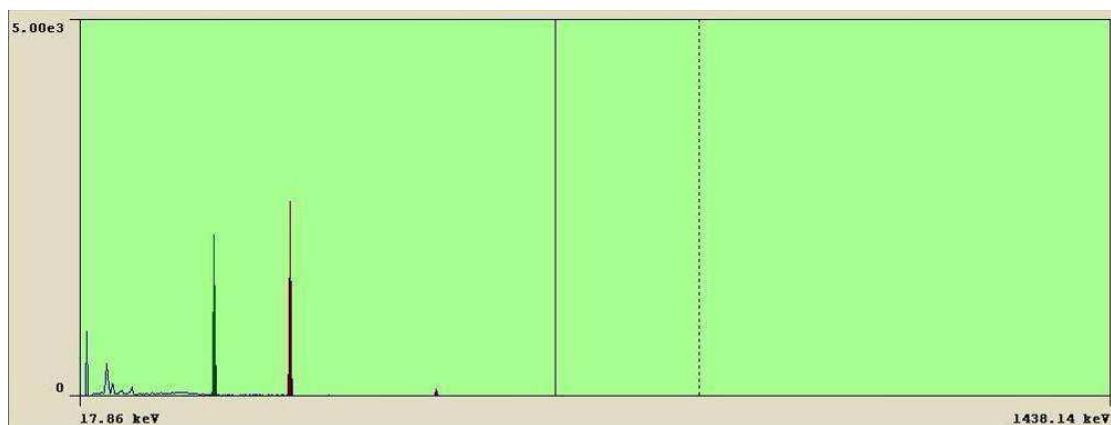


Fig 5.33: Bloque continuo de LYSO con $G = 30$.

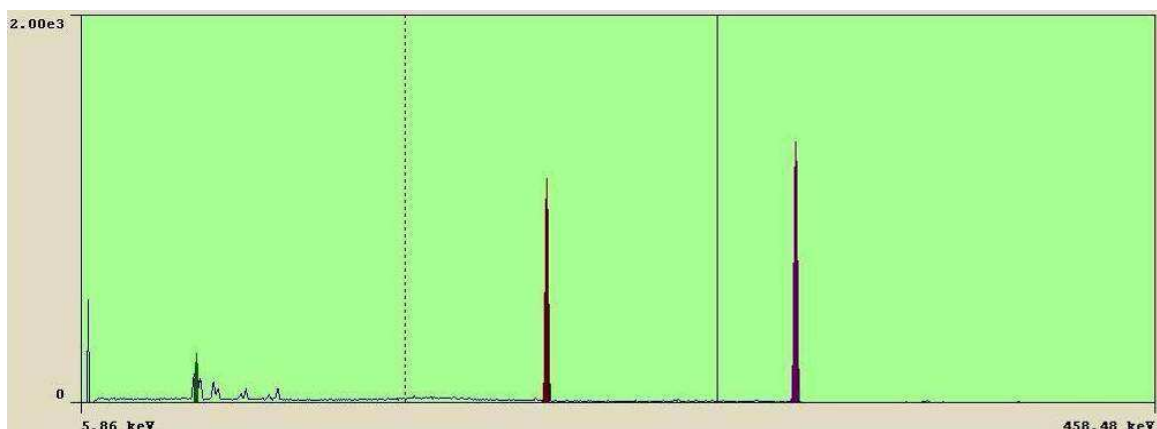


Fig 5.34: Bloque continuo de LYSO con $G = 100$.

En las Figuras 5.33 y 5.34 tenemos el espectro gamma de la actividad interna del bloque continuo de LYSO. Se identifican notoriamente dos picos en la ventana de energía de 5.06 a 458.48 keV. Además, en la ventana de 17.86 a 1438.14 keV se aprecia el pico “suma” de las dos gammas más intensas. En ambas ventanas se observa el pico de 88.3 keV y el fotopico de rayos X de 54.27 keV.

La identificación ha sido realizada por:

Detector	Picos (keV)	^{176}Lu		Error (%)
		Picos	Intensidad	
LYSO $G=30$	54.22	54.27	26.3	0.092
	201.85	201.83	78	0.010
	306.79	306.78	93.6	0.003
	508.4	508.61	SUMA	0.041
LYSO $G=100$	54.28	54.27	26.3	0.02
	201.85	201.83	78	0.01
	306.78	306.78	93.6	0.00

Tabla 5.7: Identificación del ^{176}Lu en el bloque de LYSO.

5.3.7 BGO - GSO

El GSO ($Gd_2SiO_5:Ce$) es un cristal centellador patentado y comercializado por Hitachi Chemical co. EL BGO (Bi_2GeO_{20}) es otro cristal centellador comercializado por el Instituto

Lebedev. En nuestro caso, tenemos un sistema que formaba parte de un antiguo PET. Tenemos un cristal GSO ($2 \times 0.5 \times 3 \text{ cm}$) unido a un BGO ($2 \times 0.5 \times 3 \text{ cm}$) mediante una placa delgada de plomo ($1 \times 20 \times 29 \text{ mm}$). (Ver Figura 5.35)

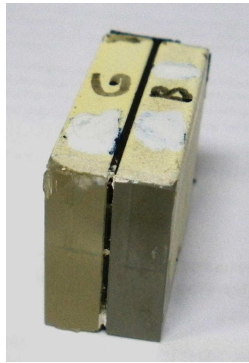


Fig 5.35: Bloque continuo de LYSO con $G = 100$.

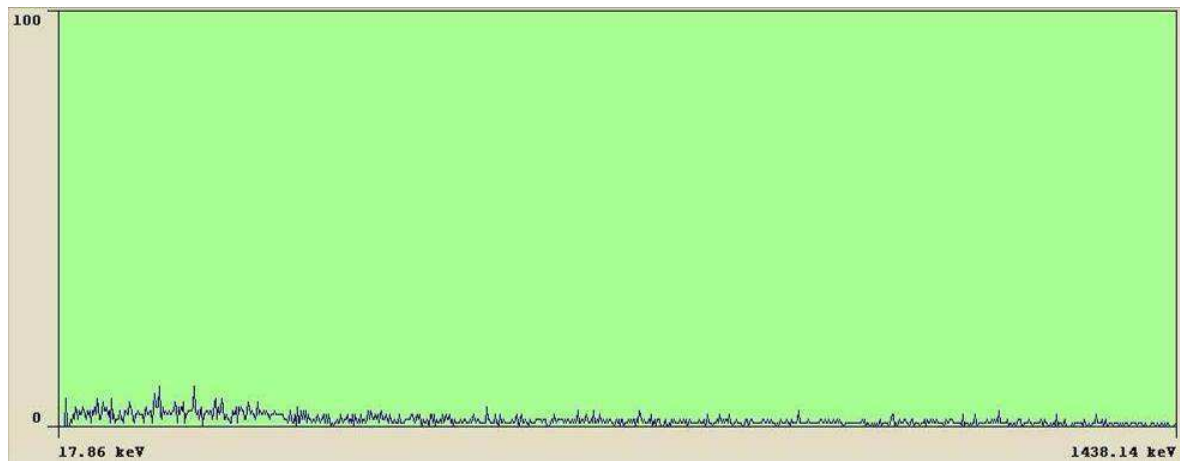


Fig 5.36: Matriz de BGO+GSO con $G = 30$.

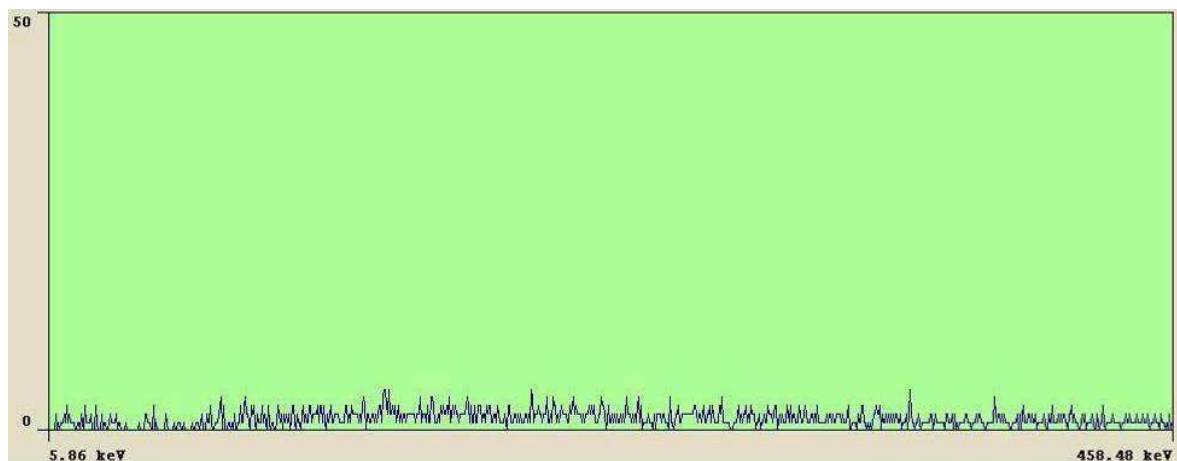


Fig 5.37: Matriz de BGO+GSO con $G = 100$.

En las Figuras 5.36 y 5.37 tenemos el espectro gamma de la actividad interna de la matriz de BGO+GSO. No se identificaron especies que contribuyeran al espectro gamma.

5.3.8 Pr:LuAG

El cristal Pr:LuAG ($\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) es un centellador patentado y comercializado por Furukawa. En nuestro caso estudiamos una matriz de 4x4 cristales de 2x2x12 mm, y un bloque continuo de forma cúbica (125 mm^3). (Ver Figura 5.38)

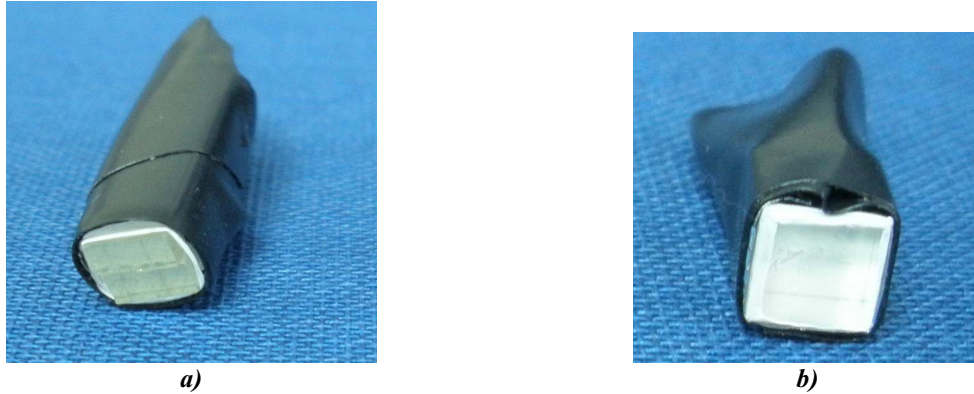


Fig 5.38: Cristales Pr:LuAg empaquetados en teflón, aluminio y cinta aislante antes de una medición. **a)** matriz de 4x4 cristales de 2x2x12 mm; **b)** bloque continuo cúbico (5x5x5 mm).

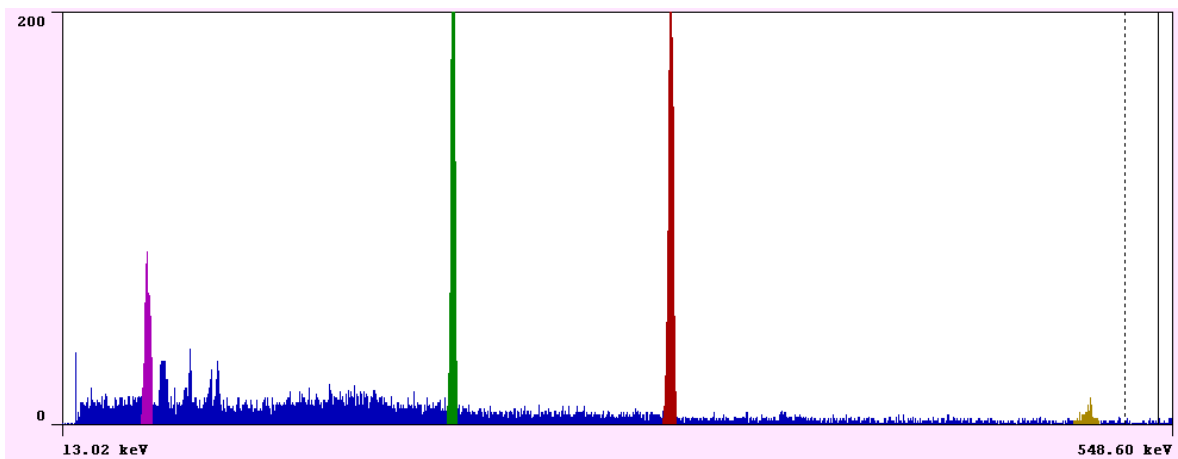


Fig 5.39: Matriz de 4x4 cristales de Pr:LuAG con $G = 30$.

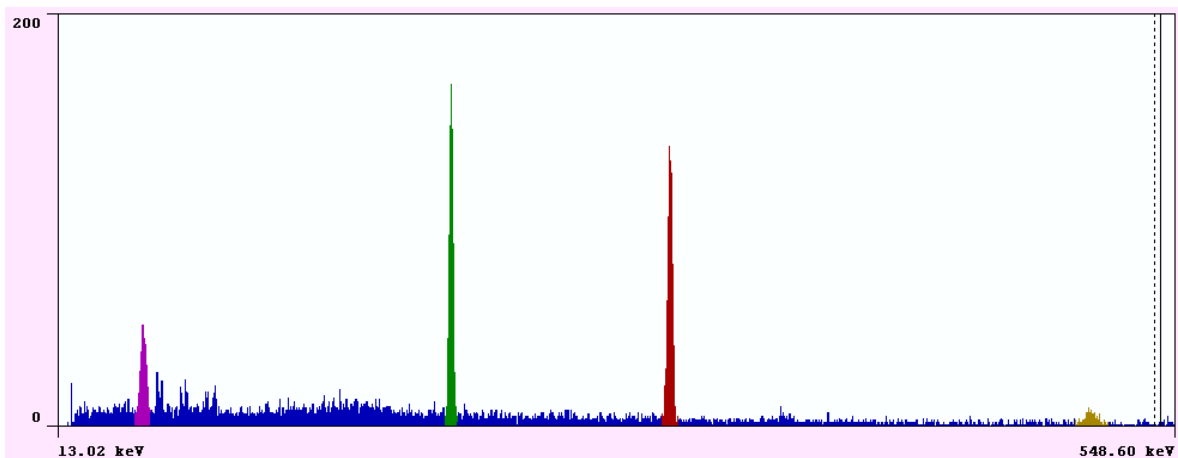


Fig 5.40: Bloque continuo(cubo) de Pr:LuAG con $G = 30$.

En las *Figuras 5.39* y *5.40* tenemos el espectro gamma de la actividad interna de los cristales Pr:LuAG. El primero una matriz de 4x4 y el segundo un bloque cúbico continuo de cristal. En la ventana de energía de 13.02 a 548.60 keV se aprecian cuatro picos asociados al ^{176}Lu : 54.3 keV, 201.83 keV, 306.78 keV y el pico “suma” de los dos anteriores.

La identificación ha sido realizada por:

Detector	Picos (keV)	^{176}Lu		Error (%)
		Picos	Intensidad	
Matriz LuAG	54.3	54.27	26.3	0.055
	201.86	201.83	78	0.015
	306.82	306.78	93.6	0.013
Cubo LuAG	54.28	54.27	26.3	0.018
	201.81	201.83	78	0.010
	306.79	306.78	93.6	0.003

Tabla 5.8: Identificación del ^{176}Lu en los cristales de Pr:LuAG.

5.3.9 BaF₂

El BaF₂ son cristales ampliamente utilizados dado que transmite radiación que va desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. En nuestro caso tenemos dos bloques continuos cilíndricos de 2.5 cm de radio y 2.5 cm de altura. (*Ver Figura 5.41*)



Fig 5.41: Bloque continuo cilíndrico de BaF₂.

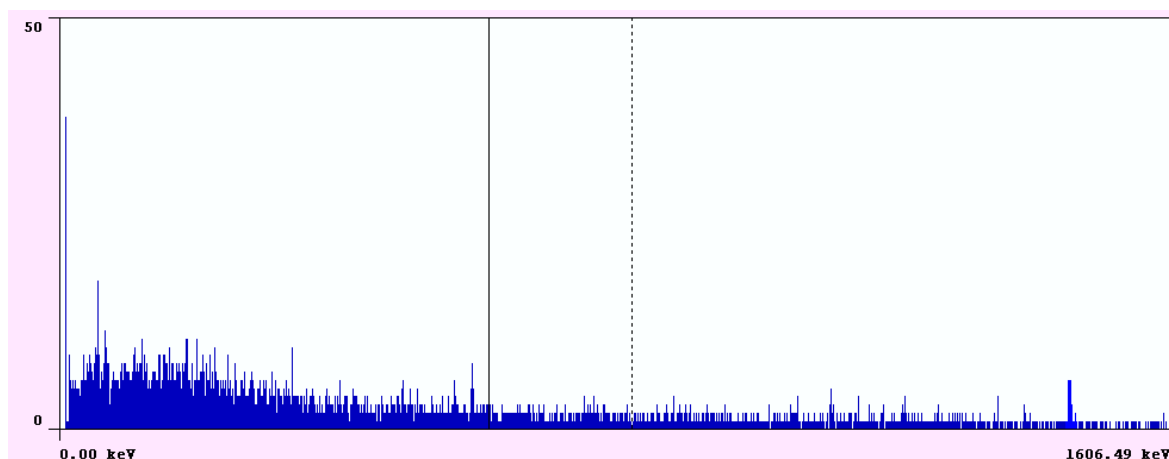


Fig 5.42: Bloque continuo de BaF₂ con G = 30.

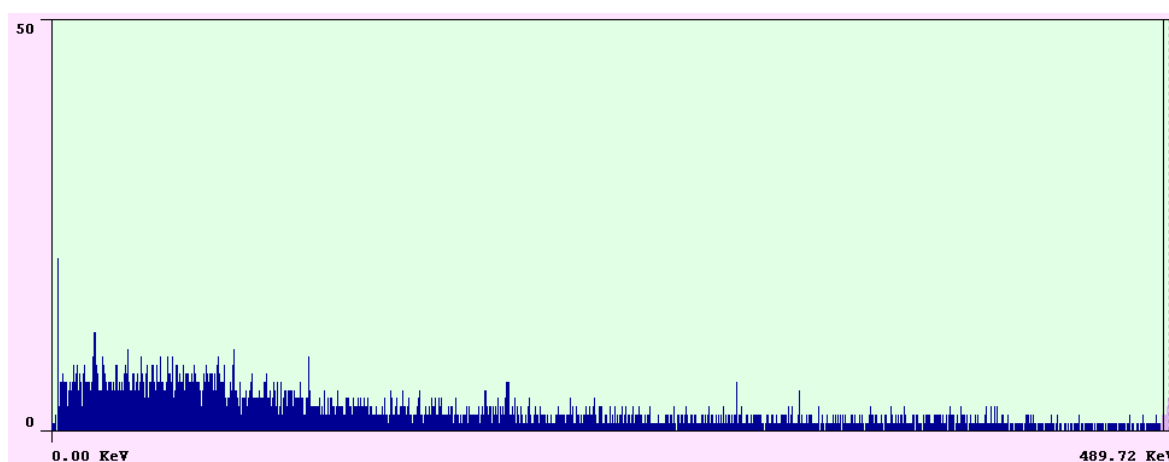


Fig 5.43: Bloque continuo de BaF₂ con G =100

En las *Figuras 5.42* y *5.43* tenemos el espectro gamma de la actividad interna de uno de los bloques continuos de BaF₂. No se identificaron especies que contribuyeran al espectro gamma. Se reporta como fondo.

5.3.10 LaBr₃(Ce)

Nuestro cristal de LaBr₃(Ce) posee ¹³⁸La, el cual tiene dos gammas característicos: 789 keV y 1436 keV. Por esta razón, al subir la ganancia a 100 los picos no se aprecian en el espectro. Este centellador es un cristal transparente de centelleo inventado en la Delft University (Holanda, 2001), y licenciado por Saint-Gobain y comercializado como Brilliance380.

En nuestro caso, estudiamos un cristal de LaBr₃(Ce) con geometría de cono truncado (*Ver Figura 5.44*).

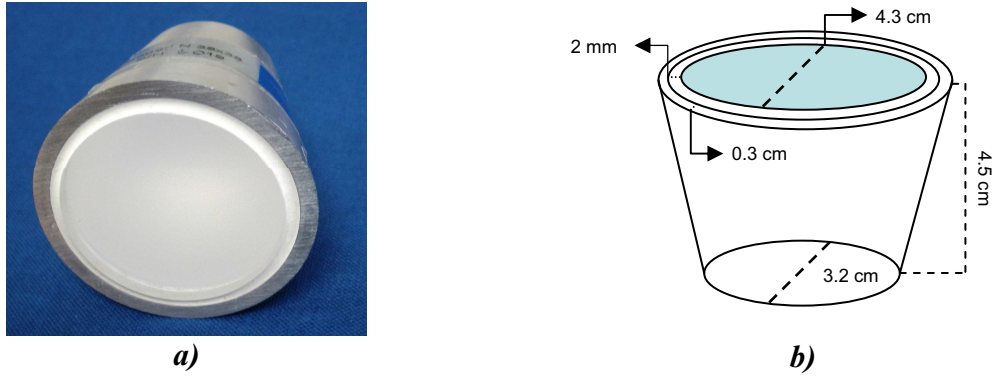


Fig. 5.44: Cristal de $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$. a) Brilliance380; b) Esquema y dimensiones del cristal.

El Lantano natural contiene 0.09% de ^{138}La , el cual tiene una vida media de 1.05×10^{11} años, dando una concentración de 1.5 Bq/cc. Este isótopo decae a ^{138}Ba por captura electrónica (66.4%) o a ^{138}Ce por emisión beta (33.6%). Las ramas principales de emisión gamma son dos: 1436 keV en coincidencia con un gamma de 32 keV; y un gamma de 789 keV coincidente con un beta, cuyo punto terminal de energía es 255 keV².

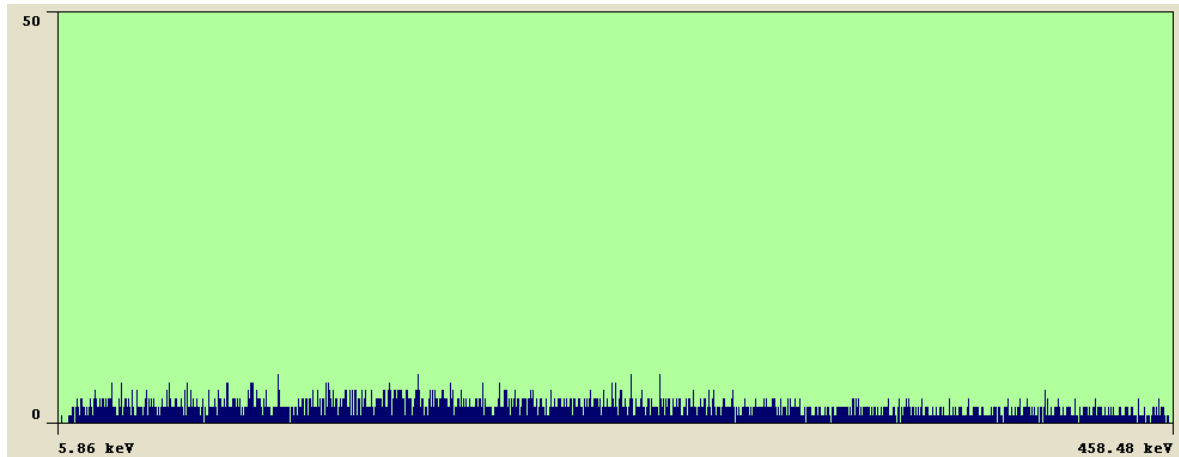


Fig 5.45: Cristal de $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ con Ganancia 100.

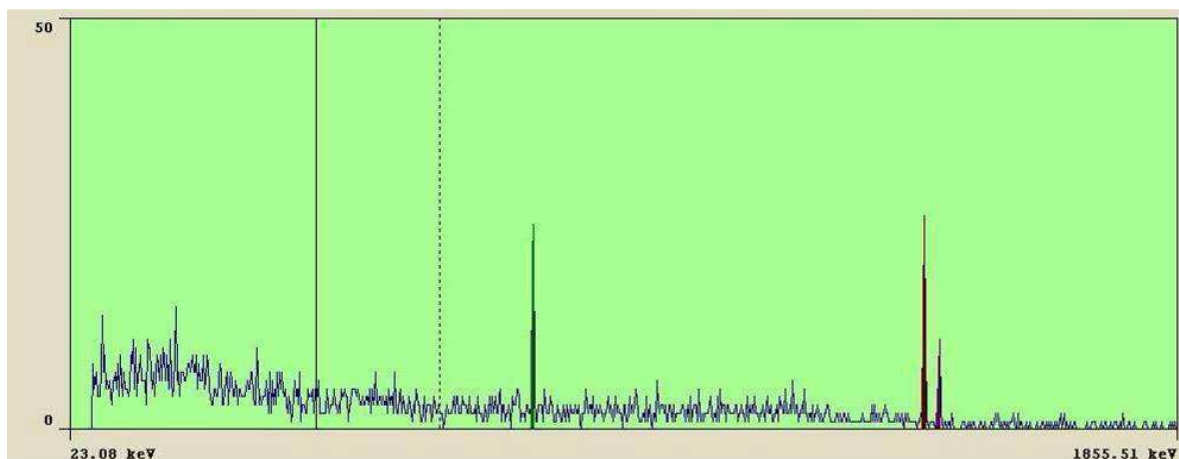


Fig 5.46: Cristal de $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ con Ganancia 30.

En la *Figura 5.45* no se identifica la presencia de ningún pico en la ventana de energía de 5.86 a 458.48 keV. Sin embargo, en la *Figura 5.46* sí se observan tres fotopicos: los dos más altos corresponden al ^{138}La , y el más energético (en 1460.82 KeV) proviene del ^{40}K del fondo natural.

La identificación ha sido realizado por:

Detector	Picos (keV)	¹³⁸ La		Error (%)
		Picos	Intensidad	
La-138	788.74	788.55	34.4	0.02
	1435.8	1435.88	65.6	0.01

Tabla 5.8: Identificación del ¹³⁸La en el bloque de Brilliance (LaBr₃:Ce).

5.4 Determinación de la Actividad Interna Absoluta

Los cristales de NaI(Tl), CsI(Tl), BGO y GSO poseen una actividad interna despreciable, es decir que no debe considerarse para hacer correcciones a medidas tomados con ellos. Sin embargo, en el resto de cristales se encontró ¹⁷⁶Lu y ¹³⁸La, se presentan los cálculos para estimar la actividad interna en cada uno de ellos:

5.4.1 Cristales con ¹⁷⁶Lu

a) LFS

Para los cristales de LFS, con ganancia de 30, se ha obtenido una actividad interna de:

- LFS-3: 2.2 Bq
- LFS-7: 1.96 Bq

CRISTAL	Picos (keV)	Intensidad	Area Neta	Eficiencia	A _{TOTAL}	A _{por cristal}
		(%)	cuentas	ε (E)	(Bq)	(Bq)
LFS-7	306.8	93.6	699	0.095	3.93	1.96
LFS-3	306.82	93.6	784	0.095	4.41	2.20

Tabla 5.9: Determinación de la actividad Interna para cristales LFS con G = 30.

Para los cristales de LFS, con ganancia de 100, se ha obtenido una actividad interna de:

- LFS-3: 1.84 Bq
- LFS-7: 1.91 Bq

CRISTAL	Picos (keV)	Intensidad	Area Neta	Eficiencia	A _{TOTAL}	A _{por cristal}
		(%)	cuentas	ε (E)	(Bq)	(Bq)
LFS-7	306.77	93.6	679	0.095	3.82	1.91
LFS-3	306.78	93.6	653	0.095	3.67	1.84

Tabla 5.10: Determinación de la actividad Interna para cristales LFS con G = 100.

De esta forma, tomaremos como valor representativo para el LFS-3 1.94 Bq y para el LFS-7 2.02 Bq.

b) MLS

Para los cristales de MLS dentro de las matrices de 4x4 y el array de 62, con ganancia de 30, se ha obtenido una actividad interna de:

- MLS (62 cristales): 2.02 Bq / cristal.
- MLS-1 (4x4): 2.49 Bq/cristal

- MLS-2 (4x4): 2.21 Bq/cristal
- MLS-3 (4x4): 2.42 Bq/cristal

CRISTAL	Picos (keV)	Intensidad	Area Neta	Eficiencia	A _{TOTAL}	A _{por cristal}
		(%)	cuentas	ε (E)	(Bq)	(Bq)
MLS	306.8	93.6	21501	0.095	120.9	2.02
MLS-1	306.82	93.6	7097	0.095	39.9	2.49
MLS-2	306.78	93.6	6302	0.095	35.4	2.21
MLS-3	306.72	93.6	6890	0.095	38.7	2.42

Tabla 5.11: Determinación de la actividad Interna para cristales MLS con G = 30.

Y para una ganancia de 100:

- MLS (62 cristales): 1.95 Bq / cristal.
- MLS-1 (4x4): 2.65 Bq/cristal
- MLS-2 (4x4): 2.36 Bq/cristal
- MLS-3 (4x4): 2.38 Bq/cristal

CRISTAL	Picos (keV)	Intensidad	Area Neta	Eficiencia	A _{TOTAL}	A _{por cristal}
		(%)	cuentas	ε €	(Bq)	(Bq)
MLS	306.8	93.6	20805	0.095	117.0	1.95
MLS-1	306.84	93.6	7543	0.095	42.4	2.65
MLS-2	306.82	93.6	6705	0.095	37.7	2.36
MLS-3	306.82	93.6	6756	0.095	38.0	2.38

Tabla 5.12: Determinación de la actividad Interna para cristales LFS con G = 100.

De esta forma, tomaremos como valor representativo para los cristales individuales de MLS 2.41 Bq.

c) LYSO

Para el cristal de LYSO, con ganancia de 30, se ha obtenido una actividad interna de 97.4 Bq.

CRISTAL	Picos (keV)	Intensidad	Area Neta	Eficiencia	A _{TOTAL}	A _{por cristal}
		(%)	cuentas	ε(%)	(Bq)	(Bq)
LYSO	306.79	93.6	27560	0.095	155.0	155.0

Tabla 5.13: Determinación de la actividad Interna para cristales LYSO con G = 30.

Para el cristal de LYSO, con ganancia de 100, se ha obtenido una actividad de 142.0 Bq.

CRISTAL	Picos (keV)	Intensidad	Area Neta	Eficiencia	A _{TOTAL}	A _{por cristal}
		(%)	cuentas	ε(%)	(Bq)	(Bq)
LYSO	306.78	93.6	28785	0.095	161.9	161.85

Tabla 5.14: Determinación de la actividad Interna para cristales LYSO con G = 100.

De esta forma, tomaremos como valor representativo de la actividad del LYSO 158.43 Bq.

d) Pr:LuAG

Para los cristales de Pr:LuAG, con ganancia de 30, se ha obtenido una actividad interna de:

- Cubo: 0.8 Bq
- Matriz (2x2): 1.0 Bq

CRISTAL	Picos (keV)	Intensidad	Area Neta	Eficiencia	A _{TOTAL}	A _{por cristal}
		(%)	cuentas	ε (E)	(Bq)	(Bq)
Cubo LuAG	306.79	93.6	2491	0.095	14.0	14
Matriz LuAG	306.82	93.6	6756	0.095	38.0	9.5

Tabla 5.15: Determinación de la actividad Interna para cristales Pr:LuAG con G = 30.

Para los cristales de Pr:LuAG, con ganancia de 30, se ha obtenido una actividad interna de:

- Cubo: 0.8 Bq
- Matriz (2x2): 1.0 Bq

CRISTAL	Picos (keV)	Intensidad	Area Neta	Eficiencia	A _{TOTAL}	A _{por cristal}
		(%)	cuentas	ε (E)	(Bq)	(Bq)
Cubo LuAG	306.79	93.6	2753	0.095	15.5	15.5
Matriz LuAG	306.82	93.6	6537	0.095	36.76	9.2

Tabla 5.15: Determinación de la actividad Interna para cristales Pr:LuAG con G = 30.

De esta forma tomamos como valor representativo para el cubo de 14.75 Bq y para la matriz de cristales de LuAG 9.4 Bq.

5.4.2 Cristales con ¹³⁸La

Para el cristal de LaBr₃(Ce), con ganancia de 30, se ha obtenido una actividad de 11.34 Bq.

CRISTAL	Picos (keV)	Intensidad	Area Neta	Eficiencia	A _{TOTAL}
		(%)	cuentas	ε (E)	(Bq)
¹³⁸ La	788.74	34.4	210	0.029	10.53
	1435.8	65.6	239	0.015	12.14

Tabla 5.16: Determinación de la actividad Interna para cristales LaBr₃ con G = 30.

5.5 Concentración de Actividad Interna

A continuación se presentan los resultados de concentración de actividad interna por cristal centellador. Los valores utilizados son los representativos de cada cristal. La concentración de actividad se expresa de modo volumétrico (Bq/cc) y másico (Bq/g). (Ver Tabla 5.17).

Cristal Centellador	Densidad	Vol	Masa	Actividad	
	(g/cm ³)	(cc)	(g)	Bq/cc	Bq/g
NaI(Tl)	3.7	13.2	48.84	0.00	0.00
	3.7	12.9	47.73	0.00	0.00
CsI: Tl	4.5	1.62	7.3	0.00	0.00
	4.5	2.88	12.96	0.00	0.00
BGO	7.1	3.48	23.3	0.00	0.00
BaF ₂	4.9	12.27	60.1	0.00	0.00
GSO	6.7	2.9	20.6	0.00	0.00
Pr:LuAG	6.7	0.1	0.47	147.50	31.38
	6.7	0.125	0.84	75.20	11.19
LaBr ₃ (Ce)	5.1	41.61	212.2	0.27	0.05
LYSO	7.3	2	14.5	79.22	10.93
LFS-3	7.35	0.0147	0.11	137.41	18.36
LFS-7	6.13	0.0147	0.1	131.97	19.40
MLS	7.35	0.027	0.2	91.85	12.40

Tabla 5.17: Concentración másica y volumétrica de la actividad interna para la muestra.

Observaciones:

- Los cristales formados por especies inestables con abundancia natural considerable (mayor al 2%) presentara emisiones debido por sus transiciones.
- La concentración volumétrica y másica servirá como referencia para determinar la contribución que hace un cristal centellador a un espectro cuando se utiliza como detector.
- El Pr:LuAG es el cristal que presenta mayor actividad por centímetro cúbico y por gramo.
- Las concentraciones para los cristales de LFS son similares, sin embargo se puede estimar que poseen la misma masa molar de ¹⁷⁸Lu. El Lutecio se utiliza en iguales cantidades para ambos cristales.

5.6 Resolución en Energía con los PMT

En la *Tabla 3.24* se presenta un resumen de las resoluciones obtenidas por los cristales centelladores según el PMT, y que se describieron en el *capítulo 3*.

Cristal Centellador	Energía (keV)	Resolución (%)		
		Literatura	XP2020B	XP20D0
NaI(Tl) - 1	511	7	8	7.9
	661.66	5.6	7.5	7.1
NaI(Tl) - 2	511	7	8.5	8
	661.66	5.6	7	7.4
CsI(Tl)-1	511	10	12	12.1
	661.66	8.7	9.5	9.8
CsI(Tl)-2	511	10	13	12.8
	661.66	8.7	9.8	9.7
LaBr ₃ (Ce)	511	3.6	3.5	*
	661.66	3.2	3	*
Pr:LuAG	511	6.7	7	*
	661.66	5	5.2	*
BaF ₂	511	15.5	16.1	*
	661.66	13.7	14.6	*
GSO	511	12	18	17.8
	661.66	10	13.1	12.9
LYSO	511	20	9.9	11.1
	661.66	10	9.5	10.9
BGO	511	16	21	20.2
	661.66	12	17.3	17.9
LFS-7	511	12	16.1	16.8
	661.66	10	14.3	15.4
LFS-3	511	12	15.9	16.3
	661.66	10	14.1	15
MLS-1	511	20	21	23.4
	661.66	16	20.3	19.9
MLS-2	511	20	21	22.6
	661.66	16	19	18.9
MLS-3	511	20	21.1	25.1
	661.66	16	17.5	19.8

Tabla 5.18: Tabla Resumen de Resolución por cristal centellador y PMT.

Observaciones:

- Se obtuvieron resoluciones en energía en un rango similar al reportado en la literatura.
- La resolución fue mejor en el PMT XP2020Q (con sensibilidad UV) que con el XP20D0.
- Los cristales de BGO y GSO tienen las peores resoluciones, comparado con la literatura, porque están unidos en un matriz. La probabilidad de que uno de ellos contaminará la medición del otro es alta.

5.7 Comparación de los resultado de Resolución en Energía

En la *Tabla 5.19* Se presentan los valores de resolución en energía obtenida por los PMT y los SiPM.

Cristal Centellador	Energía (KeV)	Resolución en Energía (%)				
		Reportada Teórica	PMT		SiPM	
			XP2020B	XP20D0	Suma	Corregido
NaI(Tl) - 1	511	7	8	7.9	20.3	17.9
	661.66	5.6	7.5	7.1	20.1	17.7
NaI(Tl) - 2	511	7	8.5	8	21.8	19.1
	661.66	5.6	7	7.4	21.6	18.9
CsI: Tl	511	10	12	12.1	17.1	15.4
	661.66	8.7	9.5	9.8	14	12.6
CsI: Tl	511	10	13	12.8	14.2	12.7
	661.66	8.7	9.8	9.7	13.7	12.33
LaBr ₃ (Ce)	511	3.6	3.5	*	11.5	10.35
	661.66	3.2	3	*	9.7	8.73
Pr:LuAG	511	6.7	7	*	*	*
	661.66	5	5.2	*	*	*
BaF ₂	511	15.5	16.1	*	*	*
	661.66	13.7	14.6	*	*	*
GSO	511	12	18	17.8	20.8	18.5
	661.66	10	13.1	12.9	19.7	17.6
LYSO	511	20	9.9	11.1	11.8	10.62
	661.66	10	9.5	10.9	10	9
BGO	511	16	21	20.2	21.2	19.08
	661.66	12	17.3	17.9	18.9	17.01
LFS-7	511	12	16.1	16.8	27.8	25
	661.66	10	14.3	15.4	18.1	16.3
LFS-3	511	12	15.9	16.3	28.9	26
	661.66	10	14.1	15	17.8	16.1
MLS-1	511	20	21	24.8	18.6	16.7
	661.66	16	20.3	19.9	18.4	16.6
MLS-2	511	20	21	22.6	21	18.5
	661.66	16	19	18.9	19.9	16.5
MLS-3	511	20	21.1	25.1	18.9	18.8
	661.66	16	17.5	19.8	17.5	17.2

Tabla 3.25: Tabla comparativa de resoluciones..

Observaciones:

- Se tienen cristales emisores cuyo pico máximo de emisión está en el UV, por lo que no pudieron ser medidos con los SiPM ni con el PMT XP20D0.
- Las resoluciones con el PMT son mejores que con los SiPM.
- Las resoluciones para cristales “grandes” son peores en el SiPM que cuando se miden en los PMT.

6. Conclusiones Generales

- Se caracterizó el HPGe mediante 3 curvas de eficiencia multienergía para 3 posiciones diferentes, las cuales fueron corregidas por tiempo muerto y apilamiento.
- Se determinó la concentración de actividad, volumétrica (Bq/cc) y másica (Bq/g) de cada cristal centellador.
- Se midieron la resolución en energía para los cristales, con tres detectores distintos: un PMT sensible a la luz visible y al UV, otro únicamente sensible al rango visible, y SiPM sensible al rango visible.
- Con los PMT se obtuvieron resoluciones en energía coherentes con los valores reportados en la literatura.
- Con los SiPM la resolución en energía es peor debido al tamaño del sensor. Se mejoró la resolución en energía al corregir la ganancia en el fichero de datos de la salida de cada canal del SiPM, con el fin de utilizar en un futuro próximo sensores más grandes compuestos de múltiples canales.

Bibliografía Capítulo 5

¹ Kozlov, et all. LFS-3 new radiation hard scintillator for electromagnetic calorimeters. Instrumentation and Detectors (physics.ins-det). Dic. 2009.

² Menge, Peter. Performance of Large Brilliance380 (lanthanum bromide) scintillators. Presented at Sorma XI, Ann Arbor MI. May, 2006. Saint-Gobain. Pág. 11.