

# Desarrollo de un equipo de espectroscopía de altas energías mediante un procesamiento analógico y digital

N. García

Instituts d'Estudis Espacials de Catalunya,

---

## Resumen

En las siguientes secciones se presenta una explicación del Proyecto de Final de Carrera (PFC) que se está realizando en el Institut d'Estudis Espacials de Catalunya. Primeramente una breve explicación de los motivos por los cuales se ha llevado a cabo este proyecto y cuales son sus objetivos. A continuación se detalla el trabajo realizado hasta la fecha en hardware y software. Al final se explica el estado actual del PFC.

---

## 1. Introducción

El Institut d'Estudis Espacials de Catalunya (IEEC) como miembro del consorcio internacional GRI ha participado en la elaboración de una propuesta de misión espacial presentada a la ESA para el programa 2015-2025. La misión que lleva por nombre Gamma Ray Imager (GRI) tiene por objeto el estudio de las emisiones de fuentes cosmológicas en el rango energético de 200 keV a 1300 keV.

El detector propuesto para el GRI estará formado por un material de estado sólido semiconductor. Se han considerado dos posibilidades en cuanto al material del detector: Ge (Germanio) y CdTe/CdZnTe (Telurio de Cadmio y Telurio de Cadmio-Zinc). Cada uno de ellos tiene sus ventajas y desventajas. Por ejemplo, el Ge da una mejor resolución mientras que el CdTe/CdZnTe permite operar el detector a temperatura ambiente debido a la elevada energía entre la banda de conducción y la de valencia (1,44 eV y 4,4 eV para CdTe y CdZnTe respectivamente).

Tanto el CdTe como el CdZnTe son buenos materiales para la detección de rayos gamma. La alta densidad ( $\sim 5.8 \text{ g/cm}^3$ ) y el elevado número atómico de sus componentes ( $Z_{\text{Cd}}=48$ ,  $Z_{\text{Te}}=52$ ,  $Z_{\text{Zn}}=30$ ) le confieren una alta eficiencia para la detección de rayos gamma. No obstante, la resolución energética es notablemente degradada debido a las pérdidas de carga eléctrica causada por las pobres propiedades de transportabilidad del material.

Con objeto de estudiar la viabilidad del CdTe/CZT como base para el desarrollo del detector de GRI, en el IEEC se han comenzado a realizar estudios tanto teóricos como prácticos. Dentro de este marco de investigación y desarrollo se embarca el Proyecto de Final de Carrera (PFC) aquí explicado.

Más concretamente este PFC tiene como objeto desarrollar un equipo de espectroscopia, basado en un detector de CdTe, en versión analógica y digital para comparar las respectivas ventajas y desventajas de las dos versiones.

Por equipo de espectroscopia se entiende el detector en sí más unos módulos que pueden ser electrónica o bien software para obtener un espectro en tiempo real.

## 2. Los bloques del equipo de espectroscopia

Teniendo en mente que el objetivo es realizar espectroscopia es necesario ver que se entiende por este término y cuales son los bloques que forman dicho equipo.

Por equipo de espectroscopia se entiende el dispositivo capaz de medir la energía y el número de fotones procedentes de una fuente. En este caso interesa medir fotones con energía dentro de la banda X y gamma. En esta región las técnicas que deben usarse para acceder a la energía del fotones está fundamentada en el tipo de interacción radiación-materia. Cuando un fotón de alta energía interacciona con el material de un

semiconductor se producen pares electrón hueco en el material y la energía del fotón es convertida en carga mediante una serie de procesos. Es posible relacionar la carga producida en el semiconductor con la energía del fotón incidente y normalmente esta relación es lineal.

Un equipo está formado por el material semiconductor, un preamplificador de carga, un amplificador conformador y un analizador multicanal. El detector es el material semiconductor más el preamplificador acoplado a él, por lo tanto en la Figura 1 se trata de los dos primeros bloques.

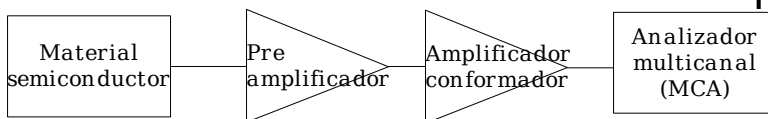


Figura 1: bloques de un equipo de espectroscopia

Los fotones que llegan al detector excitan una cantidad de cargas eléctricas en el material semiconductor proporcional a la energía de dicho fotón. En los casos donde esta constante de proporcionalidad sea mayor, el ruido inherente a la deposición del fotón será menor ya que habrá un mayor promediado. Estas cargas que son electrones y huecos son arrastradas por el fuerte campo eléctrico normalmente de centenas o miles de voltios. En realidad el material semiconductor esta dividido en dos partes, una dopada P y la otra N, o lo que es lo mismo un diodo.

Las cargas libres en la banda de conducción del semiconductor son conducidas por el campo eléctrico aplicado hacia el ánodo y cátodo del diodo (polarización inversa). En el siguiente paso el preamplificador de carga recoge estos portadores. Este dispositivo activo es un amplificador de corriente a tensión con una respuesta mucho más lenta que la duración del pulso. Normalmente puede tratarse de un simple amplificador de transresistencia de orden uno, es decir con una respuesta impulsional exponencial. Debido a que la respuesta impulsional es mucho más larga que la del pulso entrante, a efectos prácticos la convolución de la respuesta impulsional con la corriente de entrada da como resultado la integración de la corriente eléctrica en el tiempo, y eso es precisamente la carga eléctrica que contiene dicho pulso. Por lo tanto a la salida del preamplificador tendremos un pulso con amplitud proporcional a la carga. Entonces ¿cuál es la forma del pulso? Debido a que la

respuesta impulsional es mucho más larga, se puede aproximar el pulso de entrada como una delta de Dirac y por lo tanto a la salida tendremos la respuesta impulsional del mismo preamplificador; una exponencial en el caso de ser de primer orden.

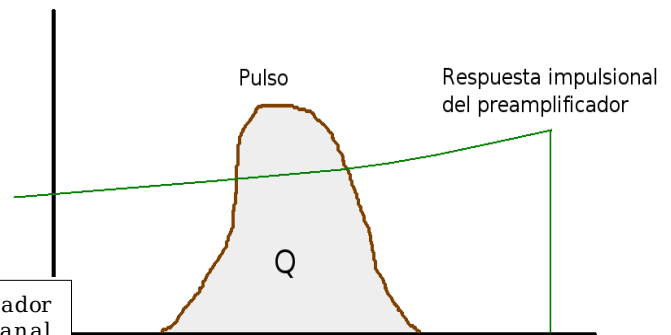


Figura 2

El pulso exponencial pasa al amplificador conformador que le da una forma adecuada para la detección de su amplitud y también reduce sustancialmente el ruido.

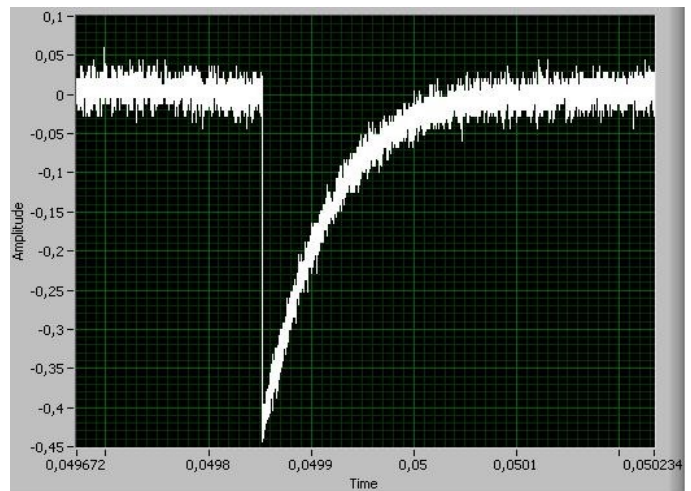


Figura 3: pulso exponencial proveniente del preamplificador

Las formas más estándares son el pulso quasigaussiano y el triangular. El requisito para que la amplitud continúe siendo proporcional a la energía del fotón es que la respuesta impulsional del amplificador sea pequeña en comparación con la duración de la exponencial y no deje pasar la componente continua.

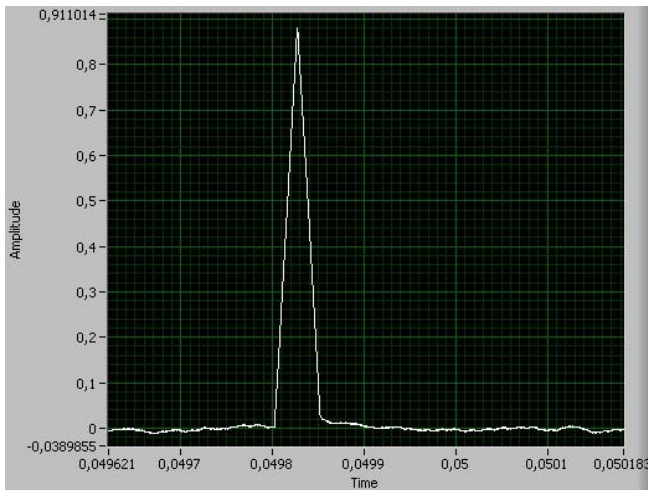


Figura 4: pulso conformado con forma triangular

Finalmente la señal de todos los pulsos conformados, es enviada al analizador multicanal (MCA). Su función consiste en clasificar los pulsos en función de su amplitud en un cierto número de intervalos o canales. Cuanto mayor sea el número de canales mayor será la resolución y también, mayor será el tiempo necesario para obtener un espectro. Sin embargo hay un límite en cuanto al número útil de canales que viene dado por el ruido del detector. A partir de ese número, por más que añadamos canales no se mejora la resolución y sí se incrementa el tiempo para conseguir el espectro.

En la interfaz gráfica programada en LabView (Figura 5) se muestra en tiempo real el número de cuentas por canal. Como la amplitud del pulso es proporcional a la energía del fotón, en realidad el gráfico representa una clasificación en energías de los fotones incidentes en el detector, es decir, la estimación del espectro de la fuente. Para finalmente obtener la mejor estimación del espectro de emisión de la fuente es necesario hacer la deconvolución por la función de respuesta del detector. Aunque en el caso de nuestro detector (un diodo de CdTe) puede considerarse que tenemos directamente el espectro. El paso final es calibrar cual es la constante de proporcionalidad entre la tensión final y la

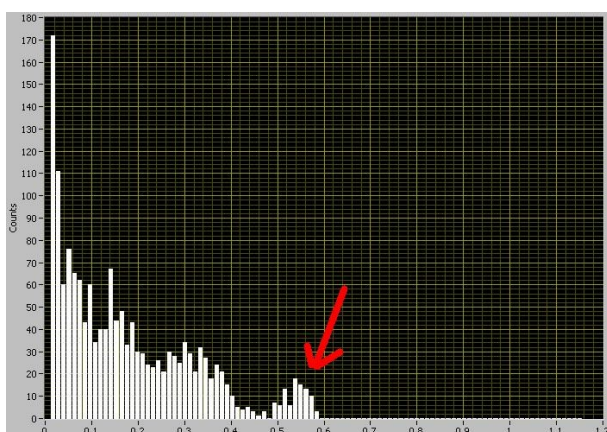


Figura 5: espectro con pocos canales

energía del fotón. Normalmente se calibra usando una fuente monocromática en el laboratorio evitando así tener que deducir todas las ganancias de tensión presentes en el sistema.

### 3. El detector

Se dispone de un detector modelo XR-100T-CdTe de la empresa Amptek. Está constituido por un cristal de CdTe de 3 mm x 3 mm x 1 mm. Desde el punto de vista electrónico este cristal es un diodo Schottky.

El cristal de CdTe es enfriado mediante una pequeña celula peltier termoeléctrica a una temperatura de  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Esto permite reducir la corriente de fuga, reducir el ruido y mejorar las propiedades del transporte de carga. Los electrodos del diodo están fabricado en Platino (Pt), el ánodo y el cátodo en Indio (In). La barrera Schottky debido a los contactos y al material semiconductor es In/p-CdTe y resulta suficientemente alta para prevenir la inyección de huecos que son la mayoría de portadores en un semiconductor dopado P. Esto repercute en que la corriente de fuga se reduce enormemente debido al uso de contactos Schottky en vez de contactos óhmicos. Y por lo tanto el detector con contactos Schottky puede ser polarizado con una tensión mayor, en este modelo de 400 V exactamente.

El detector XR-100T-CdTe de Amptek puede adquirirse junto con el módulo PX2T-CdTe y el MCA8000A, o el módulo PX4.

En el primer caso el PX2T-CdTe está formado por un amplificador conformador analógico con constante de tiempo fija de  $3\text{ }\mu\text{s}$  y pulso quasigaussiano. El pulso conformado tiene que ir a un MCA que también debe adquirirse por separado y una vez es procesado puede transferirse mediante puerto USB a un ordenador. El software para el ordenador viene dado junto al MCA. Además el módulo PX2T también incluye la fuente de alta tensión para el diodo y las de baja tensión ajustadas para alimentar la electrónica y célula peltier del detector.

El módulo PX4 contiene un amplificador conformador digital con constante de tiempo configurable entre  $0,330$  y  $45\text{ }\mu\text{s}$ . A diferencia del módulo PX2T-CdTe dispone de un MCA incorporado. Además, en este caso como el PX2T-CdTe, incluye las fuentes de

alta y baja tensión necesarias para el detector.

#### 4. El procesamiento analógico

Cómo el objetivo no es comprar todo un equipo de espectroscopia entero si no ensamblarlo y desarrollarlo por partes, hemos comprado diferentes módulos. El detector XR-100T-CdTe antes mencionado, la fuente de baja tensión, la de alta tensión, el amplificador conformador y el MCA. Además como solo se dispone de una fuente de baja tensión es necesario un circuito que suministre varias bajas tensiones a partir de una sola. El cable que une el módulo PX2T-CdTe con el XR-100-CdTE dispone de un conector LEMO en un extremo y un dB-9 en el otro. Por lo tanto se ha creado un circuito y un cable que a partir de una fuente de baja tensión y otra de alta tensión, provee al XR-100-CdTE de un cable de nueve hilos con conector dB-9 y todas las tensiones adecuadas.

El amplificador de espectroscopia o conformador adquirido es el modelo 673 de de Ortec y el MCA es el 926-USB también de Ortec. El amplificador conformador es de constante de tiempo configurable entre 0,26 y 6  $\mu$ s y pulso quasigaussiano. Además también incluye selector de puerta que permite omitir trozos de señal provenientes del preamplificador que no son adecuados.

El MCA dispone de 8000 canales, contadores de hasta 2 billones de cuentas y software Maestro-32 para mostrar el espectro por pantalla y controlar el hardware.

#### 5. El procesamiento digital

Analogamente a la adquisición del equipo analógico se ha construido otro digital.

El detector (material semiconductor más preamplificador) es el mismo que en el caso analógico. A partir de aquí se digitaliza la señal procedente del preamplificador mediante el uso de un osciloscopio. Existen en el mercado otros sistemas de adquisición mucho mejores, sin embargo no están disponibles en los laboratorios del IEEC.

El osciloscopio muestrea por bloques a velocidades de hasta 1 Gsample/s con

bloques de hasta 10 millones de puntos. Sin embargo este método tiene dos inconvenientes: la resolución es de 8 bits y podría suponer una pérdida de calidad de la señal, y los tiempos muertos entre bloque y bloque son mucho mayores que el tiempo de muestreo.

El primer problema de ruido no es tan grave como parece porque el ruido de cuantificación está un orden de magnitud por debajo del ruido blanco y gaussiano. Además debido a la amplitud del ruido gaussiano, el ruido es independiente de muestra a muestra y por lo tanto es blanco espectralmente, lo que permite reducirlo en la misma proporción que el ruido blanco y gaussiano y por lo tanto nunca ser superior.

El segundo problema es importante ya que decreta muchísimo la eficiencia del detector debido a que se pierden muchos fotones. No hay ninguna solución técnica para solventar este problema que no sea usando otro aparato de adquisición de señal. En el mercado se pueden encontrar fácilmente pero lógicamente tiene un precio.

Mediante un cable USB se transmiten los bloques muestreados hacia un ordenador portátil equipado con WinXP y LabView. Todos los bloques a partir de aquí están implementados con el entorno y lenguaje de programación LabView. Este lenguaje de programación de alto nivel permite controlar el osciloscopio (u otros instrumentos) fácilmente.

Hay 3 bloques principales programados en LabView que se ejecutan por separado y concurrentemente: el módulo de adquisición de la señal, el filtro conformador y el MCA. Cada uno de estos bloques tiene a su vez sus subbloques. En el procesamiento digital no es necesaria una amplificación como se entiende en el procesamiento analógico ya que no se añaden ruidos y por lo tanto la relación señal a ruido permanece constante. Por lo que hablaremos únicamente de filtro conformador.

Para el filtro conformador se ha implementado la posibilidad de crear pulsos gaussianos o triangulares que son enviados posteriormente al módulo MCA.

En el MCA se ha implementado un discriminador que si detecta dos picos en el mismo pulso los descarta para evitar la superposición y por lo tanto un errónea

estimación de sus amplitudes.

Estos tres módulos acarrear un procesado de la señal importante y si no se va con cuidado puede suponer un cuello de botella mayor que el propio osciloscopio. Aún siendo LabView un lenguaje de muy alto nivel y por lo tanto poco eficiente, es necesario encontrar métodos para hacer el código lo más rápido posible.

## 6. Módulos avanzados

Existen otros módulos implementados en el equipo analógico y en el equipo digital para mejorar la resolución y otros parámetros en la detección.

El amplificador conformador analógico modelo 673 dispone de dos funciones: el cancelador de polo y cero y el restaurador de la línea de base (BLR). En el caso digital está implementado el cancelador pero no el BLR y se está trabajando en la implementación del BLR.

El cancelador tiene como objetivo solucionar un problema práctico del diseño teórico del detector. Los pulsos provenientes del preamplificador vistos por el amplificador conformador tienen que ser escalones. Como no son escalones sino lentas exponenciales la respuesta del pulso conformador no es totalmente ideal. Apareciendo una pequeña cola negativa en el pulso conformado que puede en el siguiente pulso tergiversar la lectura de su amplitud.

En el caso digital el cancelador es un filtro lineal que elimina el polo introducido por la exponencial en el dominio de la transformada Z mediante un cero en el mismo lugar, y añade un polo cerca del círculo unidad. A efectos prácticos se traslada el polo cerca del círculo de radio 1 en la transformada Z para convertir la exponencial en un pulso todavía más longevo (un escalón). En el caso analógico el cancelador es una resistencia variable añadida al circuito. Debido a que hay que poner un cero donde está el polo, es necesario conocer la posición del polo, o lo que es lo mismo, la constante de decaimiento de los pulsos exponenciales. De esta forma podemos variar el filtro digital o el valor de la resistencia en el caso analógico. En el caso digital de interés sería

como poder estimar el tiempo de decaimiento de los pulsos preamplificados de una forma automática y fiable.

El BLR (Base Line Restorator) se encarga de eliminar el efecto causado por el filtro conformador que elimina la continua. Debido a que vienen pulsos con una cierta cadencia hay una cierta continua intrínseca a la señal, el filtro conformador es AC y por lo tanto baja el "nivel 0" de los pulsos para conservar la ausencia de DC. De ser constante esta bajada simplemente habría que añadir una tensión constante, pero como esta bajada del nivel 0 depende de la cadencia de los pulsos, es variable. En realidad lo que hay que hacer es restaurar la componente de muy baja frecuencia eliminada. En el caso del modelo 673 dicha posibilidad está implementada. No es así en el detector digital aunque de momento no es necesario ya que la cadencia de los pulsos no es alta y por lo tanto prácticamente no hay componente continua. De interés para el caso digital sería pensar en diferentes técnicas para implementar el BLR.

En el caso del MCA digital se ha implementado un calculador automático de ruido. Esto es útil para no haber de configurar manualmente el umbral de ruido del analizador multicanal. El funcionamiento se basa en calcular el histograma de las muestras de un bloque. Debido al ruido gaussiano que perdura la mayor parte del tiempo, este histograma tendrá una morfología gaussiana distorsionada ligeramente por los pulsos. Como los pulsos tienen un efecto principal en la parte del histograma que tiene su mismo signo, se puede eliminar esta parte y usar la de signo contrario para estimar la desviación típica de ruido, en otras palabras el valor eficaz (o también la potencia) del ruido gaussiano. Aunque dicho funcionamiento funciona bien cuando hay menos pulsos que ruido en el tiempo. Ya que si es el caso contrario entonces el histograma puede presentarse demasiado distorsionado. De interés sería ver hasta que cadencias de pulsos es esta técnica aplicable.

En electrónica nuclear acostumbra a haber también un Pulse Shape Discriminator (PSD) o un Rise Time Discriminator (RTD). Estos módulos optativos miden algunos parámetros de los pulsos para ver si es necesario descartarlo, necesitan corrección o son correctos. Por ejemplo una utilidad muy corriente es compensar la pérdida de ganancia debido a que la corriente

proveniente del material semiconductor tiene un tiempo. Debido a esto la exponencial que entra al amplificador conformador no tiene una subida instantánea, lo que se traduce en una ganancia menor del amplificador conformador. Como esta pérdida depende del tiempo del pulso original, averiguando este tiempo se puede recompensar dicha ganancia.

Hay otras posibilidades para un PSD o un RTD, como por ejemplo que los pulsos demasiado duraderos en tiempo implican que son fotones que no han depositado toda su energía y por lo tanto hay que descartarlos. De todas formas nuestro sistema analógico no lo tiene implementado. Aunque sí está pensado como una posibilidad en el sistema digital.

El sistema digital presenta una ventaja y es que no tiene unas limitaciones aparentes en cuanto a procesado de señal. Son de interés las siguiente mejoras:

- Un RTD que use un filtro conformador bipolar con dos cruces por cero.
- Un pulso conformador FIR óptimo en términos de ruido.

## **7. Comparativa del sistema analógico y el sistema digital**

Puesto que disponemos de dos procesados diferentes de la señal es posible realizar una comparación entre los dos sistemas: ver donde están los puntos fuertes y flojos de cada uno, las limitaciones técnicas, las partes críticas de cada sistema y los costes relacionados con cada parte. En definitiva estudiar los detalles, ventajas e inconvenientes de los dos equipos de espectroscopia dado un mismo material semiconductor.

Hasta no hace mucho los detectores han sido implementados con tecnología analógica por varias razones:

1. La tecnología digital no estaba suficientemente madura a un precio asequible.
2. La tecnología analógica tiene mucha experiencia atrás que avala que los sistemas empleados funcionan.
3. La amortización del diseño de estos sistemas.

Sin embargo los fabricantes empiezan a crear detectores de los dos tipos, siendo los digitales en general superiores y más caros.

Hasta ahora el esquema digital desarrollado es en realidad un tipo específico de equipo digital. Normalmente los fabricantes ofrecen un equipo de espectroscopia digital implementada en hardware o con algún dispositivo orientado a procesado como un DSP (Digital Signal Processor) que permiten operar en tiempo real, a velocidades de muestreo mayores y con mayor cantidad de bits. Lógicamente el desarrollo de estos tipos de equipos digitales es más costoso y largo, aunque sus prestaciones son superiores al equipo realizado mediante software de alto nivel y un osciloscopio. Por lo tanto la comparativa analógico/digital es una comparativa con un sistema digital concreto. A pesar de esto algunas de los resultados o conclusiones podrían ser extrapolables a cualquier sistema digital. De querer aproximar nuestro equipo digital hacia el equipo más profesional vendido por los fabricantes la primera pieza a sustituir es el osciloscopio que limita drásticamente la eficiencia del detector. En cuanto al software, éste puede ser mejorado en cuanto a velocidad de procesado mediante la programación en un lenguaje de más bajo nivel o mediante una mayor optimización del código en LabView.

Para comprobar el funcionamiento de los dos sistemas, se han aplicado fuentes radiactivas de baja intensidad como el Cs137 en el laboratorio del Departamento de Física de la Universitat Autònoma de Barcelona. De momento no está claro si el sistema digital desarrollado funciona perfectamente. Por esta razón también se están haciendo pruebas con el equipo analógico y así poder comparar el equipo digital con la maquinaria analógica.

Un aspecto muy atractivo del detector digital es la facilidad para incorporar nuevos módulos de procesado de señal y la mejora de alguno de ellos que supondrían grandes dificultades en el mundo analógico. Por esta razón junto con la comparativa de los dos sistemas, el segundo objetivo es el desarrollo y mejora de alguno(s) de los módulos digitales.

## **8. Trabajo en proceso**

Actualmente existe un cuello de botella en el procesado digital. El MCA programado en LabView resulta ser incluso más lento que el osciloscopio lo cual no parece normal. Se

están contemplando varias alternativas. Una es probar de compilar el código y no solamente precompilarlo (algo parecido a lo que sucede con JAVA). Otra posibilidad es mejorar el diseño del código u optimizarlo.

También nos encontramos en fase de comprobar que todo el sistema analógico funciona correctamente. Para esto vamos a ir a medir una fuente radiactiva y comprobar

su espectro. Lo mismo sucede con el actual sistema digital que no muestra los teóricos picos en frecuencia producidas por las fuentes monocromáticas de baja radiación.

Después de estas tareas, el objetivo es implementar alguno de los módulos avanzados y a ser posible introducir alguna mejora nueva.