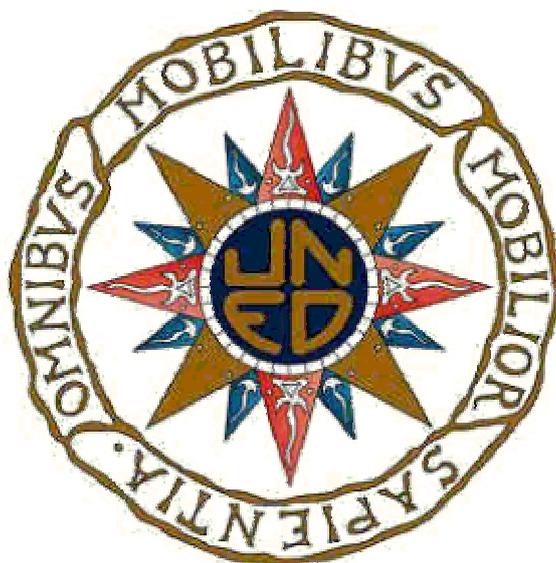


Tesis Doctoral

Espectroscopia alfa-beta-gamma con detectores phoswich mediante discriminación digital de forma de pulsos y su aplicación a la determinación de coincidencias.

Memoria presentada por:
Roberto de la Fuente Álvarez
Licenciado en Ciencias Físicas
Para optar al grado de Doctor en Ciencias Físicas.

UNED, Facultad de Ciencias, Dpto. de Física de los Materiales



León, 2008

Tesis elaborada en el:
Departamento de Química y Física Aplicada.
Universidad de León.



Espectroscopia alfa-beta-gamma con detectores phoswich mediante discriminación digital de forma de pulsos y su aplicación a la determinación de coincidencias.

Roberto de la Fuente Álvarez
Licenciado en Ciencias Físicas

Director: Dr. Benito de Celis Carrillo
Departamento de Química y Física Aplicada
Universidad de León

Tutora UNED: Dra. Amalia Willliart Torres
Departamento de Física de los Materiales
Universidad Nacional de Educación a Distancia.

Agradecimientos.

- Al profesor Dr. de Celis Carrillo, auténtico artífice de esta tesis. Por su estupenda dirección, ayuda y apoyo incondicional durante estos años. Gracias Benito.
- A la profesora Dra. Williard Torres, por sus orientaciones y correcciones, todas ellas muy acertadas.
- Al Consejo de Seguridad Nuclear, por la subvención que realiza al laboratorio de radiactividad ambiental de la Universidad de León. Los equipos usados en la presente tesis se deben a esta ayuda.
- Quiero mencionar a mis padres, familia y amigos. Especialmente a los de Villapún (Palencia). A Sveta.

Índice General

1. <u>Introducción</u>	11
2. <u>Objetivos y desarrollo de un sistema digital de detección de impulsos utilizando detectores phoswich</u>	15
3. <u>Determinación de actividades. Técnicas de coincidencias.</u>	19
3.1. <u>Determinación de Actividades</u>	19
3.1.1. <u>Método Relativo.</u>	19
3.1.2. <u>Método Absoluto por eficiencias.</u>	20
3.1.3. <u>Método Absoluto por coincidencias.</u>	21
3.2. <u>Técnicas de coincidencias.</u>	24
3.3. <u>Aplicación de las técnicas de coincidencias.</u>	29
4. <u>Equipos empleados</u>	33
4.1. <u>Características generales de materiales centelleadores.</u>	33
4.2. <u>Características electrónicas de los impulsos a la salida del fotomultiplicador.</u>	40
4.3. <u>Detectores de radiación</u>	45
4.4. <u>Fuentes radiactivas utilizadas</u>	50
5. <u>Desarrollo del sistema digital de espectrometría $\alpha/\beta/\gamma$.</u>	55
5.1. <u>Consideraciones previas.</u>	55
5.2. <u>Desarrollo y características del software.</u>	57
5.3. <u>El filtro de señales</u>	63
6. <u>Desarrollo del sistema digital para coincidencias.</u>	71
6.1. <u>Método punto-tangente</u>	74
6.2. <u>Método punto-punto</u>	88
7. <u>Aplicaciones de la técnica.</u>	91
7.1. <u>Determinación de productos de fisión.</u>	91
7.1.1. <u>Características generales de los productos de fisión.</u>	91
7.1.2. <u>Determinación del ^{137}Cs por coincidencia CI-rayo X.</u>	92
7.2. <u>Determinación de transuránidos por medio de coincidencias α-γ y α-rayo X.</u>	103
7.2.1. <u>Características generales de los transuránidos.</u>	103
7.2.2. <u>Determinación de ^{241}Am por coincidencia α-rayo X.</u>	105
7.3. <u>Uso de detectores LEGe. Coincidencia α-γ en ^{241}Am con dos cadenas.</u>	122

7.3.1. <u>Características de los equipos utilizados.</u>	122
7.3.2. <u>Identificación de coincidencias usando dos cadenas.</u>	124
7.3.3. <u>Determinación de la actividad absoluta del ^{241}Am.</u>	125
7.3.4. <u>Comparación de LIDs</u>	129
7.3.5. <u>Discusión del procedimiento utilizado.</u>	130
7.4. <u>Discusión de las aplicaciones realizadas y posibles líneas futuras de investigación</u>	132
8. <u>Conclusiones y Logros.</u>	139
9. <u>Bibliografía</u>	145
10. <u>Anexo 1: Código del programa</u>	149
10.1. <u>Formulario principal</u>	149
10.2. <u>Formulario "EnergyDialog"</u>	191
10.3. <u>Formulario "FilterDialog"</u>	193
10.4. <u>Módulo1 (Declaración de variables globales)</u>	197
11. <u>Anexo 2 - Artículo: "Coincidence measurements in $\alpha/\beta/\gamma$ spectrometry with phoswich detectors using digital pulse shape discrimination analysis".</u>	205
12. <u>Anexo 3 -Artículo: "Low level radioactivity measurements with phoswich detectors using coincident techniques and digital pulse processing analysis"</u>	211

Índice de Figuras

Figura 1 Esquema simplificado de un detector Phoswich	12
Figura 2 Esquema de una medida de coincidencia beta-gamma	26
Figura 3 Esquema de detección con sistema de anticoincidencias	27
Figura 4 ARSA-Equipo del Pacific N. National Laboratory	29
Figura 5 Circuito de un fotomultiplicador ideal.	40
Figura 6 Señales en el ánodo para las dos constantes de tiempo.	43
Figura 7 Esquema y datos técnicos del Phoswich empleado.	48
Figura 8 Phoswich en su castillete de Pb.	49
Figura 9 Apariencia del "API Panel"	57
Figura 10 Apariencia del programa en desarrollo inicial	58
Figura 11 Apariencia del programa en desarrollo avanzado	59
Figura 12 Menú del filtro para señales de NaI, CaF ₂ o tipo plástico.	64
Figura 13 Señal del ZnS(Ag). Partícula alfa.	65
Figura 14 Señal del plástico. Partícula beta	65
Figura 15 Señal del CaF ₂ . Partícula beta o rayo X.	66
Figura 16 Señal del NaI. Partícula gamma.	66
Figura 17 Gráfico explicativo del "tiempo de subida"	67
Figura 18 Distribución de los valores "Height/Up" y "Up"	69
Figura 19 Suma algebraica de dos señales, Gamma+Beta	72
Figura 20 Coincidencia Beta-Gamma	73
Figura 21 Señales del plástico sin tratar	75
Figura 22 Señales del NaI sin tratar	75
Figura 23 Señales del CaF ₂ sin tratar	76
Figura 24 Señales del plástico con igual nivel de referencia.	76
Figura 25 Señales del NaI con igual nivel de referencia	77
Figura 26 Señales del CaF ₂ con igual nivel de referencia	77
Figura 27 Señales del plástico con igual altura	78
Figura 28 Señales del NaI con igual altura	78
Figura 29 Señales del CaF ₂ con igual altura	79
Figura 30 Señal del plástico de referencia	80
Figura 31 Señal del NaI de referencia	80
Figura 32 Señal del CaF ₂ de referencia	81
Figura 33 Suma señales Plast+NaI con pesos 9 y 0,6.	82
Figura 34 Suma señales Plast+ CaF ₂ con pesos 9 y 0,6	82
Figura 35 Esquema gráfico del método punto-tangente.	83
Figura 36 Deconvolución obtenida en la prueba.	85
Figura 37 Deconvolución aceptable N°1.	86
Figura 38 Deconvolución aceptable N°2.	86
Figura 39 Deconvolución inaceptable 1.	87
Figura 40 Deconvolución inaceptable 2.	87
Figura 41 Esquema gráfico del método punto-punto	88
Figura 42 Deconvolución con método punto-punto.	90
Figura 43 Espectro de ¹⁰⁹ Cd para calibración en energías.	93
Figura 44 Espectro simple del patrón de ¹³⁷ Cs	94
Figura 45 Señal de ruido en el patrón de ¹³⁷ Cs	95
Figura 46 Señal de tipo CaF ₂ por Rayos X de 32 keV del ¹³⁷ Cs	95
Figura 47 Señal de tipo NaI por gammas de 661 keV del ¹³⁷ Cs	96
Figura 48 Señal de tipo plástico por CI y betas del ¹³⁷ Cs	96
Figura 49 Señal de tipo coincidencia en el patrón del ¹³⁷ Cs	97
Figura 50 Espectro de coincidencias del patrón de ¹³⁷ Cs	98
Figura 51 Diagrama 2D de coincidencias del patrón de ¹³⁷ Cs	99
Figura 52 Patrón de ²⁴¹ Am disuelto en líquido centelleador.	106
Figura 53 Centelleador líquido colocado sobre el Phoswich.	107
Figura 54 Espectro ²⁴¹ Am	108
Figura 55 Espectro de la Figura 54 aumentado x10	109
Figura 56 Ruido en espectro ²⁴¹ Am.	110

Figura 57 Partícula alfa (centelleo líquido) en espectro ^{241}Am .	110
Figura 58 Coincidencia alfa-gamma(CaF_2) en espectro ^{241}Am .	111
Figura 59 Gamma (NaI) en el espectro ^{241}Am .	111
Figura 60 Coincidencia centelleador líquido-gamma en el NaI	112
Figura 61 Deconv. de coincidencia CaF_2 -centelleador líquido en ^{241}Am .	113
Figura 62 Deconv. de coincidencia NaI-centelleador líquido en ^{241}Am .	113
Figura 63 Señal de ruido tomada erróneamente como coincidencia.	114
Figura 64 Señal no coincidente deconvolucionada por error.	114
Figura 65 Gráfico 2D preliminar de coincidencias del ^{241}Am	115
Figura 66 Gráfico 2D mejorado de coincidencias del ^{241}Am	116
Figura 67 Espectro mejorado de deconvolución del ^{241}Am	117
Figura 68 Espectro de deconvolución del ^{241}Am	118
Figura 69 Gráfico 2D mejorado de coincidencias del ^{241}Am	119
Figura 70 Detector centelleador (abajo) y LEGe (arriba).	123
Figura 71 Espectro de ^{109}Cd con detector LEGe	124
Figura 72 Dos canales. Señales coincidentes	125
Figura 73 Dos canales. Señales no coincidentes	126
Figura 74 Dos canales. Espectro de ^{241}Am	126
Figura 75 Dos canales. Diagrama de 2D	127

Índice de Tablas

Tabla 1 Características de algunos materiales centelleadores	34
Tabla 2 Características del NaI (TI)	35
Tabla 3 Características del CaF_2 (Eu)	36
Tabla 4 Características del $\text{ZnS}(\text{Ag})$	36
Tabla 5 Características de los centelleadores plásticos.	37
Tabla 6 Esquema de desintegración del ^{241}Am	51
Tabla 7 Esquema de desintegración del ^{90}Sr	52
Tabla 8 Esquema de desintegración del ^{109}Cd	53
Tabla 9 Esquema de desintegración del ^{137}Cs	54

1. Introducción

La detección eficiente de muy bajos niveles de radiactividad en presencia de radiación de fondo exige técnicas especiales de medida. En muchas de estas situaciones se han venido utilizado detectores tipo phoswich, por ejemplo en la determinación de sustancias radiactivas en radioecología o durante el procesamiento de residuos radioactivos^{9.1,9.2,9.3}, identificación de productos de fisión procedentes de pruebas nucleares^{9.4}, medidas de neutrones y partículas cargadas en aplicaciones aeroespaciales y radioastronomía^{9.5}, identificación de radioisótopos in vivo en medicina^{9.6}, etc.

El detector phoswich^{9.7} está constituido por dos o más centelleadores independientes acoplados a un único fotomultiplicador. Seleccionando los centelleadores apropiados el sistema puede ser utilizado para medir simultáneamente diferentes tipos de radiación: alfa, beta, gamma o incluso neutrones. Una típica configuración consiste en un centelleador grueso destinado a la detección de gammas (típicamente NaI), acoplado ópticamente a otro cristal más delgado con buen rendimiento lumínico frente a betas o alfas (generalmente CaF₂). En algunos casos se completa el equipo con una lámina fina de ZnS destinada específicamente a centellear al paso de alfas. Puede verse un esquema de este equipo en la Figura 1.

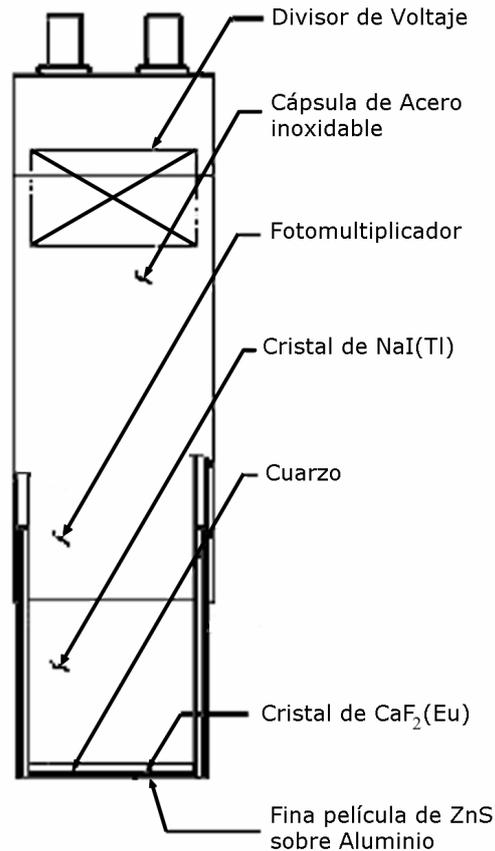


Figura 1 Esquema simplificado de un detector Phoswich

Los cristales centelleadores unidos al mismo fotomultiplicador operan como un detector de bajo fondo para la radiación de interés. El cristal delgado dispone de suficiente espesor para absorber la radiación a medir, mientras que el detector grueso actúa como un blindaje en anticoincidencias. Si la radiación no es totalmente absorbida en el detector delgado y deja parte de su energía en el centelleador grueso el impulso es rechazado. Igualmente si un impulso del exterior atraviesa el detector grueso y también deja parte de su energía en el delgado por efecto Compton, el impulso se rechaza.

Los detectores phoswich pueden diseñarse y fabricarse para aplicaciones específicas. En muchas de ellas se han empleado cristales de NaI(Tl)/CsI(Tl) o de CaF₂(Eu)/NaI(Tl). El primero se puede utilizar para detectar rayos X y rayos Gamma de baja energía con una supresión muy elevada de fondo. El otro detecta eficientemente partículas alfa o beta en el centelleador de CaF₂, debido a ser un cristal inerte y no higroscópico que puede operar sin ventana. Los cristales centelleadores tienen diferentes tiempos de luminiscencia y al estar acoplados al mismo fotomultiplicador los impulsos electrónicos producidos pueden distinguirse por su forma, con un mayor tiempo de subida para aquellos impulsos producidos por cristales con tiempo de luminiscencia más largo. La electrónica utilizada debe ser capaz de discernir los impulsos procedentes de cada centelleador, analizar cada una de ellas y admitir o rechazar la señal del detector principal según se requiera.

La diferenciación de las señales electrónicas producidas por diferentes tipos de radiación en distintos centelleadores puede realizarse mediante procedimientos analógicos o digitales. La disponibilidad reciente de tarjetas digitalizadoras de alta velocidad de muestreo, superiores normalmente a 10 Msamples/s con 12 bits de resolución, ofrece la ventaja de una alta fiabilidad y versatilidad, pudiéndose prescindir del resto de equipos electrónicos analógicos que se utilizan normalmente en medidas nucleares: amplificadores, analizadores multicanales, discriminadores de forma de pulso,

unidades de coincidencia, retrasadores de impulsos, analizadores monocanales, etc. Se requiere únicamente para el procesamiento del impulso el detector phoswich y un ordenador^{9.8,9.9}. La digitalización total de la señal y la identificación exacta del tiempo de detección ofrece también múltiples posibilidades, no contempladas cuando se trabaja con equipos analógicos convencionales, con los que sólo se suele determinar la amplitud del impulso.

A partir de la forma del impulso puede identificarse el tipo de partícula (alfa, beta o gamma), lo cual es conocido por su acrónimo en Inglés: (*Pulse Shape Discrimination Analysis, PSD*). También es posible la eliminación de ruido electrónico, determinación de la línea base en impulsos apilados, identificación precisa del momento en que se detecta la partícula (time stamping) y una mayor velocidad en el procesamiento de los impulsos, reduciendo consecuentemente el tiempo muerto del equipo y posibilitando la realización de medidas de muestras más activas. Así pues, esta técnica PSD es muy útil tanto para medidas de altas como de bajas tasas de recuento (como las muestras de radiactividad ambiental).

2. Objetivos y desarrollo de un sistema digital de detección de impulsos utilizando detectores phoswich

Como se expondrá con mas detalle en el epígrafe 3.3 , buena parte de la idea del desarrollo de la presente tesis doctoral se ha basado en el artículo de J.H.Ely^{9.4} en el que se exponen el procedimiento utilizado para la detección de radiactividad en el aire producida por explosiones atómicas subterráneas. En las conclusiones el autor expone que se requiere un estudio más detallado de las formas de los pulsos para poder estudiar las coincidencias que en principio se intuyen pero que no se llegan realmente a discriminar. Asimismo se sugiere la posibilidad de usar otros materiales centelleadores cuya emisión de luz cree unas señales mas fácilmente discernibles entre si.

De acuerdo con su propuesta, se ha fijado como objetivo establecer pautas para la definitiva distinción de los dos tipos de señales antes reseñados. Para ellos se han realizado los siguientes pasos:

- a) Se desarrolla y se pone a punto un sistema digitalizador de impulsos electrónicos generados por un detector phoswich, utilizando una tarjeta digitalizadora^{9.12} de alta velocidad de muestreo y la realización de un sistema digital de utilización genérica, similar a un analizador multicanal analógico, capaz de ser utilizado por diferentes tipos de detectores:

centelleadores genéricos, phoswichs, germanio, centelleo sólido y líquido, detectores proporcionales, etc. Este período incluye el estudio de las condiciones óptimas para la detección de los impulsos electrónicos generados por diferentes materiales centelleadores y su comportamiento frente a la radiación alfa, beta y gamma. Se realizaron procedimientos como optimización de niveles de disparo, identificación de niveles de ruido, determinación de línea base del impulso, cálculo de alturas, rechazo de impulsos no válidos o fuera de los límites admitidos, etc.

- b) Se aborda la identificación de los diferentes tipos de impulsos electrónicos, correspondientes a distintos centelleadores, de acuerdo con su forma (PSD), lo cual permite el análisis de los diferentes tipos de radiación y la obtención diferenciada de espectros alfa, beta y gamma de una misma muestra que tenga emisión de todas ellas.
- c) Se identifican la forma de las señales suma, producidas por dos partículas que dejan su energía de forma simultánea en los dos cristales del phoswich. En ninguna de las referencias consultadas se dan ejemplos de este tipo de señales. Aquí mostraremos varios tipos, provenientes de diferentes materiales fotoemisores y de distintas energías (amplitudes de señal).

- d) Se desarrollaron filtros automáticos capaces de discernir este tipo concreto de señales compuestas con un alto grado de fiabilidad.
- e) Desarrollamos un algoritmo que permite la deconvolución de la señal suma, obteniendo las dos originales, y con ello la energía estimada de cada una de ellas.
- f) Por último se utiliza esta herramienta software desarrollada en varios casos concretos de muestras radiactivas a estudiar.

3. Determinación de actividades. Técnicas de coincidencias.

3.1. Determinación de Actividades

Para contrastar las técnicas de coincidencias desarrolladas en esta tesis realizaremos algunas medidas de actividades. Expondremos aquí los conceptos básicos en que se basan estas.

3.1.1. Método Relativo.

También llamado método del patrón, es la forma más usada para estimar actividades, y requiere disponer de una fuente de referencia de actividad conocida y con la misma disposición que la muestra. Esto es condición necesaria para que la eficiencia geométrica sea constante. Considerando el caso típico de un emisor gamma, mediremos el área bajo un fotopico determinado en la muestra y en el patrón. La actividad de la muestra (A_x) se calculará como:

$$A_x = \frac{R_x}{R_s} A_s \quad (1)$$

Donde:

R_x = cuentas/s bajo el fotopico en la muestra.

R_s = cuentas/s bajo el fotopico del patrón.

A_s = actividad del patrón.

3.1.2. Método Absoluto por eficiencias.

Si no se dispone de un patrón calibrado del mismo isótopo y geometría que la muestra, se puede estimar la actividad de un emisor gamma considerando la siguiente relación:

$$A = \frac{R_x}{\epsilon_G \epsilon_E Y_g} \quad (2)$$

R_x =cuentas/s bajo el fotopico.

ϵ_G =Eficiencia debida a la geometría, en tanto por uno.

ϵ_E =Eficiencia del detector para la energía de la emisión gamma que genera el fotopico, en tanto por uno.

Y_g = Fracción de la actividad total que genera una emisión gamma de la energía del fotopico seleccionado, en tanto por uno (*branching ratio*). Este dato se toma del esquema de desintegración.

En general se suele agrupar la eficiencia geométrica y energética en una sola, como producto de ambos términos. Así resulta:

$$A = \frac{R_x}{\epsilon \cdot Y_g} \quad (3)$$

Al calcular así la actividad, es fundamental considerar la mínima actividad detectable por encima del fondo. El LID (Límite inferior de detección) se define como la raíz cuadrada del número de cuentas debidas al fondo bajo el fotopico utilizado, dividida por ϵ y la Y_g .

3.1.3. Método Absoluto por coincidencias.

Este método se utiliza en aquellos isótopos que emiten dos o más partículas de forma simultánea. Aunque puede aplicarse a cualquier combinación de ellas, vamos a suponer el caso de un fotón emitido junto con una alfa.

Como ya hemos indicado, la actividad de la muestra puede calcularse solo mediante la detección de las partículas alfa por:

$$A = \frac{R_{\alpha}}{\epsilon_{\alpha} \cdot Y_{\alpha}} \quad (4)$$

Y de la misma forma las gamma:

$$A = \frac{R_{\gamma}}{\epsilon_{\gamma} \cdot Y_{\gamma}} \quad (5)$$

Ahora bien, en el caso de detectar una coincidencia, esto supone que tanto la partícula alfa como el fotón han sido detectados, cada uno por separado, aunque en un periodo muy corto de tiempo. La actividad es en este caso:

$$A = \frac{R_{\text{coinc}}}{\epsilon_{\alpha} \cdot Y_{\alpha} \cdot \epsilon_{\gamma} \cdot Y_{\gamma}} \quad (6)$$

Puede usarse esta última ecuación para prescindir del hecho de conocer las eficiencias ϵ_{α} , ϵ_{γ} y los factores de producción Y_{α} , Y_{γ} por lo que a partir de las ecuaciones (4) (5) y (6) nos resulta:

$$A = \frac{R_\alpha R_\gamma}{R_{\text{coinc}}} \quad (7)$$

Esta relación nos permite determinar la actividad de la fuente sin conocimiento previo de las eficiencias e intensidades de ambas radiaciones.

El error de la medida en el cálculo por dicha fórmula puede estimarse, según Knoll^{9.7}, capítulo 4 sección IV, como:

$$\left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_{R_\alpha}}{R_\alpha}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{R_\gamma}}{R_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{R_{\text{coinc}}}}{R_{\text{coinc}}}\right)^2 \quad (8)$$

y despejando:

$$\sigma_A = A \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{R_\alpha}}{R_\alpha}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{R_\gamma}}{R_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{R_{\text{coinc}}}}{R_{\text{coinc}}}\right)^2} \quad (9)$$

Todos los datos son conocidos, ya que los eventos radiactivos siguen una distribución de Gauss, y la desviación estándar de una tasa de conteo de este tipo es el cociente entre la raíz del número de cuentas y el tiempo:

$$\sigma_R = \frac{\sqrt{N}}{t} \quad (10)$$

En cuanto al LID (Límite inferior de detección) que lleva asociada esta técnica, hay que indicar que es del orden del que tiene el detector gamma individualmente. Si la aplicamos sin fuente radiactiva (midiendo fondo) podremos ver que el número de cuentas alfa es despreciable ($R_\alpha \approx 0$) y lógicamente aún menor el de

coincidencias ($R_{\text{coinc}} \approx 0$). Esto hace que los errores asociados a estas magnitudes sean también muy pequeños, y por lo tanto el único error que es significativo es el producido por el fondo del detector gamma.

En conclusión, el cálculo de actividades por el método absoluto por coincidencias (3.1.3) tiene un LID que es similar al que obtendríamos al hacerlo en igualdad de condiciones por un método absoluto (3.1.2) con un detector gamma de las mismas características. La ventaja como ya hemos indicado es que no es necesario conocer eficiencias ni factores de producción.

Indicar por último que al aplicar una técnica de coincidencias se reduce apreciablemente el fondo del espectro gamma, lo cual hace que se mejore el LID si usamos este espectro para hacer cálculos de actividades por el método absoluto (3.1.2), pero no por el (3.1.3) ya que aquí es necesario un espectro no reducido en su fondo por coincidencias.

3.2. Técnicas de coincidencias.

Un circuito de *coincidencias* es un montaje electrónico con dos o más entradas y una salida. Esta se activa solo cuando en todos y cada uno de los circuitos de entrada se recibe una señal de forma simultánea. Para ser mas precisos, se han de recibir dentro de un intervalo de tiempo llamado "de coincidencia" y que el disparo de su contaje es realizado por la activación de cualquiera de las entradas.

También es posible definir circuitos de *anticoincidencias* en los cuales la salida sólo se activa si una vez disparado el tiempo de coincidencia por una de las entradas, en uno o varios de los otros canales no es detectada actividad.

Estos circuitos se han venido usando de forma profusa en física de partículas desde que *Walther Bothe*^{9,21} en 1924 diseñó un circuito electrónico de tipo AND para conectar dos o más detectores Geiger. Por este y otros trabajos durante las décadas del 20 al 40, *Bothe* recibió en 1954 el premio Nobel de Física "*por su descubrimiento del método de coincidencias y los consecuentes descubrimientos hechos por ello*".

La base estadística del método de coincidencias en el procesado de señales se encuentra en que existe una probabilidad p de que un pulso sea producido por ruido en el detector. Pero si dos detectores con iguales características detectan la señal simultáneamente, entonces la probabilidad de que la causa sea

espuria será p^2 . Como ejemplo, si suponemos $p=0.1$, entonces $p^2=0.01$.

En el caso concreto de pretender la detección de una sola partícula elemental este tipo de montaje (con dos detectores idénticos) no suele ser útil, ya que en la mayoría de los casos las partículas dejan toda su energía en uno solo de los detectores. Si la radiación detectada proviene de un isótopo radiactivo, este inconveniente puede salvarse si su esquema de decaimiento muestra que se emiten dos tipos de partículas de forma que se pueda considerar simultánea.

Uno de los ejemplos más típicos de aplicación del método de coincidencias es el de isótopos con decaimientos beta^{9.10}, cuyo descendiente emite rápidamente una radiación gamma. Uno de los circuitos se dota de un detector de betas (un simple geiger es suficiente) y el otro con un detector gamma. De esta forma se pueden reducir las interferencias que produce el fondo de forma drástica. Ver Figura 2

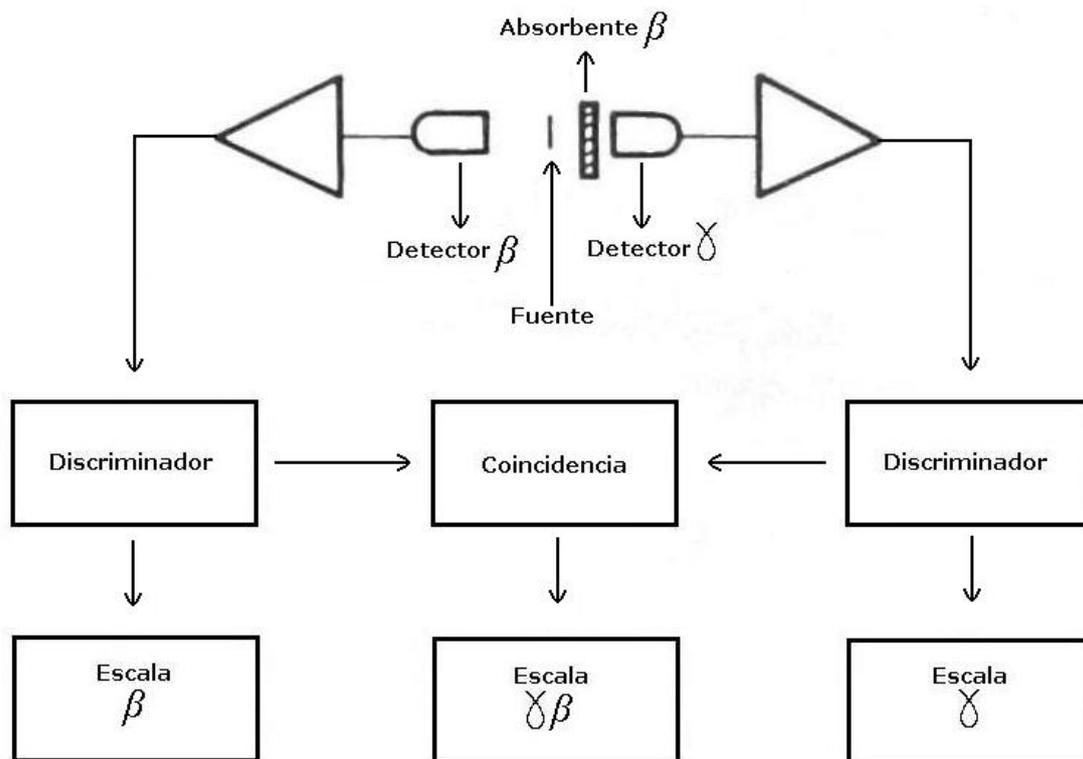


Figura 2 Esquema de una medida de coincidencia beta-gamma

Para reducir el fondo producido por rayos cósmicos o otras radiaciones externas en las medidas de se usa el método de anticoincidencias. Ver Figura 3

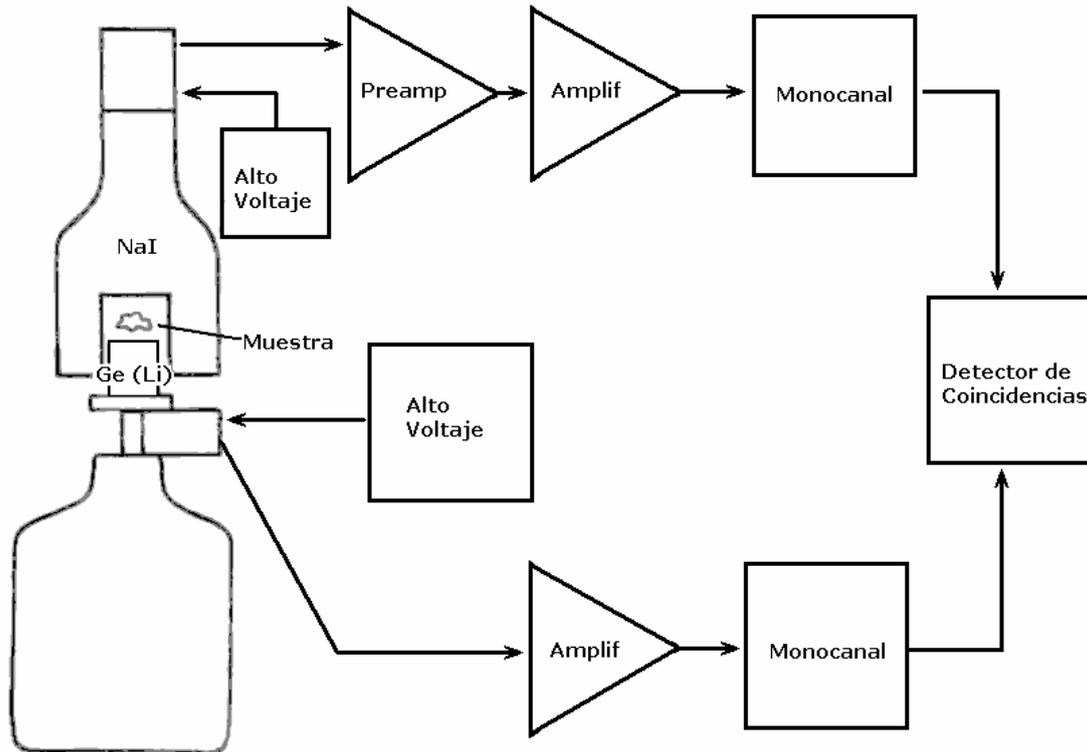


Figura 3 Esquema de detección con sistema de anticoincidencias

Para ello el detector primario se rodea con un detector secundario (o más de uno). La medida del detector primario es aceptada solo cuando no está acompañada por una señal en el secundario. Así puede asegurarse que esta detección se ha producido por la completa absorción de la radiación dentro del primario. Si una radiación externa penetra en el detector, es muy probable que si interacciona con el detector primario también lo haya hecho con el secundario dejando parte de su energía en este, y siendo rechazado dicho impulso. Este montaje tiene como ventaja añadida que se reduce el Compton producido por la fuente en el propio detector y en los materiales del blindaje.

Dichos procedimientos de coincidencias-anticoincidencias se vienen aplicando habitualmente en laboratorios internacionales destinados a la medida precisa de niveles de radiactividad absoluta (ver punto 3.1.3) y también en la detección de productos de fisión gaseosos que escapen a la atmósfera tras pruebas atómicas subterráneas^{9,11}. Recientemente, se ha propuesto la posibilidad de aplicar la técnica de coincidencias a un único detector phoswich^{9,4}, reduciendo significativamente el número de equipos electrónicos utilizados y los inconvenientes asociados con la puesta a punto y sincronización de las diferentes cadenas electrónicas para la detección de las partículas coincidentes. En la aplicación de la técnica de coincidencias con un detector phoswich las señales coincidentes vendrían caracterizadas por un único impulso, suma de los producidos por dos diferentes centelleadores. Dicha técnica simplificaría extraordinariamente el procedimiento de análisis y las necesidades de hardware requeridas, pero exige el desarrollo de un sistema de tratamiento del impulso electrónico capaz de separar de la señal compuesta el tipo de radiación y la energía de los dos impulsos coincidentes que la forman.

3.3. Aplicación de las técnicas de coincidencias.

Entre las muchas aplicaciones que los phoswich han venido desempeñando, vamos a destacar aquí una concreta, el sistema de detección llamado ARSA (Automated Radioxenon Sampler/Analyzer) desarrollado por el Pacific Northwest National Laboratory y es usado para el programa International Monitoring System (IMS), el cual está descrito en el artículo de J.H.Ely^{9,4}. Este equipo se basa en tratar de detectar isótopos del Xenon. Al ser este un gas noble escapa de forma rápida del subsuelo en caso de prueba nuclear subterránea. Las vidas medias de los ^{131m}Xe , ^{131}Xe , ^{133g}Xe y ^{135g}Xe son del orden de días, por lo que un posible aumento en su concentración sería solo explicable por una causa de tipo artificial como serían explosiones por reacciones nucleares en cadena.

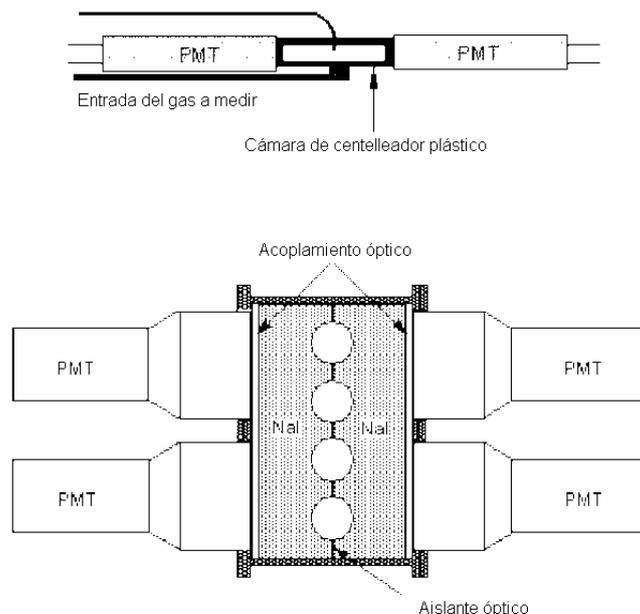


Figura 4 ARSA-Equipo del *Pacific N. National Laboratory*

El ARSA (ver Figura 4) consta de cuatro celdas de plástico centelleador en las que se inyecta el gas a estudiar. Las emisiones beta son detectadas en este centelleador, emitiendo luz que es recogida por dos tubos Fotomultiplicadores (PMT). Estos a su vez están rodeados por cristales de NaI para recoger las emisiones gamma, acoplados a otros cuatro PMT. El conjunto venía trabajando con electrónica analógica, en doble coincidencia (solo se cuentan aquellos eventos recogidos a la vez por los dos PMT del plástico mas otros dos del NaI), por lo que cada contaje de una coincidencia implicaba la detección de señal en cuatro PMT.

Para reducir el número de equipos electrónicos asociados y por ende su mantenimiento, el trabajo descrito desarrolla un método de reconocimiento digital de pulsos (*PSD*). Para ello se añadieron unas láminas de CaF_2 , formando un sistema tipo phoswich. Se añadió a los PMT una tarjeta digitalizadora que enviaba cada impulso recogido a un ordenador que almacenaba los resultados en un archivo, para su posterior lectura y análisis. Este se ha basado en calcular el tiempo (en *ns*) que cada impulso tarda en subir desde el 10% hasta el 90 % de la altura total de cada señal. Estos datos son representados gráficamente en el artículo, y pueden verse claramente dos agrupamientos de datos en función de la energía, cada uno de ellos correspondiente a señales provenientes del NaI y del CaF_2 . El autor razona que las coincidencias se esperarían encontrarlas en las

zonas intermedias entre ambas, y se requeriría de un estudio mas profundo para poder aislarlas.

Así pues, este artículo de J.H.Ely^{9.4} expone las ventajas que supondrá añadir tarjetas digitalizadoras de impulsos a los equipos tradicionales de detección por centelleo, pero concluye que todavía han de mejorarse las técnicas de PSD para poder llegar a extraer toda la información que nos proporcionan. Nuestro trabajo toma como punto de partida esta propuesta y desarrolla las herramientas necesarias para resolver estas y otras cuestiones.

4. Equipos empleados

4.1. Características generales de materiales centelleadores.

Un centelleador es un material capaz de convertir la energía perdida por la radiación ionizante en radiación electromagnética, habitualmente dentro del rango del visible. En la mayoría de las aplicaciones de medida por centelleo las radiaciones ionizantes están en el rango del keV al MeV. Los pulsos de luz emitidos por el material centelleador son detectados por un tubo fotomultiplicador (PMT). El fotocátodo del PMT está situado en la parte posterior de la ventana de entrada y emplea la energía de los fotones incidentes en emitir electrones. Estos son acelerados por un campo eléctrico creado entre diferentes puntos creándose un proceso multiplicativo. El resultado es que cada pulso de luz produce una corriente en el ánodo del PMT que puede ser detectada por un equipo electrónico. La combinación del material que emite pulsos de luz con el PMT es lo que forma un detector de centelleo. Como la intensidad de la luz emitida por el material centelleador (a temperatura constante) es proporcional a la energía cedida por la partícula, la amplitud del pulso es una medida de esta energía. La duración y forma concreta del pulso depende del tipo de radiación, dimensiones y clase del material centelleador y tipo de tubo fotomultiplicador.

Para detectar radiación gamma se necesita que esta tenga una alta probabilidad de dejar su energía en el material. Esto se consigue si la densidad del mismo es alta o con mayor cantidad de material a ser recorrido (grandes dimensiones). Pero a su vez, una vez producido el pulso de luz, este debe llegar al fotocátodo, por lo que el material debe ser transparente a esta luz. Además, ha de llegarse a un compromiso con las dimensiones, ya que en caso de ser el cristal demasiado grande, el pulso de luz es atenuado y el fotocátodo se encontrará a mayor distancia, por lo que la intensidad lumínica que llega será cada vez menor.

Características generales de algunos materiales centelleadores.

Material	Densidad [g/cm ³]	Máximo de emisión [nm]	Constante de decaimiento ⁽¹⁾	Índice de refracción ⁽²⁾	Eficiencia de conversión [%] ⁽³⁾	Higroscópico
NaI(Tl)	3,67	415	0,23 μ s	1,85	100	si
CsI(Tl)	4,51	550	1,0 μ s	1,79	45	ligeramente
CsI(Na)	4,51	420	0,63 μ s	1,84	85	si
CsI(sin dopar)	4,51	315	16 ns	1,95	4-6	ligeramente
CaF(Eu)	3,18	435	0,94 μ s	1,47	50	no
LiI(Eu)	4,08	470	1,4 μ s	1,96	35	si
Li-cristal	2,5-2,7	390-430	60 ns	1,55-1,57	4-6	no
CsF	4,64	390	3-5 ns	1,48	5-7	si
BaF	4,88	310	0,63 μ s	1,50	16	no
GSO(Ce)	6,71	440	30-60 ns	1,85	20-25	no
BGO	7,13	480	0,3 μ s	2,15	15-20	no
CdWO	7,90	470/540	20/5 μ s	2,3	25-30	no

(1) Tiempo medio efectivo de decaimiento para rayos γ .

(2) Para la longitud de onda de la máxima emisión.

(3) Señal de centelleo relativa a temperatura ambiente para rayos γ con un PMT de fotocátodo bialcalino.

Tabla 1 Características de algunos materiales centelleadores

El tiempo de decaimiento de un centelleador se define como el tiempo necesario para que el pulso lumínico retorne a un valor de $1/e$ de su valor máximo. Este valor depende no solo del material, sino

también del tipo de radiación que lo ha producido. Este valor tiene gran importancia en contajes de alta tasa de actividad. En nuestro caso, iremos mas allá de este simple dato, ya que tendremos en cuenta la forma concreta del pulso tanto en su subida como en su decrecimiento.

Propiedades del NaI(Tl)	
Densidad [g/cm ³]	3,67
Punto de fusión [K]	924
Coefficiente de dilatación térmica [K ⁻¹]	47,4 10 ⁻⁶
Plano mineral de ruptura	< 100 >
Dureza (Escala de Mho)	2
Higroscópico	si
Longitud de onda de máxima emisión [nm]	415
Índice de refracción en la máxima emisión	1,85
Tiempo de decaimiento primario [μ s]	0,23
Luminiscencia (tras 6 ms) [%]	0,3-5
Rendimiento lumínico [fotones/MeV γ]	38 10 ³

Tabla 2 Características del NaI (Tl)

El ioduro de sodio dopado con talio, NaI(Tl), es el material más usado como centelleador (ver la Tabla 2). Tiene una alta luminiscencia y una relativamente alta densidad. No solo tiene una buena eficiencia para energías gammas por encima de 100 keV, sino que puede utilizarse en espectrometría de manera más o menos aceptable para rayos X. El hecho de que sea higroscópico (reacciona con el H₂O ambiental volviéndose amarillento y opaco), hace que sea poco usado para radiaciones alfa y beta, aunque puede hacerse usando láminas muy finas de materiales ligeros como el berilio.

Propiedades del CaF₂(Eu)	
Densidad [g/cm ³]	3,18
Punto de fusión [K]	1691
Coefficiente de expansión térmica [K ⁻¹]	19,5 10 ⁻⁶
Plano mineral de ruptura	< 111 >
Dureza (Escala de Mho)	4
Higroscópico	no
Longitud de onda de máxima emisión [nm]	435
Longitud de onda mínima de corte [nm]	395
Índice de refracción para la máxima emisión	1,47
Tiempo de decaimiento primario [μs]	0.94
Luminiscencia (tras 6 ms) [%]	< 0,3
Rendimiento lumínico [fotones/MeV γ]	19 10 ³
Rendimiento fotoeléctrico [% del NaI(Tl)] (para rayos γ)	50

Tabla 3 Características del CaF₂ (Eu)

El fluoruro de calcio dopado con europio (Tabla 3) se emplea en la detección de rayos X y de partículas alfa y beta. Esto es debido a su baja densidad y a que se puede montar sin ningún tipo de lámina protectora al no ser higroscópico.

Propiedades del ZnS(Ag)	
Densidad [g/cm ³]	4,09
Plano mineral de ruptura	policristalino
Longitud de onda de máxima emisión [nm]	450
Índice de refracción para la máxima emisión	2,36
Rendimiento fotoeléctrico [% of NaI(Tl)] (para alfas)	130

Tabla 4 Características del ZnS(Ag)

El sulfuro de zinc dopado con plata (Tabla 4) es uno de los materiales centelleadores para la detección de partículas alfa que

antes comenzó a utilizarse, e incluso hoy en día es todavía uno de los más empleados. Esto es debido a que su emisión de luz para alfas es muy superior a la del NaI. Pero en cambio, solo es posible fabricarlo en forma de polvo policristalino. Al depositarlo sobre una superficie, espesores superiores a $25 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ hacen que éste sea opaco a su propia emisión lumínica, por lo que resulta inútil aumentar el grosor.

Propiedades generales de los centelleadores plásticos.

Densidad [g/cm^3]	1,03
Punto de fusión [K]	350
Coefficiente de expansión térmica [K^{-1}]	$7,8 \cdot 10^{-5}$
Plano mineral de ruptura	ninguno
Longitud de onda de máxima emisión [nm]	375-435
Indice de refracción para la máxima emisión	1,58
Tiempo de decaimiento primario [μs]	1-3
Rendimiento fotoeléctrico [% del NaI(Tl)] (para rayos γ)	25-30

Tabla 5 Características de los centelleadores plásticos.

En cuanto a los plásticos centelleadores (ver Tabla 5), consisten en materiales orgánicos disueltos en un disolvente sobre el que se realiza una polimerización. Debido a sus características mecánicas, pueden ser fácilmente cortados y torneados. Su emisión típica de luz ronda los 400 nm de longitud de onda, muy similar a la de los centelleadores de cristal inorgánico, por lo que se pueden utilizar sin problemas los mismos fotocátodos y tubos fotomultiplicadores que los empleados por estos últimos. La primera característica a destacar es su alta emisión fotónica (en rayos gamma, entre el 25 y 30% superior al NaI). La segunda es el corto tiempo de decaimiento, del orden de los nanosegundos. Esto los hace

especialmente indicados para medidas de altas tasas. La tercera es su baja densidad, por lo que su eficiencia para rayos gamma es muy baja y solo es aceptable para rayos X y partículas alfa y beta.

Los líquidos centelleadores son mezclas de disolventes aromáticos (del tipo del benceno o tolueno) con aditivos con propiedades fluorescentes. Si en su interior pasan radiaciones ionizantes (alfa o beta), estas disipan su energía excitando las nubes electrónicas de los elementos fluorescentes. Estos emiten un pulso de luz que puede ser detectado. Las mezclas también contienen compuestos que ayudan a que la longitud de onda de la luz emitida sea muy similar a la de los sólidos centelleadores (sobre 400 nm), por lo que en este caso también pueden utilizarse los mismos fotocátodos. Los equipos comerciales de centelleo líquido suelen constar de dos tubos fotomultiplicadores a los que se acopla un circuito de coincidencia, de forma que solo se contabilicen los eventos que proporcionen un pulso simultáneo en ambos detectores.

Al estar disuelta la muestra en el propio elemento centelleador, las eficiencias geométricas típicas para emisiones alfa y beta de alta energía son del 100%. En emisiones beta de baja energía (caso del Tritio), este valor puede reducirse hasta al 30%. El tiempo de decaimiento, es muy similar a la de los plásticos orgánicos, del orden de los nanosegundos. Existen líquidos centelleadores cuyas propiedades abarcan las necesidades de cada medida a realizar. Desde los de propósito general (ver ref. 9.14) hasta los más

modernos con bajo fondo, alta eficiencia de contaje, baja turbidez y menor reactividad a los viales (ver ref. 9.16). Incluso hay algunos que muestran diferentes decaimientos fluorescentes para las radiaciones alfa y beta, por lo que se pueden distinguir desintegraciones de estos dos tipos disueltas en la misma muestra (ver ref. 9.15).

4.2. Características electrónicas de los impulsos a la salida del fotomultiplicador.

Es conveniente una somera explicación de la formación de los pulsos que se obtienen en la salida del tubo fotomultiplicador. Como podemos encontrar en la referencia 9.7, la forma del pulso de voltaje que se obtiene en el ánodo del tubo no solo depende de las características del material centelleador, sino también de las de la electrónica del mismo. Un modelo del circuito del ánodo puede ser el recogido en la Figura 5.

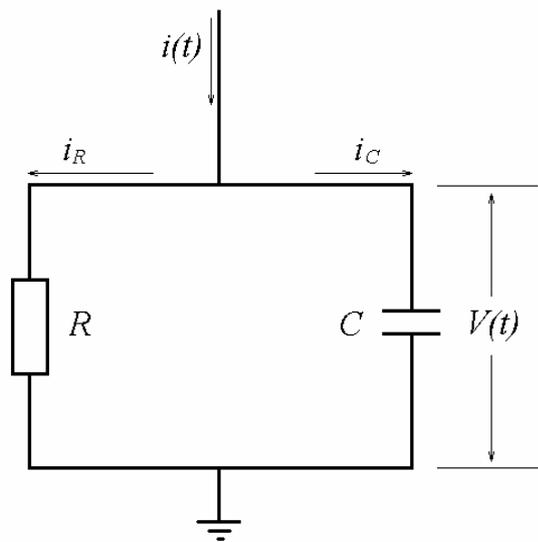


Figura 5 Circuito de un fotomultiplicador ideal.

La capacidad C aúna las contribuciones a este parámetro del ánodo del propio tubo, del cable de conexión e incluso la de entrada del circuito de preamplificación a la que estuviese conectado. La resistencia R está formada por las que pudiese tener el propio ánodo en su constitución y por la impedancia del cable. La intensidad que

llega al ánodo esta formada por los electrones generados en el tubo por la luz del centelleador, y por tanto sigue una función exponencial decreciente de la forma:

$$i(t) = i_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (11)$$

Donde λ es la constante de decaimiento luminiscente del centelleador. La intensidad inicial i_0 puede ser expresada en función de la carga total que produce la señal completa:

$$Q = \int_0^{\infty} i(t)dt = i_0 \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{i_0}{\lambda} \Rightarrow i_0 = \lambda Q \quad (12)$$

y por tanto:

$$i(t) = \lambda Q e^{-\lambda t} \quad (13)$$

Si además consideramos que la corriente ha de dividirse en dos, por el paralelo entre la resistencia y la capacidad:

$$i(t) = i_C + i_R = C \frac{dV(t)}{dt} + \frac{V(t)}{R} \quad (14)$$

Resulta una ecuación diferencial cuya solución para la condición inicial $V(0)=0$ es:

$$V(t) = \frac{1}{\lambda - \theta} \cdot \frac{\lambda Q}{C} \cdot (e^{-\theta t} - e^{-\lambda t}) \quad (15)$$

Donde hemos denotado $\theta = \frac{1}{RC}$ como la inversa de la constante de tiempo del tubo fotomultiplicador. Dependiendo de cómo se elijan las características de este, podremos tener dos casos

límite que pasaremos a estudiar. Lógicamente la señal obtenida en el laboratorio es una combinación de ambas:

- a) Caso 1: Constante de tiempo larga. En este caso la constante de tiempo del fototubo es mucho mayor que el tiempo de decaimiento del centelleador. Así: $\theta \ll \lambda$, y la solución a la ecuación diferencial será:

$$V(t) \cong \frac{Q}{C} (e^{-\theta t} - e^{-\lambda t}) \quad (16)$$

La representación gráfica de esta puede verse en la Figura 6. La gran mayoría de los circuitos de los tubos fotomultiplicadores eligen este tipo de salida, ya que la amplitud máxima del pulso es mayor (Q/C) y se reducen las interferencias del ruido. Tiene el inconveniente de que para tasas de contaje altas pueden producirse apilamientos en las largas colas de decaimiento.

- b) Caso 2: Constante de tiempo corta. En este caso se fija la constante de tiempo en el ánodo pequeña respecto al tiempo de decaimiento del centelleador. Es decir : $\theta \gg \lambda$, y la solución es:

$$V(t) = \frac{\lambda}{\theta} \frac{Q}{C} (e^{-\lambda t} - e^{-\theta t}) \quad (17)$$

El pulso, como puede verse también en la Figura 6, es ahora de mucha menos duración, por lo que es adecuado para obtener menos apilamientos en tasas de recuento altas. Tiene por desventaja que la amplitud máxima es mas

pequeña que en el caso anterior ($\lambda Q/\theta C$), y por lo tanto el posible ruido afectará mas a la forma del pulso.

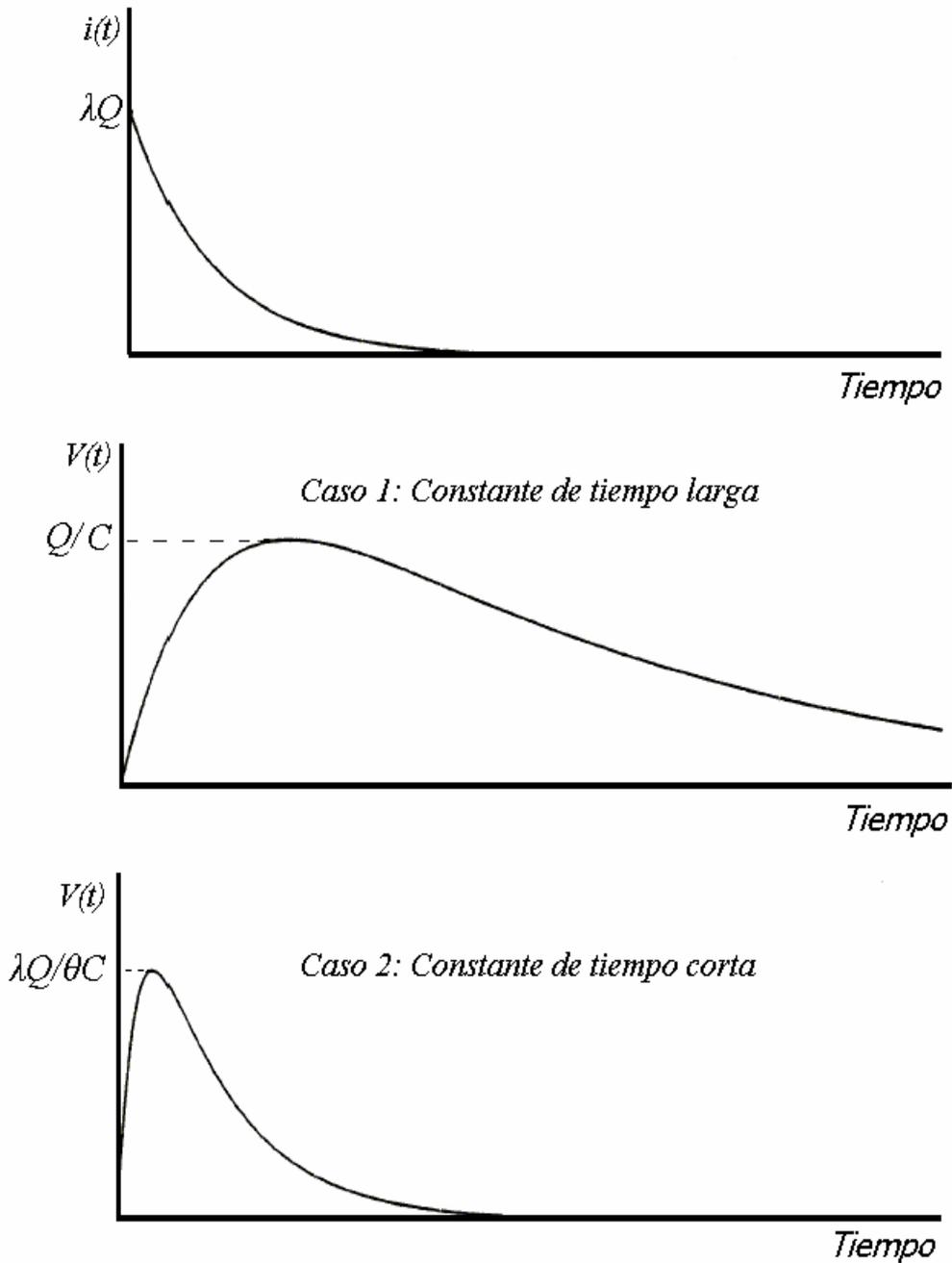


Figura 6 Señales en el ánodo para las dos constantes de tiempo.

En nuestro caso se está utilizando una constante de tiempo larga por lo que la *ecuación 16* para $\theta \ll \lambda$ y tiempos cortos se reduce a:

$$V(t) \cong \frac{Q}{C} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (18)$$

con una constante de subida λ igual a la constante de decaimiento de la luz característica de cada centelleador

4.3. Detectores de radiación

El laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidad de León trabaja en colaboración con el Consejo de Seguridad Nuclear en la determinación de radiactividad de muestras ambientales, proyecto REM, Red de Estaciones de Muestreo, y en diversos programas y acuerdos relacionados con el estudio de niveles de radiactividad en el entorno de instalaciones nucleares, Plan de Vigilancia Radiológica Ambiental en la Central Nuclear de Sta. M^a del Garoña, PVRAIN. Para la realización de estos trabajos dispone de equipos detectores de alta eficiencia y resolución (Germanios-HP y Si para espectroscopia gamma y de rayos X), detectores de centelleo sólido (NaI, plástico, SZn), centelleo líquido, contadores proporcionales y detectores phoswich (CaF₂/NaI), así como un laboratorio completo de radioquímica para análisis químicos de muestras.

Para el tratamiento digital de los impulsos electrónicos generados por el detector se ha elegido una tarjeta digitalizadora de la firma *AlazarTech*. Sus características^{9.12} principales son: 2 puertos de entrada independientes de medida, escaneados con resolución de 12 bits a un máximo de 50 MSamples/s, rango entre ± 40 mV y ± 20 V y una memoria de 128 Kbytes por canal.

Analicemos estas respecto a las características necesarias para la adquisición de señales procedentes de un centelleador. Las

dos entradas serán útiles para conectar dos cadenas distintas de detección y hacer estudios de coincidencias/anticoincidencias. Los 12 bits de resolución hacen que la altura de cada impulso pueda ser definida hasta en $2^{12}=4096$ canales. Esto es de sobra suficiente incluso para utilizarla en detectores con mucha mayor resolución energética, como son los de semiconductores (germanios). Los *50 Msamples/s* hacen que el tiempo de muestreo sea de $0,02 \mu\text{s}$, que basta para delimitar la forma de las señales teniendo en cuenta que estas suelen ser del orden de varios μs . En concreto, para una señal de $5 \mu\text{s}$, podremos digitalizarla en 250 canales. El rango de voltajes ($\pm 40 \text{ mV}$ hasta $\pm 20 \text{ V}$) es también adecuado. La característica de los 128 Kbytes por canal haría que pudiésemos almacenar de forma continua datos de hasta 500 señales de 256 muestreos cada una de ellas. En nuestro caso no lo usaremos hasta este límite, ya que cada impulso detectado y almacenado en tan solo 256 muestreos será analizado individualmente por nuestro programa, para seguidamente poner a cero la memoria del canal para una nueva detección.

En cuanto a los detectores, se ha utilizado un phoswich compuesto por centelleador de NaI(Tl) de $3 \times 3''$ ($76,2 \times 76,2 \text{ mm}$) para las gammas y un $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ de $3 \times 0,040''$ ($76,2 \times 1,016 \text{ mm}$) para la detección de partículas beta.

También se dispone de un detector de ZnS(Ag) (1mm) para detección de alfas y con dos plásticos centelleadores de grosores 3 mm y 0,5 mm respectivamente destinados a recoger betas.

Previamente a la utilización de la tarjeta digitalizadora se realizó un estudio de las características de los diferentes centelleadores disponibles, acoplándolos por separado al tubo fotomultiplicador, con el fin de evaluar las tensiones de polarización idóneas para la identificación de la radiación buscada, tamaño de impulsos obtenidos, etc.

Los datos técnicos del phoswich se recogen en la Figura 7.

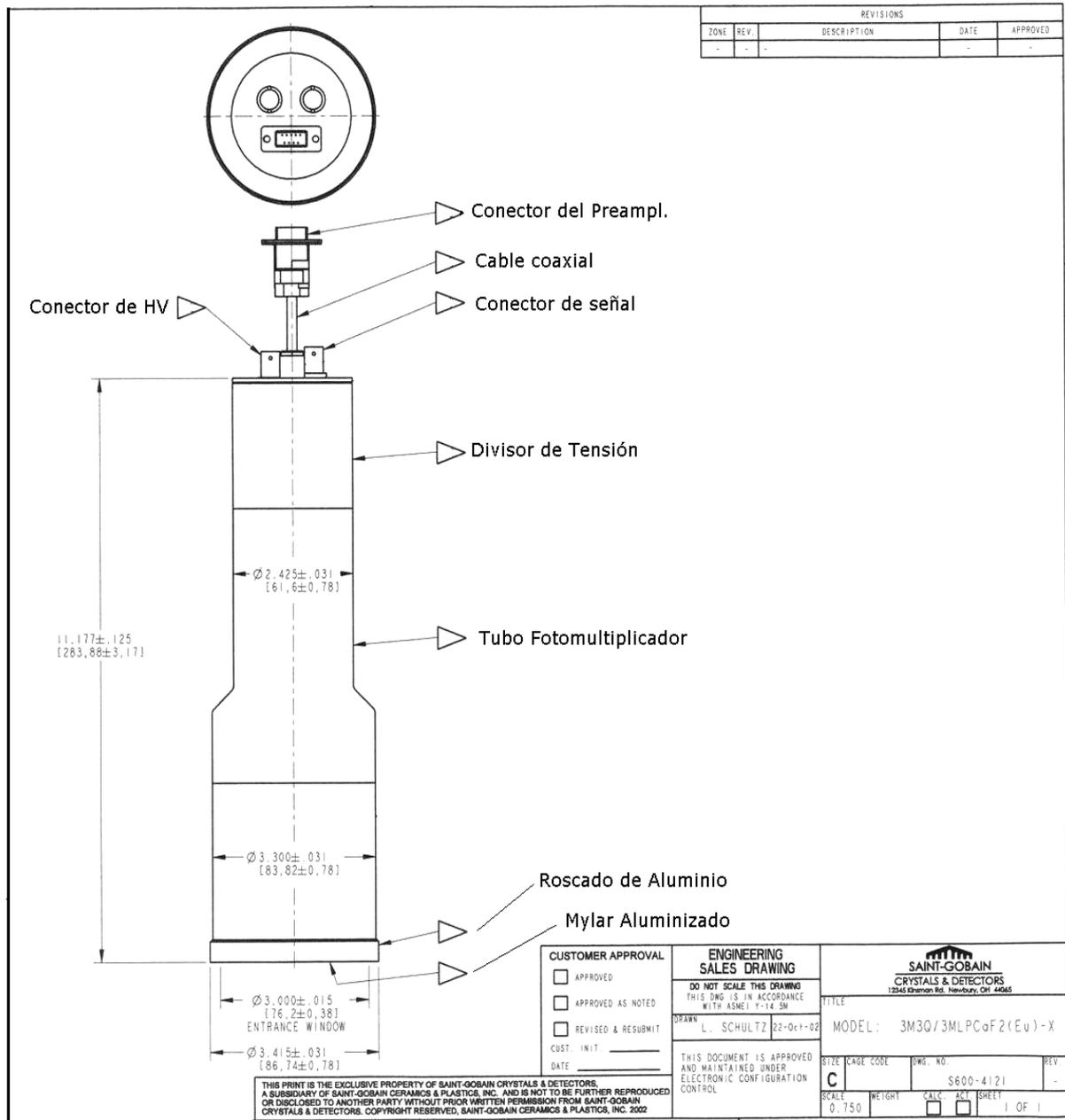


Figura 7 Esquema y datos técnicos del Phoswich empleado.

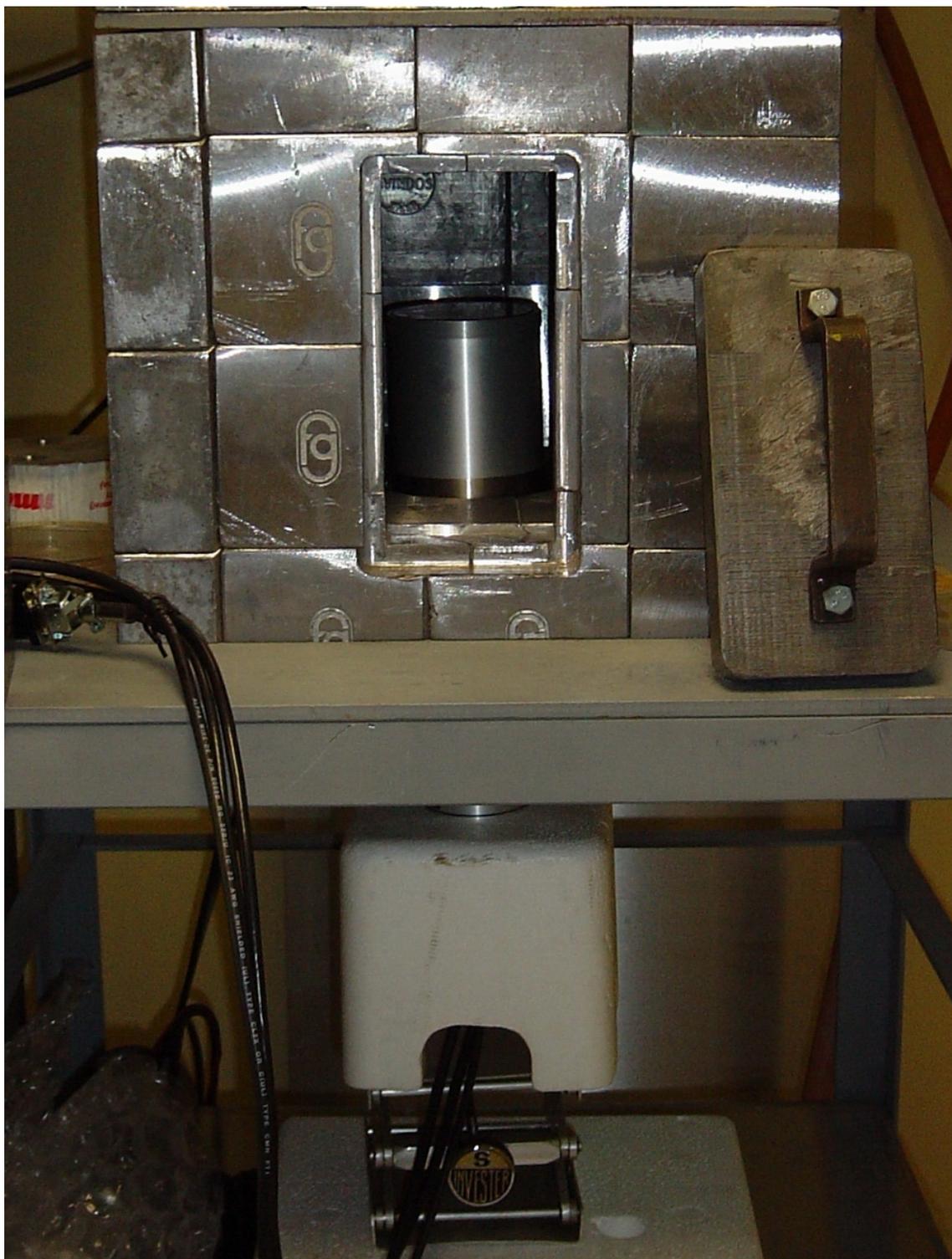


Figura 8 Phoswich en su castillete de Pb.

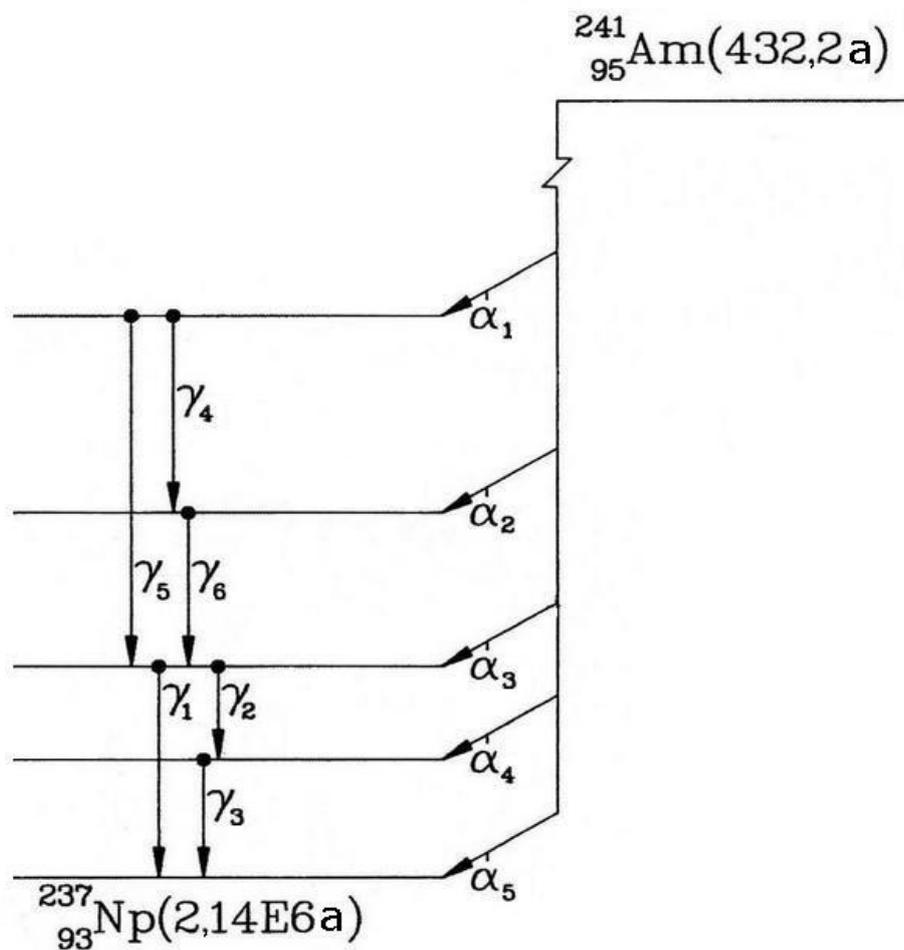
4.4. Fuentes radiactivas utilizadas

Para el estudio del comportamiento del detector phoswich ante diferentes tipos de radiación se dispuso de varios patrones radiactivos de características y actividades conocidas.

- ^{241}Am (ver Tabla 6 y ref. 9.19) para alfas.
- ^{90}Sr (ver Tabla 7) para las betas
- ^{109}Cd (ver Tabla 8 y ref.9.18) para gammas
- ^{137}Cs (ver Tabla 9 y ref.9.17) para gammas.

Las actividades se exponen en cada aplicación (apartado 7).

Como emisor alfa se utilizó una fuente de ^{241}Am de 169 Bq obtenida mediante evaporación de varias gotas de una disolución patrón de actividad conocida depositadas sobre una plancheta de acero inoxidable para reducir cualquier tipo de autoabsorción en la propia muestra. En posteriores análisis con centelleadores líquidos se utilizó la misma disolución patrón previamente disuelta en líquido centelleador contenida en una cápsula petri de vidrio para permitir la transmisión de luz. El esquema de desintegración del ^{241}Am con sus principales energías, intensidades y coincidencias es el siguiente:



Radiación	Y (intensidad %)	Energía media (keV)
γ_1	35,7	59
γ_2	2	26
γ_3	0,1	33
α_1	1,4	5388
α_2	12	5443
α_3	85	5486
α_4	0,2	5512
α_5	0,3	5544
L(α + β +...)	62	13-20

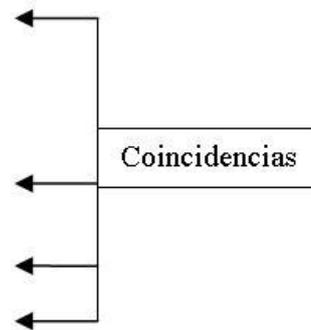
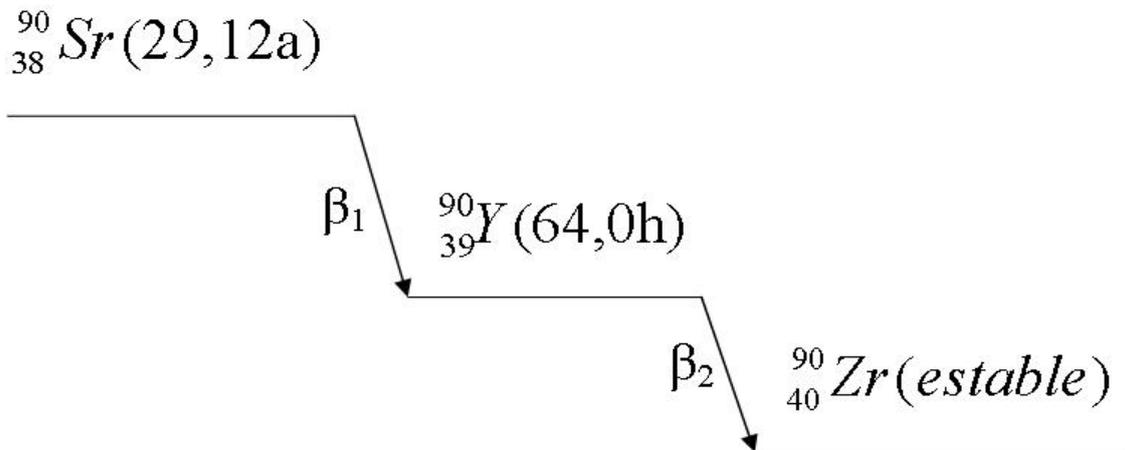


Tabla 6 Esquema de desintegración del ^{241}Am

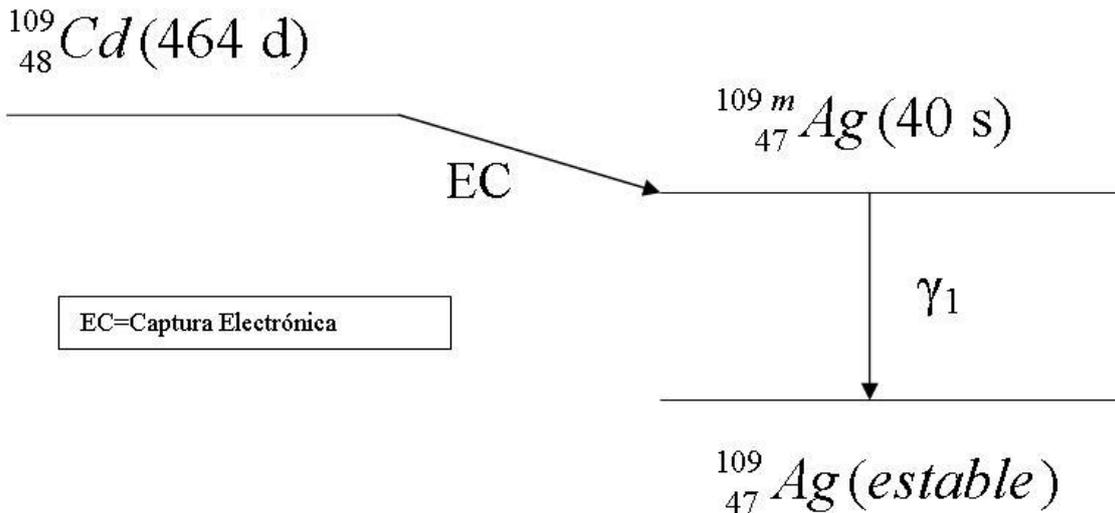
Como emisor beta se utilizó una fuente de ^{90}Sr en equilibrio con su descendiente ^{90}Y , obtenida igualmente mediante evaporación de varias gotas de una disolución patrón de actividad conocida sobre una plancheta de acero inoxidable. Su esquema de desintegración no ofrece ningún tipo de coincidencia significativa.



Radiación	Y (intensidad %)	Energía media (keV)
β_1^-	100	196
β_2^-	100	934

Tabla 7 Esquema de desintegración del ^{90}Sr

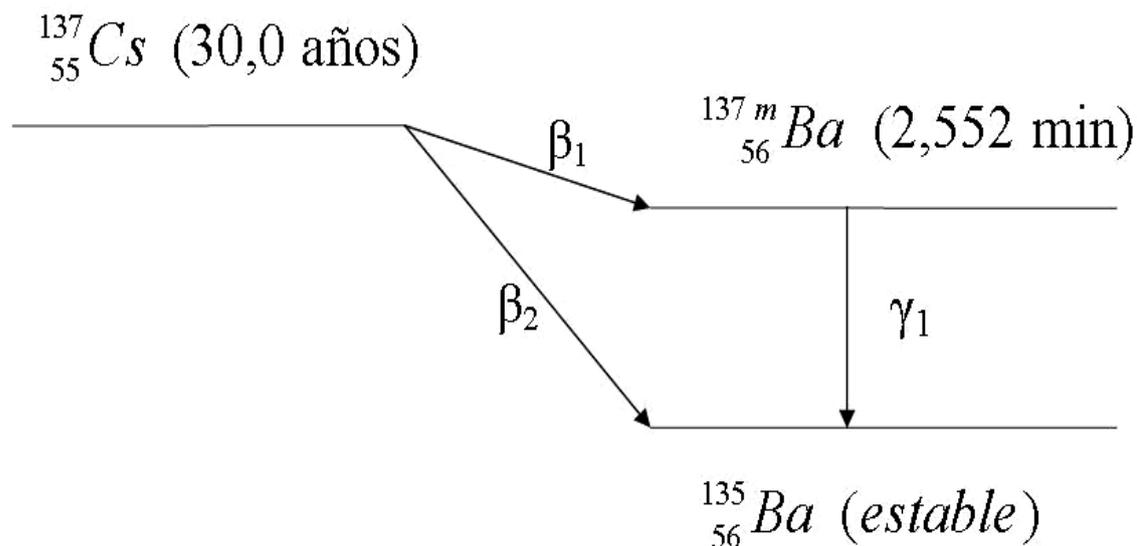
Para la calibración a bajas energías (0-100 keV) se empleó una fuente de ^{109}Cd que dispone de intensas emisiones a 22 y 88 keV.



Radiación	Y (intensidad %)	Energía (keV)
γ_1	3,6	88
K(α + β +...)	113	22-25

Tabla 8 Esquema de desintegración del ^{109}Cd

Como emisor gamma se empleó el radioisótopo ^{137}Cs . La fuente consistía en un papel de filtro conteniendo varias gotas de una disolución radiactiva de este elemento llevada a sequedad. El pequeño grosor del papel de filtro permite identificar también los electrones de conversión interna emitidos. Las características del esquema de desintegración del ^{137}Cs son:



Radiación	Y (intensidad %)	Energía (keV)
β_1^-	94,6	173
β_2^-	5,40	424
γ_1	89,8	662
CI-K	8,3	624
CI-L	1,5	655
K(α + β +...)	6	32

← Coincidencia

Tabla 9 Esquema de desintegración del ^{137}Cs

5. Desarrollo del sistema digital de espectrometría $\alpha/\beta/\gamma$.

5.1. Consideraciones previas.

Como anteriormente se ha señalado, el análisis realizado por el *Pacific Northwest Laboratory*^{9.4} se realizó grabando en archivos secuenciales los datos de cada una de las señales recibidas. Esto tiene dos claros inconvenientes:

a) Tener que terminar el proceso con un número de medidas predeterminado para poder realizar el estudio.

b) El proceso de acceso a un archivo residente en el disco duro y escritura en el mismo es muy lento en comparación con la grabación en la RAM. Esto hace que el tiempo muerto de la medida sea muy alto.

Para evitar esto, se propuso desde un principio que el diseño del software fuese de modo que se realice el análisis de tipo *PSD* automáticamente cada vez que una señal fuese obtenida. Entonces se añade la información a una matriz de datos que se mantiene en la RAM y se muestra en un gráfico. Al finalizar la medida (por número de impulsos o por tiempo) se puede escoger la opción de grabar en el disco duro un archivo con los datos y formatos que se requieran.

Las opciones de control que la casa AlazarTech ofrece para sus tarjetas se componen de librerías para *C/C++*, *Visual Basic* y *LabVIEW*. Tras comenzar nuestros intentos de controlar la tarjeta en

lenguaje C, se comprobó que las rutinas que se proporcionaban daban muchos problemas para adaptarlas al compilador que usábamos. Tras una rápida prueba se eligió Visual Basic para el desarrollo completo de la aplicación. El lenguaje VB permite un fácil y potente manejo de controles y gráficos (Interfaz de usuario) que es algo fundamental en un software como el que nos ocupa. En cambio las rutinas de cálculo compiladas en lenguajes de más bajo nivel como C++, o FORTRAN obtienen mejores velocidades en su procesado. Esto hace que los programas de uso comercial usen las rutinas típicamente de cálculo mediante dll's compiladas con dichos lenguajes, mientras que el cuerpo del programa se realiza en un lenguaje de tipo visual.

El hecho de que nuestro código se realice totalmente en VB ha permitido tener accesible en todo momento el código completo. Pero para futuros desarrollos puede aconsejarse la opción de compilar en C++ unas dll's para mejorar los tiempos de cálculo.

5.2. Desarrollo y características del software.

En primer lugar se comprobó la tarjeta con su software de control propio que se denomina “API panel”, y que es un programa compilado en un ejecutable que proporciona la firma AlazarTech junto con la propia tarjeta. Se ajustaron los parámetros de adquisición para poder ver las señales generadas por nuestro phoswich (ver Figura 9).

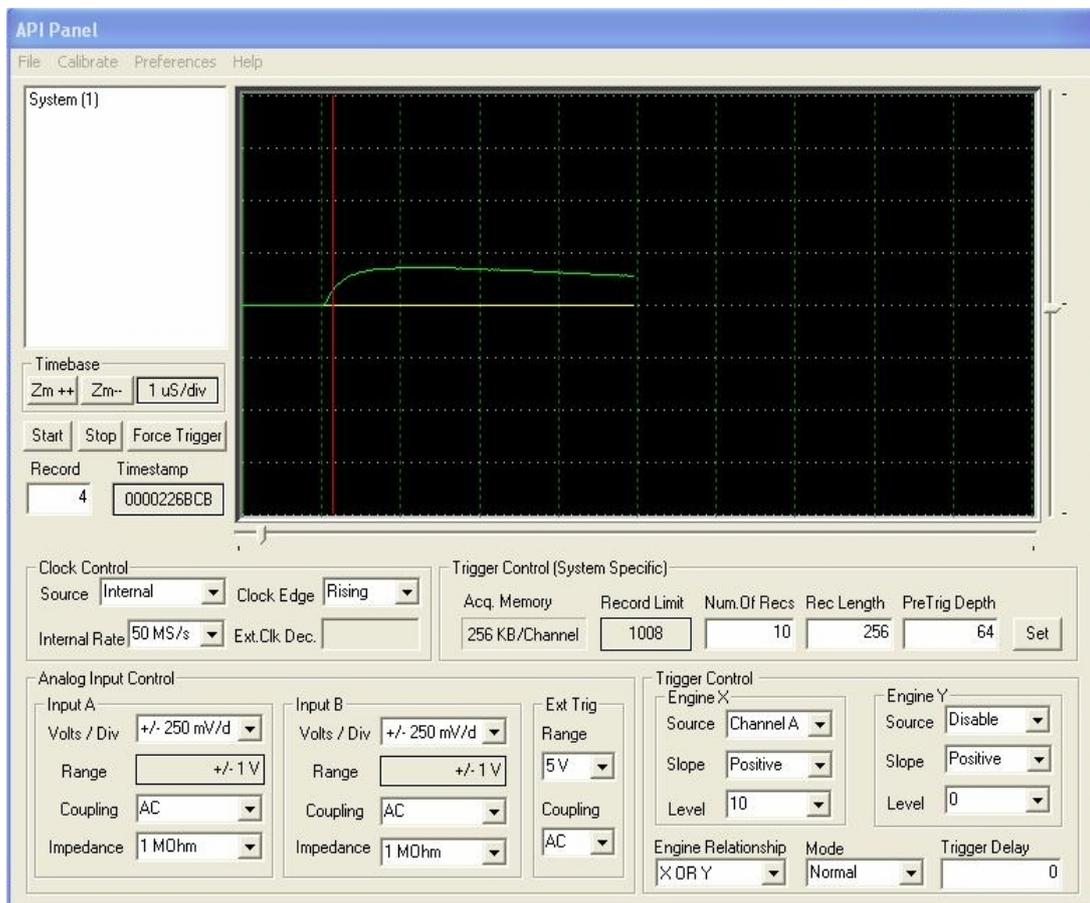


Figura 9 Apariencia del “API Panel”

Seguidamente se comenzó el armazón del programa de análisis multicanal propiamente dicho. Se estudiaron e

implementaron las funciones básicas de configuración de la tarjeta para Visual Basic^{9.13}. En la Figura 10 puede comprobarse cómo se representaron gráficamente los impulsos individuales en el cuadrante superior y se pasó el dato de la altura de cada uno de ellos a un gráfico multicanal (parte inferior), para la obtención del espectro.

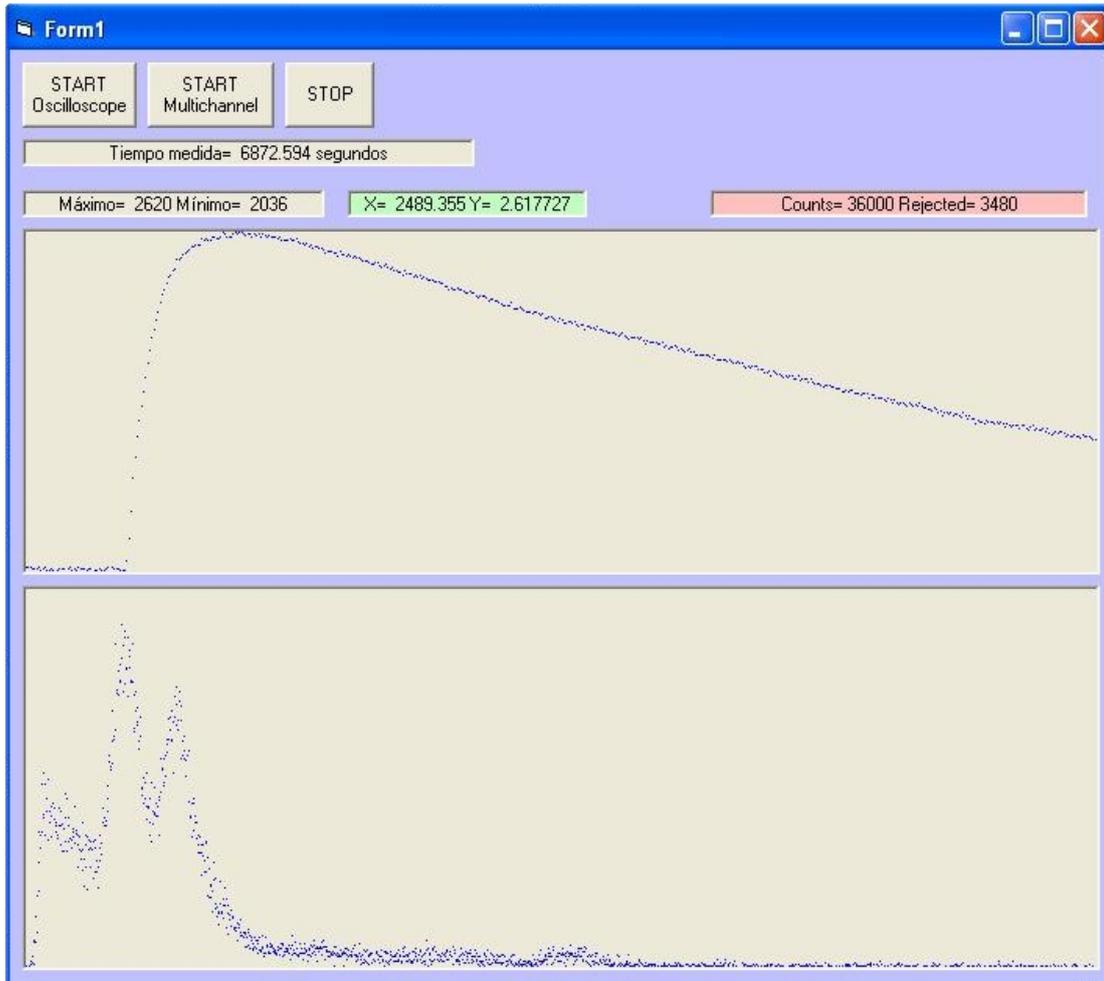


Figura 10 Apariencia del programa en desarrollo inicial

Una vez obtenidos estos resultados preliminares, se fueron incorporando las diferentes características propias de un analizador multicanal (ver Figura 11).



Figura 11 Apariencia del programa en desarrollo avanzado

En el programa se han desarrollado dos modos muy diferenciados de funcionamiento. El primero se denomina "Oscilloscope" y está destinado a capturar una sola señal o un grupo secuencial de las mismas. (Ver el código en *CommandOsc_Click*, página 149). Este modo mostrará sus resultados

en el primero de los gráficos, el de color amarillo. Si se muestra un grupo secuencial de señales (fijado por la variable "*#ToRead*"), no se podrá usar ningún tipo de filtro de reconocimiento de formas, ya que lógicamente se puede sólo aplicar a una única señal.

El segundo es el "Multichannel". En este se da la opción de mostrar las señales una a una que se van procesando en el panel amarillo, y se representa la altura en el inferior (blanco) en un diagrama multicanal. (Ver el código en *CommandMult_Click* en la pág.155). Esa subrutina, junto con la anterior, forman el principal cuerpo de nuestra aplicación. Dan instrucciones de apertura y finalización de la lectura de la tarjeta y controlan el resto de operaciones a realizar.

Los valores iniciales que deben cargarse para todo el programa en general se añaden en la *Form_Load* de la pág.164. Entre ellos podemos ver los valores de tres de las señales estándar que se usan como referencia para las deconvoluciones. También los valores que aparecerán en los despletables y datos por defecto.

Dos funciones muy importantes son *PlotSpectrum* (pág.179) y *PlotSpectrumCoincidence* (pág.181). Estas son las encargadas de representar los gráficos de un espectro normal, y de uno proveniente de una coincidencia respectivamente. En el segundo se representan las alturas de los dos impulsos en dos colores diferentes (azul y rojo).

Otra función primordial es la *GetSignalData* (pág.183). Esta es la encargada de calcular los datos fundamentales de cada uno de los impulsos que son considerados como correctos.

SaveData, en la pág. 187, guarda en un archivo de texto los datos que se requieran de cada una de las señales. El formato de estos puede escogerse para que sean admitidos directamente por programas de tipo hoja de cálculo u otros.

En el apartado 10.2 encontramos las subrutinas incluidas en el formulario "EnergyDialog", que realiza una calibración en energías del espectro. Esta es muy sencilla, dando valores para dos puntos, con interpolación lineal.

En el 10.3 encontramos todo lo referente al formulario y control de los filtros que queramos añadir a nuestras adquisiciones y que mas adelante discutiremos en profundidad.

Por último en 10.4 tenemos la declaración de las variables globales para todo el programa, tanto las que hemos necesitado para nuestras aplicaciones, como las que usa la tarjeta para su control.

5.2.1. Controles del analizador multicanal digital.

- Reloj de adquisición por segundos y por número de cuentas.
- Rangos fijos o dinámicos en ambos gráficos.
- En el multicanal, número de canales seleccionables: 256, 1024, 2048, Automático, y multiplicador/divisor de altura.
- Parado de adquisición, borrado y reinicio de medida.
- Selección de una ROI (*Region Of Interest*). Zoom y número de cuentas (área) sobre ella.
- Calibración lineal en energías con dos canales.
- Grabado de un archivo de datos de la señal mostrada y del multicanal. El formato de grabación puede ser escogido para su adquisición por programas estándar de tratamiento de gráficos y datos.
- En el gráfico inferior (espectro), contraste blanco/negro, negro/blanco.

5.2.2. Controles para la tarjeta de adquisición.

- Nivel de disparo (trigger).
- Voltaje.
- Número de muestras antes y después del disparo.
- Número de impulsos a medir (el n^o máximo depende de la memoria de la tarjeta y muestras por impulso elegidas).
- Número de señales para leer entre todas las que se tomaron.

5.3. El filtro de señales

Esta es la característica principal que distingue nuestro sistema de uno analógico convencional. En el cuadro llamado "Filter Menu" añadiremos las condiciones de filtrado por las cuales una señal detectada (y representada en el gráfico superior) será contabilizada o no como parte del espectro (gráfico inferior).

En un primer paso se desarrollaron unos filtrados muy simples, como es el simular lo que un módulo de análisis monocanal (SCA) realiza en cadenas analógicas. Es decir, centramos las adquisiciones en aquellas cuyas amplitudes (altura de la señal) se encuentren dentro de un intervalo centrado el valor "*Center*" y con amplitud "*Gap*". También es posible fijar directamente los dos valores del intervalo de alturas mediante los valores "*Height1*" y "*Height2*". Puede verse la zona del código que controla estos filtros en la rutina *SubFilters*, de la *pág 194*. Si más de un filtro es seleccionado, se puede programar que sea bajo la relación AND o la OR. En nuestro caso hemos elegido la primera, por ser la mas útil para nuestros propósitos.

El paso siguiente fue la implementación de condiciones para discriminar señales según su forma (PSD). Son los siguientes: NaI (gamma), CaF₂ (beta y rayos x) y plástico (beta).

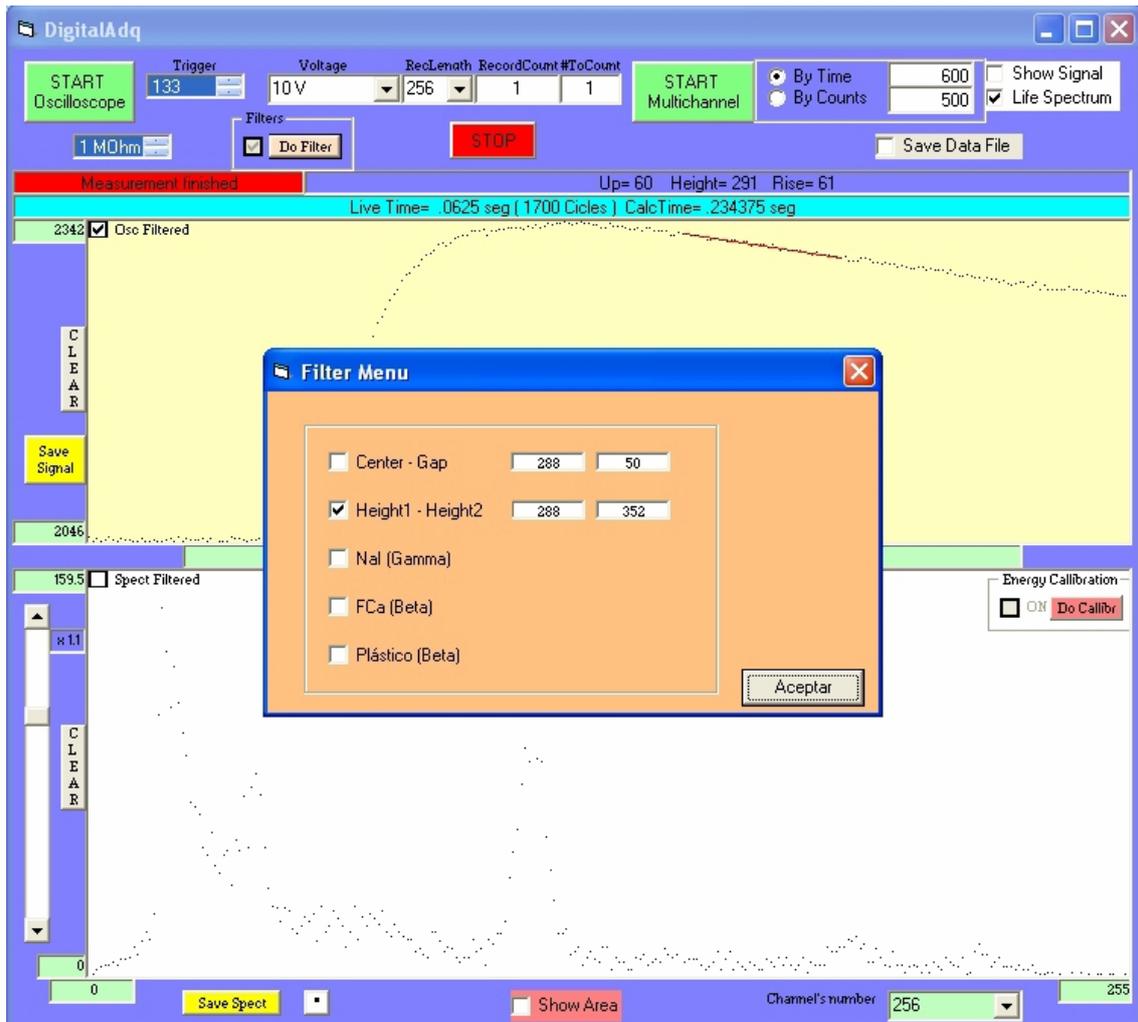


Figura 12 Menú del filtro para señales de NaI, CaF₂ o tipo plástico.

La Figura 12 muestra en su parte inferior un espectro conjunto beta-gamma del Cs-137 y Co-60. Pueden identificarse en la región de bajas energías, el pico de 620 keV de los electrones de conversión interna del Ba-137m, que está localizado alrededor de unos 250 keV en energía gamma, debido a la menor emisión de luz de centelleo del CaF₂ comparado con el NaI. Igualmente se observa la radiación de 661 keV del Ba-137m y unos pequeños picos a la derecha, correspondientes a los rayos gamma de 1173 keV y 1332 keV del Co-60.

Las Figura 13, Figura 14, Figura 15 y Figura 16 muestran la forma de los impulsos producidos por centelleadores de NaI, CaF₂, plástico y ZnS. A partir de sus características más relevantes se desarrollaron posteriormente los métodos numéricos para su identificación.

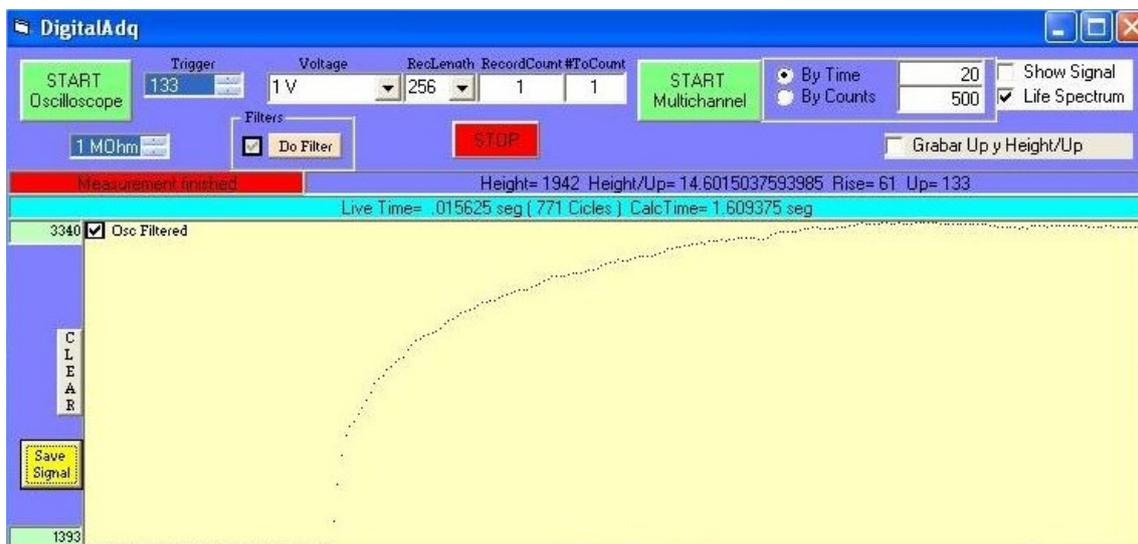


Figura 13 Señal del ZnS(Ag). Partícula alfa.

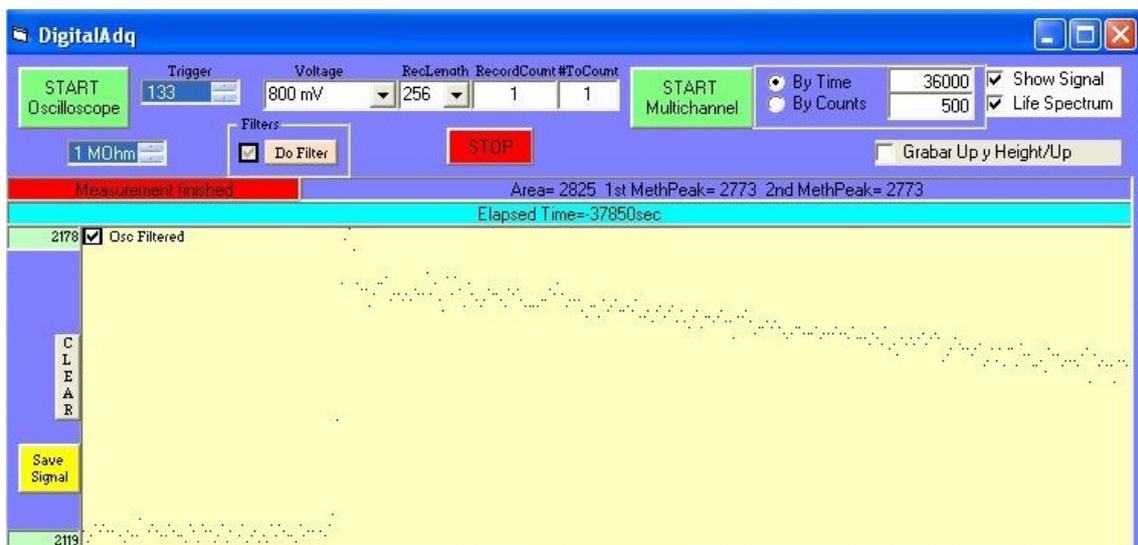


Figura 14 Señal del plástico. Partícula beta

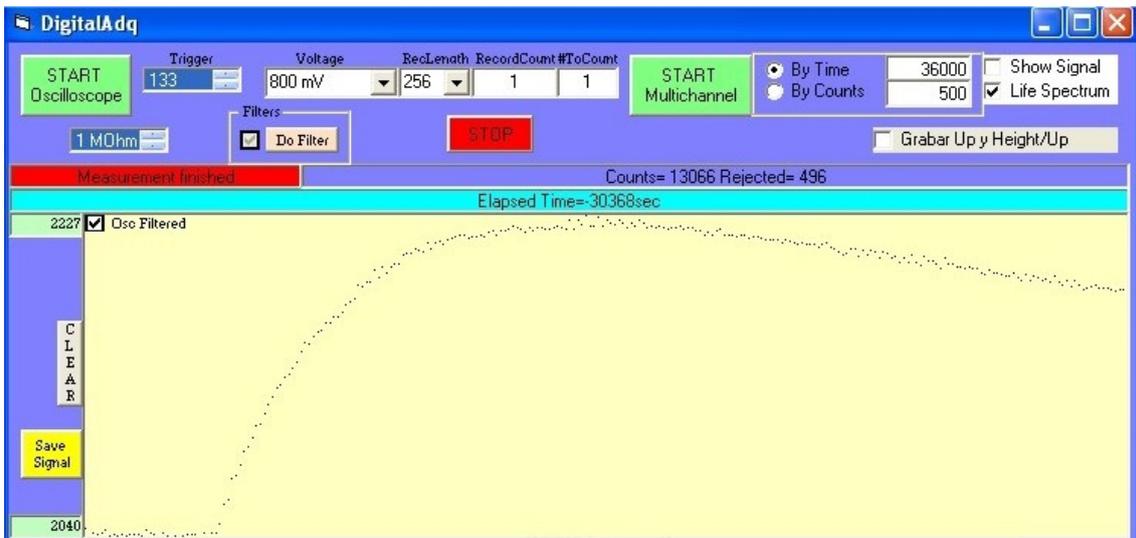


Figura 15 Señal del CaF_2 . Partícula beta o rayo X.

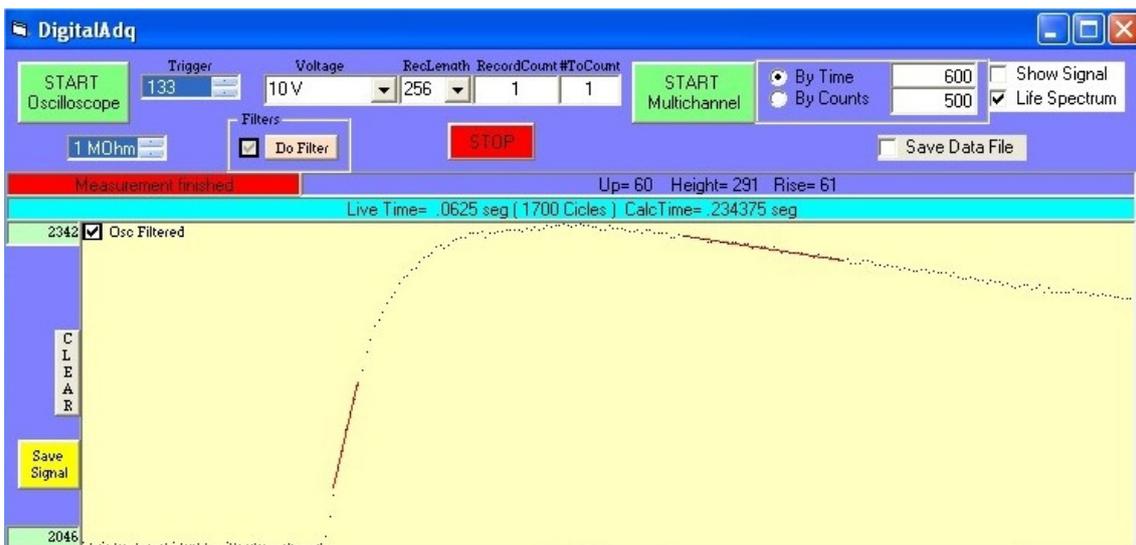


Figura 16 Señal del NaI . Partícula gamma.

En primer lugar se realizaron pruebas para ajustar la forma de las señales a polinomios de *grado n* y a funciones de dos parámetros. Tras varios ajustes se observó que sería completamente inoperativo este método por varias razones:

1.- Hay que preparar los datos para cortar las zonas que no son susceptibles de entrar en el ajuste, como la zona de 0V que almacena el pretrigger.

2.- Aun realizando esta preparación los ajustes obtenidos no presentaban grandes variaciones en los parámetros, con lo que la distinción sería poco exacta.

3.- Un ajuste por mínimos cuadrados a funciones complejas conllevaría mucho tiempo de procesamiento para cada señal.

Por estas razones se ha utilizado un método mas sencillo, pero efectivo. La Figura 17 muestra el nombre asignado a las diferentes variables empleadas:

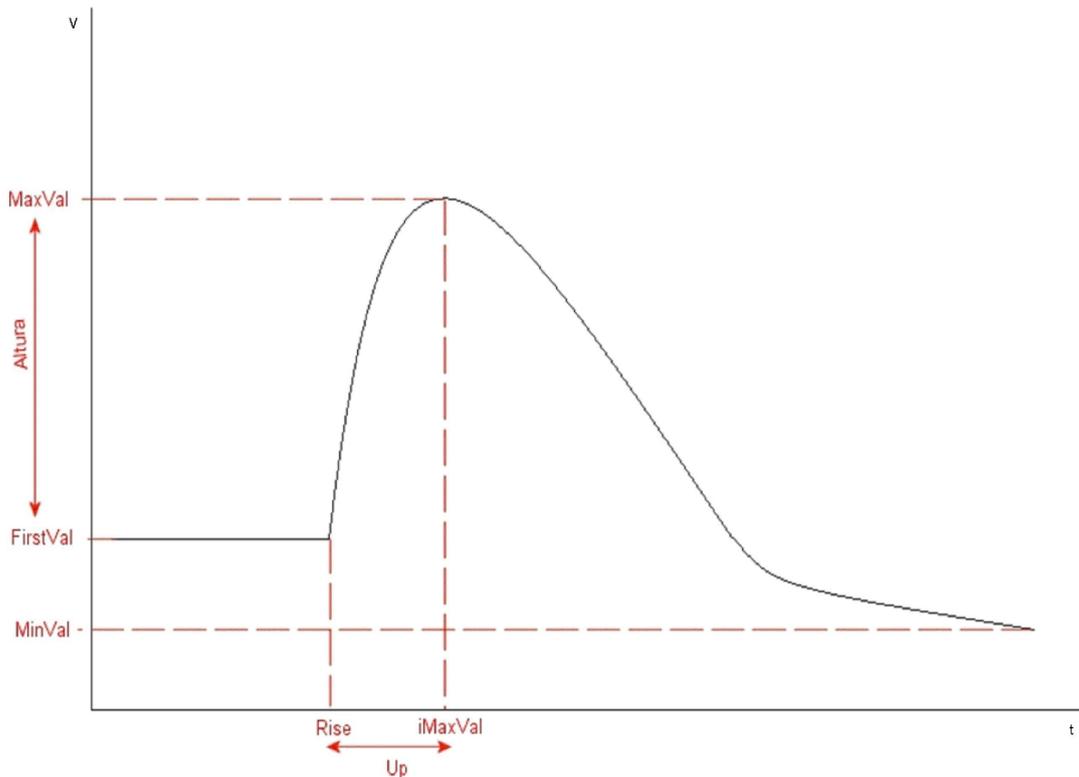


Figura 17 Gráfico explicativo del "tiempo de subida"

El "Rise Time"="RT"="Tiempo de subida", se ha denotado como "*Up*".

El valor *Rise* es el primero que cumple:

$$\text{Canal}(\text{Rise}) \geq (\text{Height} * \text{RiseCoef})$$

Empíricamente se determina que un buen valor para *RiseCoef* es 0,1. La Figura 18 representa cómo se agrupan los valores de "*Height/Up*" y de "*Up*" en una serie de unas 4700 medidas. El hecho de que se agrupasen en una banda horizontal nítidamente sería indicativo de que con este valor podríamos distinguir entre las señales que proceden del NaI y del CaF₂. Puede verse que aunque se intuyen algunos agrupamientos, no llega a haber separaciones nítidas. Así pues, ni "*Height/Up*" ni "*Up*" por si mismos nos permiten distinguir nítidamente entre ambas señales. Sin embargo, podemos ver que la parte inferior del gráfico *Up/NºMedida*, las señales del centelleador del plástico son inconfundibles, puesto que su valor *Up*, *tiempo de subida*, no supera los 5 canales.

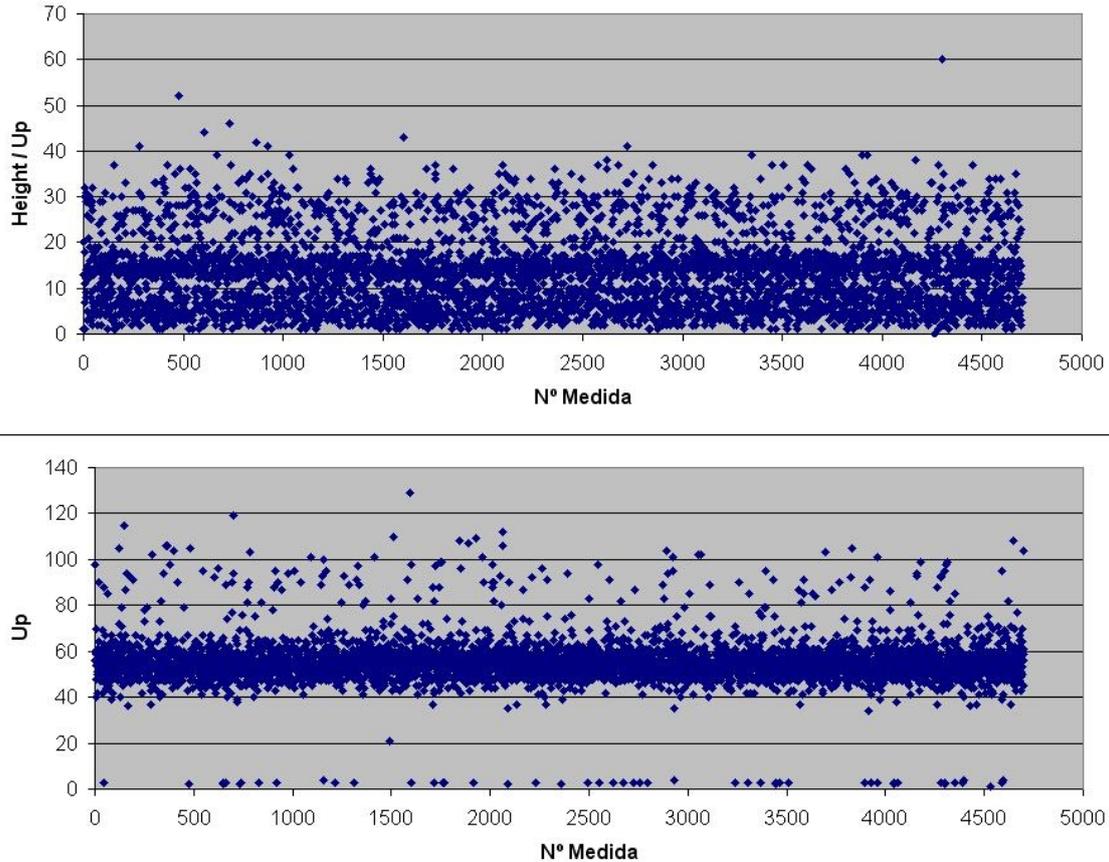


Figura 18 Distribución de los valores "Height/Up" y "Up"

El procedimiento que finalmente se ha desarrollado para distinguir entre las señales que proceden del NaI y del CaF_2 , se basa en calcular dos rectas mediante el método de mínimos cuadrados. Una de las rectas en la zona de subida y otra en la de bajada. La diferencia de sus pendientes se almacena en la variable *SlopeDif*. Según los valores de esta se pueden distinguir los impulsos de tipo NaI y CaF_2 . Observando una a una secuencialmente las señales, el índice de acierto de nuestro método es superior a 100 a 1.

6. Desarrollo del sistema digital para coincidencias.

Los filtros desarrollados hasta ahora permiten obtener espectros alfa, beta o gamma libres de otras contribuciones. Pero sin duda el interés se centra en la detección de señales formadas por coincidencias. En principio se estudió la posibilidad de poder distinguir sumas de impulsos coincidentes del NaI y en el CaF_2 , utilizando para ello el patrón de Cs-137. Pero tras cientos de señales visualizadas no se identifican claramente posibles señales candidatas.

La razón principal se debe a que la suma directa, canal a canal, de un impulso gamma (NaI) y uno beta (CaF_2), es claramente indefinida por tener características comunes a los impulsos característicos de ambos detectores (Figura 19).

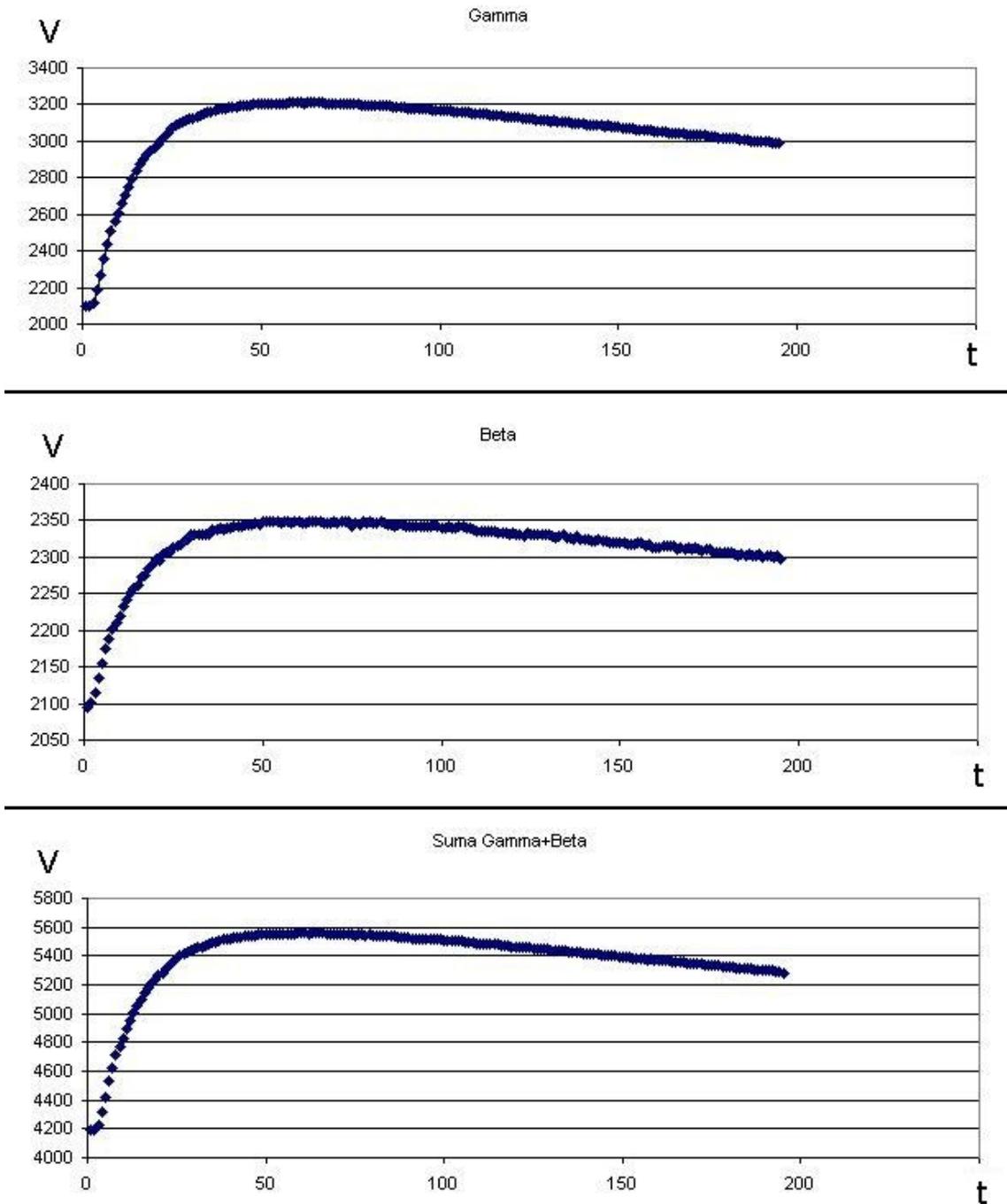


Figura 19 Suma algebraica de dos señales, Gamma+Beta

Incluso si se aplicase algún método para intentar seleccionar las señales candidatas a coincidencias en el NaI-CaF₂, muy probablemente el error en su determinación junto con el reducido número de sucesos haría que la incertidumbre en la identificación de

dichas coincidencias fuese elevada. Además, habría que desarrollar algún algoritmo inverso para determinar las amplitudes de las dos señales que sumadas producirían la coincidencia.

Así pues, nuestro interés se ha centrado en estudiar la posible utilización de un centelleador plástico en lugar del CaF_2 para la detección de partículas beta. Dicho centelleador dispone de un tiempo de luminiscencia muy corto y consecuentemente un tiempo de subida muy pequeño. Esto permite una mejor identificación y posterior análisis de la señal coincidente NaI-plástico. La Figura 20 muestra una coincidencia beta-gamma. Pueden identificarse claramente la subida rápida procedente del plástico centelleador y a continuación la señal mucho más lenta del CaF_2 o NaI.

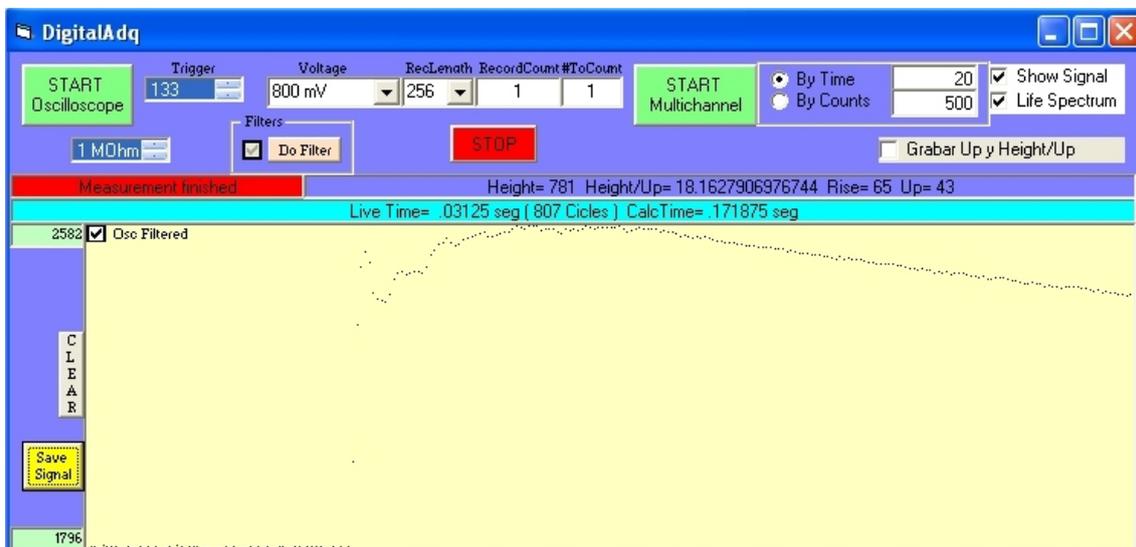


Figura 20 Coincidencia Beta-Gamma

Como puede comprobarse, la señal que se crea es concreta y poco confusa para poder diseñar un filtro específico para la

identificación y posterior análisis de la coincidencia. Este filtro resulta de más difícil elaboración que otros anteriores, ya que es necesario diferenciar los casos en que el primer máximo, procedente del plástico, sea mayor que el segundo (señal del NaI ó CaF₂) o viceversa. Una vez que la señal de coincidencia pasa el filtro identificador, un algoritmo ha de determinar el primer y segundo máximo.

6.1. Método punto-tangente

Se ha implementado un algoritmo de deconvolución para señales del tipo Plast+NaI y Plast+CaF₂, como las recogidas en las figuras anteriores. El objetivo es calcular a partir de la señal suma las dos originales que la han producido al sumarse. Expondremos aquí los cálculos recogidos en la hoja de cálculo que se adjunta como referencia en la carpeta: [Referencias\Señales y deconvolución.xls](#) .

En primer lugar se necesita un tratamiento previo de varias señales, con el objetivo de hacer una media, la cual nos servirá como modelo para las deconvoluciones.

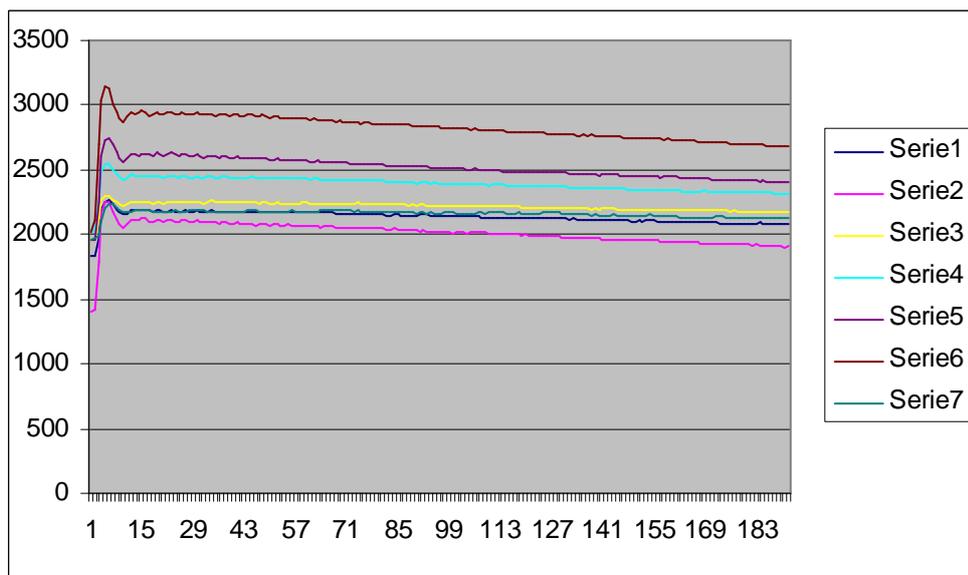


Figura 21 Señales del plástico sin tratar

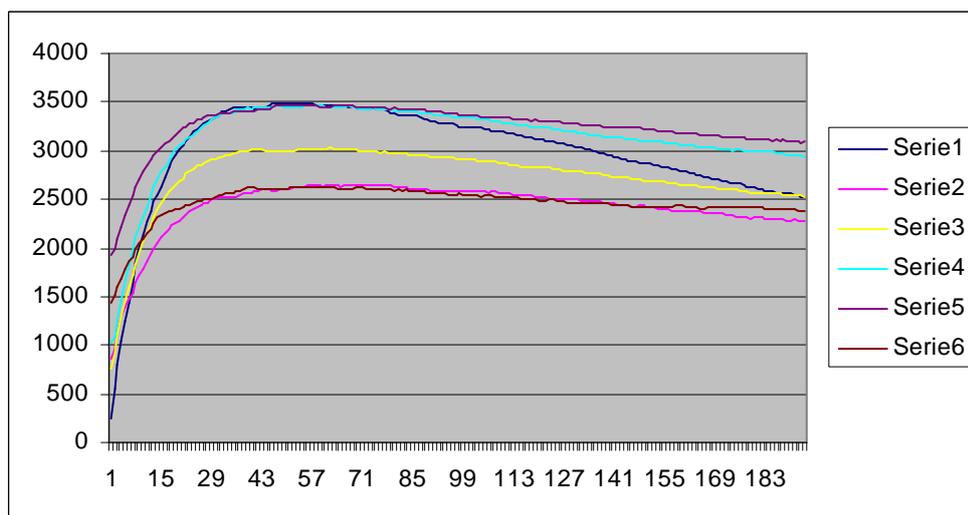


Figura 22 Señales del NaI sin tratar

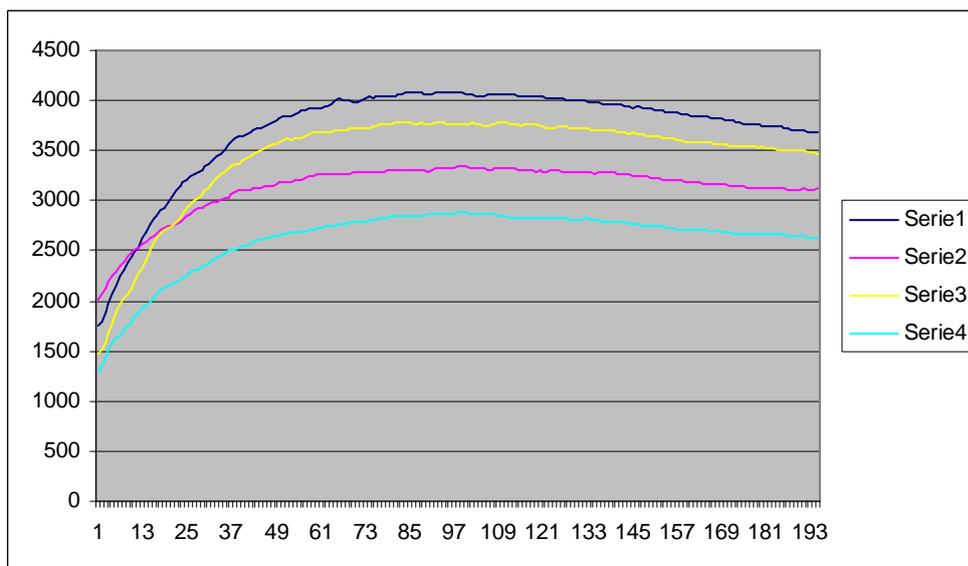


Figura 23 Señales del CaF₂ sin tratar

Seguidamente se restaron los niveles de referencia, de modo que todas las señales comiencen en el mismo punto:

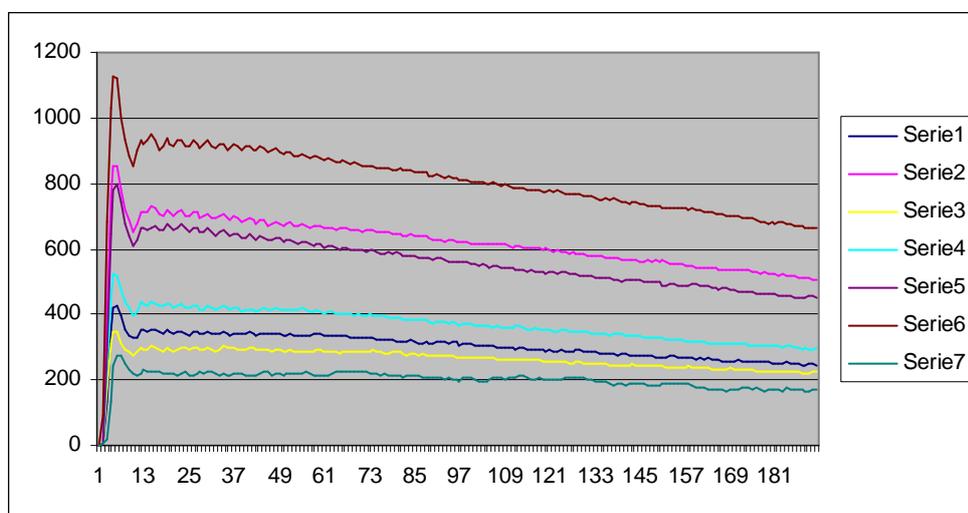


Figura 24 Señales del plástico con igual nivel de referencia.

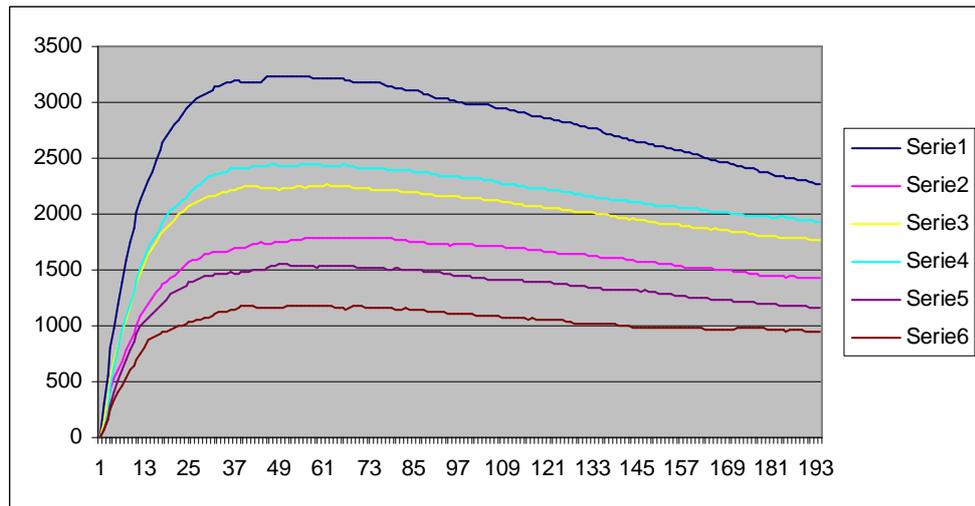


Figura 25 Señales del NaI con igual nivel de referencia

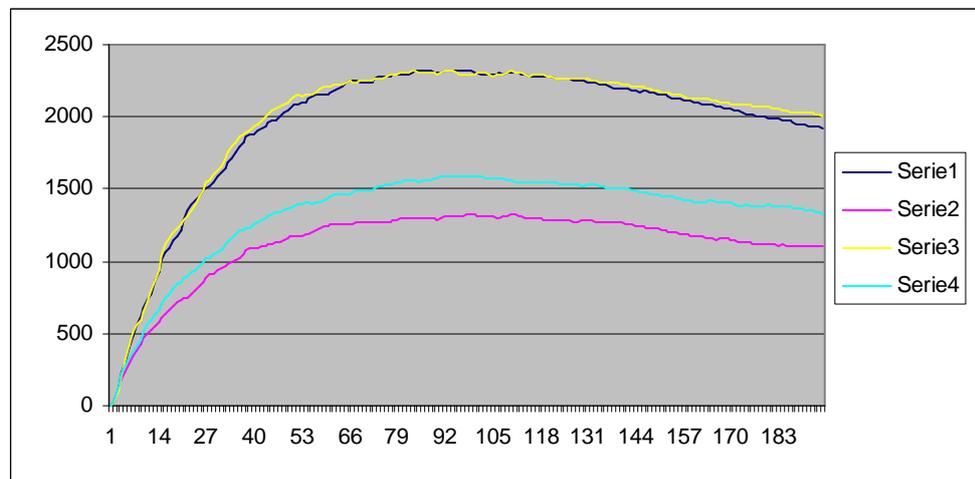


Figura 26 Señales del CaF_2 con igual nivel de referencia

Por último se calculó un coeficiente para cada una de las señales, de forma que todas ellas presentasen el mismo valor máximo:

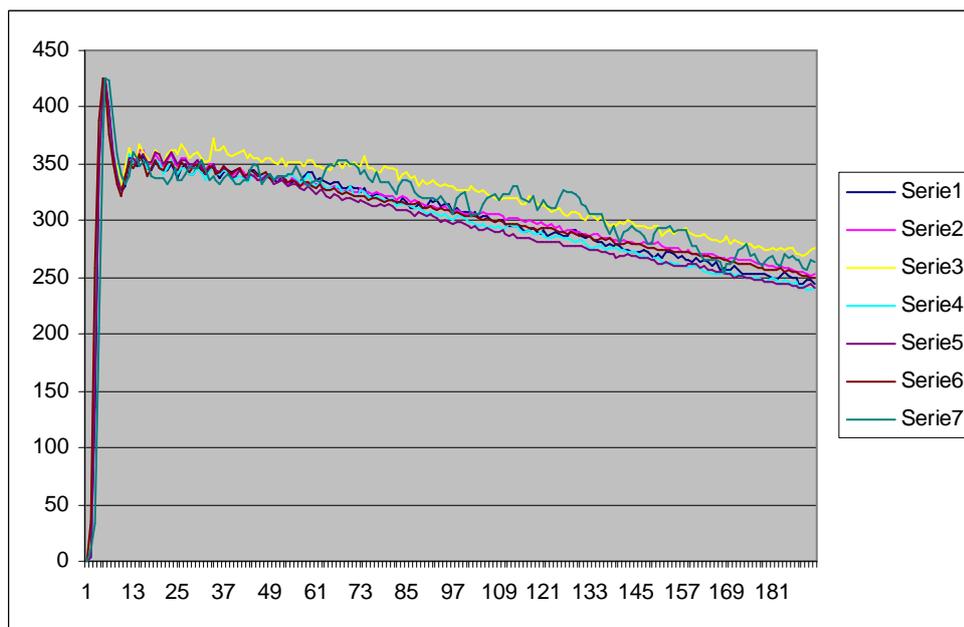


Figura 27 Señales del plástico con igual altura

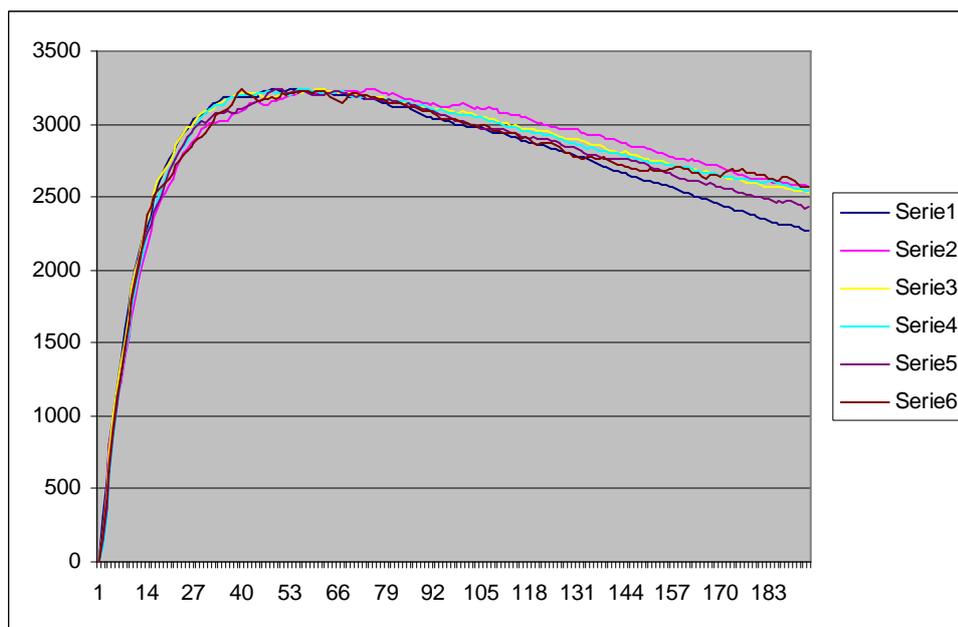


Figura 28 Señales del NaI con igual altura

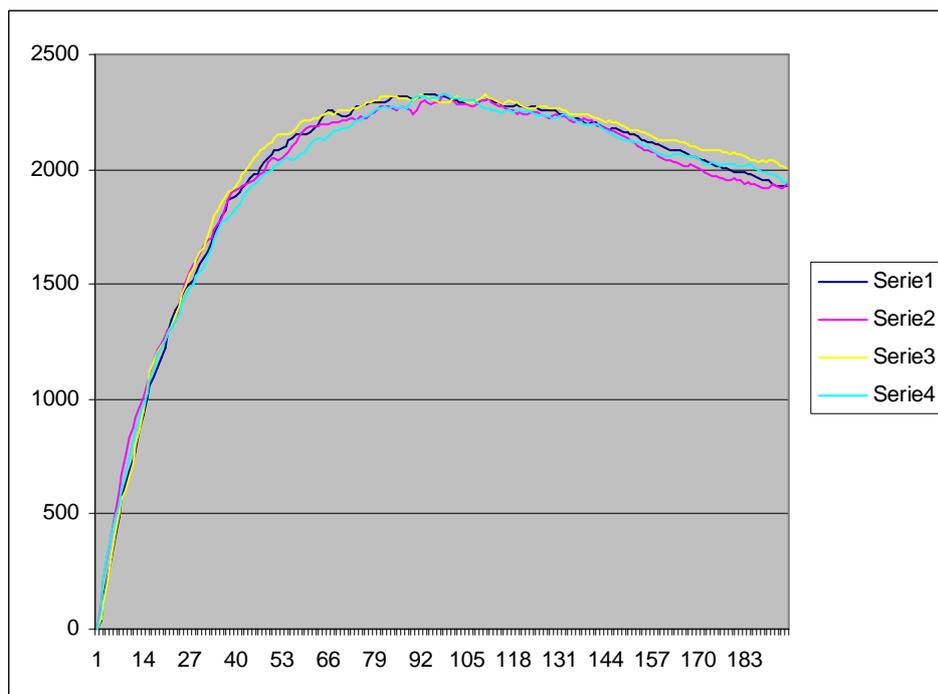


Figura 29 Señales del CaF₂ con igual altura

Se realizó la media punto a punto de todas las señales, de modo que se obtuvieron las señales medias de referencia para nuestros cálculos.

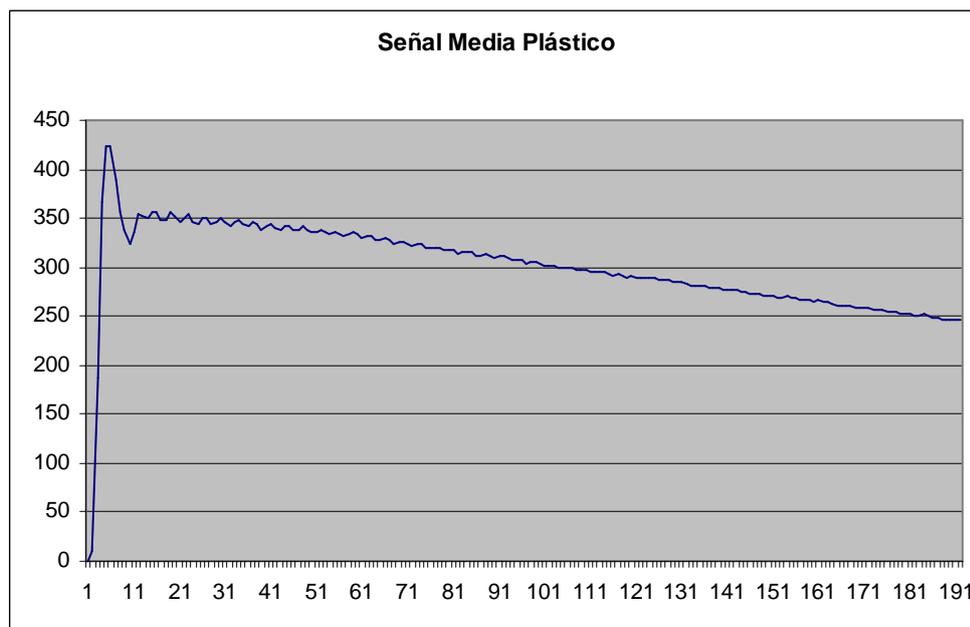


Figura 30 Señal del plástico de referencia

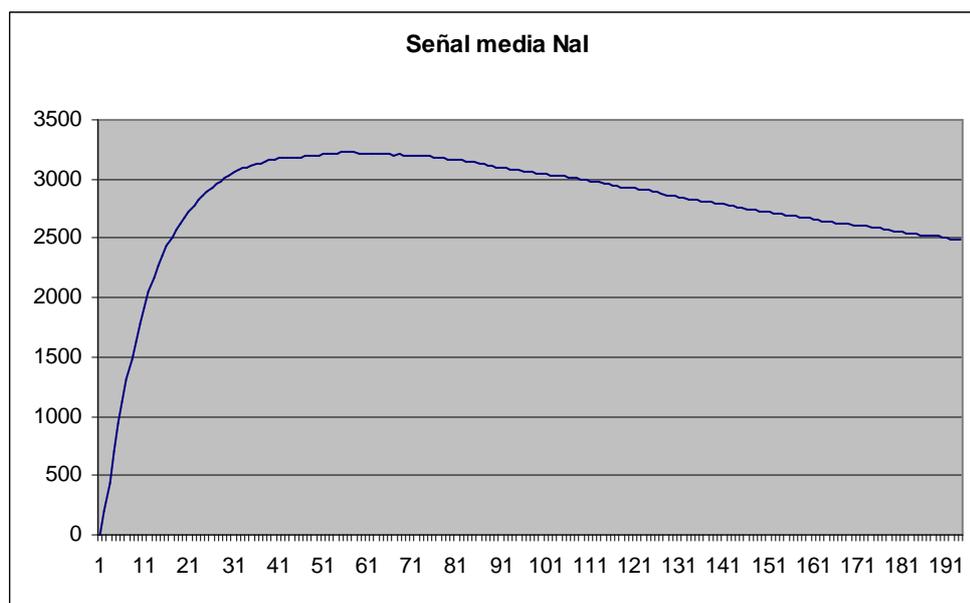


Figura 31 Señal del NaI de referencia

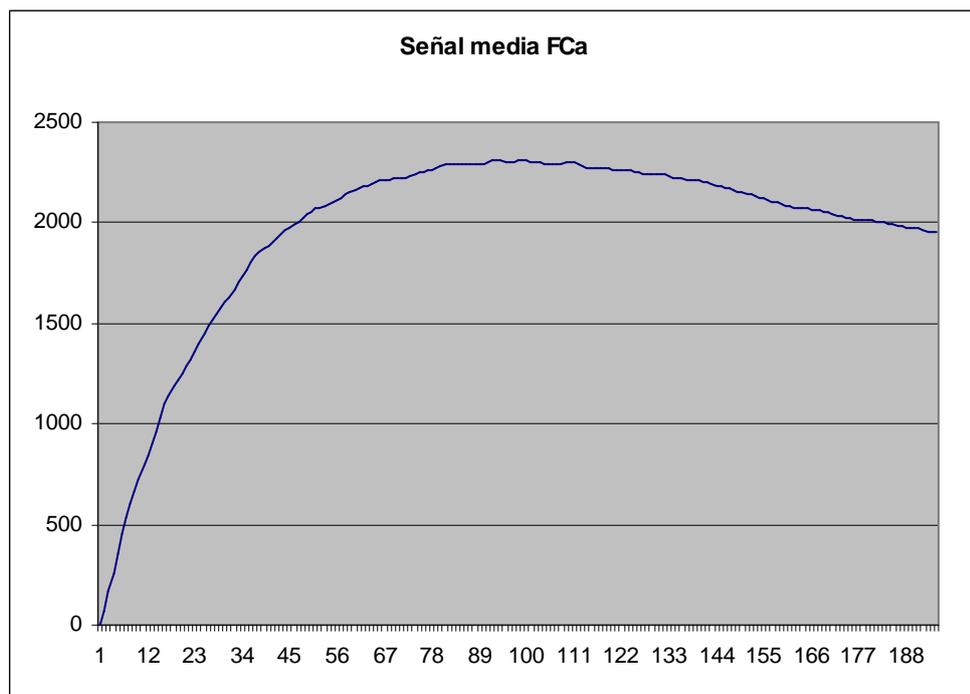


Figura 32 Señal del CaF_2 de referencia

Una vez obtenidas estas señales de referencia, se pasó a una prueba de suma dos a dos, con distintos coeficientes de multiplicación (pesos) para comprobar que efectivamente se obtienen las mismas formas de señal de coincidencia que en el equipo de digitalización. Por ejemplo, con pesos de 10 y 0,6 para las señales de Plástico y NaI respectivamente se obtiene:

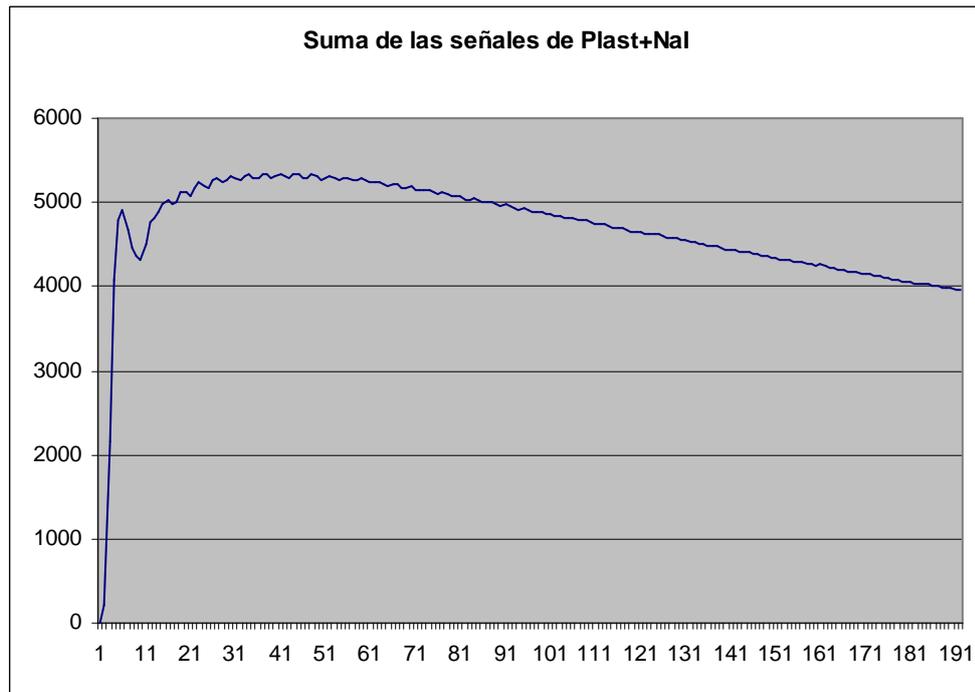


Figura 33 Suma señales Plast+Nal con pesos 9 y 0,6.

Y para las señales de referencia de Plástico y CaF_2 con pesos de 9 y 0,6 respectivamente:

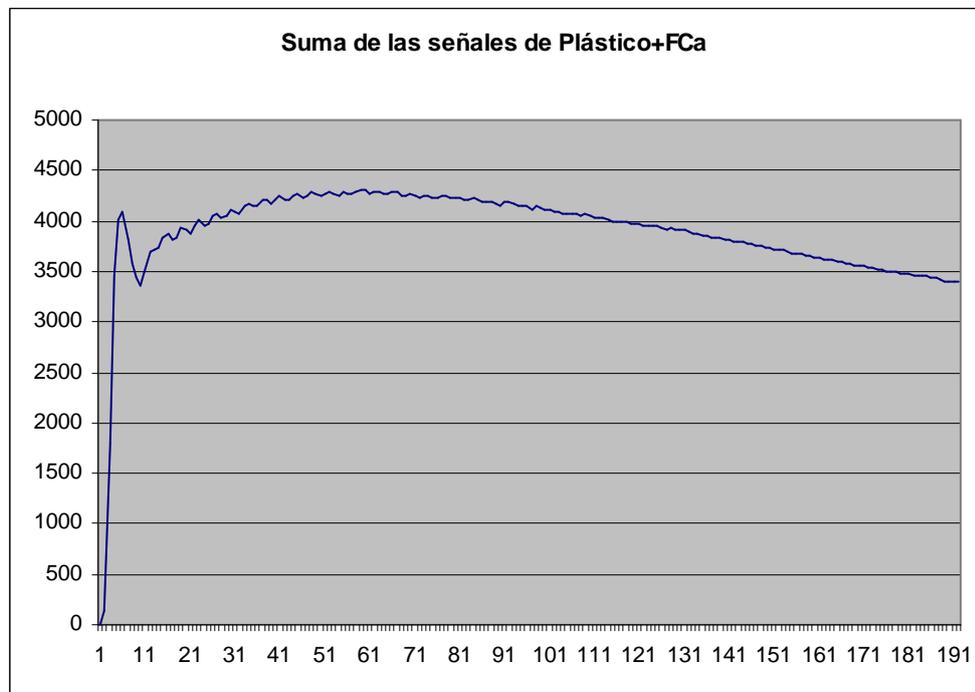


Figura 34 Suma señales Plast+ CaF_2 con pesos 9 y 0,6

Con estas señales sumadas obtenidas de forma controlada se procedió a aplicarles propiamente el método de deconvolución. Nos basaremos en considerar dos condiciones en el punto "*iSecondPeak*" (que es el máximo del segundo pico). (Ver Figura 35).

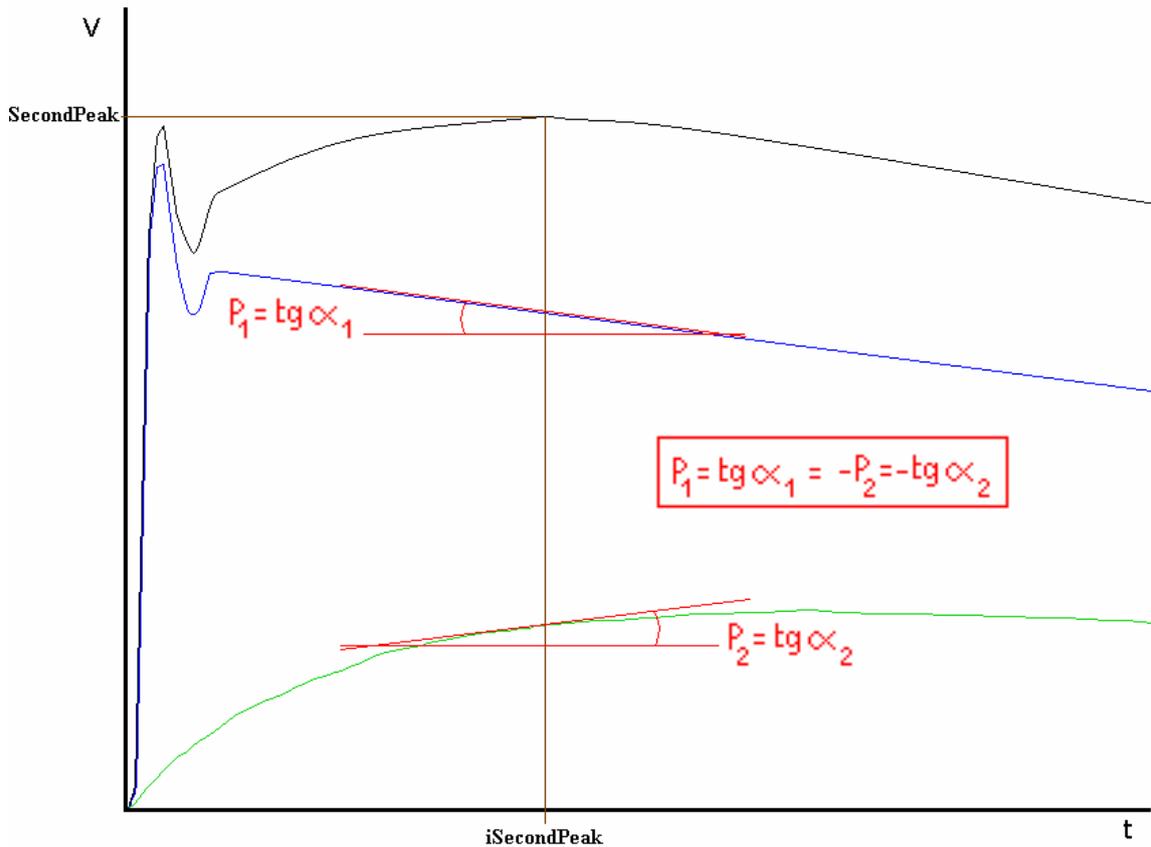


Figura 35 Esquema gráfico del método punto-tangente.

La primera es que las tangentes de las dos señales originales (P_1 y P_2) han de ser iguales y de signo contrario en este punto. La segunda es que la suma de las alturas en este punto (Y_1 e Y_2) ha de ser igual a la altura en el segundo máximo ($SecondPeak$). Esto en forma de ecuaciones corresponde a:

$$\begin{cases} C1 \cdot P1 = -C2 \cdot P2 \\ C1 \cdot Y1 + C2 \cdot Y2 = (SecondPeak) \end{cases} \quad (19)$$

Nota: La tangente de una señal multiplicada punto a punto por un coeficiente "c", es "c · tg α ", ya que:

$$\left. \begin{aligned} tg\alpha &= \frac{Y2 - Y1}{X2 - X1} \\ tg\alpha' &= \frac{C \cdot Y2 - C \cdot Y1}{X2 - X1} \end{aligned} \right\} \Rightarrow tg\alpha' = C \cdot tg\alpha \Rightarrow P' = C \cdot P \quad (20)$$

Despejando en el sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} C2 = \frac{(SecondPeak)}{\left(-\frac{P2}{P1} \cdot Y1\right) + Y2} \\ C1 = \frac{-C2 \cdot P2}{P1} \end{cases} \quad (21)$$

Obteniendo estos dos coeficientes, por medio de todos estos parámetros conocidos, tenemos resuelto el problema. En el caso concreto de la señal de Plástico+ CaF₂ sumada con pesos de C1=9 y C2=0,6 respectivamente, puede verse en el archivo [Referencias\Señales y deconvolución.xls](#) que tras aplicar este método se obtienen: C1=9,45 y C2=0,53.

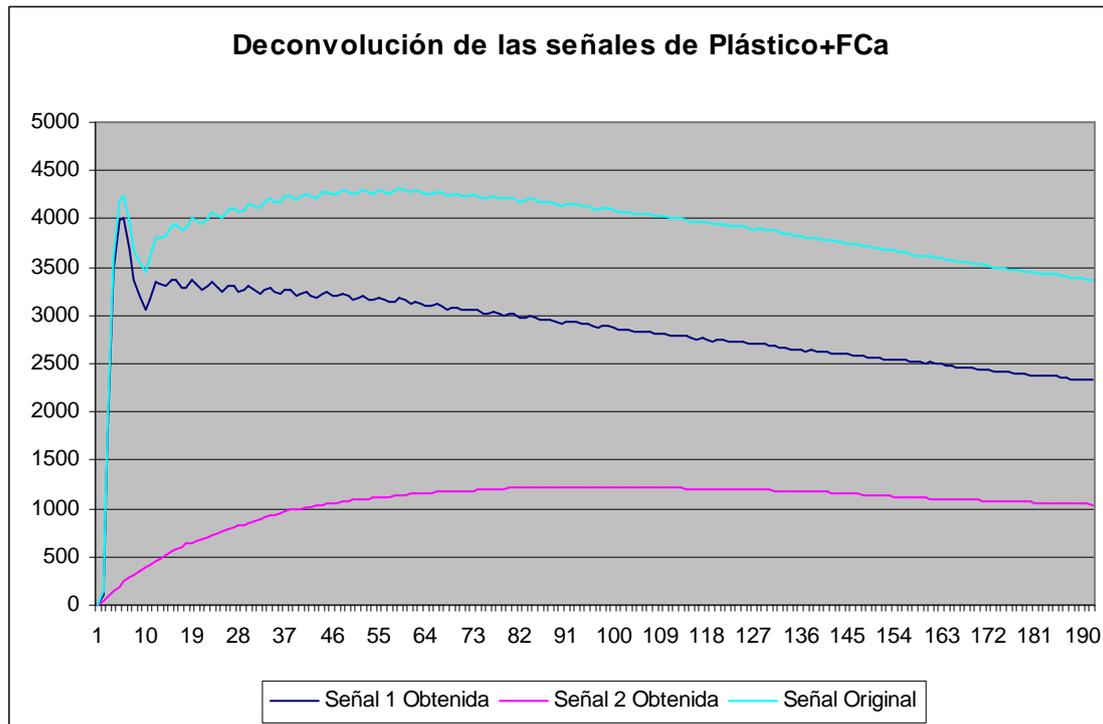


Figura 36 Deconvolución obtenida en la prueba.

El resultado mas importante para nosotros es estimar la altura del impulso producido en el cristal de NaI (o en el de CaF_2 en este caso), que es donde deja la energía la partícula gamma. Pues bien, para ello solo debemos multiplicar por el coeficiente C2 al máximo de la señal estándar correspondiente.

Para esta prueba el máximo de la señal CaF_2 original era 1389,48 y nosotros hemos obtenido 1227,43, lo que equivale a un error del 11,6%. Este error se debe principalmente a la dificultad de calcular con exactitud las tangentes.

Tras implementar este método en nuestro programa (ver subrutina *DeconvolutionBySlopeAndPoint* en la pág. 188), y representar de forma automática las señales, pudimos comprobar

que el error en el cálculo de la partícula gamma era pequeño en muchas ocasiones, como son las siguientes:

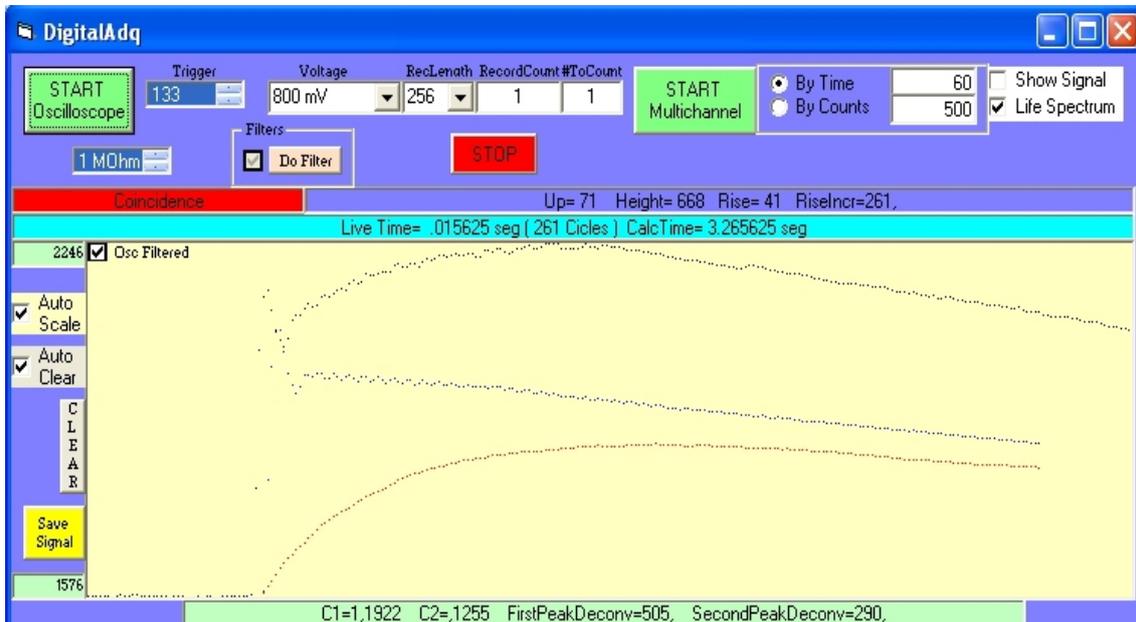


Figura 37 Deconvolución aceptable N°1.

Y también en esta, aunque con más error:

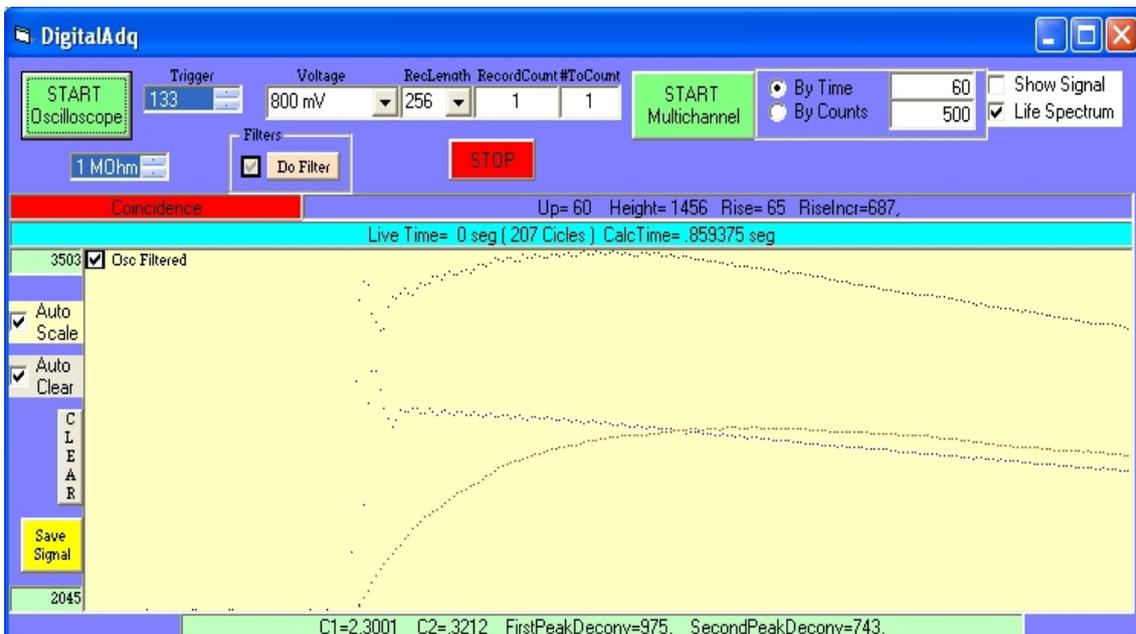


Figura 38 Deconvolución aceptable N°2.

Pero en muchas ocasiones nos encontramos con casos concretos en que el error es muy alto:

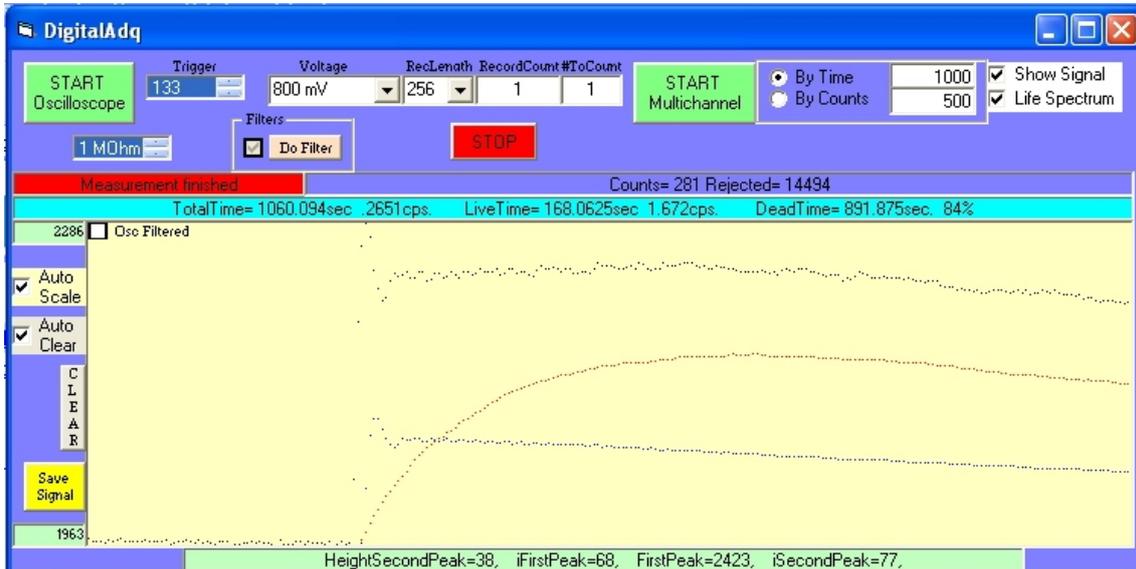


Figura 39 Deconvolución inaceptable 1.

E incluso ocasiones en que el máximo de la señal procedente del plástico era superior a la de la suma, lo cual sería absurdo:

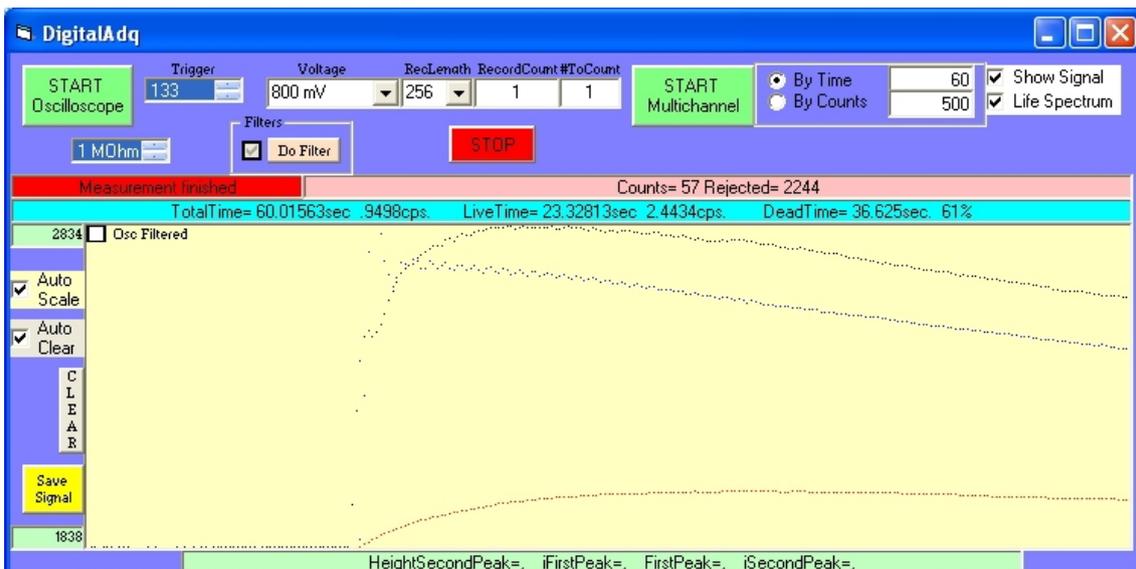


Figura 40 Deconvolución inaceptable 2.

Todo esto hizo que nos planteásemos desarrollar una deconvolución con un método distinto, dejando esta reservada para casos en los que se dispusiese de un sólo máximo como referencia, como podría ser una posible coincidencia CaF_2 -NaI.

6.2. Método punto-punto

Al tener en nuestras señales dos zonas muy bien definidas, como son los dos máximos debidos a cada una de las dos señales, vamos a plantear un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas considerando simplemente la suma de las alturas en los dos puntos:

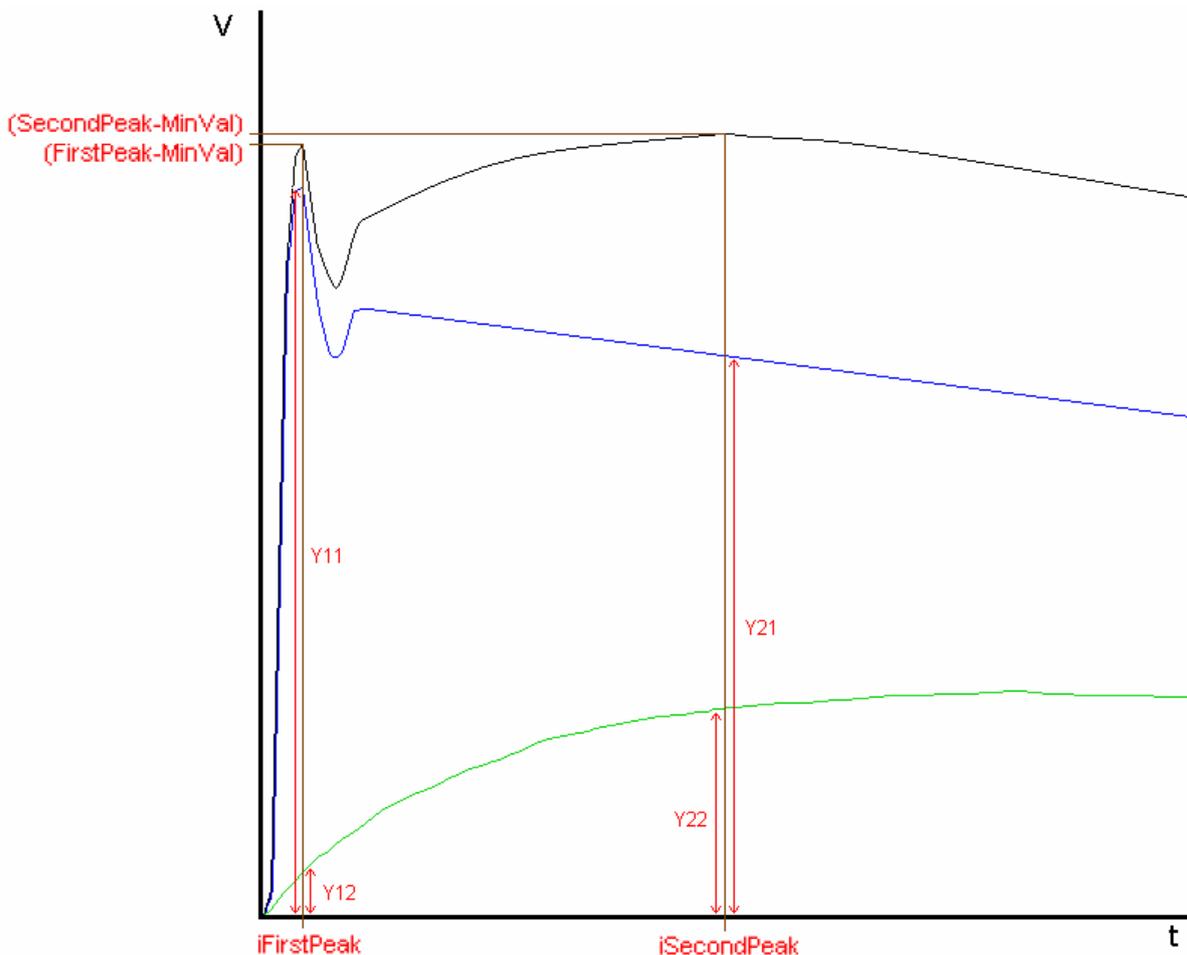


Figura 41 Esquema gráfico del método punto-punto

Vamos a denotar:

Y11=Valor se la señal estándar del plástico en el canal donde se encuentra "*FirstPeak*"

Y12= Valor se la señal estándar del cristal (NaI o CaF₂) en el canal donde se encuentra "*FirstPeak*"

Y21= Valor se la señal estándar del plástico en el canal donde se encuentra "*SecondPeak*"

Y22= Valor se la señal estándar del cristal (NaI o CaF₂) en el canal donde se encuentra "*SecondPeak*"

MinVal=Valor mínimo de la señal a deconvolucionar. Lo usamos como referencia para que el pie se asiente sobre el valor cero.

Hay que tener en cuenta que en el caso de Y11, una pequeña variación en el canal a considerar en la señal estándar del plástico haría que el valor obtenido difiera mucho. Así pues, consideraremos que este será siempre el valor fijo correspondiente a este máximo, y que en nuestro caso corresponde a 423,98.

Con todo esto, las ecuaciones son:

$$\begin{cases} (\text{FirstPeak} - \text{MinVal}) = C1 \cdot Y11 + C2 \cdot Y12 \\ (\text{SecondPeak} - \text{MinVal}) = C1 \cdot Y21 + C2 \cdot Y22 \end{cases} \quad (22)$$

y despejando las incógnitas:

$$\left\{ \begin{array}{l} C1 = \frac{(\text{FirstPeak} - \text{MinVal}) - C2 \cdot Y12}{Y11} \\ C2 = \frac{(\text{SecondPeak} - \text{MinVal}) - (\text{FirstPeak} - \text{MinVal}) \cdot \left(\frac{Y21}{Y11}\right)}{\left(Y22 - \frac{Y12 \cdot Y21}{Y11}\right)} \end{array} \right. \quad (23)$$

Tras implementar este algoritmo de deconvolución en nuestro programa en Vbasic para los dos tipos de señales estándar (Ver la subrutina *DeconvolutionByTwoPointsCaF* y también *DeconvolutionByTwoPointsNaI*, de la pág 189), pudimos comprobar que todas las deconvoluciones se realizaban de forma satisfactoria, mejorando el método expuesto anteriormente, como se muestra en el siguiente ejemplo:

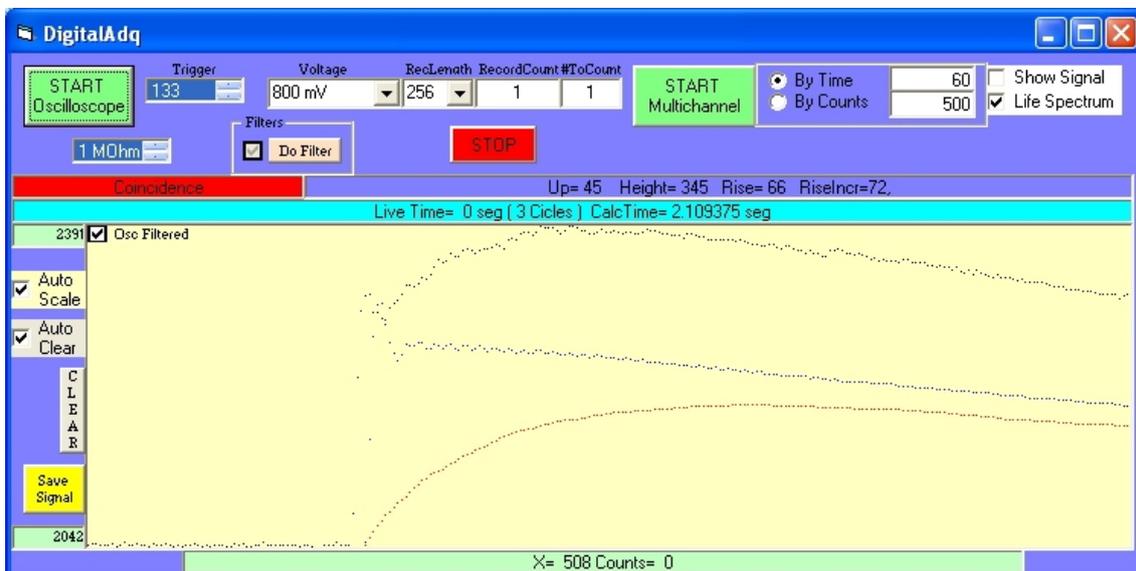


Figura 42 Deconvolución con método punto-punto.

7. Aplicaciones de la técnica.

7.1. Determinación de productos de fisión.

7.1.1. Características generales de los productos de fisión.

Los productos de fisión son isótopos producidos en reacciones de fisión, en especial las producidas por Uranio 235 de forma controlada en reactores, o incontrolada en explosiones nucleares. La radiactividad producida en la mezcla resultante de una reacción en cadena del Uranio está causada en un primer momento por isótopos de vida corta como el I-131 y Ba-140. Tras unos cuatro meses, toman el relevo otros como el Ce-141, Zr-95, Nb-95, y Sr-89. Después de algunos años cobran importancia el Ce-144, Pr-144, Ru-106, Rh-106, y Pm-147. En decenas de años, el Sr-90 y Cs-137, y por último domina el Tc-99. Muchos de estos isótopos son emisores beta negativa con gammas asociadas, debido fundamentalmente a la elevada relación N/Z (neutrones /protones) comparado con el de sus correspondientes isótopos estables.

El Cs-137 tiene una vida media de 30,23 años y decae a Ba-137m. Este, tras 2,55 minutos decae a su vez a Ba-137 estable emitiendo rayos X de 32 keV en coincidencia con electrones de conversión interna de 624 keV. (Ver Tabla 9 y referencia 9.17)

7.1.2. Determinación del ^{137}Cs por coincidencia CI-rayo X.

7.1.2.1. Análisis cualitativo.

El phoswich utilizado es el que se muestra en la Figura 7 y en la Figura 8, (ver págs.48 y 49). Se le acopla en su extremo un detector de tipo plástico de 0,5 mm, que será el encargado de medir las betas. Los rayos X traspasan en su totalidad esta fina lámina y son detectados en el CaF_2 y en menor cuantía en el NaI .

Se realizó una calibración en energías (al menos para señales en el CaF_2) para lo que se se obtuvo un espectro de una fuente patrón de ^{109}Cd , que emite rayos X de 22 keV y gammas de 88 keV (Ver referencia 9.18). Como puede comprobarse en la Figura 43, el primer pico se ve claramente en los primeros canales, y el segundo en el canal 255 (el último).

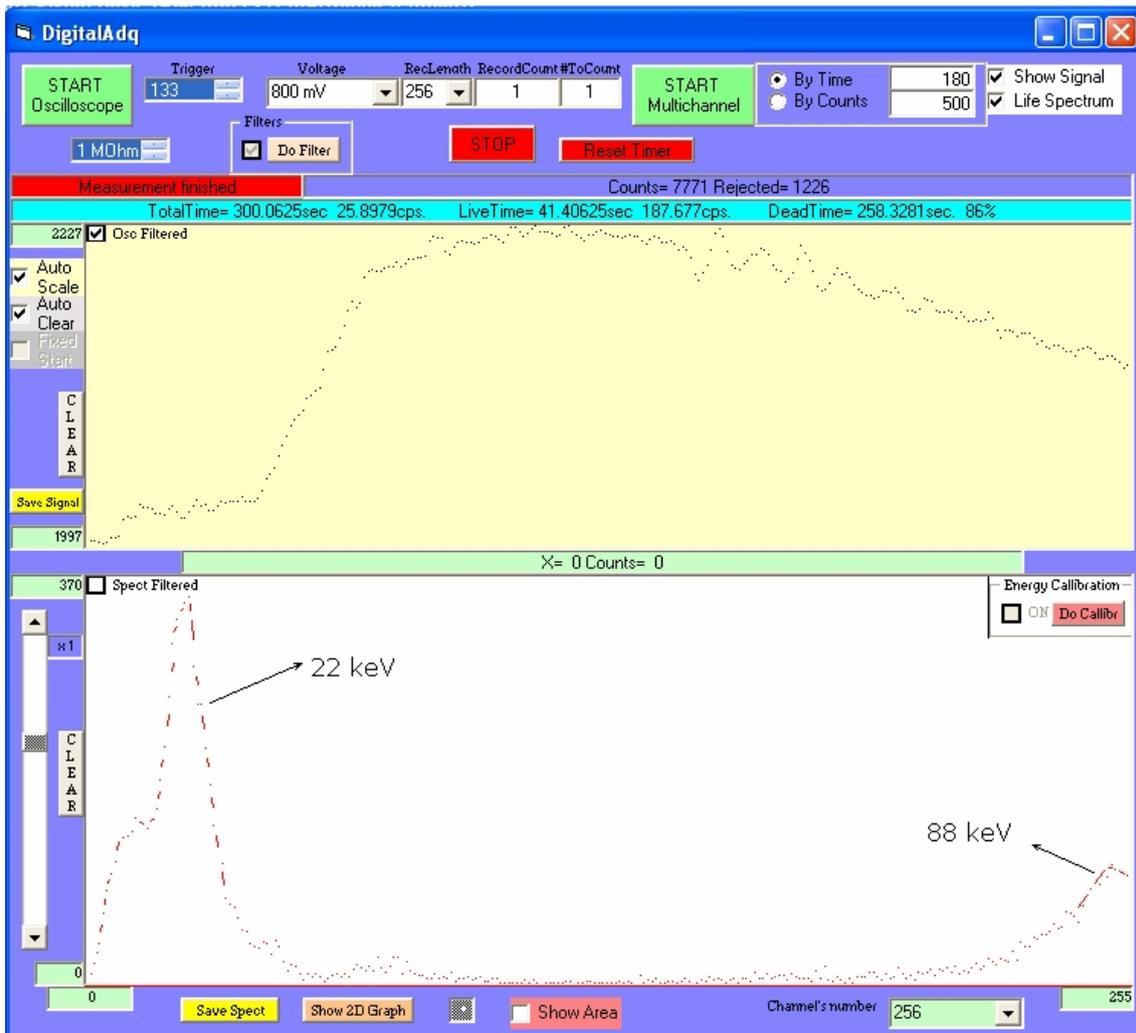


Figura 43 Espectro de ^{109}Cd para calibración en energías.

Una vez hecho esto, se pasó a tomar un espectro simple de la muestra (es decir, sin uso de filtros PSD), y cuyo resultado puede verse en la Figura 44.

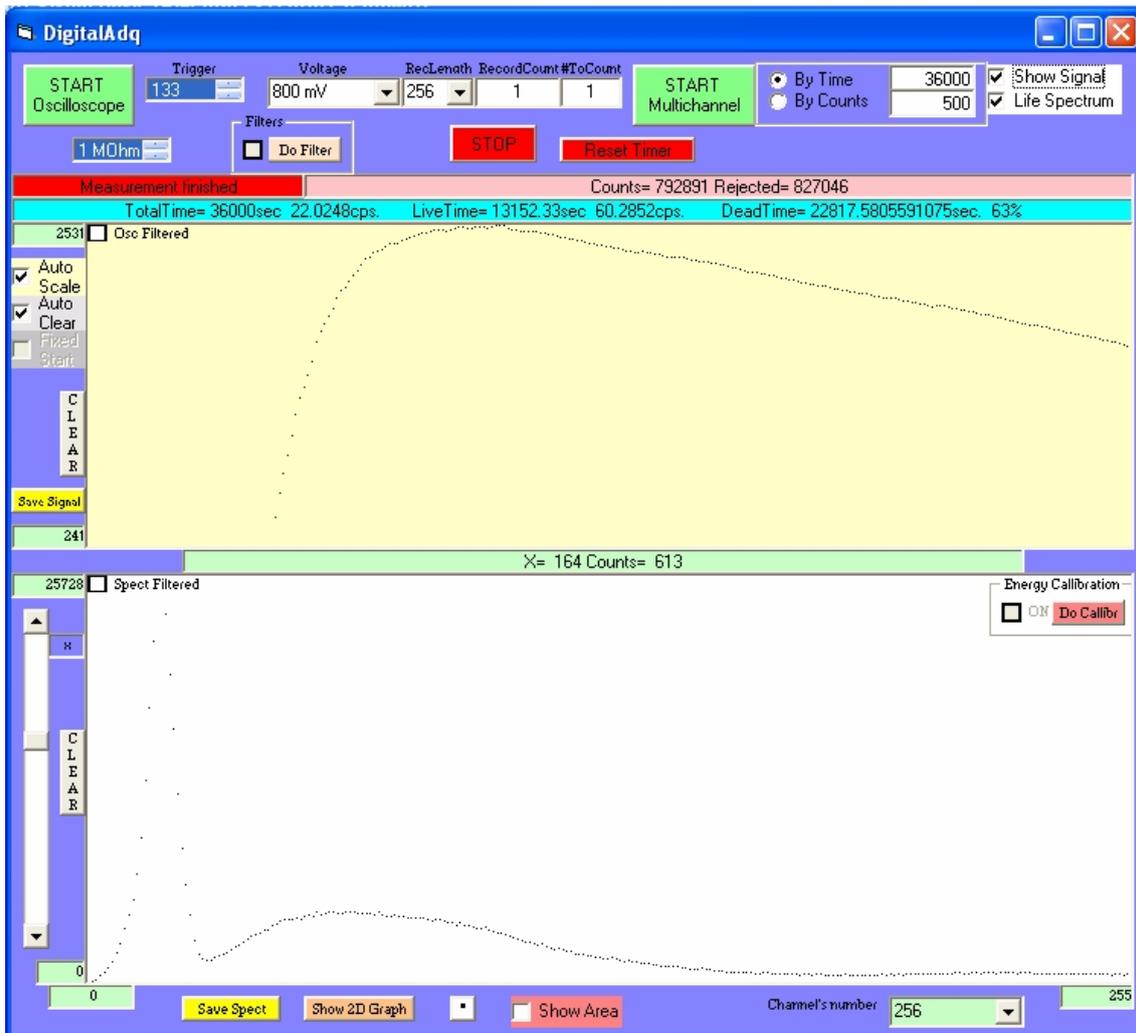


Figura 44 Espectro simple del patrón de ^{137}Cs

El primer pico del espectro de la Figura 44 se trata de ruido, y corresponde a señales de pequeña amplitud e irregulares como la de la Figura 45. Están producidas principalmente por inducciones en el cable coaxial que en nuestro caso es relativamente largo (unos 2 metros). El siguiente pico de la Figura 44, más bajo y extendido, está formado por señales de los tipos expuestos en la Figura 46, Figura 47, Figura 48, y Figura 49.

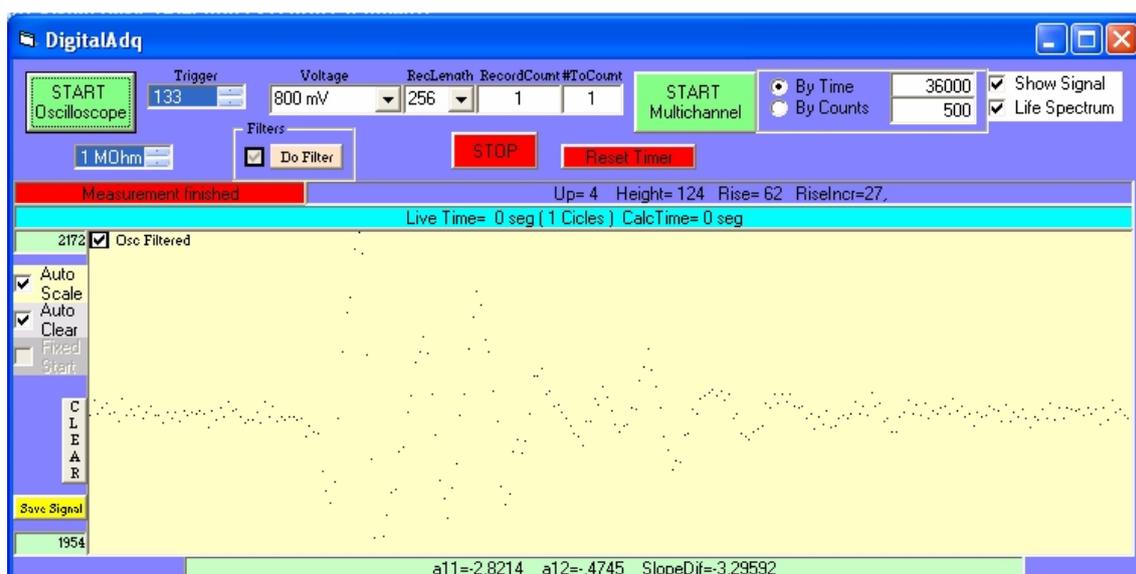


Figura 45 Señal de ruido en el patrón de ^{137}Cs

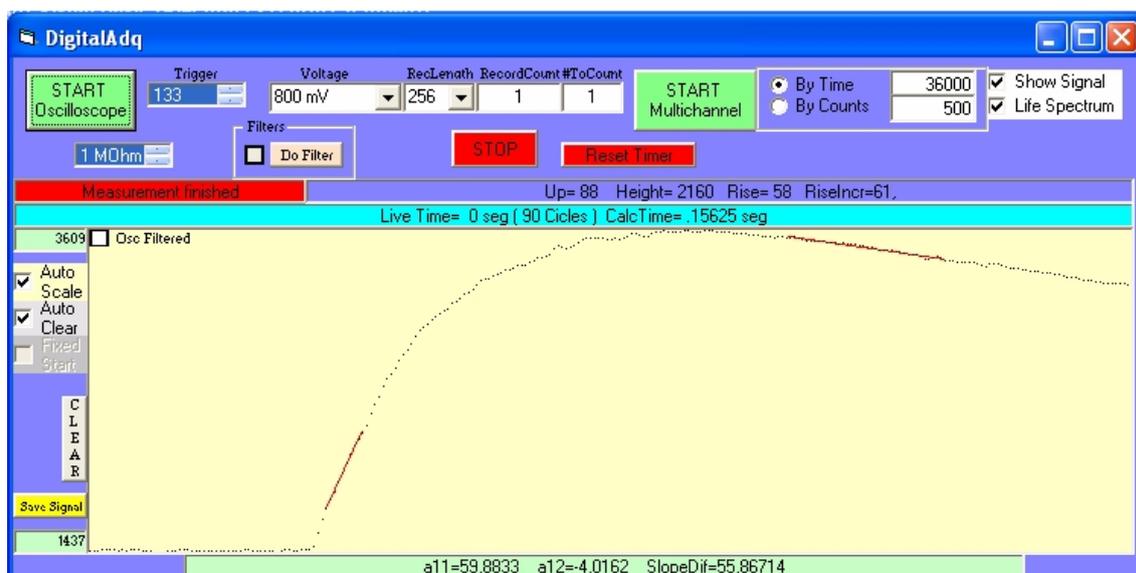


Figura 46 Señal de tipo CaF_2 por Rayos X de 32 keV del ^{137}Cs

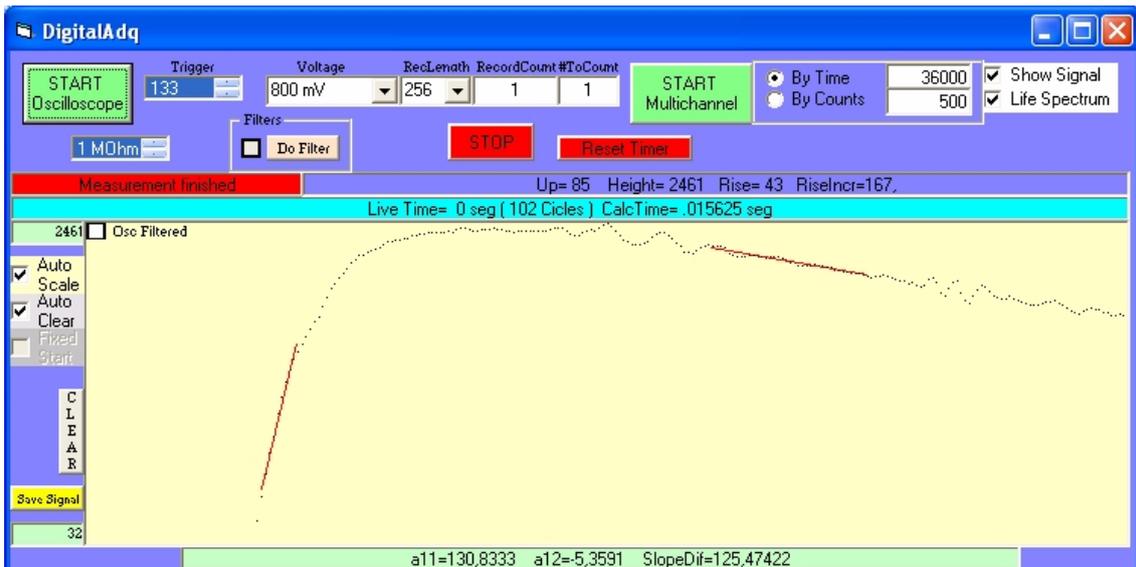


Figura 47 Señal de tipo NaI por gammas de 661 keV del ^{137}Cs

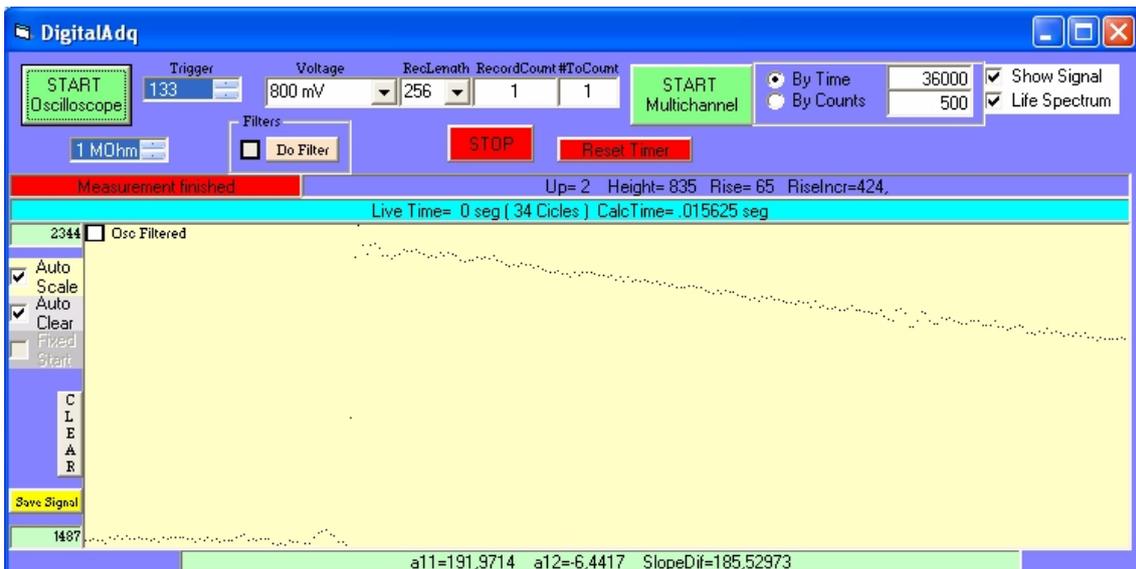


Figura 48 Señal de tipo plástico por CI y betas del ^{137}Cs

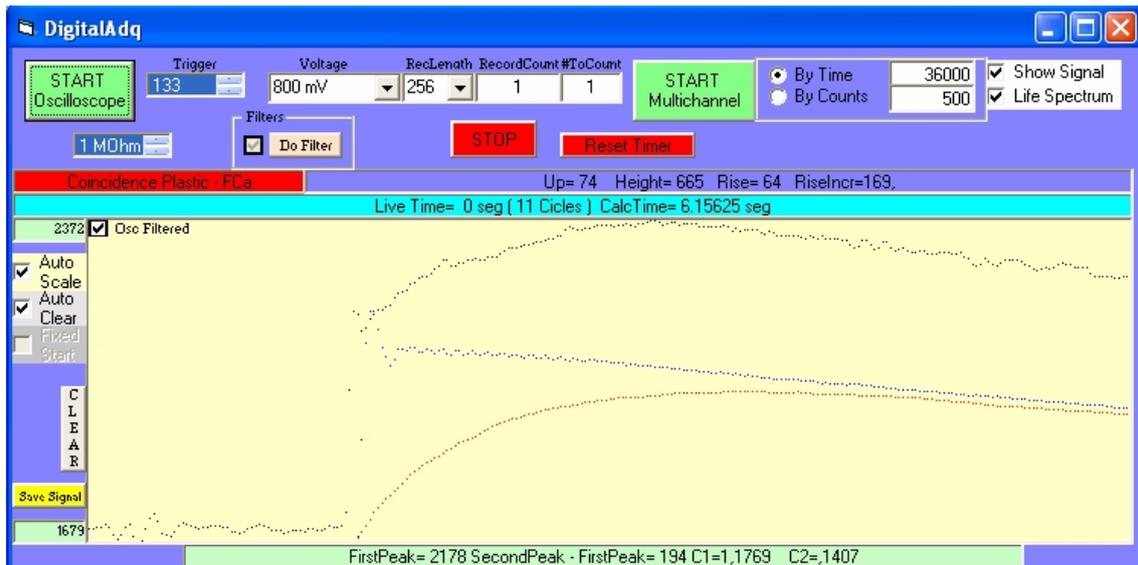


Figura 49 Señal de tipo coincidencia en el patrón del ^{137}Cs

Seguidamente se seleccionó un filtro tipo “Plástico-FCa”, y se aplicó la deconvolución automática de cada una de las mismas (Ver Figura 50 y video [Referencias\Cesio coincidencias.avi](#)). El dato relevante de cada una de las señales por separado es la altura (energía). Estos dos datos se representan por parejas en un diagrama de 2D (Ver Figura 51, y video [Referencias\Cesio 2D.avi](#)), observándose el típico agrupamiento propio de las señales coincidentes. Puede comprobarse que la zona puntual más densa situada a media altura es la que corresponde a la coincidencia buscada beta-rayo X.

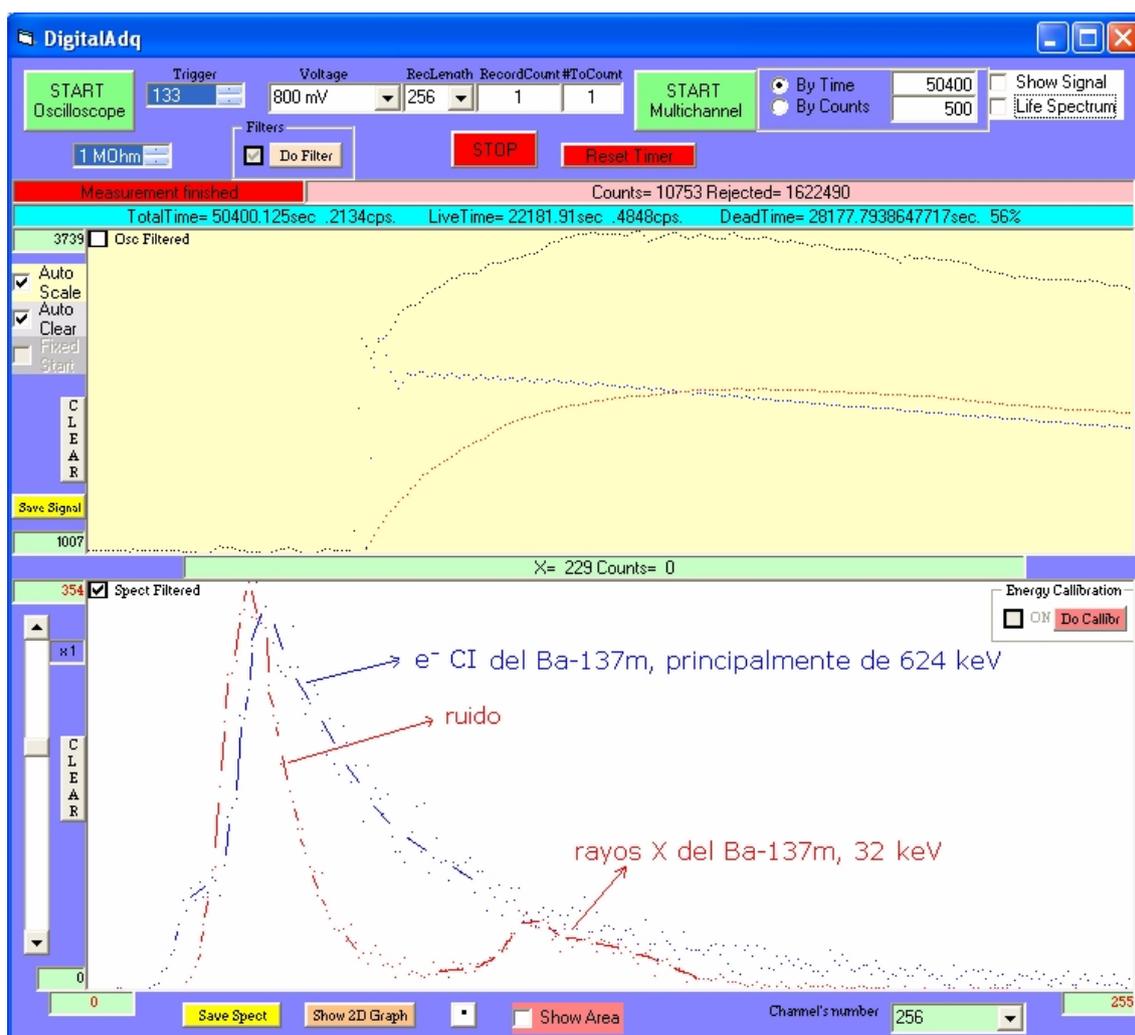


Figura 50 Espectro de coincidencias del patrón de ^{137}Cs

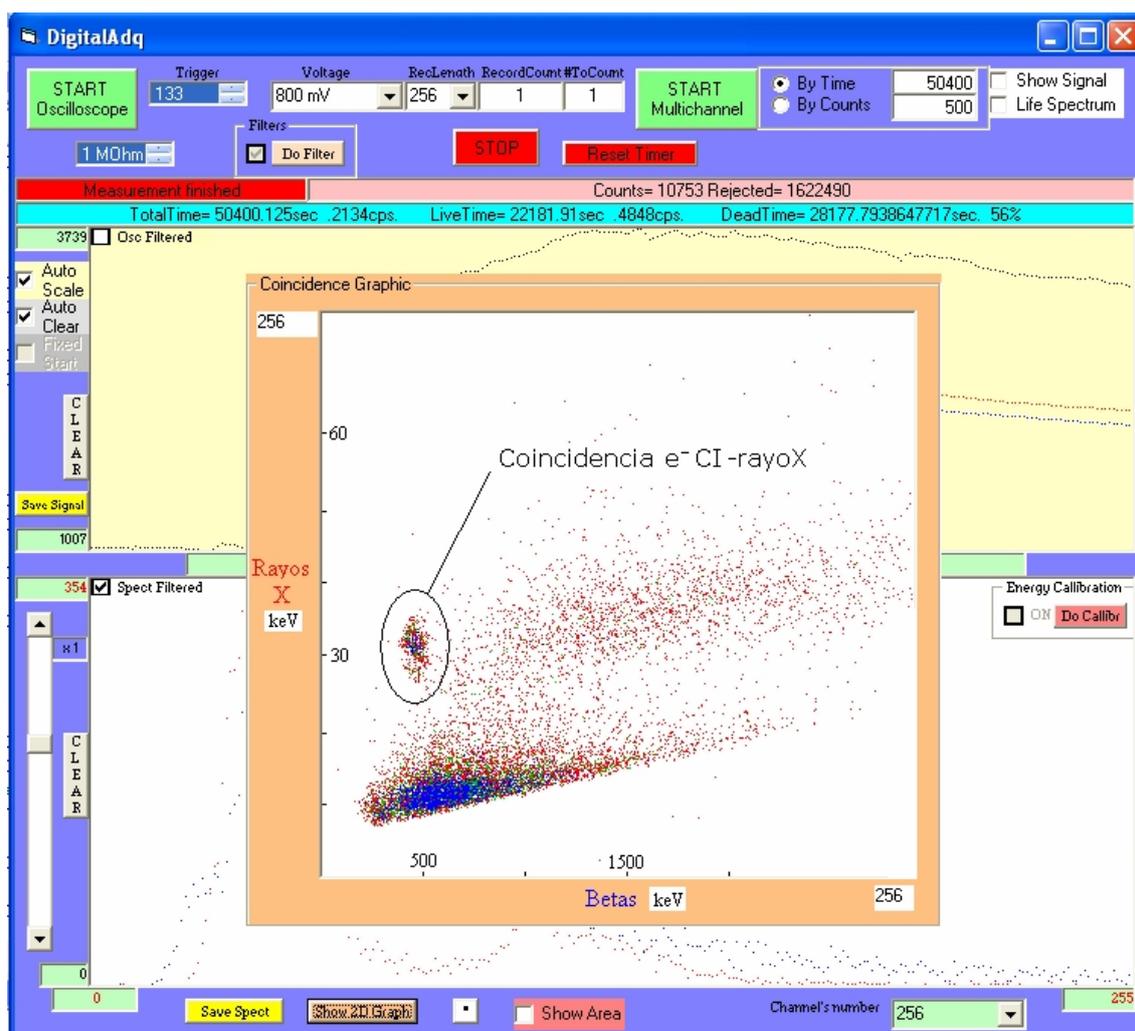


Figura 51 Diagrama 2D de coincidencias del patrón de ^{137}Cs

7.1.2.2. Análisis cuantitativo.

Según lo expuesto en el punto 3.1.3, puede calcularse la actividad absoluta de un radioisótopo sobre el que se puedan detectar coincidencias de dos tipos de radiación.

La muestra patrón tiene 200 μ l y está calibrada para el 1 de junio de 1991 con 2510 $\frac{\gamma}{g \cdot s}$ de 661,657 keV. La densidad de la muestra es 1,068 g/ml. Calculando, se obtiene que emitía 536 $\frac{\gamma}{s}$ el día de calibrado, y a día de hoy son 370 $\frac{\gamma}{s}$. Si tenemos en cuenta que por cada desintegración se producen 0,851 gammas, entonces la actividad es de 435 Bq.

Para confirmar experimentalmente esta actividad, ponemos diferentes filtros. El primero para que se obtengan señales como las de la Figura 48, es decir, electrones de CI en el plástico centelleador. El segundo para detectar las señales de rayos X (Figura 46 y Figura 47), y el tercero para detectar las coincidencias (Figura 49), pero solo aquellas que se encuentran en la zona indicada en la Figura 51.

Las tasas de recuento (eficiencias) para la geometría y condiciones de nuestro caso para electrones de CI (se denotarán como β), rayos X y coincidencias de ambas son:

$$R_{\beta} = \frac{120140}{6227} = 19,29 \pm 0,06 \frac{\text{cuentas}}{\text{s}} \quad (24)$$

$$R_x = \frac{19371}{11637} = 1,66 \pm 0,01 \frac{\text{cuentas}}{\text{s}} \quad (25)$$

$$R_{\text{coinc}} = \frac{1963}{22181} = 0,09 \pm 0,02 \frac{\text{cuentas}}{\text{s}} \quad (26)$$

Y la actividad absoluta:

$$A = \frac{R_{\beta} \cdot R_x}{R_{\text{coinc}}} = 362,9 \pm 39,3 \text{ Bq} \quad (27)$$

Comparado con el valor del patrón, que es de 435 Bq, podemos concluir que el el valor obtenido es aceptable teniendo en cuenta otros errores introducidos a lo largo del proceso y no considerados (pesada, determinación de áreas, substracción de fondos, etc). Podemos estimarlos como sigue. Error de pesada en la preparación del patrón: 1%. Error en la actividad del patrón: 1%. Error debido a la determinación del área del pico de electrones de Cl en el detector plástico que interfiere con el espectro beta continuo del ^{137}Cs : 10%. Detección de rayos X de 32 keV en el CaF_2 y NaI en lugar de en un único centelleador: 5%.

7.1.2.3. Discusión.

Hay que tener en cuenta que este producto de fisión no es el más indicado para aplicarle este método, ya que el % de rayos X que se emiten por cada desintegración es bajo. Si consultamos las tablas de la referencia 9.17 vemos que las líneas de emisión $K_{\alpha 2}$ y $K_{\alpha 1}$ (de aprox. 32 keV) sumadas, no sobrepasa el 5,8%. Aún así se ha aplicado a este radioisótopo por ser uno de los más comunes en los análisis de radiactividad ambiental.

En cambio, para otros productos en los que hay una relación alta de betas+rayos X por desintegración, este método sería bastante más adecuado. Por ejemplo, es el caso de la familia de isótopos del Xenon: ^{131m}Xe , ^{133m}Xe , ^{133}Xe y ^{135}Xe , como puede verse en la referencia 9.4.

Se destaca también el hecho de que si quisiéramos detectar coincidencias en muestras en las que se encuentra más de un isótopo emisor beta con espectro continuo, sería muy difícil o imposible distinguir entre las coincidencias provenientes de cada uno de ellos.

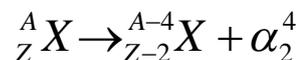
En el punto 7.4, se propondrán como líneas de investigación futuras, varios procedimientos para determinar cuantitativamente emisores beta no monoenergéticos mediante coincidencias, mejorando éste método.

7.2. Determinación de transuránidos por medio de coincidencias α - γ y α -rayo X.

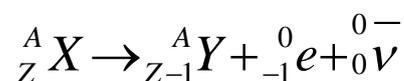
7.2.1. Características generales de los transuránidos.

Se conoce como transuránidos a aquellos elementos con número atómico superior a 92. Estos no se encuentran en proporciones usualmente observables en la naturaleza y si lo son, es por provenir de un origen artificial. Todos los que se conocen hasta la fecha son radiactivos (inestables) con periodos de semidesintegración mucho menores que la propia edad de la tierra, por lo que si hubiesen estado presentes en su formación se entendería su no presencia actual. Su detección, por tanto, tiene una gran importancia para los grupos de radiación ambiental ya que su presencia denota posibles escapes de centrales nucleares o pruebas atómicas atmosféricas.

Los isótopos transuránidos tienden a emitir partículas alfa, para reducir de este modo tanto su número másico como atómico.



Para corregir el desequilibrio se combinan con decaimientos beta-menos, que transforman un neutrón en un protón (junto con un electrón y un antineutrino).



Se forman así cadenas de desintegración que terminan en isótopos estables.

La emisión de estas partículas alfa hacen que la radiotoxicidad de estos elementos sea muy alta, y su presencia en muy pequeñas cantidades en los tejidos de los seres vivos da lugar a dosis de radiación muy elevadas en las regiones directamente expuestas.

En el esquema de desintegración de los transuránicos podemos observar que en muchas ocasiones los decaimientos alfa están seguidos de emisiones gamma que son detectadas como coincidencias en los equipos de medida.

Como puede comprobarse en la Tabla 6 y referencia 9.19, el ^{241}Am emite partículas α de unos 5,4 MeV en coincidencia con rayos γ de 59 keV.

7.2.2. Determinación de ^{241}Am por coincidencia α -rayo X.

7.2.2.1. Análisis cualitativo

La detección de muestras emisoras α tiene el inconveniente de tener que realizar finas deposiciones para que la actividad no se vea enmascarada por la autoabsorción de la fuente. Para poder evitar esta preparación, se mezclaron varias cantidades de muestra patrón de ^{241}Am con diversos centelleadores líquidos.

Por ejemplo, el mostrado en la Figura 52, se realizó mezclando 10 ml de patrón conteniendo una actividad total de 169 Bq en total, con otros 10 ml de centelleador líquido *Instagel Plus* ($\text{\textcircled{R}}\text{PerkinElmer}$) (ver ref.9.14). El resultado de la mezcla se introdujo en una cápsula de vidrio de forma circular y se selló con silicona. El líquido centelleador reacciona con los plásticos por lo que no se puede mantener en contacto directo con ellos. Incluso la silicona es también susceptible de ser atacada, por lo que se recomienda manejar con cautela.

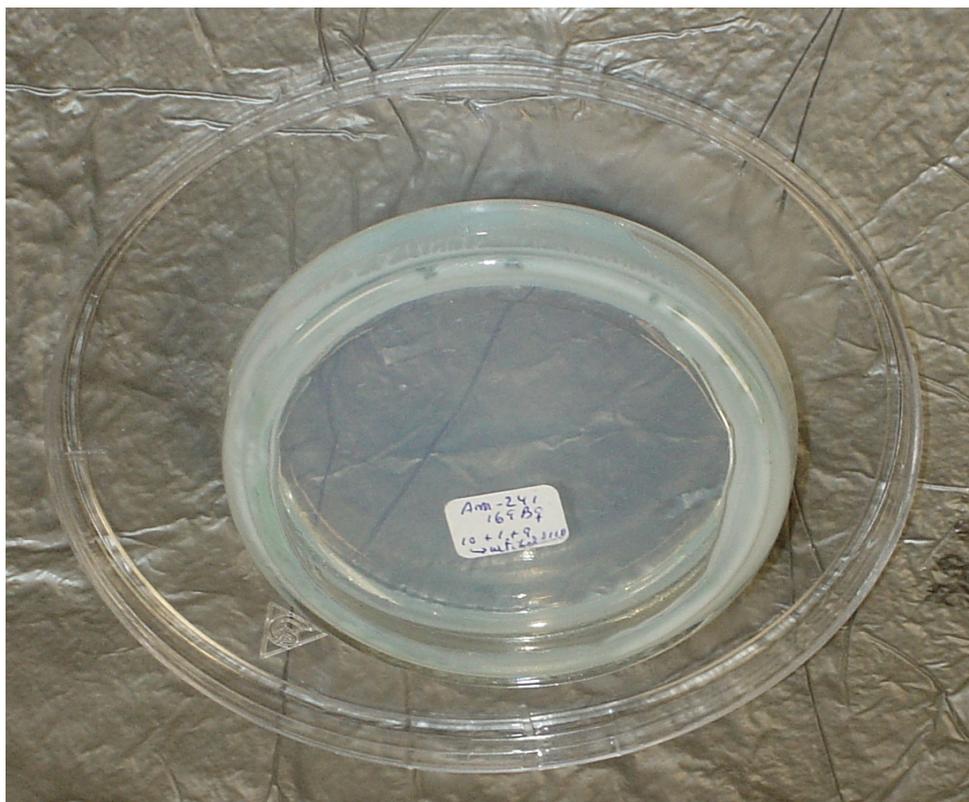


Figura 52 Patrón de ^{241}Am disuelto en líquido centelleador.

La cápsula de vidrio se introduce a su vez en el interior de una cápsula *petri* de plástico, con el propósito de centrar el patrón al colocarlo sobre el detector (Figura 53) y reducir la posibilidad de contaminación del mismo.



Figura 53 Centelleador líquido colocado sobre el Phoswich.

Hay que destacar que para evitar que la luz ambiental pueda dañar el tubo fotomultiplicador, el montaje de la Figura 53 ha de cubrirse con plásticos y tela negros.

Asimismo se realizaron varias pruebas con viales de vidrio como los usados en los equipos automáticos de centelleo líquido. Se introdujo en ellos 1 ml de disolución patrón de 50 Bq de ^{241}Am junto con 1 ó 2 ml de otros tipos de centelleadores líquidos, como *UltimaGold LLT* ($\text{\textcircled{R}}$ PerkinElmer) (ver ref.9.16).

Tras varias pruebas para optimizar la detección, se escogen los siguientes parámetros: Impedancia 1 M Ω , Voltaje: 2 V. Trigger: 133. En estas condiciones se toma un espectro como el mostrado en la Figura 54.

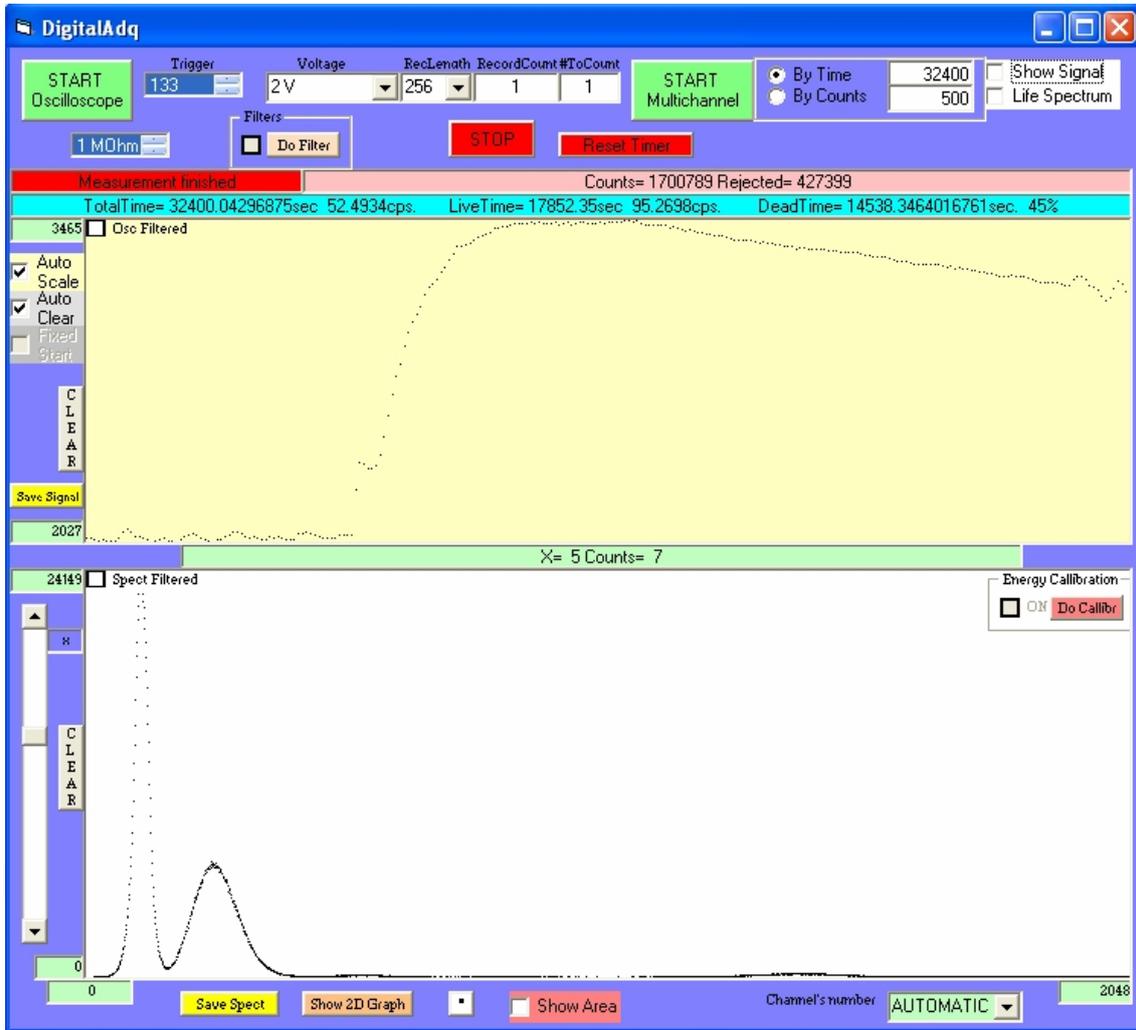


Figura 54 Espectro ^{241}Am

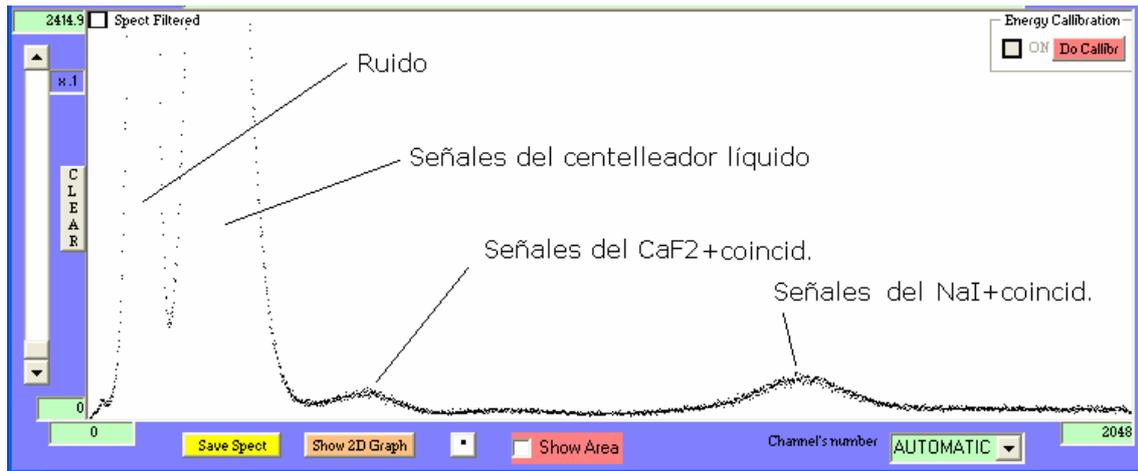


Figura 55 Espectro de la Figura 54 aumentado x10

Los 4 picos que se observan en la Figura 55 son respectivamente debidos a las siguientes señales:

- a) Señales de ruido (Figura 56)
- b) Señales provenientes del centelleador líquido: partículas alfa (Figura 57)
- c) Señales generadas por coincidencias del centelleador líquido y gammas que dejan su energía en el CaF_2 . (Figura 58)
- d) Señales provenientes de gammas detectadas en el NaI (Figura 59). En este mismo pico se detectan también coincidencias del centelleador líquido con gammas del NaI (Figura 60).

Como puede comprobarse las señales gamma y de coincidencias aparecen acumuladas en una misma zona del espectro, ya que su altura es muy similar. Un equipo analógico de coincidencias no podría distinguirlas. En cambio, en nuestro caso podemos discriminarlas de forma sencilla por su forma.

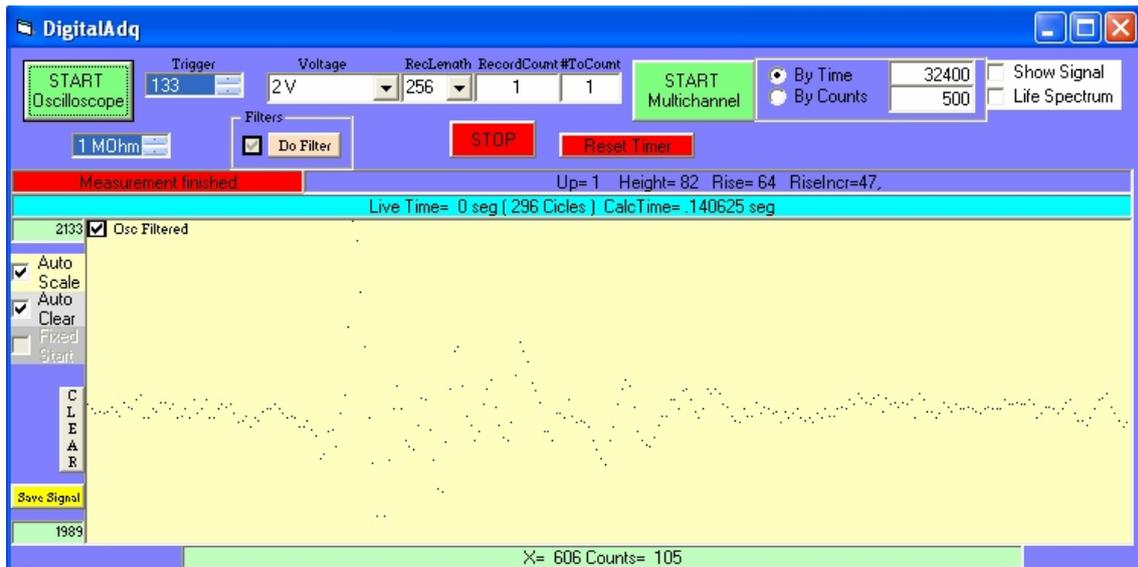


Figura 56 Ruido en espectro ^{241}Am .

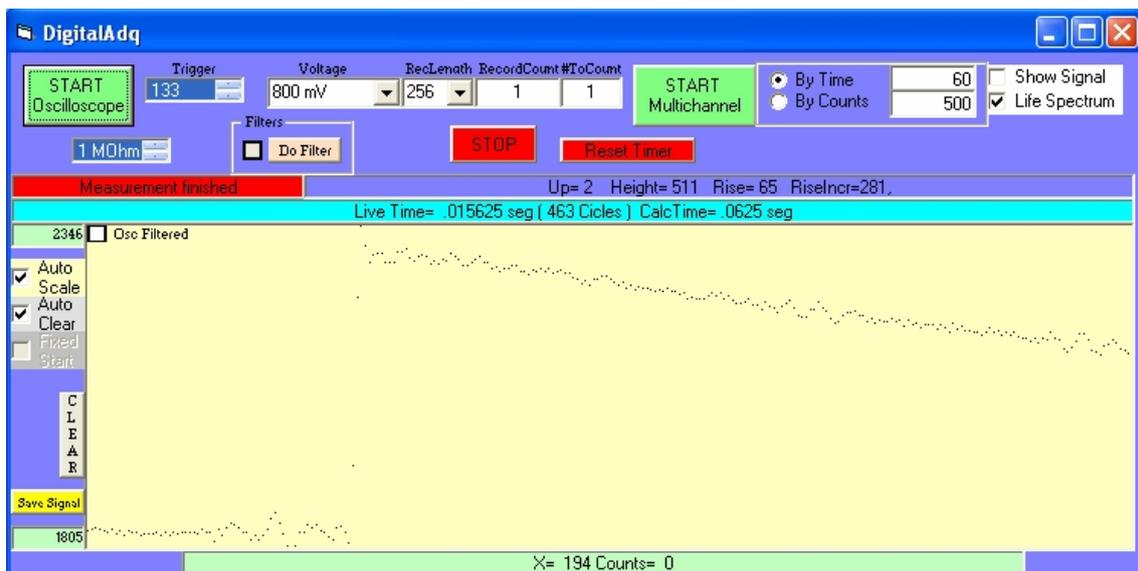


Figura 57 Partícula alfa (centelleo líquido) en espectro ^{241}Am .

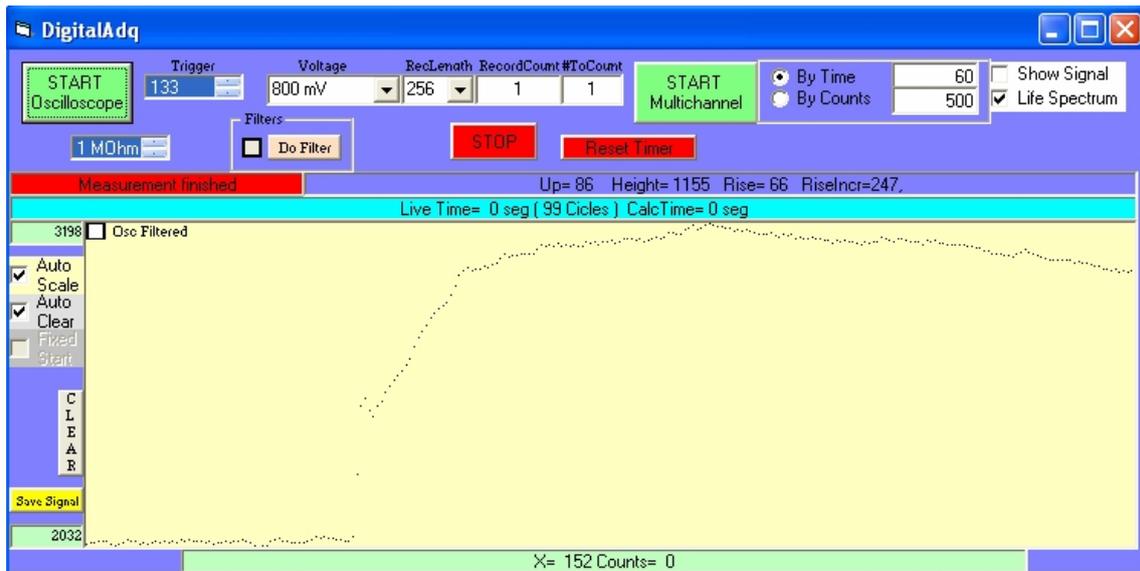


Figura 58 Coincidencia alfa-gamma(CaF_2) en espectro ^{241}Am .

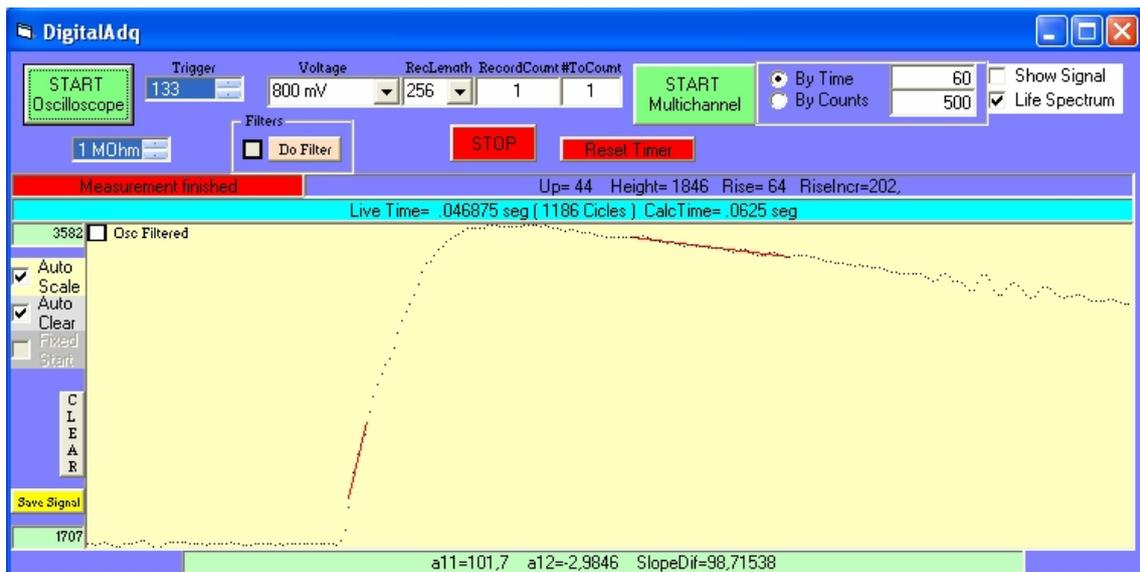


Figura 59 Gamma (NaI) en el espectro ^{241}Am .

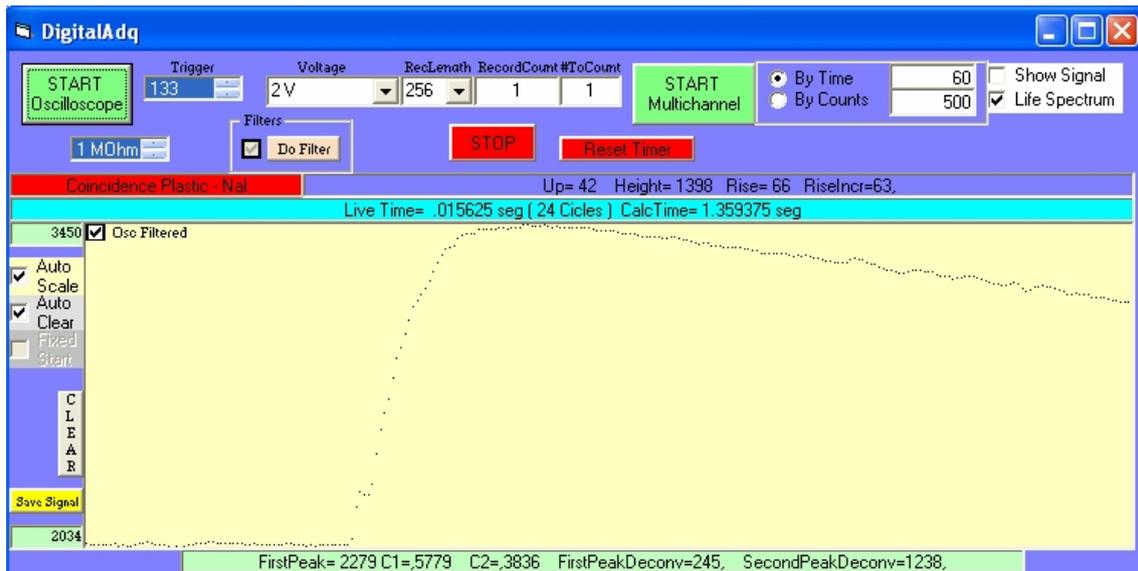


Figura 60 Coincidencia centelleador líquido-gamma en el NaI

Se realizó un primer análisis de coincidencias, aplicando un filtro de coincidencias "plástico- CaF_2 ". Pudimos emplear el mismo tipo de filtro ya desarrollado para el centelleador plástico, ya que la emisión lumínica del líquido centelleador es equivalente en cuanto a la rápida respuesta de la señal, por lo que la forma de ambas es similar. Como puede verse en la Figura 61, las señales del primer pico de coincidencias se deconvolucionan de forma correcta. También vemos en la Figura 62 que es más o menos aceptable aproximar la deconvolución de una señal de NaI con una de CaF_2 , ya que la altura de la "señal roja" calculada no variará mucho.

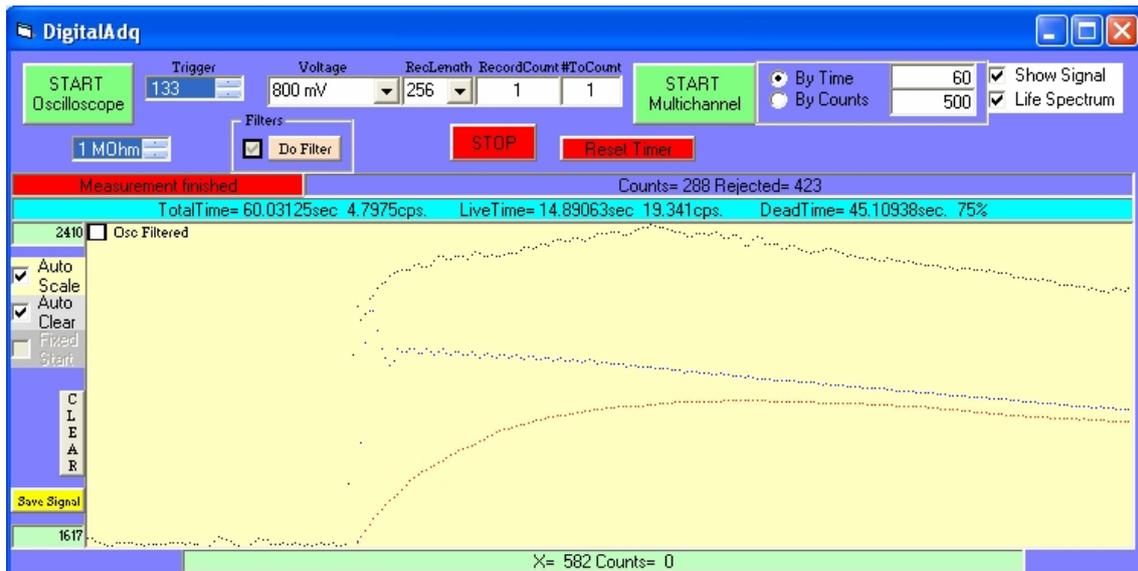


Figura 61 Deconv. de coincidencia CaF₂-centelleador líquido en ²⁴¹Am.

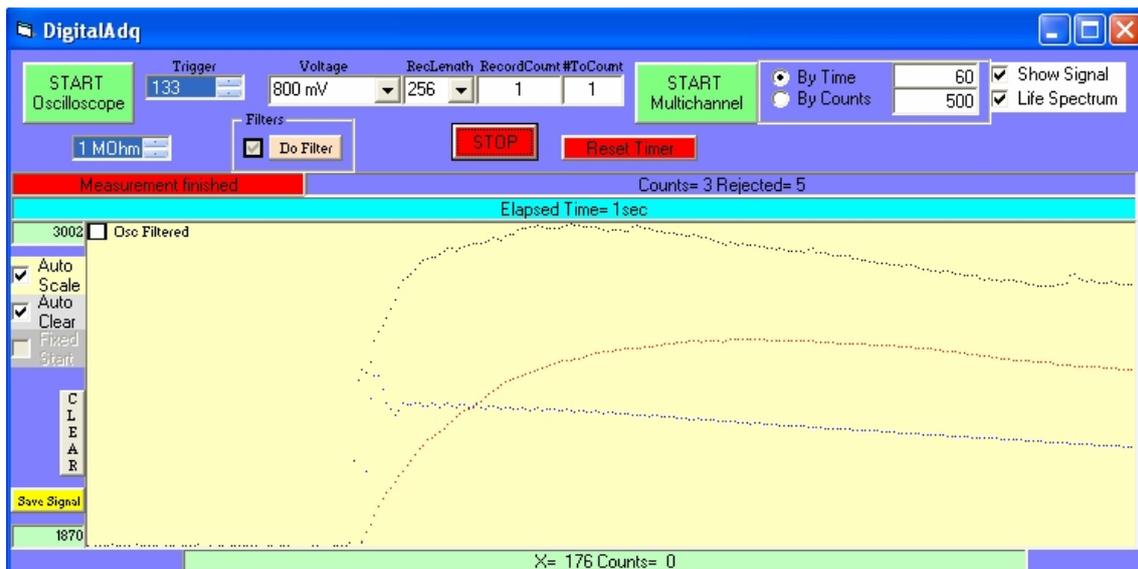


Figura 62 Deconv. de coincidencia NaI-centelleador líquido en ²⁴¹Am.

En cambio, el filtro en principio no estaba bien ajustado, y pasaban señales que no eran coincidencias, y sobre los que la deconvolución se aplicaba. (Ver vídeo [Referencias/Americio Coinc solo con altura mayor 200.avi](#)) Así podemos ver como ejemplo, la Figura 63 representa una señal de ruido deconvolucionada de forma errónea.

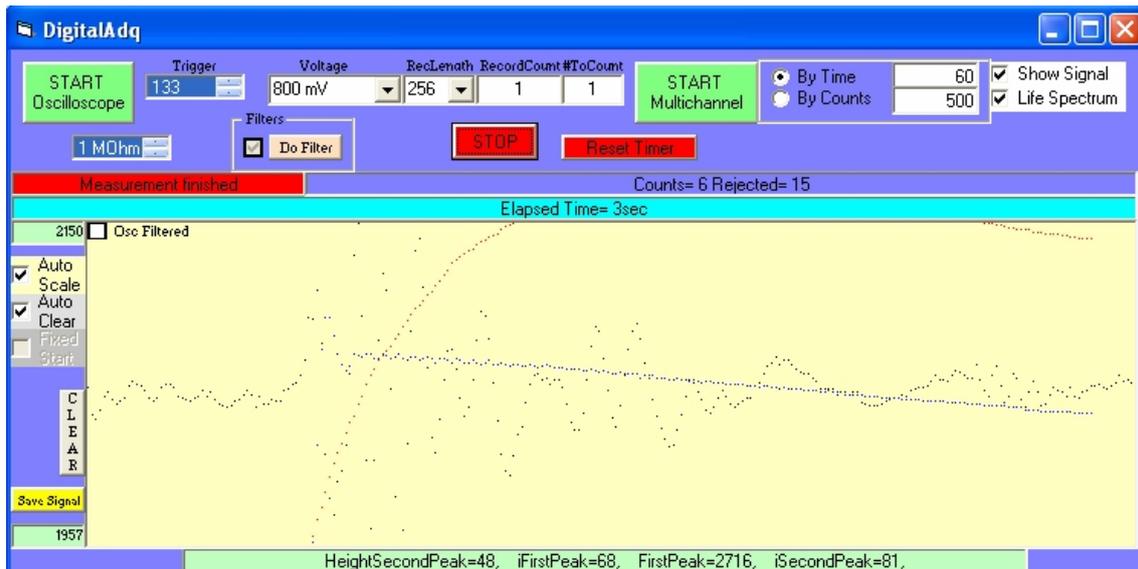


Figura 63 Señal de ruido tomada erróneamente como coincidencia.

Incluso, como puede observarse en la Figura 64, señales que no son coincidencias fueron detectadas como tales, y por tanto tratadas por el algoritmo de deconvolución.

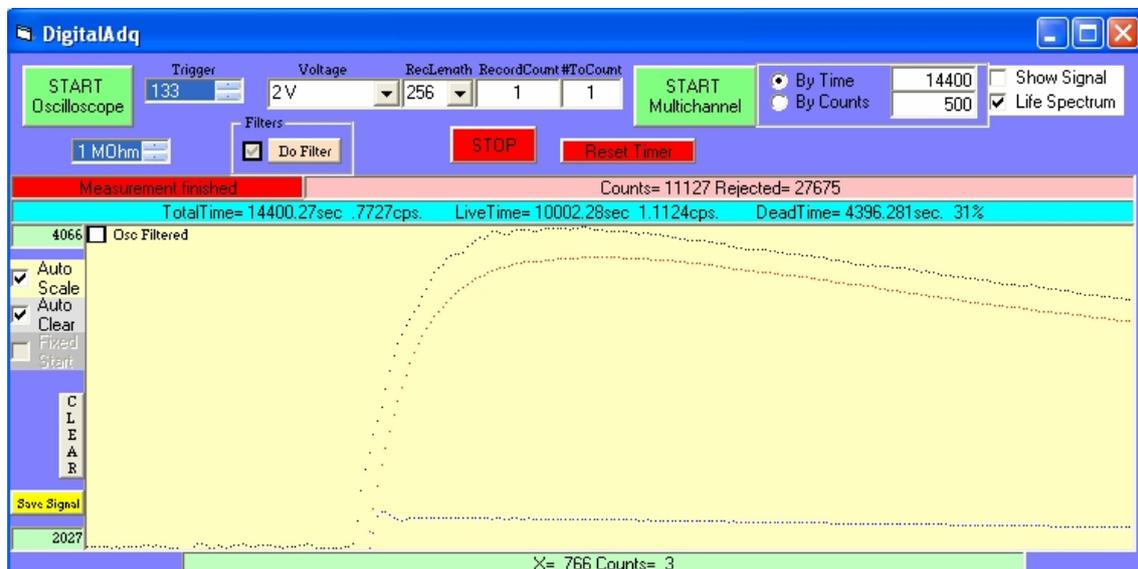


Figura 64 Señal no coincidente deconvolucionada por error.

Así, en el diagrama 2D de coincidencias que se obtiene (Figura 65) pueden verse varias zonas de acumulación, junto con una alta dispersión.

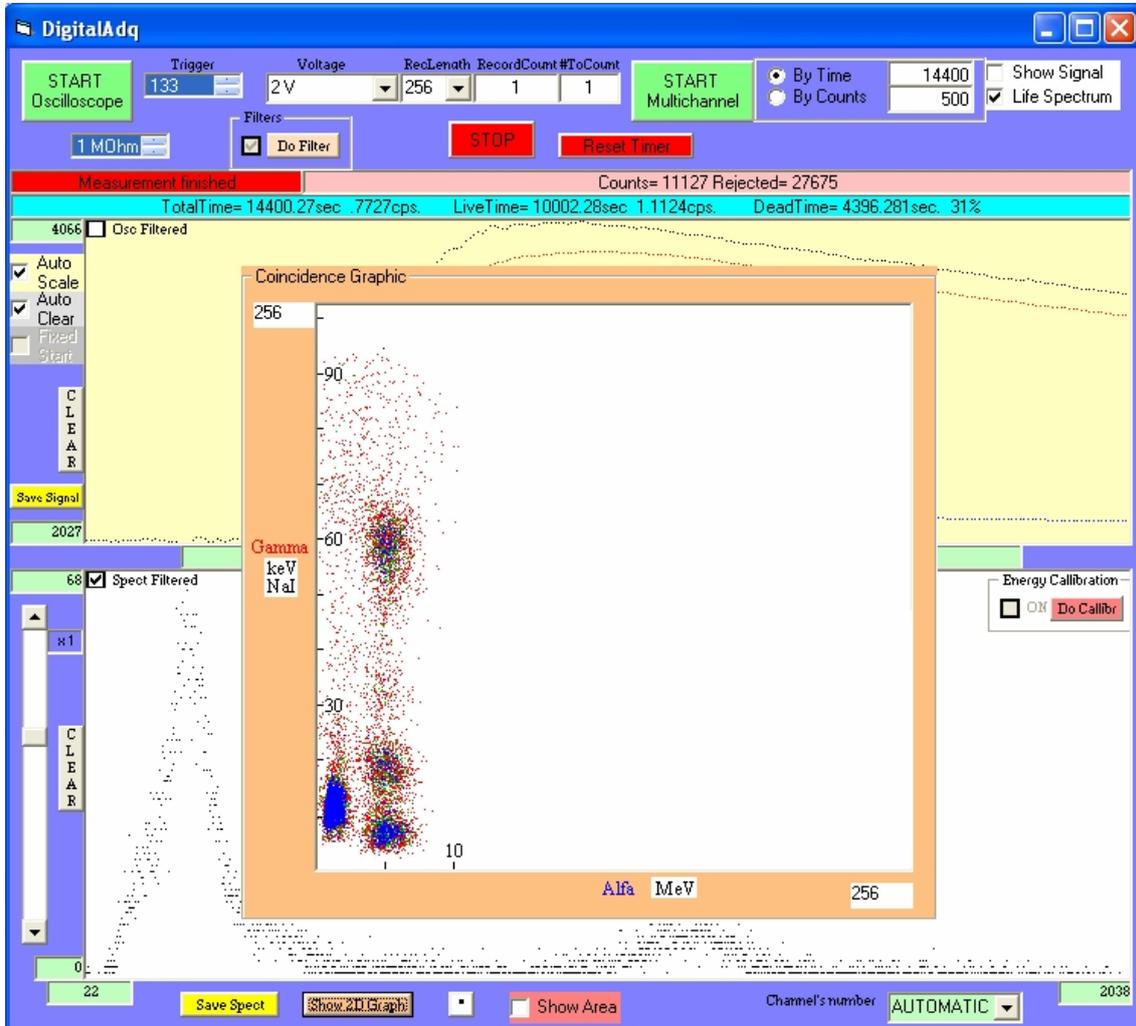


Figura 65 Gráfico 2D preliminar de coincidencias del ^{241}Am

Se modificó el filtro de una forma muy sencilla. Se fijó el parámetro altura >1000 para quedarnos solo con las señales que forman el cuarto pico de la Figura 55. Pero aun así se seguían sin discriminar señales no coincidentes como las de la Figura 64. Así que se añadió FirstPeak <2500. De esta forma solo se recogen los impulsos similares a los de la Figura 60. De lo cual resulta un

diagrama 2D de coincidencias (Figura 66) mucho mas claro y con menos dispersión y un espectro de señales deconvolucionado como el de la Figura 67.

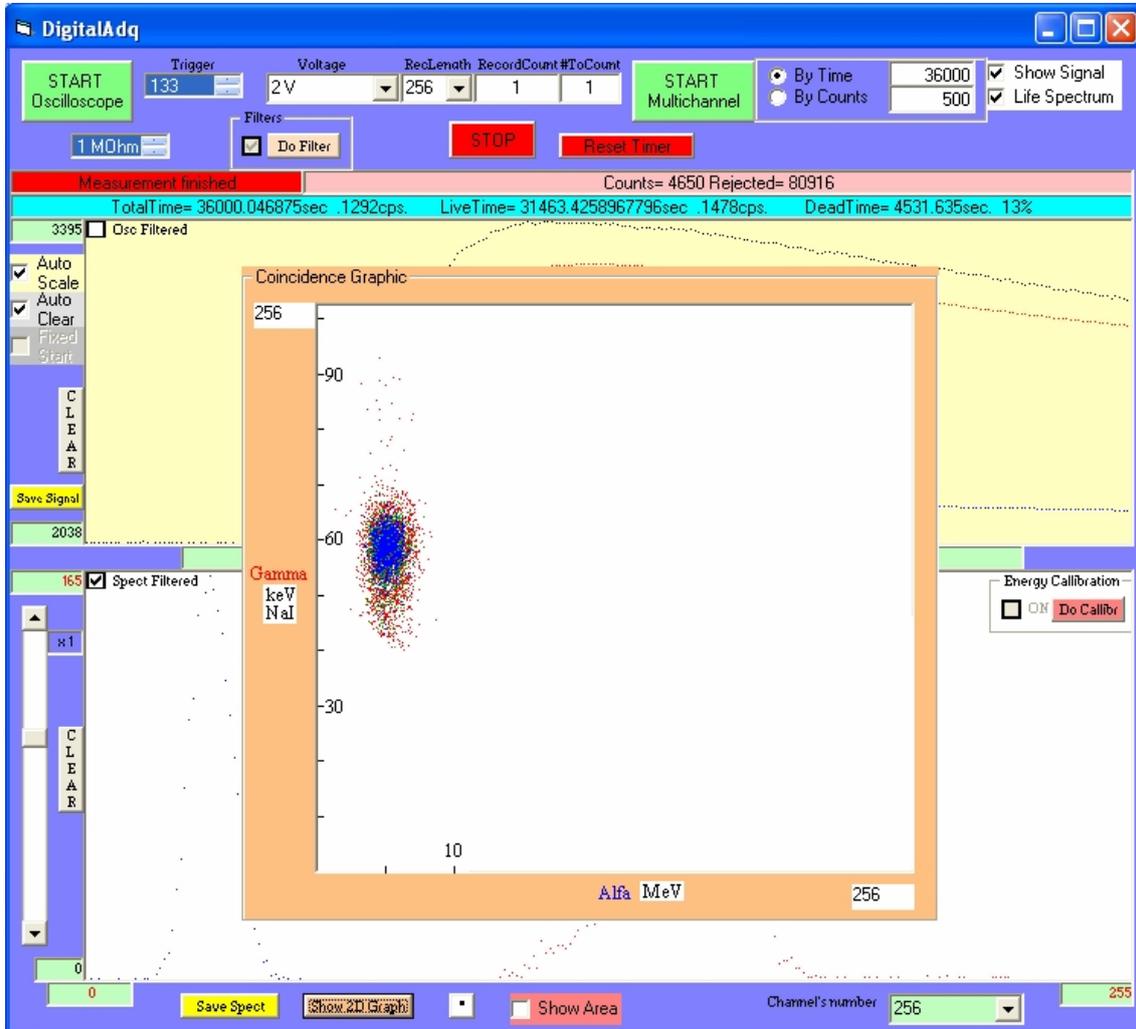


Figura 66 Gráfico 2D mejorado de coincidencias del ^{241}Am

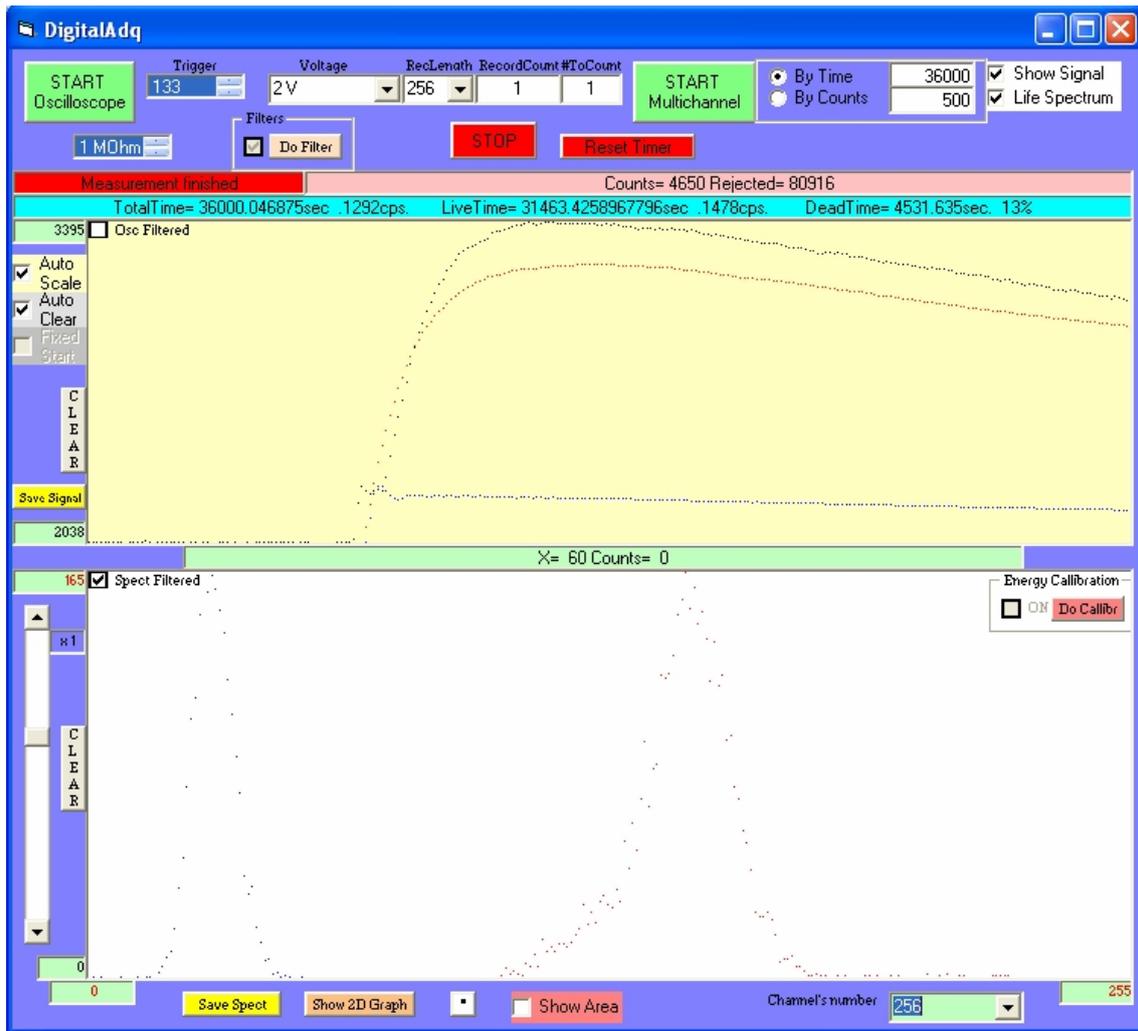


Figura 67 Espectro mejorado de deconvolución del ^{241}Am

Por último, nos quedaba dar el paso necesario para añadir a las coincidencias centellador líquido- CaF_2 (ver Figura 58). Tras varias pruebas, se comprobó que la mejor solución era fijar $\text{Altura} > 400$ junto con $\text{Abs}(\text{SecondPeak} - \text{FirstPeak}) > 200$. La primera condición nos asegura que no aparecen señales de los dos primeros picos. Y la segunda se añade para eliminar señales no coincidentes como las de la Figura 64. Esto nos hizo obtener el resultado definitivo de coincidencias en el ^{241}Am . (Ver Figura 68).

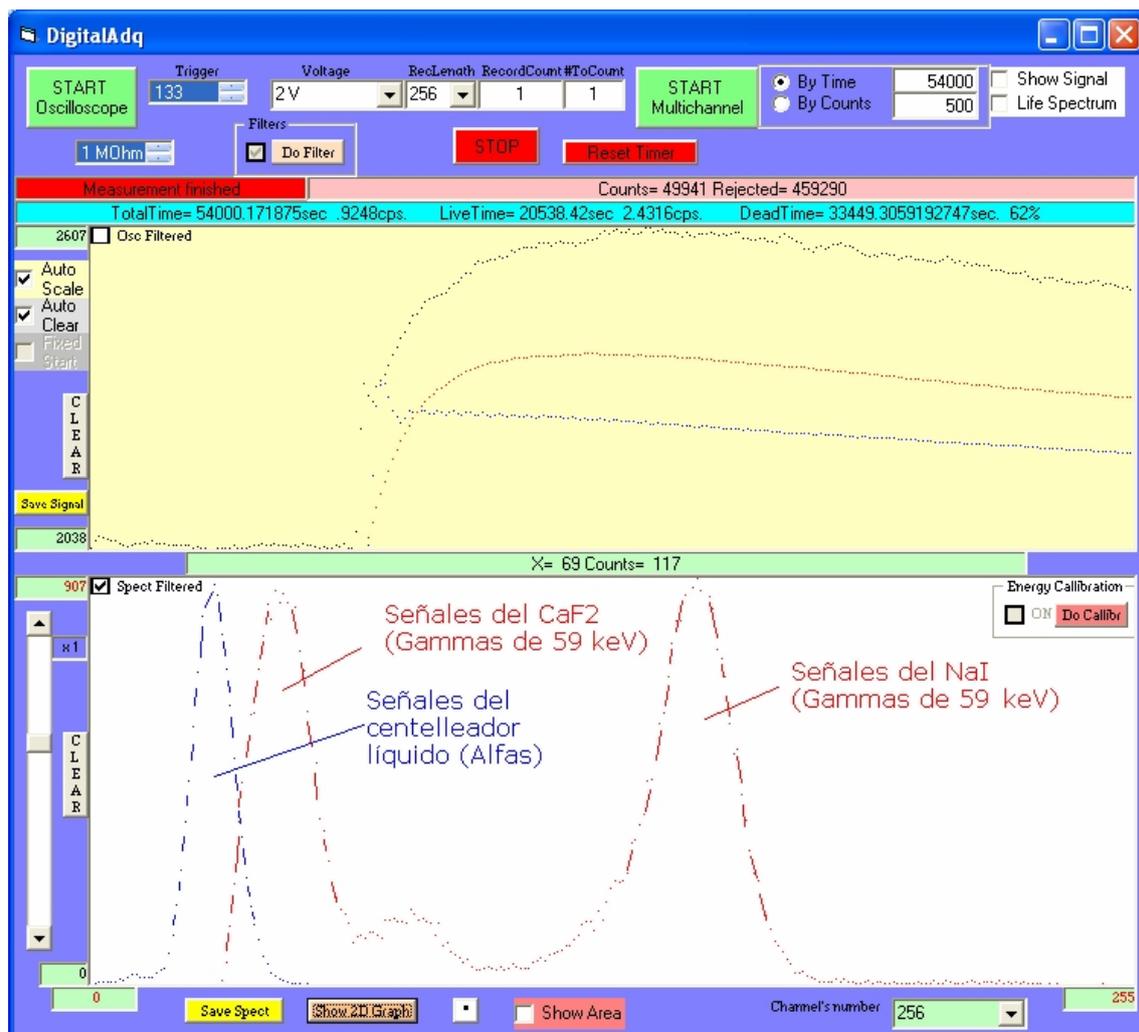


Figura 68 Espectro de deconvolución del ^{241}Am

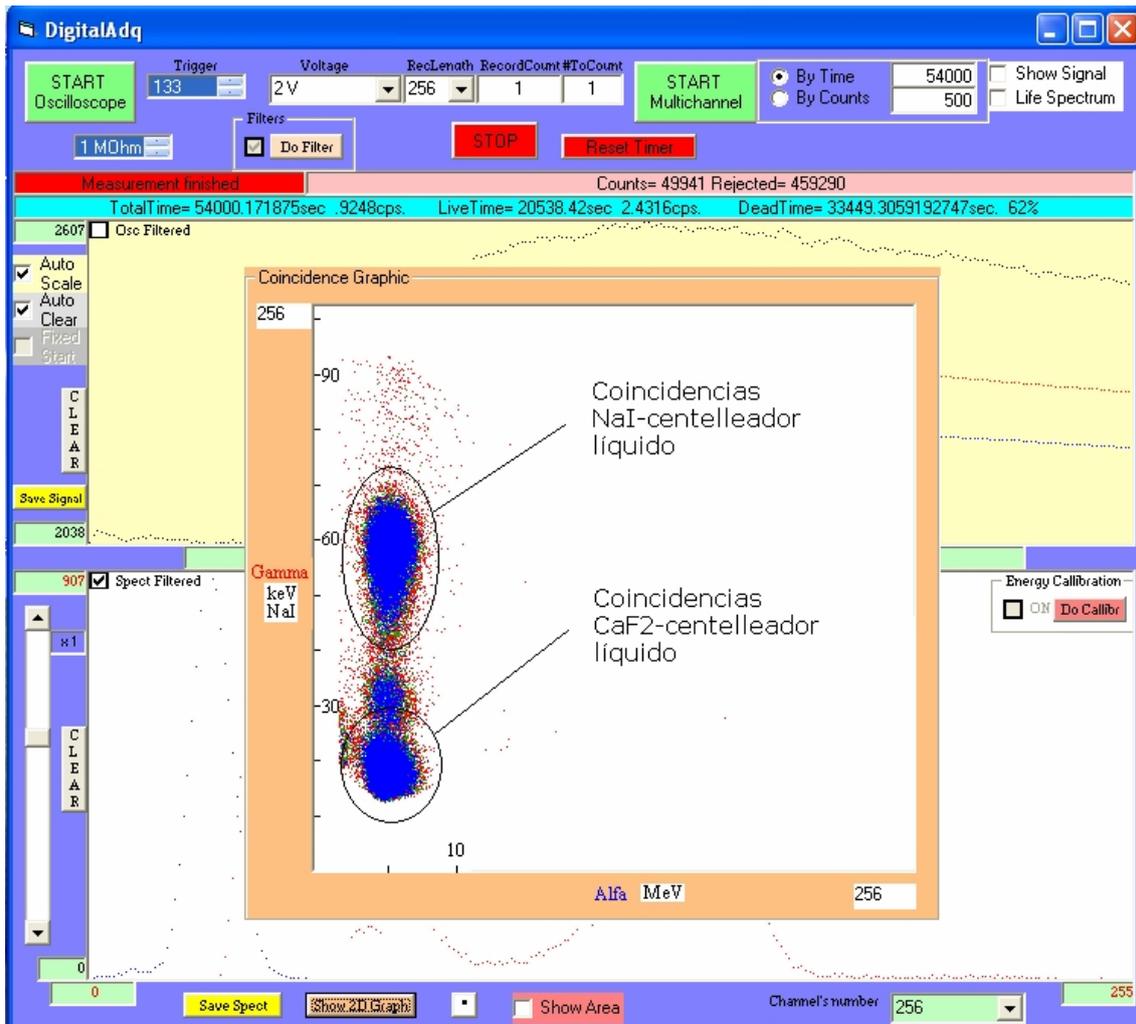


Figura 69 Gráfico 2D mejorado de coincidencias del ^{241}Am

Las dos zonas que aparecen en la Figura 69 corresponden a las gamma de 59 keV que dejan su energía respectivamente en el NaI (Figura 60) y en el CaF_2 (Figura 58). La zona intermedia, en la que parece haber también algún tipo de coincidencia, es probablemente debida a los rayos X del ^{241}Am , de entre 13 y 20 keV.

Puede consultarse el video [Referencias\Americio filtro modo oscilosc.avi](#) donde se muestra el estudio de las señales una a una (modo osciloscopio) en función del código del filtro.

En [Referencias\Americio Coinc filtro correcto.avi](#) se observa el resultado final del filtro correcto durante una medida de larga duración.

7.2.2.2. Análisis cuantitativo.

Según lo expuesto en el punto 3.1.3, puede calcularse la actividad absoluta de un radioisótopo sobre el que se puedan detectar coincidencias de dos tipos de radiación. Sobre un patrón de 50 Bq de ^{241}Am como los ya descritos anteriormente, en 300 segundos se obtuvieron 5370 cuentas alfa, 415 gammas y 132 coincidencias. Por tanto las tasas de recuento (eficiencias) para la geometría y condiciones de nuestro caso para partículas Alfa, Gamma y coincidencias de ambas son:

$$R_{\alpha} = \frac{5370}{300} = 17,9 \pm 0,2 \frac{\text{cuentas}}{\text{s}} \quad (28)$$

$$R_{\gamma} = \frac{415}{300} = 1,38 \pm 0,07 \frac{\text{cuentas}}{\text{s}} \quad (29)$$

$$R_{\text{coinc}} = \frac{132}{300} = 0,44 \pm 0,04 \frac{\text{cuentas}}{\text{s}} \quad (30)$$

Y la actividad absoluta:

$$A = \frac{R_{\alpha} R_{\gamma}}{R_{\text{coinc}}} = \frac{\frac{5370}{300} \cdot \frac{415}{300}}{\frac{132}{300}} = 56,28 \text{ Bq} = 56 \pm 6 \text{ Bq} \quad (31)$$

En una medida de mayor duración, de 32400 segundos, se obtuvieron 570256 cuentas alfa, 41658 gammas y 13500 coincidencias.

$$A = \frac{R_{\alpha} R_{\gamma}}{R_{\text{coinc}}} = \frac{570256 \cdot 41658}{\frac{32400 \cdot 32400}{13500}} = 54,31 \text{ Bq} = 54,31 \pm 0,5 \text{ Bq} \quad (32)$$

Comparado con el valor del patrón, que es de 50 Bq, podemos concluir que el método es correcto si tenemos en cuenta los errores introducidos a lo largo del ensayo y que pasamos a estimar. Error de pesada en la preparación del patrón: 1%. Error en la actividad del patrón: 1%. Error debido a la determinación de áreas de los picos: 5%.

7.2.2.3. Discusión.

Recordemos que el % de rayos X que se emiten por cada desintegración en el ^{137}Cs es bajo., y esto puede también ser una fuente de error. Pero si se obtiene una buena aproximación para éste, como hemos visto, sería incluso mejor en el caso de aplicarse esta técnica a otros radioisótopos como el $^{131\text{m}}\text{Xe}$, $^{133\text{m}}\text{Xe}$, ^{133}Xe y ^{135}Xe .

En los esquemas de decaimiento encontramos varios elementos susceptibles de poder ser estudiados mediante la técnica desarrollada en esta tesis.

Hay radionúclidos transuránidos en los que existen problemas para poder detectar alguna de las dos señales coincidentes, generalmente debido a la baja energía de sus emisiones gamma. En estos casos sería más útil utilizar un sistema de coincidencias de dos cadenas separadas, cada una con un tipo de detector adecuado, tal y como se expondrá en el punto siguiente.

7.3. Uso de detectores LEGe. Coincidencia α - γ en ^{241}Am con dos cadenas.

7.3.1. Características de los equipos utilizados.

Como ya se ha comentado, entre las características de la tarjeta digitalizadora se encuentra la capacidad de tener dos entradas independientes de señales. Se ha probado esta capacidad conectando a cada una de las entradas la señal de salida del centellador líquido y del detector de germanio tipo LEGe respectivamente (ver Figura 70). El primero se trata de un tubo fotomultiplicador al que se le acopla el centelleador líquido. Y el segundo es un detector de gammas de baja energía (LEGe, Low Energy Germanium) de 1500 mm² de área activa y con una resolución en energía (FWHM) de 350 eV a 5,9 keV y de 620 eV a 122 keV.

Como puede comprobarse, no se utiliza un phoswich propiamente dicho en este caso, como indica el título de la presente tesis. Pero es importante ver cómo puede implementarse un sistema de dos cadenas por su importancia en la determinación de coincidencias. Tampoco necesitaremos hacer uso de un filtro PSD, pero como es lógico podría aplicarse fácilmente si fuere útil para futuras medidas.



Figura 70 Detector centelleador (abajo) y LEGe (arriba).

7.3.2. Identificación de coincidencias usando dos cadenas.

En primer lugar se estudiaron los mecanismos de disparo para adaptarlos a la identificación de señales procedentes de un detector de germanio, cuyos impulsos son inversos a los de un centelleador. Para ello se realizaron pruebas con una fuente de ^{109}Cd (ver Tabla 8). Puede verse un espectro del mismo en la Figura 71.

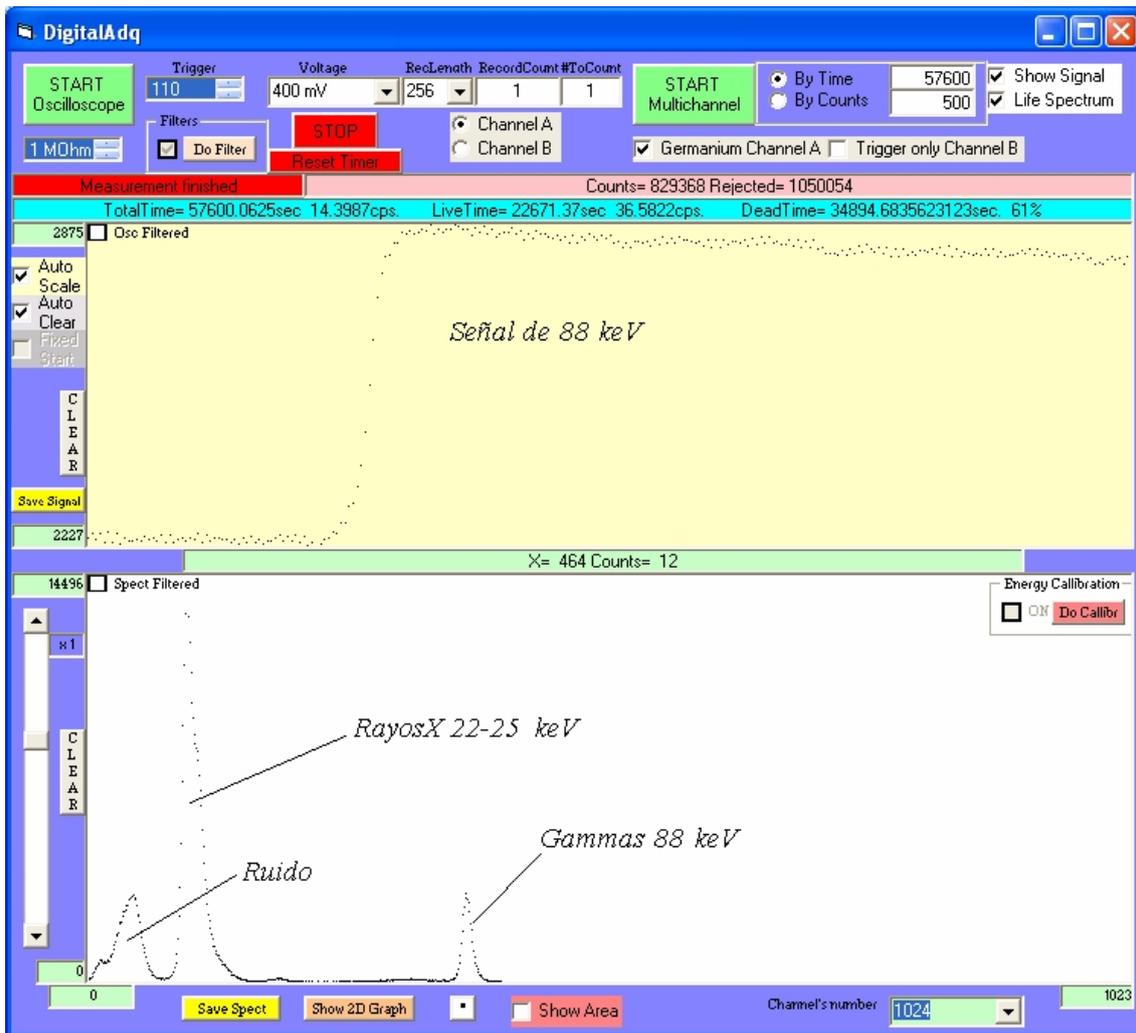


Figura 71 Espectro de ^{109}Cd con detector LEGe

En un segundo paso se mejoró el sistema para que pudiese adquirir pulsos desde las dos entradas al mismo tiempo, representarlos individualmente en el diagrama superior (modo

osciloscopio), y tomar espectros en la parte inferior (modo multicanal). Asimismo se modificaron las sentencias de "trigger" (disparo) para que se abra un canal cuando se activa el disparo del otro y viceversa. Por último se dispuso el diagrama 2D para que se representasen en éste las alturas de los pares de impulsos.

7.3.3. Determinación de la actividad absoluta del ^{241}Am .

Los resultados anteriores se aplicaron de nuevo a la determinación de la actividad de una muestra de 169 Bq de ^{241}Am (Ver Tabla 6) en disolución en un centelleador líquido (Ver Figura 52). Se analizaron las señales provenientes de ambos canales, ajustando el disparo al canal B (el de las alfas en el centelleador líquido). En algunas ocasiones la pareja de señales recogidas eran coincidentes, (ver Figura 72).

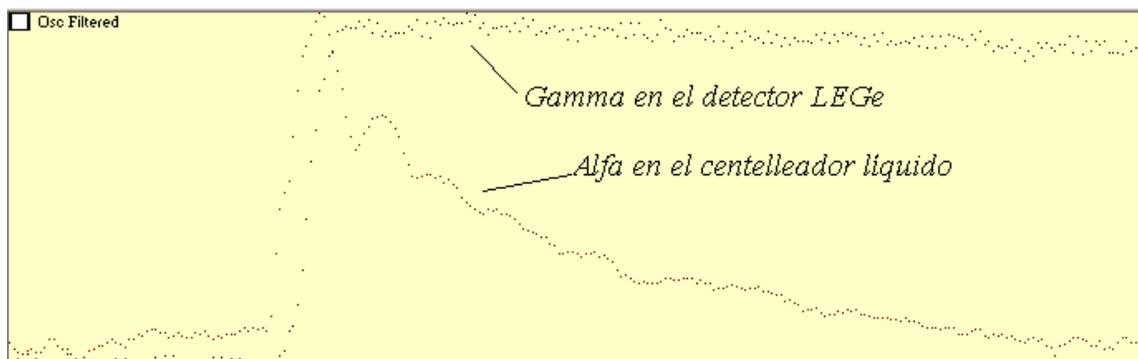


Figura 72 Dos canales. Señales coincidentes

Pero en la gran mayoría de los casos, se observa simplemente la señal que ha hecho saltar el disparo del canal B, junto con una señal de ruido.

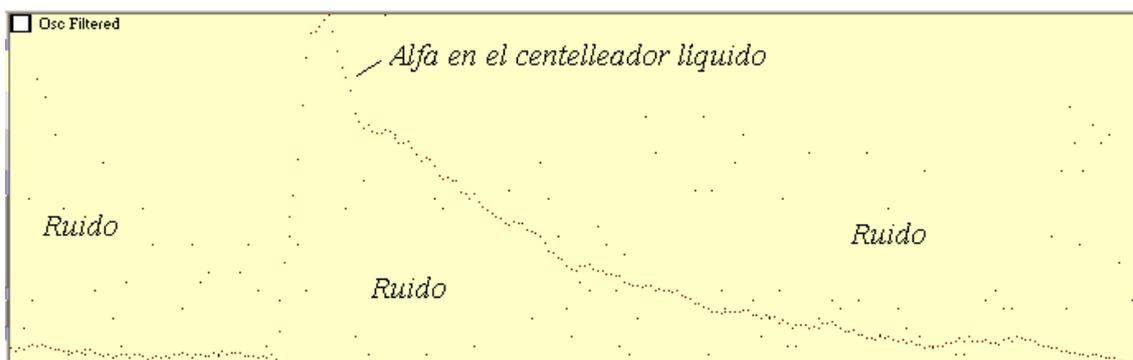


Figura 73 Dos canales. Señales no coincidentes

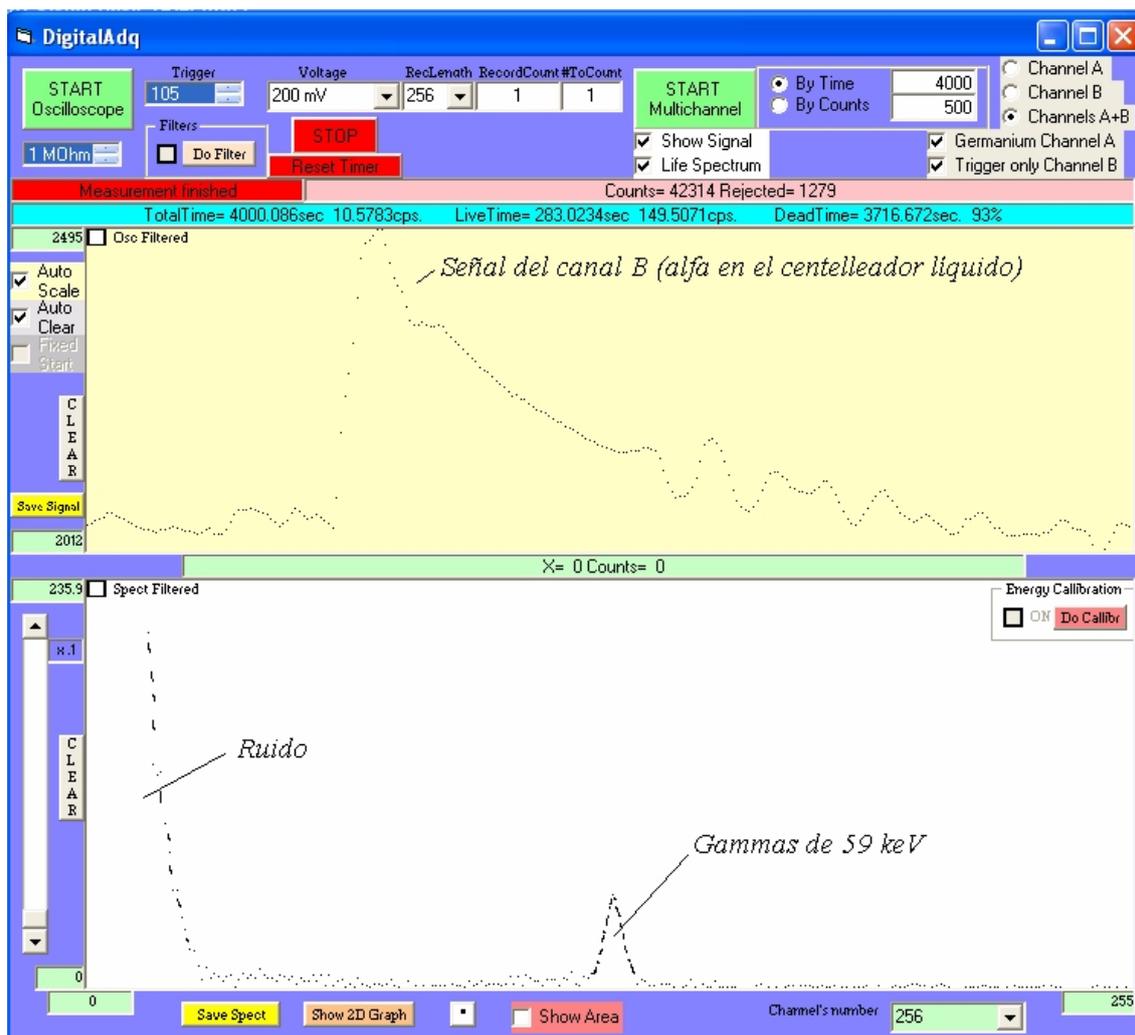


Figura 74 Dos canales. Espectro de ^{241}Am

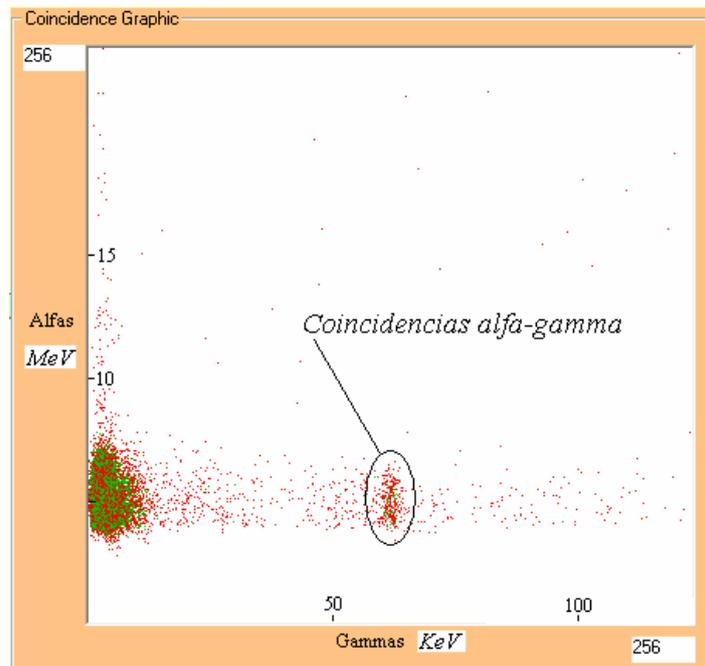


Figura 75 Dos canales. Diagrama de 2D

En la Figura 75 podemos ver que hay una primera zona a bajas energías en la que se recogen las parejas de señales de alfas junto con las de ruido (ver Figura 73). La zona señalada como "coincidencias" son parejas como las que vemos en la Figura 72.

Se ha calculado la actividad absoluta de la muestra por el método expuesto en el punto 3.1.3. Para ello se han tomado tres medidas. La primera solo con el canal A activado, recogándose 1030 cuentas en el pico de 59 keV en 327 segundos de tiempo vivo. La segunda con solo el canal B, recogándose 19073 cuentas en el pico debido a las alfas que interaccionan con el centelleador líquido, en 315 segundos de tiempo vivo. La tercera se realizó mediante un espectro del canal A (del LEGe) pero cuyo disparo se fijó tan solo con

la entrada de pulsos en el canal B. Así se obtuvieron 280 cuentas en el pico de 59 keV, en un tiempo de 265 segundos de tiempo vivo.

Por tanto las tasas de recuento para la geometría y condiciones de nuestro caso para partículas Alfa, Gamma y coincidencias son:

$$R_{\alpha} = \frac{19073}{315} = 60,5 \pm 0,4 \frac{\text{cuentas}}{\text{s}} \quad (33)$$

$$R_{\gamma} = \frac{1030}{327} = 3,1 \pm 0,1 \frac{\text{cuentas}}{\text{s}} \quad (34)$$

$$R_{\text{coinc}} = \frac{280}{265} = 1,06 \pm 0,06 \frac{\text{cuentas}}{\text{s}} \quad (35)$$

Y la actividad absoluta:

$$A = \frac{R_{\alpha} R_{\gamma}}{R_{\text{coinc}}} = \frac{\frac{19073}{315} \cdot \frac{1030}{327}}{\frac{280}{265}} = 180 \pm 12 \text{ Bq} \quad (36)$$

Comparado con la actividad calibrada de 169 Bq podemos concluir que el método es correcto si tenemos en cuenta los errores introducidos a lo largo del ensayo (Determinación de áreas, pesadas de la muestra, etc). Podemos estimarlos como sigue. Error de pesada en la preparación del patrón: 1%. Error en la actividad del patrón: 1%. Error debido a la determinación de áreas de los picos: 5%.

7.3.4. Comparación de LIDs obtenidos con otras técnicas analíticas

Como ya se ha indicado en el punto 3.1.3, al aplicar esta técnica de coincidencias se reduce apreciablemente el fondo, esto hace que el valor del LID se reduzca. Queremos aquí comparar el LID de un espectro gamma sin coincidencias con uno medido con esta técnica para cuantificar su mejora.

El LID depende de las condiciones, tiempo de medida cantidad de muestra, etc, por lo que ha de compararse en igualdad de estas. Para medidas de ^{241}Am en muestras de radiactividad ambiental, suelen tomarse muestras de 50 g en tierras y tiempos de contaje de aproximadamente un día, es decir 85000 s. En primer lugar se tomó un espectro gamma durante 85000 s de tiempo vivo, con una eficiencia estimada de 0,26 para las gammas de 59 keV, se obtuvieron 16047 cuentas de fondo bajo el fotopico. De esto resulta:

$$\text{LID} = \frac{\sqrt{F}}{t \cdot Y \cdot \varepsilon \cdot m} = \frac{\sqrt{16047}}{85000 \cdot 0,357 \cdot 0,26 \cdot 0,050} = 0,32 \text{ Bq/kg}$$

A continuación se repitió el mismo espectro pero utilizando los dos canales puestos en coincidencias. La medida fue también de 85000 s de tiempo vivo, una eficiencia estimada para alfas de 0,8 , se obtuvieron en este caso 1478 cuentas de fondo bajo el fotopico:

$$\text{LID}_{\text{coinc}} = \frac{\sqrt{F}}{t \cdot Y_{\gamma} \cdot Y_{\alpha} \cdot \varepsilon_{\gamma} \cdot \varepsilon_{\alpha} \cdot m} = \frac{\sqrt{1478}}{85000 \cdot 0,357 \cdot 1 \cdot 0,26 \cdot 0,8 \cdot 0,050} = 0,12 \text{ Bq/kg}$$

Puede observarse que se ha reducido el LID a la tercera parte respecto a la técnica sin coincidencias y sin previa optimización

del procedimiento. Independientemente de los valores concretos, que dependerán de las condiciones concretas de las medidas, es clara la ventaja del uso de esta técnica en la espectrometría gamma.

Para ilustrar estos valores, podemos también indicar niveles de LID típicos en distintos laboratorios de la red española en estas mismas condiciones. Dichos valores son de 1 Bq/kg para determinaciones en espectrometrías gamma, y de 0,1 Bq/kg en espectrometrías alfa.

7.3.5. Discusión del procedimiento utilizado.

El uso de dos cadenas de detección tiene la ventaja obvia de poder emplear distintos tipos de detectores asociados, totalmente independientes. De esta forma podemos escoger el tipo más adecuado a las radiaciones concretas que forman la coincidencia.

Entre las desventajas podría estar el mayor coste (al tener que duplicar tanto los detectores como las cadenas asociadas) y el mayor tamaño, lo que hace más difícil diseñar un equipo de tipo portátil (o de campo). Otra desventaja es que al ser independientes las cadenas se pueden inducir diferentes desfases en cada una de ellas, por lo que se necesitan retardadores en la cadena mas rápida para corregir este problema.

Por último hay que destacar que ésta aplicación práctica expuesta en el presente punto 7.3, se ha diseñado simplemente abriendo uno de los canales cuando dispara el otro. Esto puede hacer

que se recojan en el canal que no dispare señales adelantadas o atrasadas con respecto a la señal del otro que si lo ha hecho, y que podrían deberse a coincidencias aleatorias. A efectos de detección las coincidencias reales son prácticamente simultáneas, por lo que pueden rechazarse aquellas que no se recojan dentro de un estrecho margen de tiempo. Para ello se puede utilizar una característica de la tarjeta llamada "Time stamping" que marca con una señal de reloj el momento de disparo (al sobrepasar el nivel de "trigger") de cada uno de los canales. Comparando ambas puede hacerse que solamente se consideren aquellas señales que hayan entrado con un desfase mayor que el deseado.

7.4. Discusión de las aplicaciones realizadas y posibles líneas futuras de investigación

En cuanto a los procedimientos electrónicos utilizados en la tesis se propone en el futuro abordar la mejora de resolución de los detectores, en especial de los de germanio. Se ha observado que sobre las señales hay superpuestas otras de alta frecuencia y pequeña amplitud que son debidas a ruido electrónico. Lógicamente este tiene mayor importancia relativa si la altura del impulso es pequeña (bajas energías), y afecta considerablemente a la resolución del espectro gamma obtenido. Hasta ahora se han venido utilizando amplificadores analógicos que además de la amplificación de la señal, realizan otras tareas: eliminación de ruido electrónico, modulación de la forma del pulso, restablecimiento de la línea base, eliminación de impulsos apilados, etc. Algunos de éstos aspectos son ya tratados y resueltos mediante lo desarrollado en ésta tesis, pero hay que indicar que sería interesante la aplicación de técnicas de análisis en frecuencias (como la transformada de Fourier) para la eliminación del ruido electrónico de alta frecuencia. Muchos de estos procedimientos para tratamiento de señales vienen incorporados en softwares comerciales como LabView y MatLab. La implementación de este tipo de software en nuestro sistema, trabajando en tiempo real, podría ser una línea de investigación de interés en el futuro, si se quieren

realizar mejoras de carácter electrónico que afecten directamente a la resolución de los detectores.

Las técnicas desarrolladas se han utilizado en tres aplicaciones para determinar elementos radioactivos presentes en muestras ambientales, lo cual exige en la mayoría de los casos medidas de alta sensibilidad, por lo que se han utilizando diversos sistemas de coincidencia y las ventajas que ofrecen las tarjetas digitalizadoras rápidas de alta resolución.

La primera aplicación aborda la determinación de ^{137}Cs , un producto de fisión encontrado en concentraciones muy pequeñas en gran número de muestras ambientales. Su determinación implica la detección de electrones de alta energía por lo que su cuantificación por coincidencias es relativamente sencilla siempre que se utilicen muestras de poco espesor con poca absorción para las partículas beta (en realidad electrones de conversión interna, en este caso), por ejemplo: análisis de aguas mediante evaporación y medida posterior de sus residuos, partículas de polvo procedente de muestras gaseosas, muestras puntuales o de pequeño tamaño, etc. Este es el caso también de la identificación de productos de fisión gaseosos en los detectores desarrollados para la verificación del *Nuclear Test Ban Treaty*^{9,4}, en donde la identificación de los radioisótopos se realiza también empleando emisiones gamma o rayos-X en coincidencia con CE, de menor energía que en el caso del ^{137}Cs pero detectables por analizarse muestras gaseosas de poca autoabsorción.

En cuanto a los análisis cuantitativos empleados se puede utilizar la fórmula de la actividad absoluta, siempre que existan picos monoenergéticos nítidamente identificables para la radiación beta, que no es siempre el caso, y que la intensidad de la radiación gamma sea también fácilmente medible. Las coincidencias serían identificables con mayor claridad debido a la reducción de fondo. En casos más generales, por ejemplo, cuando los fotopicos no son distinguibles sobre el fondo del espectro o porque la radiación beta es un espectro continuo, en donde se pueden superponer a su vez los continuos de los diferentes radioisótopos presentes en la muestra, la identificación de éstos exigiría otros tratamientos analíticos. El más frecuente es similar al utilizado en espectrometría gamma convencional cuando se emplean curvas de eficiencia. En estos casos la actividad de la muestra y el LID de la medida se calculan a partir de las ecuaciones:

$$A = \frac{R}{T \cdot \varepsilon_{\gamma} \cdot Y_{\gamma} \cdot V} \quad (37)$$

$$LID = \frac{k \cdot \sqrt{F}}{T \cdot \varepsilon_{\gamma} \cdot Y_{\gamma} \cdot V} \quad (38)$$

donde R es el número de cuentas en el fotopico, T el tiempo de medida, k viene determinado por el factor de confianza elegido, F es el número de cuentas de fondo en el fotopico, V el tamaño de la muestra expresado en peso o volumen, Y_{γ} la intensidad (*branching ratio*) de la emisión gamma y ε_{γ} la eficiencia para esa energía, la cual

es extraída de curvas de eficiencia obtenidas experimentalmente mediante patrones gamma compuesto por un conjunto de radionúclidos que cubren un amplio espectro de energías. A partir de este patrón se obtiene la curva eficiencia–energía para una determinada geometría detector-muestra. En el caso de un sistema en coincidencias las formulas serían equivalentes

$$A = \frac{R_c}{T \cdot \varepsilon_\gamma \cdot Y_\gamma \cdot \varepsilon_\beta \cdot Y_\beta \cdot V} \quad (39)$$

$$LID = \frac{k \cdot \sqrt{F_c}}{T \cdot \varepsilon_\gamma \cdot Y_\gamma \cdot \varepsilon_\beta \cdot Y_\beta \cdot V} \quad (40)$$

donde R_c es el número de cuentas en el fotopico obtenido en coincidencias, F_c es el número de cuentas en el fondo del fotopico medido en coincidencias y ε_β la eficiencia de la radiación beta en el segundo detector, que puede disminuir significativamente si la autoabsorción de la muestra fuese muy elevada, afectando entonces al LID final obtenido. Esta disminución del LID debida a la inclusión adicional de la eficiencia de la radiación beta no suele ser grande, ya que normalmente se tienen geometrías en 2π ó 4π . De hecho se mejora mucho el LID en coincidencias frente a la espectrometría gamma convencional por la reducción de fondo. La evaluación de las eficiencias beta para un radioisótopo determinado, puede ser engorrosa, dependiendo (al igual que para el caso de la radiación gamma) de la geometría de la muestra y detector, y de la energía de la radiación beta que puede ser monoenergética o bien venir

representada por la energía beta promedio del continuo. Las eficiencias beta para la energía de un radionúclido y una determinada geometría de medida se puede calcular a partir de las expresiones anteriores mediante la ecuación:

$$\varepsilon_{\beta} = \frac{R_c}{R} \quad (41)$$

Sin embargo, el cálculo de curvas de eficiencia para energías beta no está tan bien establecido como en el caso de la radiación gamma y es una línea de trabajo que podría abordarse en futuros estudios. En estos casos sería de interés la utilización de simuladores mediante el método de Monte Carlo, para tratar de establecer y contrastar con datos experimentales las curvas teóricas obtenidas mediante estos procedimientos, que ofrecen la ventaja de poder estimar de forma aproximada la eficiencias de detectores y matrices con geometrías y constituciones muy diversas que exigirían determinaciones experimentales muy tediosas o de difícil ejecución.

Otra alternativa para el análisis cuantitativo, cuando el tipo de radionúclidos estudiados es reducido, consistiría en utilizar el método del patrón, midiéndose una actividad conocida de éste en coincidencia y comparando con la obtenida en la muestra a analizar en idénticas condiciones. La desventaja frente al anterior sistema es que aquel permite la identificación de radionúclidos diferentes a los empleados en la confección de los patrones, dado que se dispone de una curva de eficiencias que cubre todo el espectro de energías.

La segunda aplicación de la tesis utiliza detectores phoswich para la identificación de elementos transuránidos, generalmente emisores alfa que emiten en coincidencia rayos X o gamma de baja energía. Se ha elegido en los estudios realizados, ^{241}Am , y como detector alfa un centelleador líquido que permite eficiencias muy elevadas en geometrías 4π . La optimización en el futuro de este procedimiento, empleando detectores de NaI de menor espesor, incrementaría la eficiencia en la detección de la radiación alfa y gamma, al permitir mayor entrada de luz en el fotomultiplicador del phoswich, que en nuestro caso esta compuesto por un NaI de gran espesor. Con este nuevo centelleador se podría mejorar también la resolución del espectro gamma a bajas energías, que resulta esencial para medir rayos X y gamma en el rango de 10-300 keV en ausencia de interferencias.

Para mejorar la resolución del sistema y poder identificar simultáneamente muestras que contuviesen diferentes transuránidos a partir de sus emisiones X y gamma, se empleó en la tercera aplicación un detector de germanio de bajas energía y alta resolución. Este tipo detector obliga a utilizar dos cadenas electrónicas independientes, pero ofrecería la ventaja frente al NaI de poder llegar a identificar simultáneamente diversos transuránidos presentes en una muestra radiactiva, sin previo tratamiento de la muestra a parte de su disolución previa e incorporación al líquido centelleador. El interés en este procedimiento es poder llegar a prescindir de

separaciones radioquímicas y espectrometría alfa, que son los procedimientos habituales en la identificación de este tipo de elementos. Una línea de investigación futura sería la utilización de detectores de centelleo líquidos de mayor resolución que permitiesen discernir más claramente entre distintas energías de partículas alfas. Los transuránicos de mayor interés (U, Pu, Am, etc) emiten alfas con un rango de energías muy próximo, entre 4 y 6 MeV, con lo que la discriminación de estas emisiones alfa resulta casi imposible con los presentes centelleadores líquidos y uno debe limitarse a la obtención de un espectro gamma coincidente con toda la variedad de alfas emitidas por los diferentes transuránidos presentes en la muestra.

8. Conclusiones y Logros.

- 8.1. Se ha instalado una tarjeta digitalizadora capaz de recoger los impulsos producidos por un amplio tipo de detectores de radiaciones ionizantes. Se describen y utilizan las características más apropiadas para el control de la tarjeta.
- 8.2. Se ofrecen datos reales de señales de diferentes materiales centelleadores que pueden servir como referencia para futuras aplicaciones.
- 8.3. Se ha desarrollado un software con los controles más usuales de un analizador multicanal al que se ha añadido un control de filtrado. Éste analiza una a una las señales de entrada, calculando automáticamente los parámetros de interés de la forma de cada señal. Se utiliza para ello la rapidez de la memoria RAM de la computadora, y se evita la ralentización que supone la escritura de un archivo en un disco duro magnético. Con esto mejoramos lo realizado en el trabajo del *Pacific Northwest Laboratory*^{9.4}.
- 8.4. Se mejora también este trabajo^{9.4}, ya que analizamos no solo según los tiempos de subida de las señales, sino también según su forma. Así pueden obtenerse espectros exclusivamente con las señales deseadas y realizar espectrometría alfa, beta y gamma de la muestra.
- 8.5. Se exponen las diferentes alternativas tenidas en cuenta a la hora de elegir los algoritmos y condiciones a cumplir para

la distinción de señales según su forma, en especial las originadas por el centelleador de NaI(Tl) y del CaF₂(Eu).

- 8.6. Se discuten las posibles formas de las señales obtenidas por coincidencias beta-gamma y rayos X-gamma, y los problemas a la hora de lograr un filtro automático específico para éstas, así como extraer las características de las partículas que forman el impulso coincidente.
- 8.7. Se desarrolla un procedimiento utilizando dos entradas sincronizadas a la tarjeta digitalizadora y poder realizar coincidencias de dos detectores de igual o distinto tipo. Especial interés pueden tener cadenas para coincidencias entre detectores de germanio-phoswich para gamma-beta o germanio-silicio para gamma-rayos X. Para ello se podría usar la capacidad "Time Stamping" con que la tarjeta registra el momento exacto en que se produce el disparo de la tarjeta por la detección de una partícula.
- 8.8. Como se expone en el punto 7.2, las características de rápida respuesta de los líquidos centelleadores son muy parecidas a las de los plásticos. Al poder diluir las muestras en estos líquidos se consiguen eficiencias cercanas al 100%. Uniendo estas dos características, se propone y aplica la construcción de un detector tipo phoswich cuyo primer cristal se sustituye por una cápsula conteniendo la muestra diluida en líquido centelleador, y como segundo cristal se

mantiene el conocido NaI para poder detectar la radiación fotónica (X o Gamma). El uso de esta construcción puede ser muy interesante no solo para construir detectores de campo compactos, sino también es su aplicación en laboratorio. Se podrían evitar tanto separaciones radioquímicas como complejos equipos de análisis de coincidencias.

8.9. A lo largo de esta tesis se ha comprobado la utilidad de desarrollar en el futuro un software de control con LabVIEW (®National Instruments). LabVIEW es una herramienta gráfica de test, control y diseño mediante un lenguaje de programación denominado "lenguaje G". Los programas hechos con LabVIEW se llaman VI (*Virtual Instrument*), lo que da una idea de su uso en origen: el control de instrumentos. Su característica principal es la de reducir el tiempo de desarrollo de aplicaciones de todo tipo, ya que cuenta con una amplia gama de librerías, tanto para controlar hardwares concretos, como herramientas software. En nuestro caso podría ser útil el uso de funciones de tratamiento automatizado de señales, que usan algoritmos para el filtrado y reconocimiento de las mismas. Como puede verse en la referencia 9.12, la casa ALAZAR TECH dispone de librerías de control para LabVIEW similares a las de C y Visual Basic ya expuestas en la referencia 9.13.

- 8.10. Para realizar el tipo de medidas expuestas en esta tesis se sugiere no usar un phoswich de NaI-CaF₂, sino un cristal simple de NaI recubierto con una capa de vidrio fino transparente para evitar que la humedad lo deteriore, y a la vez que pueda pasar la luz del centelleador líquido. En nuestro caso, al no disponer de esto, hemos usado un phoswich NaI-CaF₂. El cristal de fluoruro, no higroscópico, hace que podamos abrirlo, pero a la vez nos proporciona señales espúreas de detecciones de gammas en este.
- 8.11. También se sugiere la posibilidad de usar un cristal de NaI mucho menos grueso (aprox 1 cm). De este modo se podría conseguir por una parte una mejor resolución en energías de las gammas detectadas, y por otra que el centelleador líquido se encuentre mucho más cerca del tubo fotomultiplicador mejorando la recolección de luz.
- 8.12. Los cálculos de actividades absolutas por coincidencias^{3.1.3} que se han expuesto (7.1.2.2 y 7.2.2.2) tienen la ventaja de no necesitar, en principio, un patrón. En cambio tienen como punto desfavorable el que los filtros de señales no son 100% fiables. Pero en el caso concreto de las señales procedentes de una coincidencia por emisiones recogidas en el NaI y en centelleador plástico, la eficacia de estos filtros es altísima debido a la forma bien definida. Así pues, si se desea realizar una medida de actividad de un isótopo que

presente una emisión coincidente, y se dispone de un patrón con el mismo isótopo, se concluye que este método sería muy útil, ya que se podría calcular la actividad relativa^{3.1.1} como una simple regla de proporcionalidad.

8.13. Concluimos que los diagramas 2D como los de la Figura 66, Figura 69 y Figura 75, puede ser una muy buena herramienta para distinguir entre distintos transuránidos con emisiones coincidentes alfa-gamma (Americios, Uranios, Plutonios...). En cada zona del diagrama se acumularían puntos provenientes de un sólo radionucleido, por lo que sería posible su caracterización cualitativa y cuantitativa en la muestra. En la actualidad se realizan estas medidas mediante costosas separaciones radioquímicas. Que este método sea efectivo dependerá de la posibilidad de contar con un detector que discrimine más claramente entre las distintas energías de las alfas, que se encuentran normalmente en el rango de los 4 a 6 MeV.

8.14. Parte de los resultados obtenidos en la presente tesis han sido reflejados en dos artículos, el primero^{9.20} publicado en los "*proceedings*" del décimo simposium internacional de física de radiaciones (ISRP-10), y a su vez admitido en *Nuclear Instruments and Methods*, y el segundo^{9.22} en *Journal of Environmental Radioactivity*.

9. Bibliografía

- 9.1. White, T. L, Miller, W.H. "A triple crystal phoswich detector with digital pulse shape discrimination for alpha/beta/gamma spectroscopy". Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 422(1999) 144.147.
- 9.2. Miller, W.H. and Diaz de Leon, M. "Utilization of phoswich detectors for simultaneous, multiple radiation detection". Nuclear Science and Engineering Institute. University of Missouri-Columbia, MO 65211, USA (Nov 2003).

[Referencias\UPD.pdf](#)

http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=821938

- 9.3. Wang, C., Lee, J. and Chiou H."Rapid Determination of Sr-89/Sr-90 in Radwaste by Low-level Background Beta Counting System". Applied Radiation and Isotopes, 45 (1994) 251
- 9.4. Ely, J.H., Aalseth C.E., McIntyre J.I.."Nobel beta-gamma coincidence measurements using phoswich detectors". Pacific Northwest Laboratory. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol 263, N°1 (2005) 245-250.

[Referencias\NBG.pdf](#)

<https://www.nemre.nnsa.doe.gov/srr/2003/papers/06-01.pdf>

- 9.5. Takada M., Taniguchi S., Nakamura T., and Fijitaka K.. IEEE transactions in Nuclear Science, A356 (1998) 334
- 9.6. Strass M.G. Keane A.T. and Reinke S.A. "X Ray Spectrometry in vivo with a S(Li) –NaI (TI) detector". IEEE Transactions on Nuclear Science, 37,2 (1990).
- 9.7. Knoll, G. F. "Radiation Detection and Measurement", ed. John Wiley and Sons, 3rd edition, 2000.
- 9.8. Warburton, W.K., Momayezi, M., Hubbard-Nelson, B., Skulski, W., "Digital Pulse Processing: New Possibilities in Nuclear Spectroscopy", Applied Radiation and Isotopes 53 (2000) 913-920.

[Referencias\DPP.pdf](#)

<http://www.xia.com/Papers/Irrma.pdf>

- 9.9. W. Skulski W., Momayezi, M., Hubbard-Nelson, B., Grudberg, P., Harris, J., Wardwurton, W., "Towards Digital Gamma-ray and Particle Spectroscopy" Nato Advance Research workshop on Techniques and Selected Application in Nuclear Physics, 2-4 september, 1999, Krzyze, Poland.
- 9.10. Luca, A., de Felice, P., Tanase, G., "Low Level Gamma Spectrometry by beta-gamma coincidence". Applied Radiation and Isotopes 53 (2000) 221-224.

9.11. Reeder, P.L., Bowyer, T.W. "Xe isotope detection and discrimination using beta spectroscopy with coincident gamma spectroscopy". Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 408 (1998)582-590.

9.12. ALAZAR TECHNOLOGIES INC. (2005)"Technical specifications for ATS330 card". Montreal, Canada.

[Referencias\ATS330.pdf](#)

<http://www.alazartech.com/products/ats330.htm>

9.13. ALAZAR TECHNOLOGIES INC. (2005)" ATS-SDK Software Manual". Montreal, Canada.

[Referencias\ATS-SDK Software Manual V4.6.1.pdf](#)

http://www.alazartech.com/support/Download%20Files/ATS-SDK%20V4_6_1%20Manual%20For%20Web.pdf

9.14. Insta-Gel Plus™, Marca registrada de PerkinElmer, Inc.

<http://las.perkinelmer.com/Catalog/ProductInfoPage.htm?ProductID=6013391>

9.15. Ultima Gold™ AB, Marca registrada de PerkinElmer, Inc.

<http://las.perkinelmer.com/Catalog/ProductInfoPage.htm?ProductID=6013301>

9.16. Ultima Gold™ LLT, Marca registrada de PerkinElmer, Inc.

<http://las.perkinelmer.com/Catalog/ProductInfoPage.htm?ProductID=6013371>

9.17. Tabla de desintegración del ^{137}Cs y del $^{137\text{m}}\text{Ba}$.

The Lund/LBNL Nuclear Data Search. Version 2.0, February 1999.

S.Y.F. Chu, L.P. Ekström

^{137}Cs : <http://nucleardata.nuclear.lu.se/nucleardata/toi/nuclide.asp?iZA=550137>

$^{137\text{m}}\text{Ba}$: <http://nucleardata.nuclear.lu.se/nucleardata/toi/nuclide.asp?iZA=560437>

9.18. Tabla de desintegración del ^{109}Cd .

The Lund/LBNL Nuclear Data Search. Version 2.0, February 1999.

S.Y.F. Chu, L.P. Ekström

<http://nucleardata.nuclear.lu.se/nucleardata/toi/nuclide.asp?iZA=480109>

9.19. Tabla de desintegración del ^{241}Am .

The Lund/LBNL Nuclear Data Search. Version 2.0, February 1999.

S.Y.F. Chu, L.P. Ekström

<http://nucleardata.nuclear.lu.se/nucleardata/toi/nuclide.asp?iZA=950241>

9.20. B. de Celis, R. de la Fuente, A. Williard, B. de Celis Alonso, "Coincidence measurements in $\alpha/\beta/\gamma$ spectrometry with phoswich detectors using digital pulse shape discrimination analysis". Nucl. Instr. and Meth. A (2007), doi:10.1016/j.nima.2007.05.085.

[Referencias\NIMA47035.pdf](#)

<http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2007.05.085>

9.21. Biografía de *Walther Wilhelm Georg Bothe*

http://en.wikipedia.org/wiki/Walther_Bothe

9.22. de la Fuente, R. et al., "Low level radioactivity measurements with phoswich detectors using coincident techniques and digital pulse processing analysis", J. Environ. Radioact. (2008), doi:10.1016/j.jenvrad.2007.12.008

[Referencias\JEnvironRadioact2008Feb.pdf](#)

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.12.008>

10. Anexo 1: Código del programa

Se transcriben en este anexo los formularios y códigos que forman la aplicación "*DigitalAdq*". Ha sido programado en *Visual Basic*[®] v6.0.

10.1. Formulario principal

```
'=====
'
'           DigitalAdq
' Copyright (c) Universidad de León - Departamento de Física y Química
' Based on: Ac2DskVB Copyright (c) AlazarTech Inc
'=====
```

Option Explicit 'para forzar la declaración explícita de variables.

```
Private Sub CommandOsc_Click()
```

```
Dim i As Long
```

```
Dim j As Long
```

```
Dim h As Variant
```

```
Dim status As Long
```

```
Dim Major As Byte
```

```
Dim Minor As Byte
```

```
Dim Rev As Byte
```

```
Dim MemSize As Long
```

```
Dim SampleSize As Byte
```

```
Dim Channel As Byte
```

```
Dim NumOfBoards As Integer
```

```
Dim NumOfSystems As Integer
```

```
Dim RecordToRead As Long ' Este es el numero del registro que nos va a leer desde la tarjeta. Tiene que ser, como máximo
```

```
RecordCount
```

```
Dim Start, Final, TotalTime, cpsTT 'For Total Time
```

```
Dim Start1, Final1, LiveTime, Cicles, cpsLT 'For Live Time
```

```
Dim Start2, Final2, CalcTime 'For Calculation Time
```

```
Dim ExitFlag As Boolean
```

```
Dim TempVal As Long
```

Dim TriggerAddress, TimeStampHighPart, TimeStampLowPart As Long

'Static a1Temp, a0Temp As Variant

Dim RiseCorrection As Integer

NumOfBoards = AlazarBoardsInSystemBySystemID(1)

If NumOfBoards < 1 Then

 MsgBox "No digitalization card is detected", vbExclamation, "DigitalAdq"

 GoTo Fin

End If

status = AlazarGetCPLDVersion(h, Major, Minor)

status = AlazarGetSDKVersion(Major, Minor, Rev)

status = AlazarGetDriverVersion(Major, Minor, Rev)

'bd.RecLength =512

'bd.RecordCount = 5 'Como máximo podemos contar 504 registros de 256 canales

If Text2.Text < 1 Or Text2.Text > RecordLimit Then

 MsgBox "RecordCount must be between 1 and" + Str\$(RecordLimit), vbExclamation, "DigitalAdq"

 GoTo Fin

End If

bd.RecordCount = Text2.Text

bd.PreDepth = 64 'Pretrigger Samples

bd.ClockSource = INTERNAL_CLOCK

bd.ClockEdge = CLOCK_EDGE_RISING

bd.SampleRate = SAMPLE_RATE_50MSPS

bd.CouplingChanA = AC_COUPLING

'bd.InputRangeChanA = INPUT_RANGE_PM_200_MV

'bd.InputImpedChanA = IMPEDANCE_1M_OHM

If ListImpedance.Text = "1 MOhm" Then bd.InputImpedChanA = IMPEDANCE_1M_OHM

If ListImpedance.Text = "600 Ohm" Then bd.InputImpedChanA = IMPEDANCE_600_OHM

If ListImpedance.Text = "300 Ohm" Then bd.InputImpedChanA = IMPEDANCE_300_OHM

If ListImpedance.Text = "75 Ohm" Then bd.InputImpedChanA = IMPEDANCE_75_OHM

If ListImpedance.Text = "50 Ohm" Then bd.InputImpedChanA = IMPEDANCE_50_OHM

bd.CouplingChanB = AC_COUPLING

bd.InputRangeChanB = INPUT_RANGE_PM_1_V

bd.InputImpedChanB = IMPEDANCE_50_OHM 'IMPEDANCE_1M_OHM

bd.TriEngOperation = TRIG_ENGINE_OP_J_OR_K

```
bd.TriggerEngine1 = TRIG_ENGINE_J
bd.TrigEngSource1 = TRIG_CHAN_A
bd.TrigEngSlope1 = TRIGGER_SLOPE_POSITIVE
'bd.TrigEngLevel1 = 140
    bd.TrigEngLevel1 = ListTrigger.Text
bd.TriggerEngine2 = TRIG_ENGINE_K
bd.TrigEngSource2 = TRIG_DISABLE
bd.TrigEngSlope2 = TRIGGER_SLOPE_POSITIVE
bd.TrigEngLevel2 = 128
'.....
```

```
CommandOsc.Enabled = False
```

```
'Picture1.Cls
```

```
a0 = 0
```

```
a1 = 0
```

```
r = 0
```

```
a01 = 0
```

```
a11 = 0
```

```
'Checking for NumRecordsToRead <= bd.RecordCount
```

```
    NumRecordsToRead = Text3.Text
```

```
    If NumRecordsToRead < 1 Or NumRecordsToRead > bd.RecordCount Then
```

```
        MsgBox "NumRecordsToRead must be higher than 1 and lower than RecordCount (= " + Str$(bd.RecordCount) + ")",
```

```
vbExclamation, "DigitalAdq"
```

```
        GoTo Fin
```

```
    End If
```

```
'Checking for Filters
```

```
    If CheckOscFiltered = vbChecked And Text3 > 1 Then
```

```
        MsgBox "To use a filter is a must: NumRecordsToRead=1", vbExclamation, "DigitalAdq"
```

```
        GoTo Fin
```

```
    End If
```

```
'Starting Measure
```

```
    Label1.Caption = "Measurement started"
```

```
    Label1.BackColor = &HFF00& 'verde
```

```
'Ponemos a contar a la tarjeta
```

```
For i = 1 To NumOfBoards
    h = AlazarGetBoardBySystemID(1, i)
    status = AlazarSetRecordCount(h, bd.RecordCount)
    status = AlazarSetRecordSize(h, bd.PreDepth, bd.RecLength - bd.PreDepth)
    status = AlazarSetCaptureClock(h, bd.ClockSource, bd.SampleRate, bd.ClockEdge, 0)
    Channel = CHANNEL_A
    status = AlazarInputControl(h, Channel, bd.CouplingChanA, bd.InputRangeChanA, bd.InputImpedChanA)
    Channel = CHANNEL_B
    status = AlazarInputControl(h, Channel, bd.CouplingChanB, bd.InputRangeChanB, bd.InputImpedChanB)
    status = AlazarSetTriggerOperation(h, bd.TriEngOperation, bd.TriggerEngine1, bd.TrigEngSource1, bd.TrigEngSlope1,
bd.TrigEngLevel1, bd.TriggerEngine2, bd.TrigEngSource2, bd.TrigEngSlope2, bd.TrigEngLevel2)

    status = AlazarSetTriggerTimeOut(h, 500000) 'create a 5 second time out delay
Next i

h = AlazarGetBoardBySystemID(1, 1)
status = AlazarStartCapture(h)

'Para el tiempo de la medida
Cicles = 0
Start1 = Timer
While (AlazarBusy(h))
    Cicles = Cicles + 1
    DoEvents 'Para permitir otros procesos mientras la tarjeta esta ocupada midiendo
    If FlagSTOP = True Then GoTo Fin
Wend
Final1 = Timer
LiveTime = Final1 - Start1 ' Life Time.

'Reading the card memory
Start2 = Timer
'For board = 1 To NumOfBoards
    h = AlazarGetBoardBySystemID(1, 1) 'h = AlazarGetBoardBySystemID(1, board)
    For RecordToRead = 1 To NumRecordsToRead
        status = AlazarRead(h, CHANNEL_A, ChanA_Data((RecordToRead - 1) * bd.RecLength), 2, RecordToRead, 0, bd.RecLength)
```

```
'status = AlazarRead(h, CHANNEL_B, ChanB_Data((i - 1) * bd.RecLength), 2, RecordToRead, 0, bd.RecLength)
Next RecordToRead

status = AlazarGetTriggerAddress(h, (RecordToRead - 1), TriggerAddress, TimeStampHighPart, TimeStampLowPart)
'Next board
'MsgBox Str$(TriggerAddress) + Str$(TimeStampHighPart) + Str$(TimeStampLowPart)

'Getting the data of the signal
GetSignalData

'Get another signal if the signal is saturated
If MaxVal >= 4095 Then CommandOsc_Click

'Checking for filters
If CheckOscFiltered = vbChecked Then
    Call FilterDialog.Filters
    If FlagSTOP = True Then GoTo Fin
    If FlagFilterPass = False Then CommandOsc_Click
End If

'Getting the data of the deconvolution if needed

If (FilterDialog.Check(7) = vbChecked) Then
    DeconvolutionByTwoPointsCaF
End If

If (FilterDialog.Check(8) = vbChecked) Then
    DeconvolutionByTwoPointsNaI
End If

If FlagWrongDeconvolution = True Then CommandOsc_Click

'Labels
'Label2.Caption = "a11=" + Format(a1Temp, "#####") + " a12=" + Format(a1, "#####") + " SlopeDif=" + Format(SlopeDif,
"#####")
Label4.Caption = "Up=" + Str$(Up) + " Height=" + Str$(Altura) + " Rise=" + Str$(Rise) + " RiseIncr=" + Format(RiseIncr, "#####")
Label4.BackColor = &HFF8080 'azul
Label9.Caption = Str$(MaxVal)
Label10.Caption = Str$(MinVal)
```

'Drawing the plot

If CheckAutoClear = vbChecked Then Picture1.Cls

If CheckAutoScale = vbChecked Then Picture1.Scale (0, MaxVal)-((NumRecordsToRead * bd.RecLength), MinVal)

RiseCorrection = 0

If CheckFixedStart = vbChecked Then RiseCorrection = FixedRise - Rise

If CheckFixedStart = vbUnchecked And (Up > 5 And RiseIncr < (Altura * 0.2)) Then

Form1.Picture1.Line (Rise, (a01 + (a11 * Rise)))-((Rise + (Up * (10 / 100))), (a01 + (a11 * (Rise + (Up * (10 / 100))))), RGB(255, 0, 0)

Form1.Picture1.Line ((iMaxVal + (bd.RecLength / 10)), (a0 + (a1 * (iMaxVal + (bd.RecLength / 10))))-((iMaxVal + (bd.RecLength / 4)), (a0 + (a1 * (iMaxVal + (bd.RecLength / 4))))), RGB(255, 0, 0)

Label2.Caption = "a11=" + Format(a11, "#.#####") + " a12=" + Format(a12, "#.#####") + " SlopeDif=" + Format(SlopeDif, "#.#####")

End If

For i = 0 To NumRecordsToRead * bd.RecLength

TempVal = ChanA_Data(i)

If TempVal < 0 Then TempVal = 65535 + TempVal

TempVal = TempVal / 16

Picture1.PSet (i + RiseCorrection, TempVal), RGB(0, 0, 0)

Next i

If (FilterDialog.Check(7) = vbChecked Or FilterDialog.Check(8) = vbChecked) Then

'Drawing the Plastic Deconvolution

For i = 0 To NumRecordsToRead * bd.RecLength

TempVal = C1 * StandartSignalPlastic(i)

Picture1.PSet (Rise + i, MinVal + TempVal), RGB(0, 0, 255) 'azul

Next i

If (FilterDialog.Check(7) = vbChecked) Then

'Drawing the CaF Deconvolution

For i = 0 To NumRecordsToRead * bd.RecLength

TempVal = C2 * StandartSignalCaF(i)

Picture1.PSet (Rise + i, MinVal + TempVal), RGB(255, 0, 0) 'rojo

Next i

End If

If (FilterDialog.Check(8) = vbChecked) Then

'Drawing the NaI Deconvolution

For i = 0 To NumRecordsToRead * bd.RecLength

```
TempVal = C2 * StandartSignalNal(i)
Picture1.PSet (Rise + i, MinVal + TempVal), RGB(255, 0, 0) 'rojo
Next i
End If
Label2.Caption = "FirstPeak=" + Str$(FirstPeak) + " SecondPeak - FirstPeak=" + Str$(Abs(SecondPeak - FirstPeak)) + " C1=" +
Format(C1, "#####") + " C2=" + Format(C2, "#####") + " FirstPeakDeconv=" + Format(FirstPeakDeconv, "#####") + "
SecondPeakDeconv=" + Format(SecondPeakDeconv, "#####")
End If
```

'Time presentation

```
Final2 = Timer
```

```
CalcTime = Final2 - Start2 ' Life Time.
```

```
Label3.Caption = "Live Time= " + Str$(LiveTime) + " seg (" + Str$(Cicles) + " Cicles ) CalcTime=" + Str$(CalcTime) + " seg"
```

Fin:

```
If Label1.Caption = "Measurement started" Then Label1.Caption = "Measurement finished"
```

```
Label1.BackColor = &HFF& 'red
```

```
CommandOsc.Enabled = True
```

```
FlagSTOP = False
```

```
FlagFilterPass = True
```

```
CommandOsc.SetFocus
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandMult_Click()
```

```
Dim h As Variant
```

```
Dim status As Long
```

```
Dim Major As Byte
```

```
Dim Minor As Byte
```

```
Dim Rev As Byte
```

```
Dim MemSize As Long
```

```
Dim SampleSize As Byte
```

```
Dim Channel As Byte
```

```
Dim NumOfBoards As Integer
```

```
Dim NumOfSystems As Integer
```

```
Dim RecordToRead As Long ' Este es el numero del registro que nos va a leer desde la tarjeta. Tiene que ser, como máximo
```

```
RecordCount
```

```
Dim i, j As Long
```

```
Dim StartTT, FinalTT, TempTotalTime 'For Total Time
```

```
Dim StartLT, FinalLT, Cicles 'For Live Time
```

Dim StartDT, FinalDT 'For Calculation Time

Dim Counts As Long 'Numero de ciclos = medir un impulso, procesarle y almacenarlo en el espectro

Dim Rejected As Long 'Numero de impulsos rechazados por estar saturado (MaxVal=4095)

Dim ExitFlag As Boolean

Dim TempVal As Long

Dim cpsTT, cpsLT, DTpc As Long

Dim a1Temp As Variant

NumOfBoards = AlazarBoardsInSystemBySystemID(1)

If NumOfBoards < 1 Then

 MsgBox "No digitalization card is detected", vbExclamation, "DigitalAdq"

 GoTo Fin

End If

status = AlazarGetCPLDVersion(h, Major, Minor)

status = AlazarGetSDKVersion(Major, Minor, Rev)

status = AlazarGetDriverVersion(Major, Minor, Rev)

'bd.RecLength =512

'bd.RecordCount = 1 'Como máximo podemos contar 504 registros de 256 canales

bd.PreDepth = 64 'Canales que almacena y muestra antes de que salte el trigger

bd.ClockSource = INTERNAL_CLOCK

bd.ClockEdge = CLOCK_EDGE_RISING

bd.SampleRate = SAMPLE_RATE_50MSPS

bd.CouplingChanA = AC_COUPLING

'bd.InputRangeChanA = INPUT_RANGE_PM_200_MV

'bd.InputImpedChanA = IMPEDANCE_1M_OHM

 If ListImpedance.Text = "1 MOhm" Then bd.InputImpedChanA = IMPEDANCE_1M_OHM

 If ListImpedance.Text = "600 Ohm" Then bd.InputImpedChanA = IMPEDANCE_600_OHM

 If ListImpedance.Text = "300 Ohm" Then bd.InputImpedChanA = IMPEDANCE_300_OHM

 If ListImpedance.Text = "75 Ohm" Then bd.InputImpedChanA = IMPEDANCE_75_OHM

 If ListImpedance.Text = "50 Ohm" Then bd.InputImpedChanA = IMPEDANCE_50_OHM

bd.CouplingChanB = AC_COUPLING

bd.InputRangeChanB = INPUT_RANGE_PM_1_V

bd.InputImpedChanB = IMPEDANCE_1M_OHM

bd.TriEngOperation = TRIG_ENGINE_OP_J_OR_K

```
bd.TriggerEngine1 = TRIG_ENGINE_J
bd.TrigEngSource1 = TRIG_CHAN_A
bd.TrigEngSlope1 = TRIGGER_SLOPE_POSITIVE
'bd.TrigEngLevel1 = 140
    bd.TrigEngLevel1 = ListTrigger.Text
bd.TriggerEngine2 = TRIG_ENGINE_K
bd.TrigEngSource2 = TRIG_DISABLE
bd.TrigEngSlope2 = TRIGGER_SLOPE_POSITIVE
bd.TrigEngLevel2 = 128
'-----
```

```
CommandMult.Enabled = False
```

```
'Checking for Filters
```

```
If CheckSpectFiltered = vbChecked And Text3 > 1 Then
    MsgBox "To use a filter is a must: NumRecordsToRead=1", vbExclamation, "DigitalAdq"
    GoTo Fin
End If

If CheckSpectFiltered = vbChecked And CheckAnyFilter = vbUnchecked Then
    MsgBox "No filter is set yet", vbExclamation, "DigitalAdq"
    GoTo Fin
End If
```

```
'Control of bd.RecordCount <= RecordLimit
```

```
bd.RecordCount = Text2.Text
If bd.RecordCount > RecordLimit Or bd.RecordCount < 1 Then
    MsgBox "RecordCount= " + Str$(Text2) + " must be between 1 and" + Str$(RecordLimit), vbExclamation, "DigitalAdq"
    GoTo Fin
End If
```

```
'Control of Number of Counts
```

```
If TextCount < 1 Then
    MsgBox "The number of counts must be higher than 0", vbExclamation, "DigitalAdq"
    GoTo Fin
End If
```

```
'Control of NumRecordsToRead
```

```
If Text3.Text <> 1 Then
    MsgBox "NumRecordsToRead must be 1", vbExclamation, "DigitalAdq"
```

```
'MsgBox "NumRecordsToRead must be between 1 and" + Str$(bd.RecordCount), vbExclamation, "DigitalAdq"

GoTo Fin

End If

NumRecordsToRead = Text3.Text

'Captions to start

Label1.Caption = "Measurement started"

Label1.BackColor = &HFF00& 'verde

Label3.Caption = "Time"

Label4.Caption = "Counts"

Picture1.Cls

'Time Controls Inicialization

StartTT = Timer

StartDT = Timer

'----- STARTING MEASUREMENT LOOP -----

ExitFlag = False

While ExitFlag = False

'Starting the card

For i = 1 To NumOfBoards

    h = AlazarGetBoardBySystemID(1, i)

    status = AlazarSetRecordCount(h, bd.RecordCount)

    status = AlazarSetRecordSize(h, bd.PreDepth, bd.RecLength - bd.PreDepth)

    status = AlazarSetCaptureClock(h, bd.ClockSource, bd.SampleRate, bd.ClockEdge, 0)

    Channel = CHANNEL_A

    status = AlazarInputControl(h, Channel, bd.CouplingChanA, bd.InputRangeChanA, bd.InputImpedChanA)

    'Channel = CHANNEL_B

    'status = AlazarInputControl(h, Channel, bd.CouplingChanB, bd.InputRangeChanB, bd.InputImpedChanB)

    status = AlazarSetTriggerOperation(h, bd.TriEngOperation, bd.TriggerEngine1, bd.TrigEngSource1, bd.TrigEngSlope1,

bd.TrigEngLevel1, bd.TriggerEngine2, bd.TrigEngSource2, bd.TrigEngSlope2, bd.TrigEngLevel2)

    status = AlazarSetTriggerTimeOut(h, 500000) 'create a 5 second time out delay

Next i

h = AlazarGetBoardBySystemID(1, 1)

FinalDT = Timer
```

```
If StartDT > FinalDT Then FinalDT = FinalDT + 86400
```

```
DeadTime = DeadTime + (FinalDT - StartDT)
```

```
'Opening and closing the card for signals
```

```
StartLT = Timer
```

```
status = AlazarStartCapture(h)
```

```
While (AlazarBusy(h))
```

```
DoEvents 'Para permitir otros procesos mientras la tarjeta esta ocupada midiendo
```

```
Wend
```

```
FinalLT = Timer
```

```
If StartLT > FinalLT Then FinalLT = FinalLT + 86400 'A media noche se pone a cero. Le sumo 1 dia.
```

```
LiveTime = LiveTime + (FinalLT - StartLT)
```

```
'Reading the card memory
```

```
StartDT = Timer
```

```
'For board = 1 To NumOfBoards
```

```
h = AlazarGetBoardBySystemID(1, 1) 'h = AlazarGetBoardBySystemID(1, board)
```

```
For RecordToRead = 1 To NumRecordsToRead
```

```
status = AlazarRead(h, CHANNEL_A, ChanA_Data((RecordToRead - 1) * bd.RecLength), 2, RecordToRead, 0, bd.RecLength)
```

```
'status = AlazarRead(h, CHANNEL_B, ChanB_Data((i - 1) * bd.RecLength), 2, RecordToRead, 0, bd.RecLength)
```

```
Next RecordToRead
```

```
'Next board
```

```
'Getting the signal data
```

```
GetSignalData
```

```
'Rejecting saturated signals
```

```
If MaxVal >= 4095 Then
```

```
Rejected = Rejected + 1
```

```
GoTo Siguiente
```

```
End If
```

```
'Checking for filters
```

```
If CheckSpectFiltered = vbChecked Then
```

```
Call FilterDialog.Filters
```

```
If FlagSTOP = True Then GoTo Fin
```

```
If FlagFilterPass = False Then GoTo Siguiente
```

```
End If
```

'Getting the data of the deconvolution if needed

If (FilterDialog.Check(7) = vbChecked) Then

 DeconvolutionByTwoPointsCaF

End If

If (FilterDialog.Check(8) = vbChecked) Then

 DeconvolutionByTwoPointsNaI

End If

If FlagWrongDeconvolution = True Then GoTo Siguiente

If Check1.Value = vbChecked Then

'Representacion gráfica del impulso

 If CheckAutoClear = vbChecked Then Picture1.Cls

 If CheckAutoScale = vbChecked Then Picture1.Scale (0, MaxVal)-((NumRecordsToRead * bd.RecLength), MinVal)

 For i = 0 To NumRecordsToRead * bd.RecLength

 TempVal = 0

 TempVal = ChanA_Data(i)

 If TempVal < 0 Then TempVal = 65535 + TempVal

 TempVal = TempVal / 16

 Picture1.PSet (i, TempVal), RGB(0, 0, 0)

 Next i

'Representación de las señales deconvolucionadas si se necesita.

If (FilterDialog.Check(7) = vbChecked Or FilterDialog.Check(8) = vbChecked) Then

 'Drawing the Plastic Deconvolution

 For i = 0 To NumRecordsToRead * bd.RecLength

 TempVal = C1 * StandartSignalPlastic(i)

 Picture1.PSet (Rise + i, MinVal + TempVal), RGB(0, 0, 255) 'azul

 Next i

 'Drawing the CaF Deconvolution

 If (FilterDialog.Check(7) = vbChecked) Then

 For i = 0 To NumRecordsToRead * bd.RecLength

 TempVal = C2 * StandartSignalCaF(i)

 Picture1.PSet (Rise + i, MinVal + TempVal), RGB(255, 0, 0) 'rojo

 Next i

 End If

```
'Drawing the NaI Deconvolution
If (FilterDialog.Check(8) = vbChecked) Then
    For i = 0 To NumRecordsToRead * bd.ReclLength
        TempVal = C2 * StandartSignalNaI(i)
        Picture1.PSet (Rise + i, MinVal + TempVal), RGB(255, 0, 0) 'rojo
    Next i
End If

Label2.Caption = "C1=" + Format(C1, "#.#####") + " C2=" + Format(C2, "#.#####") + " FirstPeakDeconv=" +
Format(FirstPeakDeconv, "#.#####") + " SecondPeakDeconv=" + Format(SecondPeakDeconv, "#.#####")
End If

'Labels
Label1.Caption = "Up=" + Str$(Up)
Label9.Caption = Str$(MaxVal)
Label10.Caption = Str$(MinVal)
Label2.Caption = "a11=" + Format(a1Temp, "#.#####") + " a12=" + Format(a1, "#.#####") + " SlopeDif=" + Format(SlopeDif,
"#.#####")
End If

'Llenado de la matriz de canales
If (FilterDialog.Check(7) = vbUnchecked And FilterDialog.Check(8) = vbUnchecked) Then
    If MaxVal < 4095 And Altura <= 2048 Then
        Canal(Altura) = Canal(Altura) + 1
    Else
        Rejected = Rejected + 1
    End If
    Counts = Counts + 1
End If

If (FilterDialog.Check(7) = vbChecked Or FilterDialog.Check(8) = vbChecked) Then
    If MaxVal < 4095 And FirstPeakDeconv < 2048 And FirstPeakDeconv > 0 And SecondPeakDeconv > 0 And SecondPeakDeconv <
2048 Then
        CanalPico1(FirstPeakDeconv) = CanalPico1(FirstPeakDeconv) + 1
        CanalPico2(SecondPeakDeconv) = CanalPico2(SecondPeakDeconv) + 1

        SaveData ' llama a una función que guarda los datos de las coincidencias
```

DeconvNumber = DeconvNumber + 1

MatrixFirstPeakDeconv(DeconvNumber) = FirstPeakDeconv

MatrixSecondPeakDeconv(DeconvNumber) = SecondPeakDeconv

Plot2DCoincidenceGraph ' Llama a la función que representará las coincidencias

Else

Rejected = Rejected + 1

End If

Counts = Counts + 1

End If

Siguiente:

'Exit conditions

FinalTT = Timer

If StartTT > FinalTT Then FinalTT = FinalTT + 86400 'A media noche se pone a cero. Le sumo 1 dia.

TempTotalTime = Abs(FinalTT - StartTT)

Label3.Caption = "Elapsed Time=" + Str\$(Int(TempTotalTime)) + "sec"

Label4.Caption = "Counts=" + Str\$(Counts) + " Rejected=" + Str\$(Rejected)

If TimeOption.Value = True And TempTotalTime >= Abs(TextTime()) Then ExitFlag = True

If CountsOption.Value = True And Counts >= TextCount() Then ExitFlag = True

If FlagSTOP = True Then ExitFlag = True

If FlagResetTimer = True Then

TotalTime = 0

DeadTime = 0

LiveTime = 0

Counts = 0

cpsTT = 0

cpsLT = 0

DTpc = 0

Label3.Caption = "TotalTime=" + Str\$(TotalTime) + "sec " + Str\$(cpsTT) + "cps. LiveTime=" + Str\$(LiveTime) + "sec " +

Str\$(cpsLT) + "cps. DeadTime=" + Str\$(DeadTime) + "sec. " + Str\$(DTpc) + "%"

FlagResetTimer = False

ExitFlag = True

End If

'Representacion gráfica en el multicanal

If (Check2.Value = vbChecked Or ExitFlag = True) Then

If (FilterDialog.Check(7) = vbUnchecked And FilterDialog.Check(8) = vbUnchecked) Or CheckSpectFiltered = vbUnchecked Then

i = PlotSpectrum(X1, X2, ComboChannels.Text, VScroll1.Value, Color1)

End If

If (FilterDialog.Check(7) = vbChecked Or FilterDialog.Check(8) = vbChecked) And CheckSpectFiltered = vbChecked Then

Picture2.Cls

i = PlotSpectrumCoincidence(X1, X2, ComboChannels.Text, VScroll1.Value, 1, &HFF0000) ' &H00FF0000& Es azul

i = PlotSpectrumCoincidence(X1, X2, ComboChannels.Text, VScroll1.Value, 2, &HFF&) '&HFF& es rojo

End If

End If

Wend '----- END OF LOOP CONTROLLED BY ExitFlag -----

'Time Presentation

FinalDT = Timer

FinalTT = Timer

If StartTT > FinalTT Then FinalTT = FinalTT + 86400 'A media noche se pone a cero. Le sumo 1 dia.

If StartDT > FinalDT Then FinalDT = FinalDT + 86400 'A media noche se pone a cero. Le sumo 1 dia.

TotalTime = TotalTime + (FinalTT - StartTT)

DeadTime = DeadTime + (FinalDT - StartDT)

If TotalTime = 0 Or LiveTime = 0 Or Counts = 0 Then

Label3.Caption = "TotalTime=" + Str\$(TotalTime) + " seg"

Else

cpsTT = (Counts / TotalTime)

cpsLT = (Counts / LiveTime)

DTpc = (DeadTime / TotalTime) * 100

If cpsTT <> 0 Then cpsTT = Format(cpsTT, "#.####")

If cpsLT <> 0 Then cpsLT = Format(cpsLT, "#.####")

If DTpc <> 0 Then DTpc = Format(DTpc, "#.##")

Label3.Caption = "TotalTime=" + Str\$(TotalTime) + "sec " + Str\$(cpsTT) + "cps. LiveTime=" + Str\$(LiveTime) + "sec " + Str\$(cpsLT) + "cps. DeadTime=" + Str\$(DeadTime) + "sec. " + Str\$(DTpc) + "%"

End If

Fin:

'If Label1.Caption = "Measurement started" Then

Label1.Caption = "Measurement finished"

Label1.BackColor = &HFF& 'rojo

CommandMult.Enabled = True

FlagSTOP = False

End Sub

Private Sub Form_Load()

Dim i As Integer

'Loading the standart signals for deconvolution analysis.

StandartSignalPlastic(1) = 0: StandartSignalNal(1) = 0: StandartSignalCaF(1) = 0

StandartSignalPlastic(2) = 10.81255056: StandartSignalNal(2) = 193.6541105: StandartSignalCaF(2) = 66.9311459

StandartSignalPlastic(3) = 188.205059: StandartSignalNal(3) = 444.6625302: StandartSignalCaF(3) = 165.6953721

StandartSignalPlastic(4) = 366.5359187: StandartSignalNal(4) = 699.9146459: StandartSignalCaF(4) = 261.8979101

StandartSignalPlastic(5) = 422.8914573: StandartSignalNal(5) = 934.9474782: StandartSignalCaF(5) = 358.135295

StandartSignalPlastic(6) = 423.9821374: StandartSignalNal(6) = 1127.53214: StandartSignalCaF(6) = 451.5313004

StandartSignalPlastic(7) = 389.1572835: StandartSignalNal(7) = 1305.392879: StandartSignalCaF(7) = 531.8872632

StandartSignalPlastic(8) = 356.3330744: StandartSignalNal(8) = 1481.654293: StandartSignalCaF(8) = 601.5588847

StandartSignalPlastic(9) = 338.7660831: StandartSignalNal(9) = 1640.315607: StandartSignalCaF(9) = 660.8643635

StandartSignalPlastic(10) = 324.7121481: StandartSignalNal(10) = 1789.212799: StandartSignalCaF(10) = 727.9603045

StandartSignalPlastic(11) = 335.4606007: StandartSignalNal(11) = 1923.107363: StandartSignalCaF(11) = 789.0177259

StandartSignalPlastic(12) = 354.6171489: StandartSignalNal(12) = 2048.311067: StandartSignalCaF(12) = 838.8478346

StandartSignalPlastic(13) = 352.336472: StandartSignalNal(13) = 2167.160719: StandartSignalCaF(13) = 907.2396815

StandartSignalPlastic(14) = 350.6560891: StandartSignalNal(14) = 2278.808884: StandartSignalCaF(14) = 964.6866998

StandartSignalPlastic(15) = 356.8725995: StandartSignalNal(15) = 2357.708673: StandartSignalCaF(15) = 1033.515132

StandartSignalPlastic(16) = 356.229152: StandartSignalNal(16) = 2436.495599: StandartSignalCaF(16) = 1096.482257

StandartSignalPlastic(17) = 347.2609811: StandartSignalNal(17) = 2508.003975: StandartSignalCaF(17) = 1137.302352

StandartSignalPlastic(18) = 347.313466: StandartSignalNal(18) = 2567.011584: StandartSignalCaF(18) = 1189.982319

StandartSignalPlastic(19) = 355.4493493: StandartSignalNal(19) = 2625.325621: StandartSignalCaF(19) = 1220.452047

StandartSignalPlastic(20) = 351.8285323: StandartSignalNal(20) = 2679.17487: StandartSignalCaF(20) = 1253.180196

StandartSignalPlastic(21) = 345.3782235: StandartSignalNal(21) = 2721.181494: StandartSignalCaF(21) = 1287.581411

StandartSignalPlastic(22) = 350.5781211: StandartSignalNal(22) = 2771.924339: StandartSignalCaF(22) = 1321.796307

StandartSignalPlastic(23) = 354.6350549: StandartSignalNal(23) = 2818.965753: StandartSignalCaF(23) = 1360.982423

StandartSignalPlastic(24) = 347.0824537: StandartSignalNal(24) = 2861.240294: StandartSignalCaF(24) = 1397.364304

StandartSignalPlastic(25) = 344.0769964: StandartSignalNal(25) = 2897.34972: StandartSignalCaF(25) = 1444.36564

StandartSignalPlastic(26) = 350.5573009: StandartSignalNal(26) = 2927.574916: StandartSignalCaF(26) = 1483.919353

StandartSignalPlastic(27) = 350.2882917: StandartSignalNal(27) = 2958.058377: StandartSignalCaF(27) = 1520.719166
StandartSignalPlastic(28) = 343.9863661: StandartSignalNal(28) = 2986.709232: StandartSignalCaF(28) = 1543.278188
StandartSignalPlastic(29) = 345.5649058: StandartSignalNal(29) = 3013.256181: StandartSignalCaF(29) = 1572.647993
StandartSignalPlastic(30) = 350.162309: StandartSignalNal(30) = 3030.61397: StandartSignalCaF(30) = 1603.41884
StandartSignalPlastic(31) = 345.2219563: StandartSignalNal(31) = 3054.593713: StandartSignalCaF(31) = 1626.240465
StandartSignalPlastic(32) = 341.1707419: StandartSignalNal(32) = 3076.635553: StandartSignalCaF(32) = 1669.240312
StandartSignalPlastic(33) = 346.5294659: StandartSignalNal(33) = 3090.457161: StandartSignalCaF(33) = 1702.739631
StandartSignalPlastic(34) = 348.1180859: StandartSignalNal(34) = 3098.77787: StandartSignalCaF(34) = 1735.17086
StandartSignalPlastic(35) = 343.1068648: StandartSignalNal(35) = 3109.960272: StandartSignalCaF(35) = 1768.901174
StandartSignalPlastic(36) = 341.2596831: StandartSignalNal(36) = 3124.853454: StandartSignalCaF(36) = 1805.202525
StandartSignalPlastic(37) = 345.5658579: StandartSignalNal(37) = 3137.740394: StandartSignalCaF(37) = 1831.458968
StandartSignalPlastic(38) = 344.5390218: StandartSignalNal(38) = 3151.275976: StandartSignalCaF(38) = 1854.277784
StandartSignalPlastic(39) = 338.9878166: StandartSignalNal(39) = 3162.464909: StandartSignalCaF(39) = 1871.845856
StandartSignalPlastic(40) = 341.554306: StandartSignalNal(40) = 3171.84572: StandartSignalCaF(40) = 1889.086228
StandartSignalPlastic(41) = 344.3665391: StandartSignalNal(41) = 3172.203402: StandartSignalCaF(41) = 1904.70716
StandartSignalPlastic(42) = 339.8806768: StandartSignalNal(42) = 3179.570651: StandartSignalCaF(42) = 1922.080718
StandartSignalPlastic(43) = 337.1879946: StandartSignalNal(43) = 3179.405172: StandartSignalCaF(43) = 1942.233166
StandartSignalPlastic(44) = 341.7896308: StandartSignalNal(44) = 3179.476233: StandartSignalCaF(44) = 1959.848302
StandartSignalPlastic(45) = 342.4725075: StandartSignalNal(45) = 3182.097175: StandartSignalCaF(45) = 1977.279325
StandartSignalPlastic(46) = 337.9031931: StandartSignalNal(46) = 3183.959444: StandartSignalCaF(46) = 1991.02379
StandartSignalPlastic(47) = 338.3974181: StandartSignalNal(47) = 3193.336117: StandartSignalCaF(47) = 2005.234243
StandartSignalPlastic(48) = 341.1593196: StandartSignalNal(48) = 3203.319306: StandartSignalCaF(48) = 2024.219543
StandartSignalPlastic(49) = 338.5570299: StandartSignalNal(49) = 3203.390805: StandartSignalCaF(49) = 2042.592007
StandartSignalPlastic(50) = 335.2759225: StandartSignalNal(50) = 3205.489299: StandartSignalCaF(50) = 2056.182338
StandartSignalPlastic(51) = 336.5809678: StandartSignalNal(51) = 3210.458161: StandartSignalCaF(51) = 2070.394083
StandartSignalPlastic(52) = 338.7057616: StandartSignalNal(52) = 3206.971496: StandartSignalCaF(52) = 2077.184948
StandartSignalPlastic(53) = 335.0643488: StandartSignalNal(53) = 3210.957932: StandartSignalCaF(53) = 2082.338565
StandartSignalPlastic(54) = 333.4927298: StandartSignalNal(54) = 3216.403792: StandartSignalCaF(54) = 2092.835314
StandartSignalPlastic(55) = 336.2769789: StandartSignalNal(55) = 3222.847657: StandartSignalCaF(55) = 2098.908332
StandartSignalPlastic(56) = 334.7548441: StandartSignalNal(56) = 3225.73194: StandartSignalCaF(56) = 2109.38328
StandartSignalPlastic(57) = 331.7618572: StandartSignalNal(57) = 3229.673105: StandartSignalCaF(57) = 2123.561858
StandartSignalPlastic(58) = 333.4484582: StandartSignalNal(58) = 3226.51734: StandartSignalCaF(58) = 2144.860214
StandartSignalPlastic(59) = 335.9949822: StandartSignalNal(59) = 3218.482348: StandartSignalCaF(59) = 2152.613407
StandartSignalPlastic(60) = 333.6755474: StandartSignalNal(60) = 3219.032439: StandartSignalCaF(60) = 2158.942732
StandartSignalPlastic(61) = 330.1239432: StandartSignalNal(61) = 3219.860804: StandartSignalCaF(61) = 2170.739946
StandartSignalPlastic(62) = 332.1393415: StandartSignalNal(62) = 3216.774237: StandartSignalCaF(62) = 2178.629626
StandartSignalPlastic(63) = 331.1055354: StandartSignalNal(63) = 3216.337946: StandartSignalCaF(63) = 2185.090158
StandartSignalPlastic(64) = 327.7921968: StandartSignalNal(64) = 3212.784247: StandartSignalCaF(64) = 2191.729427
StandartSignalPlastic(65) = 327.6964368: StandartSignalNal(65) = 3210.350951: StandartSignalCaF(65) = 2199.630289

StandartSignalPlastic(66) = 329.1672889: StandartSignalNal(66) = 3205.951392: StandartSignalCaF(66) = 2211.839774
StandartSignalPlastic(67) = 328.4088096: StandartSignalNal(67) = 3203.251392: StandartSignalCaF(67) = 2213.491776
StandartSignalPlastic(68) = 324.2259995: StandartSignalNal(68) = 3206.232749: StandartSignalCaF(68) = 2216.053707
StandartSignalPlastic(69) = 325.2279451: StandartSignalNal(69) = 3204.12895: StandartSignalCaF(69) = 2217.880827
StandartSignalPlastic(70) = 326.5820621: StandartSignalNal(70) = 3201.746563: StandartSignalCaF(70) = 2218.053951
StandartSignalPlastic(71) = 323.4032183: StandartSignalNal(71) = 3197.380593: StandartSignalCaF(71) = 2219.627194
StandartSignalPlastic(72) = 322.6234102: StandartSignalNal(72) = 3195.747613: StandartSignalCaF(72) = 2225.602633
StandartSignalPlastic(73) = 324.1535561: StandartSignalNal(73) = 3194.07789: StandartSignalCaF(73) = 2234.522407
StandartSignalPlastic(74) = 323.3208647: StandartSignalNal(74) = 3196.430738: StandartSignalCaF(74) = 2241.932143
StandartSignalPlastic(75) = 320.2142123: StandartSignalNal(75) = 3191.847029: StandartSignalCaF(75) = 2247.333613
StandartSignalPlastic(76) = 319.7949671: StandartSignalNal(76) = 3186.37025: StandartSignalCaF(76) = 2254.309883
StandartSignalPlastic(77) = 320.6702775: StandartSignalNal(77) = 3180.657312: StandartSignalCaF(77) = 2257.90609
StandartSignalPlastic(78) = 319.9579379: StandartSignalNal(78) = 3173.014607: StandartSignalCaF(78) = 2266.165766
StandartSignalPlastic(79) = 318.1284695: StandartSignalNal(79) = 3169.446843: StandartSignalCaF(79) = 2274.274765
StandartSignalPlastic(80) = 318.2503067: StandartSignalNal(80) = 3163.294027: StandartSignalCaF(80) = 2281.027312
StandartSignalPlastic(81) = 318.421732: StandartSignalNal(81) = 3160.072203: StandartSignalCaF(81) = 2287.298581
StandartSignalPlastic(82) = 314.024967: StandartSignalNal(82) = 3155.229168: StandartSignalCaF(82) = 2289.400949
StandartSignalPlastic(83) = 314.705196: StandartSignalNal(83) = 3152.290038: StandartSignalCaF(83) = 2289.634525
StandartSignalPlastic(84) = 316.4783426: StandartSignalNal(84) = 3142.544006: StandartSignalCaF(84) = 2292.983944
StandartSignalPlastic(85) = 314.8283106: StandartSignalNal(85) = 3139.130157: StandartSignalCaF(85) = 2288.348995
StandartSignalPlastic(86) = 312.5208574: StandartSignalNal(86) = 3133.836281: StandartSignalCaF(86) = 2288.813751
StandartSignalPlastic(87) = 312.1536803: StandartSignalNal(87) = 3127.341763: StandartSignalCaF(87) = 2291.339566
StandartSignalPlastic(88) = 313.3086865: StandartSignalNal(88) = 3118.856878: StandartSignalCaF(88) = 2290.00174
StandartSignalPlastic(89) = 310.7643668: StandartSignalNal(89) = 3108.324377: StandartSignalCaF(89) = 2290.358419
StandartSignalPlastic(90) = 309.209241: StandartSignalNal(90) = 3101.495315: StandartSignalCaF(90) = 2288.492243
StandartSignalPlastic(91) = 311.5724352: StandartSignalNal(91) = 3095.452145: StandartSignalCaF(91) = 2298.109761
StandartSignalPlastic(92) = 310.6754: StandartSignalNal(92) = 3090.457465: StandartSignalCaF(92) = 2312.834307
StandartSignalPlastic(93) = 309.4405528: StandartSignalNal(93) = 3083.589082: StandartSignalCaF(93) = 2315.451582
StandartSignalPlastic(94) = 307.3487436: StandartSignalNal(94) = 3076.120969: StandartSignalCaF(94) = 2312.662517
StandartSignalPlastic(95) = 308.3551797: StandartSignalNal(95) = 3071.191936: StandartSignalCaF(95) = 2306.117273
StandartSignalPlastic(96) = 306.891831: StandartSignalNal(96) = 3066.32303: StandartSignalCaF(96) = 2305.867315
StandartSignalPlastic(97) = 303.9305103: StandartSignalNal(97) = 3062.362757: StandartSignalCaF(97) = 2306.269413
StandartSignalPlastic(98) = 306.2775366: StandartSignalNal(98) = 3056.095406: StandartSignalCaF(98) = 2315.803936
StandartSignalPlastic(99) = 305.0843287: StandartSignalNal(99) = 3051.786259: StandartSignalCaF(99) = 2315.489987
StandartSignalPlastic(100) = 303.32497: StandartSignalNal(100) = 3049.859096: StandartSignalCaF(100) = 2309.413149
StandartSignalPlastic(101) = 302.3510903: StandartSignalNal(101) = 3045.609657: StandartSignalCaF(101) = 2303.730043
StandartSignalPlastic(102) = 302.0287765: StandartSignalNal(102) = 3036.94516: StandartSignalCaF(102) = 2300.640237
StandartSignalPlastic(103) = 301.7347132: StandartSignalNal(103) = 3030.903587: StandartSignalCaF(103) = 2297.03078
StandartSignalPlastic(104) = 299.6370971: StandartSignalNal(104) = 3024.66387: StandartSignalCaF(104) = 2292.705276

StandartSignalPlastic(105) = 300.0338266: StandartSignalNal(105) = 3023.036708: StandartSignalCaF(105) = 2291.117071
StandartSignalPlastic(106) = 300.0180456: StandartSignalNal(106) = 3015.983398: StandartSignalCaF(106) = 2291.435525
StandartSignalPlastic(107) = 299.1783995: StandartSignalNal(107) = 3013.288258: StandartSignalCaF(107) = 2291.470769
StandartSignalPlastic(108) = 297.6729661: StandartSignalNal(108) = 3003.793459: StandartSignalCaF(108) = 2292.76803
StandartSignalPlastic(109) = 298.2120707: StandartSignalNal(109) = 2998.829924: StandartSignalCaF(109) = 2297.238512
StandartSignalPlastic(110) = 297.2288626: StandartSignalNal(110) = 2989.991661: StandartSignalCaF(110) = 2300.406864
StandartSignalPlastic(111) = 295.2475434: StandartSignalNal(111) = 2985.888065: StandartSignalCaF(111) = 2297.202492
StandartSignalPlastic(112) = 295.892034: StandartSignalNal(112) = 2978.406164: StandartSignalCaF(112) = 2289.250968
StandartSignalPlastic(113) = 295.9793062: StandartSignalNal(113) = 2971.693765: StandartSignalCaF(113) = 2283.029711
StandartSignalPlastic(114) = 294.9321987: StandartSignalNal(114) = 2968.179812: StandartSignalCaF(114) = 2275.944492
StandartSignalPlastic(115) = 292.838727: StandartSignalNal(115) = 2955.184561: StandartSignalCaF(115) = 2272.485801
StandartSignalPlastic(116) = 291.7078115: StandartSignalNal(116) = 2945.503183: StandartSignalCaF(116) = 2272.97251
StandartSignalPlastic(117) = 292.7135773: StandartSignalNal(117) = 2946.239626: StandartSignalCaF(117) = 2271.355236
StandartSignalPlastic(118) = 291.629142: StandartSignalNal(118) = 2936.235751: StandartSignalCaF(118) = 2269.209298
StandartSignalPlastic(119) = 289.7387783: StandartSignalNal(119) = 2931.614517: StandartSignalCaF(119) = 2267.819932
StandartSignalPlastic(120) = 290.2833501: StandartSignalNal(120) = 2922.405385: StandartSignalCaF(120) = 2265.503399
StandartSignalPlastic(121) = 290.1216888: StandartSignalNal(121) = 2919.883319: StandartSignalCaF(121) = 2261.055793
StandartSignalPlastic(122) = 288.2786106: StandartSignalNal(122) = 2917.450071: StandartSignalCaF(122) = 2257.603909
StandartSignalPlastic(123) = 288.8454416: StandartSignalNal(123) = 2912.746082: StandartSignalCaF(123) = 2257.775515
StandartSignalPlastic(124) = 288.9735222: StandartSignalNal(124) = 2905.444368: StandartSignalCaF(124) = 2257.754586
StandartSignalPlastic(125) = 288.6587593: StandartSignalNal(125) = 2898.11225: StandartSignalCaF(125) = 2255.051788
StandartSignalPlastic(126) = 286.162258: StandartSignalNal(126) = 2888.534156: StandartSignalCaF(126) = 2251.170618
StandartSignalPlastic(127) = 286.1217482: StandartSignalNal(127) = 2877.397099: StandartSignalCaF(127) = 2245.958106
StandartSignalPlastic(128) = 286.5087301: StandartSignalNal(128) = 2865.629667: StandartSignalCaF(128) = 2244.155791
StandartSignalPlastic(129) = 285.7819743: StandartSignalNal(129) = 2864.175181: StandartSignalCaF(129) = 2243.077074
StandartSignalPlastic(130) = 284.8754005: StandartSignalNal(130) = 2855.836782: StandartSignalCaF(130) = 2244.679119
StandartSignalPlastic(131) = 284.6778227: StandartSignalNal(131) = 2850.120638: StandartSignalCaF(131) = 2240.785346
StandartSignalPlastic(132) = 282.9274375: StandartSignalNal(132) = 2839.849021: StandartSignalCaF(132) = 2240.292379
StandartSignalPlastic(133) = 281.9444958: StandartSignalNal(133) = 2834.475896: StandartSignalCaF(133) = 2237.046238
StandartSignalPlastic(134) = 280.9765921: StandartSignalNal(134) = 2828.222616: StandartSignalCaF(134) = 2226.749153
StandartSignalPlastic(135) = 280.6273108: StandartSignalNal(135) = 2821.077178: StandartSignalCaF(135) = 2222.272745
StandartSignalPlastic(136) = 280.2431071: StandartSignalNal(136) = 2816.272358: StandartSignalCaF(136) = 2218.964505
StandartSignalPlastic(137) = 278.7640505: StandartSignalNal(137) = 2809.588099: StandartSignalCaF(137) = 2216.171258
StandartSignalPlastic(138) = 279.2214397: StandartSignalNal(138) = 2801.982161: StandartSignalCaF(138) = 2214.286326
StandartSignalPlastic(139) = 278.0762296: StandartSignalNal(139) = 2795.450912: StandartSignalCaF(139) = 2212.591854
StandartSignalPlastic(140) = 277.2590206: StandartSignalNal(140) = 2787.900055: StandartSignalCaF(140) = 2210.580524
StandartSignalPlastic(141) = 276.8540135: StandartSignalNal(141) = 2785.5325: StandartSignalCaF(141) = 2205.701921
StandartSignalPlastic(142) = 275.9326365: StandartSignalNal(142) = 2775.6043: StandartSignalCaF(142) = 2198.938063
StandartSignalPlastic(143) = 275.9614356: StandartSignalNal(143) = 2768.84225: StandartSignalCaF(143) = 2191.911417

StandartSignalPlastic(144) = 275.058723: StandartSignalNal(144) = 2765.926484: StandartSignalCaF(144) = 2184.019015
StandartSignalPlastic(145) = 274.5527874: StandartSignalNal(145) = 2757.237618: StandartSignalCaF(145) = 2178.849846
StandartSignalPlastic(146) = 273.6602515: StandartSignalNal(146) = 2749.921125: StandartSignalCaF(146) = 2174.994345
StandartSignalPlastic(147) = 273.4046884: StandartSignalNal(147) = 2745.572183: StandartSignalCaF(147) = 2170.716914
StandartSignalPlastic(148) = 272.416012: StandartSignalNal(148) = 2738.764355: StandartSignalCaF(148) = 2162.91694
StandartSignalPlastic(149) = 271.6334411: StandartSignalNal(149) = 2730.527433: StandartSignalCaF(149) = 2155.159243
StandartSignalPlastic(150) = 271.4024442: StandartSignalNal(150) = 2723.288388: StandartSignalCaF(150) = 2149.910518
StandartSignalPlastic(151) = 270.7457506: StandartSignalNal(151) = 2720.080367: StandartSignalCaF(151) = 2144.311362
StandartSignalPlastic(152) = 269.1955014: StandartSignalNal(152) = 2713.212986: StandartSignalCaF(152) = 2138.734201
StandartSignalPlastic(153) = 269.6104672: StandartSignalNal(153) = 2708.061485: StandartSignalCaF(153) = 2132.198672
StandartSignalPlastic(154) = 269.9667498: StandartSignalNal(154) = 2702.390288: StandartSignalCaF(154) = 2123.026596
StandartSignalPlastic(155) = 268.1877899: StandartSignalNal(155) = 2696.370256: StandartSignalCaF(155) = 2119.80861
StandartSignalPlastic(156) = 267.9378301: StandartSignalNal(156) = 2692.65847: StandartSignalCaF(156) = 2114.40425
StandartSignalPlastic(157) = 266.9934362: StandartSignalNal(157) = 2685.088257: StandartSignalCaF(157) = 2106.373687
StandartSignalPlastic(158) = 265.962989: StandartSignalNal(158) = 2680.164749: StandartSignalCaF(158) = 2098.33052
StandartSignalPlastic(159) = 266.3938079: StandartSignalNal(159) = 2675.384635: StandartSignalCaF(159) = 2090.264347
StandartSignalPlastic(160) = 265.1823237: StandartSignalNal(160) = 2669.468364: StandartSignalCaF(160) = 2085.787939
StandartSignalPlastic(161) = 266.2828806: StandartSignalNal(161) = 2664.643772: StandartSignalCaF(161) = 2081.678764
StandartSignalPlastic(162) = 264.0883908: StandartSignalNal(162) = 2655.176077: StandartSignalCaF(162) = 2078.254994
StandartSignalPlastic(163) = 263.6920751: StandartSignalNal(163) = 2649.139607: StandartSignalCaF(163) = 2078.226838
StandartSignalPlastic(164) = 262.7518399: StandartSignalNal(164) = 2644.923268: StandartSignalCaF(164) = 2075.844376
StandartSignalPlastic(165) = 261.5935222: StandartSignalNal(165) = 2633.913087: StandartSignalCaF(165) = 2073.720014
StandartSignalPlastic(166) = 261.2927716: StandartSignalNal(166) = 2626.860371: StandartSignalCaF(166) = 2064.361564
StandartSignalPlastic(167) = 260.1313194: StandartSignalNal(167) = 2626.411147: StandartSignalCaF(167) = 2061.295677
StandartSignalPlastic(168) = 260.0689386: StandartSignalNal(168) = 2622.531132: StandartSignalCaF(168) = 2060.311778
StandartSignalPlastic(169) = 259.2236151: StandartSignalNal(169) = 2618.675921: StandartSignalCaF(169) = 2055.613526
StandartSignalPlastic(170) = 258.7575767: StandartSignalNal(170) = 2610.095196: StandartSignalCaF(170) = 2051.387764
StandartSignalPlastic(171) = 258.6705976: StandartSignalNal(171) = 2605.1097: StandartSignalCaF(171) = 2038.946034
StandartSignalPlastic(172) = 257.9480802: StandartSignalNal(172) = 2602.332881: StandartSignalCaF(172) = 2032.804697
StandartSignalPlastic(173) = 256.7890037: StandartSignalNal(173) = 2599.769354: StandartSignalCaF(173) = 2028.779754
StandartSignalPlastic(174) = 256.3486719: StandartSignalNal(174) = 2594.186717: StandartSignalCaF(174) = 2026.323001
StandartSignalPlastic(175) = 255.7801453: StandartSignalNal(175) = 2586.735111: StandartSignalCaF(175) = 2023.098854
StandartSignalPlastic(176) = 255.0029695: StandartSignalNal(176) = 2585.271546: StandartSignalCaF(176) = 2017.285953
StandartSignalPlastic(177) = 254.2778208: StandartSignalNal(177) = 2573.846419: StandartSignalCaF(177) = 2017.307205
StandartSignalPlastic(178) = 253.8687845: StandartSignalNal(178) = 2566.579009: StandartSignalCaF(178) = 2013.861117
StandartSignalPlastic(179) = 252.9083111: StandartSignalNal(179) = 2561.749865: StandartSignalCaF(179) = 2011.674097
StandartSignalPlastic(180) = 252.2051847: StandartSignalNal(180) = 2559.882063: StandartSignalCaF(180) = 2013.336556
StandartSignalPlastic(181) = 252.0872873: StandartSignalNal(181) = 2554.993583: StandartSignalCaF(181) = 2005.921287
StandartSignalPlastic(182) = 251.1048943: StandartSignalNal(182) = 2549.069381: StandartSignalCaF(182) = 2005.849239

StandartSignalPlastic(183) = 251.4023433: StandartSignalNal(183) = 2542.848236: StandartSignalCaF(183) = 1999.283293
StandartSignalPlastic(184) = 251.9893726: StandartSignalNal(184) = 2536.006089: StandartSignalCaF(184) = 1997.175031
StandartSignalPlastic(185) = 251.1162179: StandartSignalNal(185) = 2527.441268: StandartSignalCaF(185) = 1993.262895
StandartSignalPlastic(186) = 249.415881: StandartSignalNal(186) = 2530.167041: StandartSignalCaF(186) = 1986.114471
StandartSignalPlastic(187) = 249.1440502: StandartSignalNal(187) = 2527.882052: StandartSignalCaF(187) = 1979.980814
StandartSignalPlastic(188) = 247.182891: StandartSignalNal(188) = 2524.754666: StandartSignalCaF(188) = 1974.727316
StandartSignalPlastic(189) = 247.0322127: StandartSignalNal(189) = 2517.766454: StandartSignalCaF(189) = 1971.266783
StandartSignalPlastic(190) = 246.9499332: StandartSignalNal(190) = 2509.440489: StandartSignalCaF(190) = 1971.682874
StandartSignalPlastic(191) = 246.2080821: StandartSignalNal(191) = 2502.776148: StandartSignalCaF(191) = 1972.266616
StandartSignalPlastic(192) = 246.069453: StandartSignalNal(192) = 2496.430079: StandartSignalCaF(192) = 1963.694647

'Inicializing Flags

FlagResetTimer = False

'Loading ListImpedance defaults

ListImpedance.AddItem "1 MOhm"

ListImpedance.AddItem "600 Ohm"

ListImpedance.AddItem "300 Ohm"

ListImpedance.AddItem "75 Ohm"

ListImpedance.AddItem "50 Ohm"

ListImpedance.ListIndex = 0

bd.InputImpedChanA = IMPEDANCE_1M_OHM

'Loading ListTrigger defaults

For i = 128 To 255

ListTrigger.AddItem i

Next i

ListTrigger.ListIndex = 5 'Para que salga 133

'Loading Voltage values

Voltage.AddItem "20 mV"

Voltage.AddItem "40 mV"

Voltage.AddItem "50 mV"

Voltage.AddItem "80 mV"

Voltage.AddItem "100 mV"

Voltage.AddItem "200 mV"

Voltage.AddItem "400 mV"

Voltage.AddItem "500 mV"

Voltage.AddItem "800 mV"

Voltage.AddItem "1 V"

Voltage.AddItem "2 V"

Voltage.AddItem "4 V"

```
Voltage.AddItem "5 V"  
Voltage.AddItem "8 V"  
Voltage.AddItem "10 V"  
Voltage.AddItem "20 V"  
Voltage.AddItem "40 V"  
Voltage.Text = Voltage.List(8)  
bd.InputRangeChanA = INPUT_RANGE_PM_800_MV  
  
'Loading RecLength values  
RecLength.AddItem "256"  
RecLength.AddItem "512"  
RecLength.AddItem "1024"  
RecLength.AddItem "2048"  
RecLength.Text = RecLength.List(0)  
bd.RecLength = 256  
RecordLimit = 504  
  
'Loading ComboChannels values  
ComboChannels.AddItem "AUTOMATIC"  
ComboChannels.AddItem "256"  
ComboChannels.AddItem "512"  
ComboChannels.AddItem "1024"  
ComboChannels.Text = ComboChannels.List(1) 'Cargamos la opción por defecto  
  
'Loading RecordCount value  
Text2.Text = 1  
Text2.ToolTipText = "RecordCount (Max=504)"  
  
'Loading NumRecordsToRead value  
Text3.Text = 1  
  
'Loading Get Spectrum defaults  
TextCount.Text = 500  
TimeOption.Value = True  
TextTime.Text = 60  
Check2.Value = vbChecked  
  
'Inicializing ScrollBars  
VScroll1.Max = 1  
VScroll1.Min = 15  
VScroll1.Value = 10  
  
'Default Scales  
Picture1.Scale (0, 1)-(2048, 0)  
Picture2.Scale (0, 1)-(2048, 0)  
  
'Inicializing Filter values
```

```
LeftFilter = 0
RightFilter = 0
'Inicializing Checks Auto
CheckAutoClear = vbChecked
CheckAutoScale = vbChecked
CheckFixedStart.Enabled = False
'Hiding 2D Coincidence Graph
Frame2DGraph.Visible = False
End Sub
Private Sub CheckAutoClear_Click()
If CheckAutoClear = vbChecked Then
CheckFixedStart.Enabled = False
CheckFixedStart.Value = False
End If
If CheckAutoClear = vbUnchecked Then CheckFixedStart.Enabled = True
End Sub
Private Sub CommandResetTimer_Click()
FlagResetTimer = True
TotalTime = 0
DeadTime = 0
LiveTime = 0
Label3.Caption = "TotalTime=" + Str$(TotalTime) + "sec " + " LiveTime=" + Str$(LiveTime) + "sec DeadTime=" +
Str$(DeadTime) + "sec. "
End Sub
Private Sub Picture1_MouseDown(Button As Integer, Shift As Integer, X As Single, Y As Single)
Label2.Caption = "X= " + Str$(X) + " Y= " + Str$(Y)
End Sub
Private Sub Picture2_MouseMove(Button As Integer, Shift As Integer, X As Single, Y As Single)
Dim Energy As Variant
If (X > 0 And X < 2048) Then
X = Int(X)
Energy = (m * X) + N
If Energy = 0 Then
Label2.Caption = "X= " + Str$(X) + " Counts= " + Str$(CanalToPlot(X))
Else
Energy = Format(Energy, "#.####")
End If
End If
End Sub
```

```
Label2.Caption = "X= " + Str$(X) + " Counts= " + Str$(CanalToPlot(X)) + " Energy= " + Str$(Energy) + "KeV"
End If
End If
End Sub

Private Sub Picture1_MouseMove(Button As Integer, Shift As Integer, X As Single, Y As Single)
Label2.Caption = " HeightSecondPeak=" + Format(HeightSecondPeak, "#####") + " iFirstPeak=" + Format(iFirstPeak, "#####")
+ " FirstPeak=" + Format(FirstPeak, "#####") + " iSecondPeak=" + Format(iSecondPeak, "#####")
End Sub

Private Sub Picture2_MouseDown(Button As Integer, Shift As Integer, X As Single, Y As Single)
'Button=1 izquierdo Button=2 derecho Button=4 central
If Button = 1 And (X > 0 And X < 2048) Then
X1 = Int(X)
If ComboChannels.Text = "AUTOMATIC" Then
LeftFilter = X1
Else
LeftFilter = Int(X1 * (2048 / Int(ComboChannels.Text)))
End If
Label2.Caption = "X1= " + Str$(X1) + " Counts= " + Str$(CanalToPlot(X1)) + " Energy= " + Str$(m * X1 + N) + "KeV"
End If
If Button = 2 And (X > 0 And X < 2048) Then
X2 = Int(X)
If ComboChannels.Text = "AUTOMATIC" Then
RightFilter = X2
Else
RightFilter = Int(X2 * (2048 / Int(ComboChannels.Text)))
End If
Label2.Caption = "X2= " + Str$(X2) + " Counts= " + Str$(CanalToPlot(X1)) + " Energy= " + Str$(m * X2 + N) + "KeV"
End If
End Sub

Private Sub RecLength_Click()
If RecLength.Text = "256" Then
bd.RecLength = 256
RecordLimit = 504
Text2.ToolTipText = "RecordCount (Max=504)"
End If
```

```
If RecLength.Text = "512" Then
    bd.RecLength = 512
    RecordLimit = 254
    Text2.ToolTipText = "RecordCount (Max=254)"
End If

If RecLength.Text = "1024" Then
    bd.RecLength = 1024
    RecordLimit = 127
    Text2.ToolTipText = "RecordCount (Max=127)"
End If

If RecLength.Text = "2048" Then
    bd.RecLength = 2048
    RecordLimit = 63
    Text2.ToolTipText = "RecordCount (Max=63)"
End If

End Sub
```

Private Sub Voltage_Click()

```
If Voltage.Text = "20 mV" Then bd.InputRangeChanA = INPUT_RANGE_PM_20_MV
If Voltage.Text = "40 mV" Then bd.InputRangeChanA = INPUT_RANGE_PM_40_MV
If Voltage.Text = "50 mV" Then bd.InputRangeChanA = INPUT_RANGE_PM_50_MV
If Voltage.Text = "80 mV" Then bd.InputRangeChanA = INPUT_RANGE_PM_80_MV
If Voltage.Text = "100 mV" Then bd.InputRangeChanA = INPUT_RANGE_PM_100_MV
If Voltage.Text = "200 mV" Then bd.InputRangeChanA = INPUT_RANGE_PM_200_MV
If Voltage.Text = "400 mV" Then bd.InputRangeChanA = INPUT_RANGE_PM_400_MV
If Voltage.Text = "500 mV" Then bd.InputRangeChanA = INPUT_RANGE_PM_500_MV
If Voltage.Text = "800 mV" Then bd.InputRangeChanA = INPUT_RANGE_PM_800_MV
If Voltage.Text = "1 V" Then bd.InputRangeChanA = INPUT_RANGE_PM_1_V
If Voltage.Text = "2 V" Then bd.InputRangeChanA = INPUT_RANGE_PM_2_V
If Voltage.Text = "4 V" Then bd.InputRangeChanA = INPUT_RANGE_PM_4_V
If Voltage.Text = "5 V" Then bd.InputRangeChanA = INPUT_RANGE_PM_5_V
If Voltage.Text = "8 V" Then bd.InputRangeChanA = INPUT_RANGE_PM_8_V
If Voltage.Text = "10 V" Then bd.InputRangeChanA = INPUT_RANGE_PM_10_V
If Voltage.Text = "20 V" Then bd.InputRangeChanA = INPUT_RANGE_PM_20_V
If Voltage.Text = "40 V" Then bd.InputRangeChanA = INPUT_RANGE_PM_40_V

End Sub
```

Private Sub VScroll1_Scroll()

```
Dim i As Variant
```

Label17.Caption = "x" + Str\$(VScroll1.Value / 10)

If FilterDialog.Check(7) = vbUnchecked Or FilterDialog.Check(8) = vbUnchecked Or CheckSpectFiltered = vbUnchecked Then

 i = PlotSpectrum(X1, X2, ComboChannels.Text, VScroll1.Value, Color1)

End If

If (FilterDialog.Check(7) = vbChecked Or FilterDialog.Check(8) = vbChecked) And CheckSpectFiltered = vbChecked Then

 Picture2.Cls

 i = PlotSpectrumCoincidence(X1, X2, ComboChannels.Text, VScroll1.Value, 1, &HFF0000) ' &H00FF0000& Es azul

 i = PlotSpectrumCoincidence(X1, X2, ComboChannels.Text, VScroll1.Value, 2, &HFF&) '&HFF& es rojo

End If

End Sub

Private Sub BlackWhite_Click()

If BlackWhite = vbUnchecked Then

 Picture2.BackColor = &HFFFFFF 'Blanco

 BlackWhite.BackColor = &HFFFFFF 'Blanco

 BlackWhite.ForeColor = &H0& 'Negro

 Color1 = &H0& 'Negro

End If

If BlackWhite = vbChecked Then

 Picture2.BackColor = &H0& 'Negro

 BlackWhite.BackColor = &H0& 'Negro

 BlackWhite.ForeColor = &HFFFFFF 'Blanco

 Color1 = &HFFFFFF 'Blanco

End If

VScroll1_Scroll

End Sub

Private Sub CheckShowArea_Click()

If X1 = 0 And X2 = 0 Then

 CheckShowArea.Value = vbUnchecked

 Exit Sub

End If

If (X2 <= X1) Then

 MsgBox "X2 (right limit) must be higher than X1 (left limit)", vbExclamation, "DigitalAdq"

 CheckShowArea.Value = vbUnchecked

```
Exit Sub
End If

If CheckShowArea.Value = vbChecked And (X1 <> 0 And X2 <> 0) Then

    Dim i As Long
    Dim Area As Long
    Dim BackGround1, BackGround2 As Long 'Area of trapezoid under the peak
    Dim Peak1, Peak2 As Long
    Dim Y3LC, Y3RC 'Averages of 3 channels

    i = PlotSpectrum(X1, X2, ComboChannels.Text, VScroll1.Value, Color1)

    'Area and Peak area calculation by line methode
    Area = 0
    Y3LC = (CanalToPlot(X1) + CanalToPlot(X1 + 1) + CanalToPlot(X1 + 2)) / 3
    Y3RC = (CanalToPlot(X2) + CanalToPlot(X1 - 1) + CanalToPlot(X1 - 2)) / 3
    For i = X1 To X2
        Area = Area + CanalToPlot(i)
        BackGround1 = BackGround1 + (((i - (X1 + 1)) / ((X2 - 1) - (X1 + 1))) * (Y3RC - Y3LC)) + Y3LC
    Next i
    Peak1 = Area - BackGround1
    Peak1 = Format(Peak1, "#.####")

    'Peak calculation by trapezoid methode
    BackGround2 = ((Y3LC + Y3RC) * (X2 - X1)) / 2
    Peak2 = Area - BackGround2
    Peak2 = Format(Peak2, "#.####")

    Label4.Caption = "Area=" + Str$(Area) + " 1st MethPeak=" + Str$(Peak1) + " 2nd MethPeak=" + Str$(Peak2)

End If

If CheckShowArea.Value = vbUnchecked Then

    Label4.Caption = "Counts"

    VScroll1_Scroll

End If

End Sub

Private Sub Clear1_Click()

    Picture1.Cls


```

Label9.Caption = "Max Osc"

Label10.Caption = "Min Osc"

End Sub

Private Sub Clear2_Click()

Dim i As Integer

Picture2.Cls

Label5.Caption = "Min Ch"

Label6.Caption = "Counts"

Label7.Caption = "Max Ch"

Label8.Caption = "0"

TotalTime = 0

DeadTime = 0

LiveTime = 0

For i = 0 To 2048

Canal(i) = 0

CanalToPlot(i) = 0

CanalPico1(i) = 0

CanalPico2(i) = 0

CanalPico3(i) = 0

Next i

Label4.Caption = ""

End Sub

Private Sub ComboChannels_Click()

X1 = 0

X2 = 0

m = 0

N = 0

CheckShowArea.Value = vbUnchecked

VScroll1.Scroll

End Sub

Private Sub CheckOscFiltered_Click()

If CheckOscFiltered = vbChecked And CheckAnyFilter = vbUnchecked Then

MsgBox "No filter is set yet", vbExclamation, "DigitalAdq"

CheckOscFiltered = vbUnchecked

End If
End Sub

```
Private Sub CheckSpectFiltered_Click()  
    If CheckSpectFiltered = vbChecked And CheckAnyFilter = vbUnchecked Then  
        MsgBox "No filter is set yet", vbExclamation, "DigitalAdq"  
        CheckSpectFiltered = vbUnchecked  
    End If  
End Sub
```

```
Private Sub CheckFixedStart_Click()  
    If CheckFixedStart = vbChecked Then FixedRise = Rise  
    'If CheckFixedStart = vbUnchecked Then  
End Sub
```

```
Private Sub CommandSTOP_Click()  
    FlagSTOP = True  
End Sub
```

```
Private Sub EnergyCalButton_Click()  
    EnergyDialog.Show  
End Sub
```

```
Private Sub CommandSaveSpec_Click()  
    Dim i, j As Long  
    Dim FileName As String  
  
    'Escritura del archivo excel  
    FileName = "SpecA " + LTrim$(Voltage.Text) + " " + ComboChannels.Text + " Channels " + ".csv"  
    j = FreeFile  
    Open FileName For Output As #j  
    For i = LeftLim To RightLim 'For i = MinCanalNoVacio To 4094  
        Print #j, Str$(CanalToPlot(i)) + ","  
    Next i  
    Close #j  
  
    'Escritura del archivo .dat para el CurveExpert  
    FileName = "SpecA " + LTrim$(Voltage.Text) + " " + ComboChannels.Text + " Channels " + ".dat"  
    j = FreeFile
```

```
Open FileName For Output As #j
For i = LeftLim To RightLim 'For i = MinCanalNoVacio To 4094
    Print #j, Str$(i) + Str$(CanalToPlot(i))
Next i
Close #j
End Sub

Private Sub CommandSaveSignal_Click()

Dim i, j As Long
Dim FileName As String
Dim TempVal As Long

'Escritura del archivo excel
FileName = "ChanA " + LTrim$(Voltage.Text) + ".csv"
j = FreeFile
Open FileName For Output As #j
For i = 1 To Int(Text3.Text) * Int(RecLength.Text) 'NumRecordsToRead * bd.RecLength
    TempVal = ChanA_Data(i)
    If TempVal < 0 Then TempVal = 65535 + TempVal
    TempVal = TempVal / 16
    Print #j, Str$(TempVal) + ","
Next i
Close #j

'Escritura del archivo .dat para el CurveExpert
FileName = "ChanA " + LTrim$(Voltage.Text) + ".dat"
j = FreeFile
Open FileName For Output As #j
For i = 1 To Int(Text3.Text) * Int(RecLength.Text)
    TempVal = ChanA_Data(i)
    If TempVal < 0 Then TempVal = 65535 + TempVal
    TempVal = TempVal / 16
    Print #j, Str$(i) + Str$(TempVal)
Next i
Close #j

'FileName = "ChanB" + LTrim$(Str$(board)) + ".csv"
'j = FreeFile
'Open FileName For Output As #j
```

```
'For i = 1 To NumRecordsParaLeer * bd.RecLength
' TempVal = 0
' TempVal = ChanB_Data(i)
' If TempVal < 0 Then
'   TempVal = 65535 + TempVal
' End If
' TempVal = TempVal / 16
' Print #j, Str$(TempVal) + ","
'Next i
'Close #j
End Sub
```

Public Function PlotSpectrum(A, B, NChannels, MultFactor, Color)

```
Dim i, j, k As Long
Dim ValMaxCounts As Long ' Valor de cuentas en el canal que mas tenga
Dim MinCanalNoVacio, MaxCanalNoVacio As Integer 'El menor de los canales no vacios
```

```
Label6.ForeColor = &H80000012 'negro
```

```
Label5.ForeColor = &H80000012
```

```
Label7.ForeColor = &H80000012
```

```
If NChannels = "AUTOMATIC" Then
```

```
For i = 0 To 2048
```

```
CanalToPlot(i) = Canal(i)
```

```
Next i
```

```
'Calculo el MinCanalNoVacio y MaxCanalNoVacio
```

```
MinCanalNoVacio = 2048
```

```
MaxCanalNoVacio = 0
```

```
For i = 0 To 2048
```

```
  If CanalToPlot(i) >= 1 And MinCanalNoVacio > i Then MinCanalNoVacio = i
```

```
  If CanalToPlot(i) >= 1 And MaxCanalNoVacio < i Then MaxCanalNoVacio = i
```

```
Next i
```

```
LeftLim = MinCanalNoVacio
```

```
RightLim = MaxCanalNoVacio
```

```
Else
```

```
'Paso de una matriz a otra.
```

```
For i = 0 To 2048
```

```
    CanalToPlot(i) = 0
  Next i
  k = 1
  For i = 0 To 2048
    For j = 1 To (2048 / NChannels) - 1
      CanalToPlot(k) = CanalToPlot(k) + Canal(i)
      i = i + 1
      If i >= 2048 Then Exit For
    Next j
    If i >= 2048 Then Exit For
    k = k + 1
  Next i

  LeftLim = 0
  RightLim = NChannels - 1
End If

If CheckShowArea = vbChecked Then
  LeftLim = A
  RightLim = B
End If

If LeftLim = RightLim Then GoTo Fin:

'Calculo el ValMaxCounts
ValMaxCounts = 1
For i = LeftLim To RightLim
  If CanalToPlot(i) >= 1 And ValMaxCounts < CanalToPlot(i) Then ValMaxCounts = CanalToPlot(i)
Next i

Picture2.Cls
If ValMaxCounts > 1 Then
  Picture2.Scale (LeftLim, (ValMaxCounts * (MultFactor / 10)))-(RightLim, 0)
End If
For i = LeftLim To RightLim
  Picture2.PSet (i, CanalToPlot(i)), Color
  'If (i > LeftLim) Then Picture1.Line ((i - 1), CanalToPlot(i - 1))-(i, CanalToPlot(i)),Color
Next i
```

Label6.Caption = Str\$(ValMaxCounts * (MultFactor / 10))

Label5.Caption = Str\$(LeftLim)

Label7.Caption = Str\$(RightLim)

Fin:

End Function

Public Function PlotSpectrumCoincidence(A, B, NChannels, MultFactor, SpectNumber, Color)

Dim i, j, k As Long

Dim ValMaxCounts As Long ' Valor de cuentas en el canal que mas tenga

Dim MinCanalNoVacio, MaxCanalNoVacio As Integer 'El menor de los canales no vacios

'Dim RightLim, LeftLim As Long 'Los limites que representaremos

If SpectNumber = 1 Then

For i = 0 To 2048

Canal(i) = CanalPico1(i)

Next i

End If

If SpectNumber = 2 Then

For i = 0 To 2048

Canal(i) = CanalPico2(i)

Next i

End If

If SpectNumber = 3 Then

For i = 0 To 2048

Canal(i) = CanalPico3(i)

Next i

End If

If NChannels = "AUTOMATIC" Then

For i = 0 To 2048

CanalToPlot(i) = Canal(i)

Next i

'Calculo el MinCanalNoVacio y MaxCanalNoVacio

MinCanalNoVacio = 2048

MaxCanalNoVacio = 0

For i = 0 To 2048

If CanalToPlot(i) >= 1 And MinCanalNoVacio > i Then MinCanalNoVacio = i

```
If CanalToPlot(i) >= 1 And MaxCanalNoVacio < i Then MaxCanalNoVacio = i
Next i

LeftLim = MinCanalNoVacio
RightLim = MaxCanalNoVacio
Else
'Paso de una matriz a otra.
For i = 0 To 2048
    CanalToPlot(i) = 0
Next i
k = 1
For i = 0 To 2048
    For j = 1 To (2048 / NChannels) - 1
        CanalToPlot(k) = CanalToPlot(k) + Canal(i)
        i = i + 1
        If i >= 2048 Then Exit For
    Next j
    If i >= 2048 Then Exit For
    k = k + 1
Next i

LeftLim = 0
RightLim = NChannels - 1
End If

If CheckShowArea = vbChecked Then
    LeftLim = A
    RightLim = B
End If

If LeftLim = RightLim Then GoTo Fin:

'Calculo el ValMaxCounts
ValMaxCounts = 1
For i = LeftLim To RightLim
    If CanalToPlot(i) >= 1 And ValMaxCounts < CanalToPlot(i) Then ValMaxCounts = CanalToPlot(i)
Next i
```

```
'Picture2.Cls
If ValMaxCounts > 1 Then
    Picture2.Scale (LeftLim, (ValMaxCounts * (MultFactor / 10)))-(RightLim, 0)
End If
For i = LeftLim To RightLim
    Picture2.PSet (i, CanalToPlot(i)), Color
    'If (i > LeftLim) Then Picture1.Line ((i - 1), CanalToPlot(i - 1))-(i, CanalToPlot(i)),Color
Next i

If SpectNumber = 1 Then
    Label6.ForeColor = &HFF0000 'azul
    Label5.ForeColor = &HFF0000
    Label7.ForeColor = &HFF0000
End If
If SpectNumber = 2 Then
    Label6.ForeColor = &HFF& 'rojo
    Label5.ForeColor = &HFF&
    Label7.ForeColor = &HFF&
End If
'If SpectNumber = 3 Then
' Label6.ForeColor = &HFF8080 'azul
' Label5.ForeColor = &HFF&
' Label7.ForeColor = &HFF&
'End If

Label6.Caption = Str$(ValMaxCounts * (MultFactor / 10))
Label5.Caption = Str$(LeftLim)
Label7.Caption = Str$(RightLim)
```

Fin:

End Function

```
Private Sub FilterButton_Click()
```

```
    FilterDialog.Show
```

```
End Sub
```

```
Sub GetSignalData()
```

```
    Dim h As Variant
```

```
    Dim i As Long
```

```
    Dim TempVal, RiseTempVal, PreviousTempVal, SecondPeakReference As Long
```

Dim RiseCoef As Variant

Dim RiseFlag, FirstPeakFlag As Boolean

RiseFlag = False

FirstPeakFlag = False

RiseCoef = 0.1

MaxVal = 0

MinVal = 4095

FirstPeak = 0

SecondPeak = 0

iFirstPeak = 0

iSecondPeak = 0

For i = 0 To (bd.RecLength * NumRecordsToRead) - 1 'para leer de un record largo seria: TempVal = ChanA_Data(i + (j *
bd.RecLength))

TempVal = ChanA_Data(i)

If TempVal < 0 Then TempVal = 65536 + TempVal ' Ya que 4096*16=65536

TempVal = TempVal / 16

If i = 0 Then FirstVal = TempVal

If MaxVal < TempVal Then

MaxVal = TempVal

iMaxVal = i

End If

If (TempVal >= 1 And MinVal > TempVal) Then MinVal = TempVal

Next i

Altura = MaxVal - FirstVal

For i = 0 To (bd.RecLength * NumRecordsToRead) - 1

TempVal = ChanA_Data(i)

If TempVal < 0 Then TempVal = 65536 + TempVal

TempVal = TempVal / 16

If ((TempVal - FirstVal) > (Altura * RiseCoef)) And RiseFlag = False Then

Rise = i

RiseTempVal = TempVal

RiseFlag = True

End If

If i = (Rise + 1) Then RiseIncr = TempVal - RiseTempVal

```
'cálculo de las las alturas del primer y segundo pico (FirstPeak y SecondPeak)
If ((CheckSpectFiltered = vbChecked Or CheckOscFiltered = vbChecked) And RiseFlag = True) Then
  If (TempVal < PreviousTempVal And FirstPeakFlag = False) Then
    FirstPeak = PreviousTempVal
    iFirstPeak = (i - 1)
    FirstPeakFlag = True
  End If

  If i = iFirstPeak + 7 Then SecondPeakReference = TempVal

  If (FirstPeakFlag = True And i > (iFirstPeak + 5) And TempVal >= SecondPeak) Then
    SecondPeak = TempVal
    iSecondPeak = i
  End If

End If

PreviousTempVal = TempVal
Next i

Up = (iMaxVal - Rise)
UpSecondPeak = iSecondPeak - Rise
HeightSecondPeak = Int(SecondPeak - (SecondPeakReference - (0.46 * iSecondPeak)))

'Getting the line parameters for NaI-CaF discrimination
If (FilterDialog.Check(2) = vbChecked Or FilterDialog.Check(3) = vbChecked) And Up > 10 Then
  h = Form1.MinimosCuadrados(Rise, Int(Rise + (Up * (10 / 100))), ChanA_Data, False)
  a01 = a0
  a11 = a1
  h = Form1.MinimosCuadrados(iMaxVal + (bd.RecLength / 10), iMaxVal + (bd.RecLength / 4), ChanA_Data, False)
  a12 = a1
  SlopeDif = a11 + a12
End If

End Sub

Public Function MinimosCuadrados(FirstX, LastX, Matriz, PaintLine)

  Dim i As Integer

  Dim TempVal As Long

  Dim N, EX, EY, EX2, EY2, EXY As Variant
```

For i = FirstX To LastX

TempVal = Matriz(i)

If TempVal < 0 Then TempVal = 65535 + TempVal

TempVal = TempVal / 16

N = N + 1

EX = EX + i

EY = EY + TempVal

EX2 = EX2 + (i ^ 2)

EY2 = EY2 + (TempVal ^ 2)

EXY = EXY + (i * TempVal)

Next i

If EY <> 0 And EX <> 0 Then

a0 = ((EY * EX2) - (EX * EXY)) / ((N * EX2) - (EX * EX))

a1 = ((N * EXY) - (EX * EY)) / ((N * EX2) - (EX * EX))

If Abs(((N * EX2) - (EX * EX)) * ((N * EY2) - (EY * EY))) > 0 Then

r = ((N * EXY) - (EX * EY)) / (Sqr(Abs(((N * EX2) - (EX * EX)) * ((N * EY2) - (EY * EY)))))

End If

End If

If PaintLine = True Then

Picture1.Scale (0, MaxVal)-((NumRecordsToRead * bd.RecLength), MinVal)

Form1.Picture1.Line (FirstX, (a0 + (a1 * FirstX)))-(LastX, (a0 + (a1 * LastX))), RGB(255, 0, 0)

End If

End Function

Public Function Pendiente(FirstX, LastX, Matriz)

Dim i As Integer

Dim N, EX, EY, EX2, EY2, EXY As Variant

If FirstX < 0 Then FirstX = 0

If LastX < 0 Then LastX = 0

For i = FirstX To LastX

N = N + 1

EX = EX + i

EY = EY + Matriz(i)

```
EX2 = EX2 + (i ^ 2)
EY2 = EY2 + (Matriz(i) ^ 2)
EXY = EXY + (i * Matriz(i))
Next i
If EY <> 0 And EX <> 0 Then
  a0 = ((EY * EX2) - (EX * EXY)) / ((N * EX2) - (EX * EX))
  a1 = ((N * EXY) - (EX * EY)) / ((N * EX2) - (EX * EX))
  If Abs(((N * EX2) - (EX * EX)) * ((N * EY2) - (EY * EY))) > 0 Then
    r = ((N * EXY) - (EX * EY)) / (Sqr(Abs(((N * EX2) - (EX * EX)) * ((N * EY2) - (EY * EY)))))
  End If
End If

End Function
```

```
Sub SaveData()
  Dim FileName As String
  Dim j As Long

  FileName = "Coincidence data " + LTrim$(Voltage.Text) + " " + LTrim$(RecLength.Text) + ".csv"
  j = FreeFile
  Open FileName For Append As #j
  If FlagFirstDataSaved = False Then
    Print #j, "FirstPeakDeconv" + ";" + "SecondPeakDeconv"
    FlagFirstDataSaved = True
  End If
  'Print #j, Str$(Up) + ";" + Str$(Format(a0, "#.####")) + ";" + Str$(Format(a1, "#.####")) + ";" + Str$(Format(r, "#.####"))
  Print #j, Str$(Format(FirstPeakDeconv, "#")) + ";" + Str$(Format(SecondPeakDeconv, "#"))
  Close #j
End Sub
```

```
Sub Plot2DCoincidenceGraph()
  'Lo programo para 256x256 canales
  Dim i As Long
  Dim red, green, blue, dotcolor As VariantTypeConstants

  red = &HFF&
  green = &HC000&
  blue = &HFF0000

  Picture3.Cls
```

Picture3.Scale (0, 256)-(256, 0)

LabelMaxFirstPeakDeconv.Caption = "256"

LabelMaxSecondPeakDeconv.Caption = "256"

For i = 1 To DeconvNumber

dotcolor = red

If Picture3.Point(MatrixFirstPeakDeconv(i) * (256 / 2048), MatrixSecondPeakDeconv(i) * (256 / 2048)) = red Then

dotcolor = green

GoTo PLOT

End If

If Picture3.Point(MatrixFirstPeakDeconv(i) * (256 / 2048), MatrixSecondPeakDeconv(i) * (256 / 2048)) = green Then

dotcolor = blue

GoTo PLOT

End If

If Picture3.Point(MatrixFirstPeakDeconv(i) * (256 / 2048), MatrixSecondPeakDeconv(i) * (256 / 2048)) = blue Then

dotcolor = blue

GoTo PLOT

End If

PLOT: Picture3.PSet (MatrixFirstPeakDeconv(i) * (256 / 2048), MatrixSecondPeakDeconv(i) * (256 / 2048)), dotcolor

Next i

End Sub

Sub DeconvolutionBySlopeAndPoint()

Dim h, X, Y1, Y2, P1, P2 As Variant

FlagWrongDeconvolution = False

X = Int((192 * (iSecondPeak - Rise)) / (bd.RecLength - Rise))

Y1 = StandartSignalPlastic(X)

Y2 = StandartSignalCaF(X) 'esta funcion la dejo programada para funcionar con coincidencia Plastico-F

h = Pendiente(X - 5, X + 5, StandartSignalPlastic)

P1 = a1

h = Pendiente(X - 5, X + 5, StandartSignalCaF)

P2 = a1

C2 = (SecondPeak - MinVal) / (((-1) * P2 * Y1 / P1) + Y2)

C1 = ((-1) * C2 * P2) / P1

If C1 < 0 Or C2 < 0 Then FlagWrongDeconvolution = True

If FlagWrongDeconvolution = False Then

FirstPeakDeconv = Int(C1 * 423.9821374) 'El máximo de la StandartSignalPlastic es 423.9821374

SecondPeakDeconv = Int(C2 * 2315.803936) 'El máximo de la StandartSignalCaF es 2315.803936

End If

End Sub

Sub DeconvolutionByTwoPointsCaF()

Dim X1, Y11, Y12, Y21, Y22 As Variant

FlagWrongDeconvolution = False

X1 = Int(((192 * (FirstPeak - Rise)) / (bd.RecLength - Rise)))

X2 = Int(((192 * (SecondPeak - Rise)) / (bd.RecLength - Rise)))

Y11 = 423.9821374 'En vez de StandartSignalPlastic(X1) Ponemos el valor del pico del Plastico de la señal estandar

Y12 = StandartSignalCaF(X1)

Y21 = StandartSignalPlastic(X2)

Y22 = StandartSignalCaF(X2)

C2 = ((SecondPeak - MinVal) - ((FirstPeak - MinVal) * (Y21 / Y11))) / (Y22 - ((Y12 * Y21) / Y11))

C1 = ((FirstPeak - MinVal) - C2 * Y12) / Y11

If C1 < 0 Or C2 < 0 Then FlagWrongDeconvolution = True

If FlagWrongDeconvolution = False Then

FirstPeakDeconv = Int(C1 * 423.9821374) 'El máximo de la StandartSignalPlastic es 423.9821374

SecondPeakDeconv = Int(C2 * 2315.803936) 'El máximo de la StandartSignalCaF es 2315.803936

End If

End Sub

Sub DeconvolutionByTwoPointsNaI()

Dim X1, Y11, Y12, Y21, Y22 As Variant

FlagWrongDeconvolution = False

X1 = Int(((192 * (FirstPeak - Rise)) / (bd.RecLength - Rise)))

X2 = Int(((192 * (iSecondPeak - Rise)) / (bd.RecLength - Rise)))

Y11 = 423.9821374 'En vez de StandartSignalPlastic(X1) Ponemos el valor del pico del Plastico de la señal estandar

Y12 = StandartSignalNal(X1)

Y21 = StandartSignalPlastic(X2)

Y22 = StandartSignalNal(X2)

C2 = ((SecondPeak - MinVal) - ((FirstPeak - MinVal) * (Y21 / Y11))) / (Y22 - ((Y12 * Y21) / Y11))

C1 = ((FirstPeak - MinVal) - C2 * Y12) / Y11

If C1 < 0 Or C2 < 0 Then FlagWrongDeconvolution = True

If FlagWrongDeconvolution = False Then

 FirstPeakDeconv = Int(C1 * 423.9821374) 'El máximo de la StandartSignalPlastic es 423.9821374

 SecondPeakDeconv = Int(C2 * 3229.673105) 'El máximo de la StandartSignalNal es 3229.673105

End If

End Sub

Private Sub CommandShow2DGraph_Click()

If Frame2DGraph.Visible = True Then Frame2DGraph.Visible = False: Exit Sub

If Frame2DGraph.Visible = False Then Frame2DGraph.Visible = True

Plot2DCoincidenceGraph

End Sub

10.2. Formulario "EnergyDialog"

```
'Private Sub Form_Load()  
' Label1.Caption = "X1= " + Str$(X1) + "Channel"  
' Label2.Caption = "X2= " + Str$(X2) + "Channel"  
' Label3.Caption = " E = " + Str$(m) + " X + " + Str$(n)  
'End Sub
```

```
Private Sub Form_Paint()  
  
Label1.Caption = "X1= " + Str$(X1) + "Channel"  
Label2.Caption = "X2= " + Str$(X2) + "Channel"  
Label3.Caption = " E = " + Str$(m) + " X + " + Str$(N)  
  
End Sub
```

```
Private Sub OKButton_Click()  
  
EnergyDialog.Hide  
  
End Sub
```

```
Private Sub SETCalibration_Click()  
  
Dim E1  
Dim E2  
  
E1 = Abs(TextX1KeV.Text)  
E2 = Abs(TextX2KeV.Text)  
  
If X2 <= X1 Then  
    MsgBox "The Channel X2 must be higher than X1 channel", vbExclamation, "DigitalAdq"  
    Exit Sub  
End If  
  
If E1 >= E2 Then  
    MsgBox "The energy of channel X2 must be higher than X1 energy", vbExclamation, "DigitalAdq"  
    Exit Sub  
End If  
  
m = (E2 - E1) / (X2 - X1)  
N = E1 - (X1 * (E2 - E1) / (X2 - X1))  
  
If N >= 0 Then  
    Label3.Caption = " E = " + Str$(m) + " X + " + Str$(N)  
Else
```

Label3.Caption = " E =" + Str\$(m) + " X - " + Str\$(Abs(N))

End If

Form1.CheckEnerCal.Value = vbChecked

End Sub

10.3. Formulario "FilterDialog"

Option Explicit

```
Private Sub Check_Click(Index As Integer)
    If (Index = 0 And Check(0) = vbChecked) Then Check(1) = vbUnchecked
    If (Index = 1 And Check(1) = vbChecked) Then Check(0) = vbUnchecked
End Sub
```

```
Private Sub Form_Paint()
    'Loading Filter defaults
    TextCenter.Text = LeftFilter
    TextGap.Text = 50
    TextLeft.Text = LeftFilter
    TextRight.Text = RightFilter
End Sub
```

```
Private Sub Form_Unload(Cancel As Integer)
    Form1.CheckAnyFilter = vbUnchecked
End Sub
```

```
Private Sub OKButton_Click()
    Dim i As Integer
    If (Check(0) = vbChecked And Int(TextCenter.Text) - Int(TextGap.Text) <= 0) Then
        MsgBox "(Center - Gap) Filter limits not valid", vbExclamation, "DigitalAdq"
        GoTo Fin
    End If
    If Check(1) = vbChecked And ((Int(TextLeft.Text) > Int(TextRight.Text)) Or Int(TextLeft.Text) = 0 Or Int(TextRight.Text) = 0) Then
        MsgBox "(Height1 - Height2) Filter limits not valid", vbExclamation, "DigitalAdq"
        GoTo Fin
    End If
    Form1.CheckAnyFilter = vbUnchecked
    For i = 1 To Check.Count
        If Check(i - 1) = vbChecked Then
            Form1.CheckAnyFilter = vbChecked
        End If
    Next i
```

FilterDialog.Hide

Fin:

End Sub

Sub Filters()

Dim h As Variant

Dim FlagFilter0, FlagFilter1, FlagFilter2, FlagFilter3, FlagFilter4, FlagFilter5, FlagFilter6, FlagFilter7, FlagFilter8, FlagFilter9 As Boolean

FlagFilter0 = ""

FlagFilter1 = ""

FlagFilter2 = ""

FlagFilter3 = ""

FlagFilter4 = ""

FlagFilter5 = ""

FlagFilter6 = ""

FlagFilter7 = ""

FlagFilter8 = ""

FlagFilterPass = False

If Form1.CheckAnyFilter = vbChecked And MaxVal < 4095 Then

 'Flags for each filter

 If (Check(0) = vbChecked) Then

 FlagFilter0 = False

 If ((Altura > (Abs(TextCenter) - Abs(TextGap)) And Altura < (Abs(TextCenter) + Abs(TextGap)))) Then FlagFilter0 = True

 End If

 If (Check(1) = vbChecked) Then

 FlagFilter1 = False

 If (Altura > (Abs(TextLeft)) And Altura < (Abs(TextRight))) Then FlagFilter1 = True

 End If

 If (Check(2) = vbChecked) Then

 FlagFilter2 = False

 If (a11 > 0 And a11 < 5000) And a12 < 0 And Altura > 400 And (Up > 30) And Up < 60 And Rise > 5 And RiseIncr < 250 And RiseIncr > 30 And SlopeDif > 0 And SlopeDif < 1000 Then

 FlagFilter2 = True

 Form1.Label1.Caption = "INa"

 End If

End If

If (Check(3) = vbChecked) Then

FlagFilter3 = False

If (a11 > 30 And a11 < 100) And a12 < 0 And (Up > 50) And Rise > 5 And RiseIncr > (Altura * 0.1) And SlopeDif > 35 And SlopeDif <

80 Then

FlagFilter3 = True

Form1.Label1.Caption = "CaF"

End If

End If

If (Check(4) = vbChecked) Then

FlagFilter4 = False

If (Up < 5 And Up > 1) And FirstPeak >= SecondPeak And Altura > 200 Then

FlagFilter4 = True

Form1.Label1.Caption = "Plastic higher"

End If

End If

If (Check(5) = vbChecked) Then

If (RiseIncr > (Altura * 0.2) And Up > 5) Then

FlagFilter5 = True

Form1.Label1.Caption = "Second peak higher"

Else

FlagFilter5 = False

End If

End If

If (Check(6) = vbChecked) Then

If (RiseIncr > (Altura * 0.2)) Then

FlagFilter6 = True

Form1.Label1.Caption = "Plastic signal"

Else

FlagFilter6 = False

End If

End If

If (Check(7) = vbChecked) Then

If (Altura > 300 And RiseIncr > (Altura * 0.2) And HeightSecondPeak > 200 And Abs(SecondPeak - FirstPeak) > 125) Then

```
FlagFilter7 = True
Form1.Label1.Caption = "Coincidence Plastic - FCa"
Else
FlagFilter7 = False
End If
End If

If (Check(8) = vbChecked) Then
If (Abs(SecondPeak - FirstPeak) > 200 And Altura > 400) Then
FlagFilter8 = True
Form1.Label1.Caption = "Coincidence Plastic - NaI"
Else
FlagFilter8 = False
End If
End If
'Total filter
If (FlagFilter0 = False Or FlagFilter1 = False Or FlagFilter2 = False Or FlagFilter3 = False Or FlagFilter4 = False Or FlagFilter5 = False
Or FlagFilter6 = False Or FlagFilter7 = False Or FlagFilter8 = False) Then
FlagFilterPass = False
Else
FlagFilterPass = True
End If
End If

End Sub
```

10.4. Módulo1 (Declaración de variables globales)

```
'=====
' File Name:
'   ATSApiVB.bas
'       DigitalAdq
' Copyright (c) Universidad de León - Departamento de Física y Química
' Based on: Ac2DskVB Copyright (c) AlazarTech Inc
'=====

'My Public Declarations:

Public Canal(2048) As Long 'La matriz de los canales
Public CanalPico1(2048), CanalPico2(2048), CanalPico3(2048) As Long
Public CanalToPlot(2048) As Long 'Matriz que se muestra
Public StandartSignalPlastic(2048), StandartSignalNal(2048), StandartSignalCaF(2048) As Long
Public FlagSTOP, FlagFilterPass, FlagFirstDataSaved, FlagWrongDeconvolution, FlagResetTimer As Boolean
Public X1, X2 As Integer 'Recordar: Integer, 4 bytes, -2147483647 a 2147483647
Public MultFactor As Long
Public m, N As Long
Public ChanA_Data(130050) As Integer 'Ya que el limite es 130048 (=1024*127=512*254, etc)
Public ChanB_Data(130050) As Integer
Public RightLim, LeftLim As Long 'Los límites que representaremos
Public NumRecordsToRead As Long
Public Color1, Color2
Public TotalTime, DeadTime, LiveTime As Variant
Public bd As BoardDef
Public RecordLimit As Integer
Public MaxVal, MinVal, Altura, FirstVal, Rise, RiseIncr, iMaxVal, Up, FixedRise As Integer
Public FirstPeak, SecondPeak, iFirstPeak, iSecondPeak, HeightSecondPeak, UpSecondPeak, FirstPeakDeconv, SecondPeakDeconv As
Integer
Public LeftFilter, RightFilter As Integer
Public a0, a1, r As Variant
Public C1, C2 As Variant
Public SlopeDif As Variant
Public MatrixFirstPeakDeconv(1000000), MatrixSecondPeakDeconv(1000000) 'Matrices de los valores a representar en la
2DCoincidenceGraph. Escojo 1000000 para no quedarme corto
Public DeconvNumber As Long 'Este es el número de Deconvoluciones = Numero de puntos a representar en 2DCoincidenceGraph
```

'AlazarTech Public Declarations:

Public Declare Function AlazarOpen Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal name As String) As Integer

Public Declare Sub AlazarClose Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal h As Integer)

Public Declare Function AlazarBoardsFound Lib "ATSApiVB.dll" () As Long

Public Declare Function AlazarGetCPLDVersion Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal h As Integer, ByRef Major As Byte, ByRef Minor As Byte) As Long

Public Declare Function AlazarGetSDKVersion Lib "ATSApiVB.dll" (ByRef Major As Byte, ByRef Minor As Byte, ByRef Revision As Byte) As Long

Public Declare Function AlazarGetDriverVersion Lib "ATSApiVB.dll" (ByRef Major As Byte, ByRef Minor As Byte, ByRef Revision As Byte) As Long

Public Declare Function AlazarAbortCapture Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal h As Integer) As Long

Public Declare Function AlazarForceTrigger Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal h As Integer) As Long

Public Declare Function AlazarStartCapture Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal h As Integer) As Long

Public Declare Function AlazarBusy Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal h As Integer) As Long

Public Declare Function AlazarTriggered Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal h As Integer) As Long

Public Declare Function AlazarGetStatus Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal h As Integer) As Long

Public Declare Function AlazarGetChannelInfo Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal h As Integer, ByRef MemSize As Long, ByRef SampleSize As Byte) As Long

Public Declare Function AlazarMemoryTest Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal h As Integer, ByRef errors As Long) As Long

Public Declare Function AlazarAutoCalibrate Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal h As Integer) As Long

Public Declare Function AlazarInputControl Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal h As Integer, ByVal Channel As Byte, ByVal Coupling As Long, ByVal InputRange As Long, ByVal Impedance As Long) As Long

Public Declare Function AlazarSetExternalTrigger Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal h As Integer, ByVal Coupling As Long, ByVal Range As Long) As Long

Public Declare Function AlazarSetTriggerDelay Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal h As Integer, ByVal Delay As Long) As Long

Public Declare Function AlazarSetTriggerTimeOut Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal h As Integer, ByVal to_ns As Long) As Long

Public Declare Function AlazarTriggerTimedOut Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal h As Integer) As Long

Public Declare Function AlazarDetectMultipleRecord Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal h As Integer) As Long

Public Declare Function AlazarSetTriggerOperation Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal h As Integer, ByVal TriggerOperation As Long, ByVal TriggerEngine1 As Long, ByVal Source1 As Long, ByVal Slope1 As Long, ByVal Level1 As Long, ByVal TriggerEngine2 As Long, ByVal Source2 As Long, ByVal Slope2 As Long, ByVal Level2 As Long) As Long

Public Declare Function AlazarGetTriggerAddress Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal h As Integer, ByVal Record As Long, ByRef TriggerAddress As Long, ByRef TimeStampHighPart As Long, ByRef TimeStampLowPart As Long) As Long

Public Declare Function AlazarSetRecordCount Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal h As Integer, ByVal Count As Long) As Long

Public Declare Function AlazarSetRecordSize Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal h As Integer, ByVal PreSize As Long, ByVal PostSize As Long) As Long

Public Declare Function AlazarSetCaptureClock Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal h As Integer, ByVal Source As Long, ByVal Rate As Long, ByVal Edge As Long, ByVal Decimation As Long) As Long

Public Declare Function AlazarRead Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal h As Integer, ByVal Channel As Long, ByRef Buffer As Any, ByVal ElementSize As Integer, ByVal Record As Long, ByVal TransferOffset As Long, ByVal TransferLength As Long) As Long

' System API

Public Declare Function AlazarGetSystemHandle Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal sid As Integer) As Integer

Public Declare Function AlazarNumOfSystems Lib "ATSApiVB.dll" () As Integer

Public Declare Function AlazarBoardsInSystemBySystemID Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal sid As Integer) As Integer

Public Declare Function AlazarBoardsInSystemByHandle Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal systemHandle As Integer) As Integer

Public Declare Function AlazarGetBoardBySystemID Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal sid As Integer, ByVal brdNum As Long) As Integer

Public Declare Function AlazarGetBoardBySystemHandle Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal systemHandle As Integer, ByVal brdNum As Long) As Integer

Public Declare Function AlazarSetLED Lib "ATSApiVB.dll" (ByVal h As Integer, ByVal State As Integer) As Integer

,

' Board Definition structure

,

Type BoardDef

RecordCount As Long

RecLength As Long

PreDepth As Long

ClockSource As Long

ClockEdge As Long

SampleRate As Long

CouplingChanA As Long

InputRangeChanA As Long

InputImpedChanA As Long

CouplingChanB As Long

InputRangeChanB As Long

InputImpedChanB As Long

TriEngOperation As Long

TriggerEngine1 As Long

TrigEngSource1 As Long

TrigEngSlope1 As Long

TrigEngLevel1 As Long

TriggerEngine2 As Long

TrigEngSource2 As Long

TrigEngSlope2 As Long

TrigEngLevel2 As Long

End Type

,

' Sample Rate values

,

Public Const SAMPLE_RATE_1KSPS As Integer = &H1
Public Const SAMPLE_RATE_2KSPS As Integer = &H2
Public Const SAMPLE_RATE_5KSPS As Integer = &H4
Public Const SAMPLE_RATE_10KSPS As Integer = &H8
Public Const SAMPLE_RATE_20KSPS As Integer = &HA
Public Const SAMPLE_RATE_50KSPS As Integer = &HC
Public Const SAMPLE_RATE_100KSPS As Integer = &HE
Public Const SAMPLE_RATE_200KSPS As Integer = &H10
Public Const SAMPLE_RATE_500KSPS As Integer = &H12
Public Const SAMPLE_RATE_1MSPS As Integer = &H14
Public Const SAMPLE_RATE_2MSPS As Integer = &H18
Public Const SAMPLE_RATE_5MSPS As Integer = &H1A
Public Const SAMPLE_RATE_10MSPS As Integer = &H1C
Public Const SAMPLE_RATE_20MSPS As Integer = &H1E
Public Const SAMPLE_RATE_25MSPS As Integer = &H21
Public Const SAMPLE_RATE_50MSPS As Integer = &H22
Public Const SAMPLE_RATE_100MSPS As Integer = &H24
Public Const SAMPLE_RATE_200MSPS As Integer = &H28
Public Const SAMPLE_RATE_500MSPS As Integer = &H2A
Public Const SAMPLE_RATE_1GSPS As Integer = &H2C

' user defined sample rate - used with External Clock

Public Const SAMPLE_RATE_USER_DEF As Integer = &H40

,

' Impedance Values

,

Public Const IMPEDANCE_1M_OHM As Integer = &H1
Public Const IMPEDANCE_50_OHM As Integer = &H2
Public Const IMPEDANCE_75_OHM As Integer = &H4
Public Const IMPEDANCE_300_OHM As Integer = &H8
Public Const IMPEDANCE_600_OHM As Integer = &HA

,

' Clock Source

,

Public Const INTERNAL_CLOCK As Integer = &H1

```
Public Const EXTERNAL_CLOCK    As Integer = &H2
'
' Clock Edge
'
Public Const CLOCK_EDGE_RISING  As Integer = &H0
Public Const CLOCK_EDGE_FALLING As Integer = &H1
'
' Input Ranges
'
Public Const INPUT_RANGE_PM_20_MV  As Integer = &H1
Public Const INPUT_RANGE_PM_40_MV  As Integer = &H2
Public Const INPUT_RANGE_PM_50_MV  As Integer = &H3
Public Const INPUT_RANGE_PM_80_MV  As Integer = &H4
Public Const INPUT_RANGE_PM_100_MV As Integer = &H5
Public Const INPUT_RANGE_PM_200_MV As Integer = &H6
Public Const INPUT_RANGE_PM_400_MV As Integer = &H7
Public Const INPUT_RANGE_PM_500_MV As Integer = &H8
Public Const INPUT_RANGE_PM_800_MV As Integer = &H9
Public Const INPUT_RANGE_PM_1_V    As Integer = &HA
Public Const INPUT_RANGE_PM_2_V    As Integer = &HB
Public Const INPUT_RANGE_PM_4_V    As Integer = &HC
Public Const INPUT_RANGE_PM_5_V    As Integer = &HD
Public Const INPUT_RANGE_PM_8_V    As Integer = &HE
Public Const INPUT_RANGE_PM_10_V   As Integer = &HF
Public Const INPUT_RANGE_PM_20_V   As Integer = &H10
Public Const INPUT_RANGE_PM_40_V   As Integer = &H11
'
' Coupling Values
'
Public Const AC_COUPLING        As Integer = &H1
Public Const DC_COUPLING       As Integer = &H2
'
' Trigger Engines
'
Public Const TRIG_ENGINE_J     As Integer = &H0
Public Const TRIG_ENGINE_K     As Integer = &H1
'
' Trigger Engine Operation
'
```

Public Const TRIG_ENGINE_OP_J As Integer = &H0
Public Const TRIG_ENGINE_OP_K As Integer = &H1
Public Const TRIG_ENGINE_OP_J_OR_K As Integer = &H2
Public Const TRIG_ENGINE_OP_J_AND_K As Integer = &H3
Public Const TRIG_ENGINE_OP_J_XOR_K As Integer = &H4
Public Const TRIG_ENGINE_OP_J_AND_NOT_K As Integer = &H5
Public Const TRIG_ENGINE_OP_NOT_J_AND_K As Integer = &H6

,

' Trigger Engine Sources

,

Public Const TRIG_CHAN_A As Integer = &H0
Public Const TRIG_CHAN_B As Integer = &H1
Public Const TRIG_EXTERNAL As Integer = &H2
Public Const TRIG_DISABLE As Integer = &H3

,

' Trigger Slope

,

Public Const TRIGGER_SLOPE_POSITIVE As Integer = &H1
Public Const TRIGGER_SLOPE_NEGATIVE As Integer = &H2

,

' Channel Selection

,

Public Const CHANNEL_ALL As Integer = &H0
Public Const CHANNEL_A As Integer = &H1
Public Const CHANNEL_B As Integer = &H2
Public Const CHANNEL_C As Integer = &H3
Public Const CHANNEL_D As Integer = &H4
Public Const CHANNEL_E As Integer = &H5
Public Const CHANNEL_F As Integer = &H6
Public Const CHANNEL_G As Integer = &H7
Public Const CHANNEL_H As Integer = &H8

,

' Master/Slave Configuration

,

Public Const BOARD_IS_INDEPENDENT As Integer = &H0
Public Const BOARD_IS_MASTER As Integer = &H1
Public Const BOARD_IS_SLAVE As Integer = &H2
Public Const BOARD_IS_LAST_SLAVE As Integer = &H3

,

' LED Control

,

Public Const LED_OFF As Integer = &H0

Public Const LED_ON As Integer = &H1

,

' Attenuator Relay

,

Public Const AR_X1 As Integer = &H0

Public Const AR_DIV40 As Integer = &H1

,

' External Trigger Attenuator Relay

,

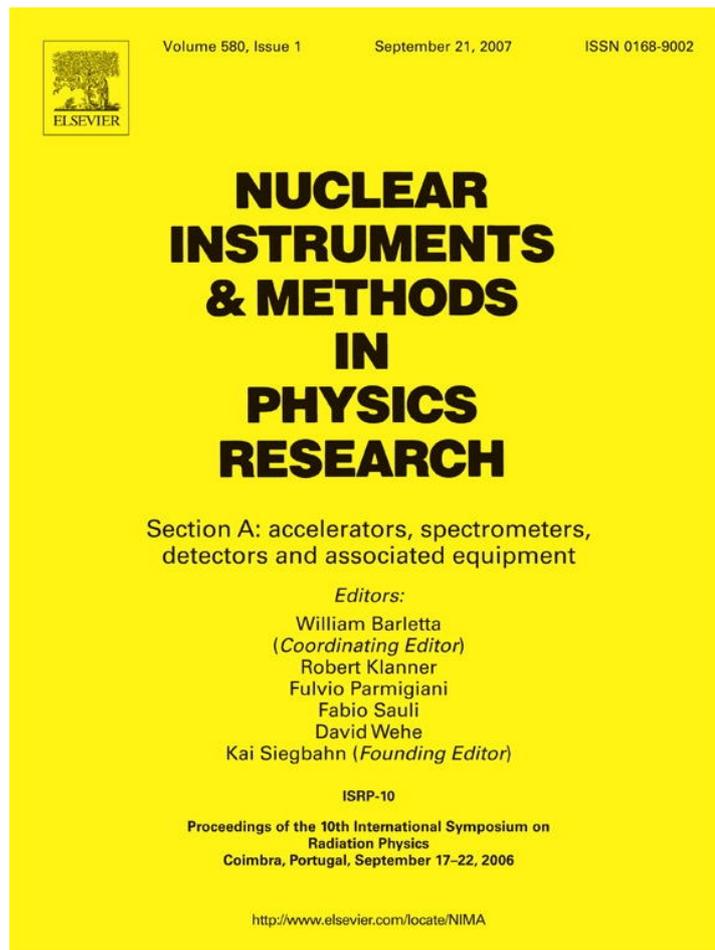
Public Const ETR_DIV5 As Integer = &H0

Public Const ETR_X1 As Integer = &H1

11. Anexo 2 - Artículo: "Coincidence measurements in $\alpha/\beta/\gamma$ spectrometry with phoswich detectors using digital pulse shape discrimination analysis".

Ver referencia 9.20

(Ver también en [Referencias\NIMA47035.pdf](#))



This article was published in an Elsevier journal. The attached copy is furnished to the author for non-commercial research and education use, including for instruction at the author's institution, sharing with colleagues and providing to institution administration.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit: <http://www.elsevier.com/copyright>

Available online at www.sciencedirect.com

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 580 (2007) 206–209

**NUCLEAR
INSTRUMENTS
& METHODS
IN PHYSICS
RESEARCH**
Section A
www.elsevier.com/locate/nima

Coincidence measurements in $\alpha/\beta/\gamma$ spectrometry with phoswich detectors using digital pulse shape discrimination analysis

B. de Celis^{a,*}, R. de la Fuente^a, A. Williard^b, B. de Celis Alonso^c^aUniversity of León, Escuela de Ingeniería Industrial, León 24071, Spain^bUNED, F. Ciencias Físicas, Madrid 28040, Spain^cKing's College London, IoP, De Crespigny Park, London SE5 8AF, UK

Available online 16 May 2007

Abstract

A novel system has been developed for the detection of low radioactivity levels using coincidence techniques. The device combines a phoswich detector for $\alpha/\beta/\gamma$ ray recognition with a fast digital card for electronic pulse analysis. The detector is able to discriminate different types of radiation in a mixed $\alpha/\beta/\gamma$ field and can be used in a coincidence mode by identifying the composite signal produced by the simultaneous detection of β particles in a plastic scintillator and γ rays in an NaI(Tl) scintillator. Use of a coincidence technique with phoswich detectors was proposed recently to verify the Nuclear Test Ban Treaty, which made it necessary to monitor the low levels of xenon radioisotopes produced by underground nuclear explosions. Previous studies have shown that combining $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ for β ray detection and NaI(Tl) for γ ray detection makes it difficult to identify the coincidence signals because of the similar fluorescence decay times of the two scintillators. With the device proposed here, it is possible to identify the coincidence events owing to the short fluorescence decay time of the plastic scintillator. The sensitivity of the detector may be improved by employing liquid scintillators, which allow low radioactivity levels from actinides to be measured when present in environmental samples. The device developed is simpler to use than conventional coincidence equipment because it uses a single detector and electronic circuit, and it offers fast and precise analysis of the coincidence signals by employing digital pulse shape analysis.

© 2007 Elsevier B.V. All rights reserved.

PACS: 29.30.Kv; 29.40.Mc

Keywords: Phoswich detectors; $\alpha/\beta/\gamma$ Coincidence; Digital pulse shape discrimination; PSD

1. Introduction

The efficient detection of low levels of radioactivity in the presence of background radiation demands special measurement techniques. It has been common practice to use phoswich detectors in many situations, for example for the determination of radioactive substances in radioecological studies during the treatment of radioactive waste [1,2], determination of radionuclides in the atmosphere [3], measurements of neutrons and charged particles in space applications [4] and health physics instrumentation [5].

A phoswich detector is composed of several independent scintillation crystals coupled to a single photomultiplier tube [6]. An appropriate selection of the type of scintillators used allows the possibility of simultaneous detection of different types of radioactive emission with those scintillators. Their signals are then separated by their rise time, which is proportional to the fluorescence decay time of the scintillator.

Pulse shape discrimination (PSD) analysis is an essential part of the procedure and can be performed by analog or digital methods. The recent availability of digital cards offer the advantage of higher reliability and simplicity of use. This is achieved because it allows one to work without the electronic equipment necessary when employing conventional analog procedures, i.e. multichannel analyzers

*Corresponding author. Tel.: +34 987291540.

E-mail address: bccelc@unileon.es (B. de Celis).

(MCAs), amplifiers, single-channel analyzers, etc. The direct analog-to-digital conversion of the detector signal offers many other possibilities [7], such as $\alpha/\beta/\gamma$ discrimination by PSD analysis, precise detection time determination (time stamping), and dead-time reduction.

Phoswich detectors are normally used to detect low-intensity radiation. In such situations, the phoswich detector operates as a low-background detector, where one of the crystals has sufficient thickness to absorb the radiation of interest, whereas the other crystal acts as an anticoincidence shield. In our case, instead of rejecting the coincidence signals, we have chosen the coincidence mode. The coincidence technique [6], which traditionally employs two independent electronic circuits, is characterized by high background suppression, allowing the identification of certain radionuclides with very low detection thresholds. Recently, coincidence techniques with phoswich detectors have been proposed by several international laboratories to verify the Nuclear Test Ban Treaty. This idea is of interest because the use of phoswich detectors simplifies the coincidence measurement equipment by reducing the large number of detectors and photomultiplier tubes required, together with the very precise calibrations that they need. The alterations suggested involved the use of phoswich detectors using $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ and $\text{NaI}(\text{Tl})$ for β and γ detection, respectively. However, results showed that it was difficult to identify the coincidence signals, owing to the similar fluorescence decay times of the two scintillators. It was also difficult to calculate the shape and amplitude of the two component signals [3].

2. Materials and methods

The double phoswich crystal employed in our device was composed of a $76.2 \times 1.016 \text{ mm}^2$ $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ crystal for β detection and a $76.2 \times 76.2 \text{ mm}^2$ $\text{NaI}(\text{Tl})$ scintillator for γ detection, and they have fluorescence decay times 940 and 230 ns, respectively. In order to determine more precisely the coincidences, a 0.5 mm plastic scintillator was superimposed. In this new configuration, β particles with energies under 1 MeV were stopped in the plastic scintillator, X-rays in the $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ crystal, and γ rays in the $\text{NaI}(\text{Tl})$ crystal.

The electronic processing of the signal was performed by a digital card (AlazarTech[®] ATS330 PCI) with the following technical specifications: two channels independently sampled at 12 bit resolution, a sampling rate of 50 M samples/s, multiple possibilities for triggering, multiple records and time stamping. The two channels would be useful if coincidence measurements were performed with two independent electronic circuits and solid-state detectors. The scintillators were coupled independently to the photomultiplier tube to study their pulse shape characteristics, the optimum bias voltage, and the card parameters (sampling rate, samples per pulse, triggering thresholds, voltage range, input impedance, noise level, etc.). Those hardware conditions determined the optimum parameters

for simultaneous particle detection when different scintillator crystals were coupled together. The device was then tested with radioactive sources of known radioactivity and different emitted particles and energies: ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{152}Eu and ^{226}Ra .

The digital card was supplied with basic software to set up the acquisition hardware. It contained a software development kit to allow one to fully control the card. In order to develop a complete system able to perform $\alpha/\beta/\gamma$ spectrometry and coincidence experiments, many other functions were developed and incorporated into the original software. The system developed acts like a digital oscilloscope that visualizes each individual pulse, and also like a conventional MCA. Several selection functions were incorporated: voltage amplitude, record length, sampling rate, trigger level, input impedance, etc. The characteristics incorporated into the MCA were identification of a region of interest, peak area determination, calibration of energies, dead-time determination, and loading and recording of spectra.

Several algorithms were developed to perform the PSD analysis. They separate the signals that came from different scintillators, allowing simultaneous acquisition of $\alpha/\beta/\gamma$ spectra from a radioactive sample. In addition, AND and OR relations could be used during the acquisition to obtain a compound spectrum from the sample.

Fig. 1 shows four signals arising from the detection of $\alpha/\beta/\gamma$ radioactivity in four different scintillators: $\text{ZnS}(\text{Ag})$, plastic/liquid, $\text{CaF}_2(\text{Eu})$, and $\text{NaI}(\text{Tl})$. The rise time is significantly large for the $\text{ZnS}(\text{Ag})$ scintillator with α particles owing to its large fluorescence decay time. The shortest rise time corresponds to β particles detected in the plastic scintillator. Intermediate rise times are caused by β particles or X-rays detected in the $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ scintillator and γ rays in the $\text{NaI}(\text{Tl})$ scintillator.

The pulse rise time was the main characteristic employed for particle identification. The algorithms were improved by recording or rejecting mixed signals that could correspond to pulses coming from a single scintillator or to a compound of signals caused by coincidences. Second-level

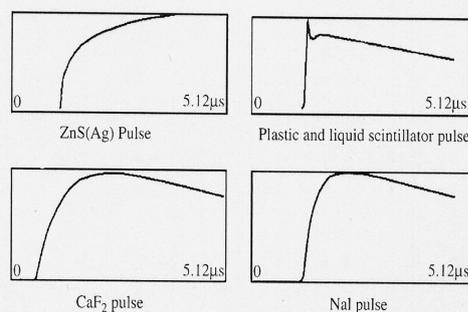


Fig. 1. Digitized signals from four scintillators. The pulses were obtained in the following conditions: sampling rate 50 M samples/s, 256 samples per pulse, sampling time per pulse 5.12 μs .

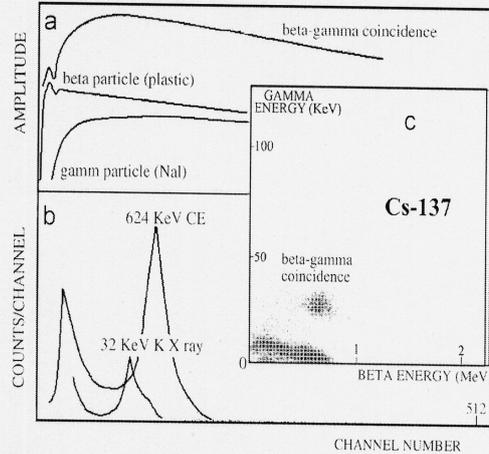


Fig. 2. (a) ^{137}Cs β - γ coincidence signal and its deconvolution obtained with a plastic-scintillator/NaI phoswich. The pulse starting with a sharp peak corresponds to β particles (624 keV conversion electrons) detected in the plastic scintillator. The smaller pulse corresponds to 32 keV K X-rays detected in the NaI scintillator. (b) β and γ coincidence spectra. (c) 2-D coincidence diagram.

tests were then carried out, where we tried to classify the pulses by comparison with standard reference signals typical of each scintillator. This last set of tests was abandoned because it was considered that the marked rise time characteristics of each scintillator allowed a relatively simple and fast classification of the radiation type. In the case of particles detected in the ZnS(Ag) and plastic scintillators, the identification was easy; however, for the $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ and NaI(Tl) scintillators the algorithms had to be more precise because the pulses had similar rise times. In this case, an algorithm that determined the slope of the pulse at 10% of its peak value and after the peak was developed. The difference in slope determined the pulse type. Using these procedures, we obtained 99% of certainties and 1% of errors.

3. Results

The radioactive source used for the β - γ coincidence tests was ^{137}Cs , which emits 32 keV X-rays in coincidence with 620 keV conversion electrons. It is difficult to identify β - γ coincidences detected in a CaF_2/NaI phoswich and, therefore, a plastic scintillator was chosen for β detection instead of CaF_2 . The short fluorescence decay time of the plastic allowed precise identification of the coincidence pulses, as they were preceded by a sharp peak (Fig. 2).

An algorithm was developed to numerically analyze the coincidence pulse and determine the shape and amplitude of the two constituent signals, which identify the type and energy of each coincident particle.

This analytical procedure was extended to the determination of actinides in environmental samples by employing liquid instead of plastic scintillators for α or β detection.

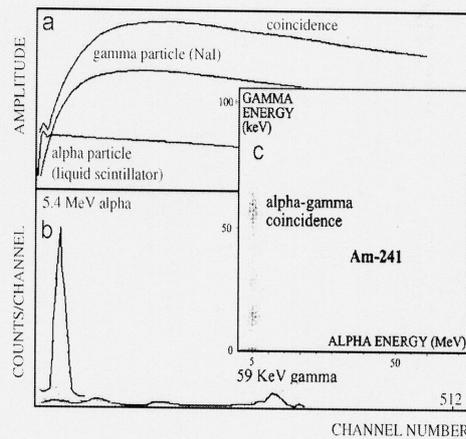


Fig. 3. (a) ^{241}Am α - γ coincidence and deconvolution coincidence of an α particle (5.6 MeV) and a γ particle (59 keV) using a liquid scintillator and an NaI crystal. (b) α and γ coincidence spectra. (c) 2-D coincidence diagram.

Actinides usually decay by α emission in coincidence with low-energy γ or X-ray radiation. The efficiency of α detection is usually very low, owing to self-absorption in the sample. The liquid scintillator increases the efficiency by about 70%, increasing the sensitivity of the analysis. The accuracy of the procedure was tested with a ^{241}Am source of known activity, which emitted 5.4 MeV α particles in coincidence with 59 keV γ rays (Fig. 3). The radioactive solution, dissolved in a small amount of liquid scintillator (10 ml) was measured inside a petri glass to reduce light and gamma auto-absorption.

The α , γ , and coincidence intensities were measured and the absolute activity of the source was determined from the equations

$$N_{\alpha} = \varepsilon_{\alpha} Y_{\alpha} A \quad (1)$$

$$N_{\gamma} = \varepsilon_{\gamma} Y_{\gamma} A \quad (2)$$

$$N_{\text{coin}} = \varepsilon_{\alpha} Y_{\alpha} \varepsilon_{\gamma} Y_{\gamma} A \quad (3)$$

$$A = N_{\alpha} N_{\gamma} / N_{\text{coin}} \quad (4)$$

where N_{α} , N_{γ} , and N_{coin} are the α , γ , and coincidence activities in counts/s; ε and Y are the efficiency and yield, respectively, of each emission, and A is the absolute activity of the sample.

These results predict satisfactorily the activity of the source. The background in the 2-D coincidence area was also tested with a multielemental radioactive standard to check for possible interferences and estimate the minimum detectable activity (MDA) of the analysis. The typical value in the area of interest in the 2-D diagram was less than 0.1 cpm, which gives an MDA of 0.01 Bq for the geometry and acquisition time employed in the measurement.

4. Conclusions

The detection system developed by us can be used in combination with phoswich detectors to obtain simultaneously

the α , β , and γ spectra of a radioactive sample. It can also be employed with different types of detectors (solid, gas, Ge, etc.) while still offering all the advantages of digital systems: experimental simplification, reduction of dead time and noise, coincidence capabilities, etc.

The analytical procedure using coincidences described here has a high sensitivity for the determination of very low levels of radioactivity. It can be used to determine fission products by β - γ coincidence and actinides by α - γ coincidence. The procedure is simpler to use than conventional coincidence techniques because it uses a single detector and electronic circuit. It also offers fast and precise determination of the signals by employing digital PSD analysis.

References

- [1] T. White, W. Miller, Nucl. Instr. and Meth. A 422 (1999) 144.
- [2] C. Wang, J. Lee, H. Chiou, Appl. Radiat. Isot. 45 (1994) 251.
- [3] J. Ely, C. Aalseth, J. McIntyre, J. Radioanal. Nucl. Chem. 263 (1) (2005) 245.
- [4] M. Takada, S. Taniguchi, T. Nakamura, K. Fijitaka, IEEE Trans. Nucl. Sci. A NS-356 (1998) 334.
- [5] A.T. Farsoni, D.M. Hamby, Nucl. Instr. and Meth. A 555 (2005) 225.
- [6] G.F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, third ed., Wiley, New York, 2000.
- [7] W.K. Warburton, M. Momayez, B. Hubbard-Nelson, W. Skulski, Appl. Radiat. Isotopes 53 (2000) 913.

12. Anexo 3 -Artículo: "Low level radioactivity measurements with phoswich detectors using coincident techniques and digital pulse processing analysis".

Ver referencia 9.22

(Ver también en [Referencias\JEnvironRadioact2008Feb.pdf](#))



Available online at www.sciencedirect.com



ScienceDirect

Journal of Environmental Radioactivity xx (2008) 1–5

JOURNAL OF
ENVIRONMENTAL
RADIOACTIVITY

www.elsevier.com/locate/jenvrad

Low level radioactivity measurements with phoswich detectors using coincident techniques and digital pulse processing analysis

R. de la Fuente ^a, B. de Celis ^{a,*}, V. del Canto ^a, J. Lumbreras ^a, B. de Celis Alonso ^b,
A. Martín-Martín ^{c,d}, J.L. Gutierrez-Villanueva ^{c,d}

^a University of León, Escuela de Ingeniería Industrial, León 24071, Spain

^b King's College London, IoP, De Crespigny Park, SE88AF, UK

^c Laboratorio LIBRA, Edificio 1+D, Paseo Belén 3, 47011 Valladolid, Spain

^d Departamento de Física Teórica, Atómica y Óptica, Facultad de Ciencias,
P^o Prado de la Magdalena, s/n. 47005 Valladolid, Spain

Abstract

A new system has been developed for the detection of low radioactivity levels of fission products and actinides using coincidence techniques. The device combines a phoswich detector for $\alpha/\beta/\gamma$ -ray recognition with a fast digital card for electronic pulse analysis. The phoswich can be used in a coincident mode by identifying the composed signal produced by the simultaneous detection of α/β particles and X-rays/ γ particles. The technique of coincidences with phoswich detectors was proposed recently to verify the Nuclear Test Ban Treaty (NTBT) which established the necessity of monitoring low levels of gaseous fission products produced by underground nuclear explosions. With the device proposed here it is possible to identify the coincidence events and determine the energy and type of coincident particles. The sensitivity of the system has been improved by employing liquid scintillators and a high resolution low energy germanium detector. In this case it is possible to identify simultaneously by α/γ coincidence transuranic nuclides present in environmental samples without necessity of performing radiochemical separation. The minimum detectable activity was estimated to be 0.01 Bq kg^{-1} for 0.1 kg of soil and 1000 min counting.

© 2007 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: $\alpha/\beta/\gamma$; Coincidence; Phoswich; Digital pulse shape discrimination; PSD; Actinides; Transuranic

1. Introduction

The use of coincidence techniques with phoswich detectors using digital pulse processing has been recently studied (de Celis et al., 2006; Ely et al., 2005). The technique is of interest because the use of a phoswich detector simplifies the coincidence measurement equipment by reducing the number of detectors and photomultiplier tubes required together with the precise calibrations that they need. Besides, coincidence measurements are characterized by high background suppression, allowing the identification of certain radionuclides with low detection thresholds (Knoll, 2000, pp. 668–675).

The coincidence technique with phoswich detectors was proposed recently to verify the Nuclear Test Ban Treaty, which established the necessity of monitoring low levels of radioactive xenons in the atmosphere produced by underground nuclear explosions. Previous studies have shown that working with certain scintillators makes the identification of coincidence signals difficult and, as a consequence, different types of scintillators have been proposed in order to improve the efficiency and resolution of the measurements (McIntyre et al., 2005).

2. Description of the detector and pulse shape discrimination (PSD) system

The phoswich detector is composed of several independent scintillation crystals coupled to a single photomultiplier tube,

* Corresponding author. Tel.: +34 987291540.

E-mail addresses: bcelc@unileon.es (B. de Celis), alonsomm@libra.uva.es (A. Martín-Martín), joselg@libra.uva.es (J.L. Gutierrez-Villanueva).

Fig. 1. An appropriate selection of the type of scintillators allows the possibility of simultaneous detection of different types of radioactive emissions in those scintillators. Their signals are separated according to their rise time which is proportional to the fluorescence decay time of each scintillator when the PM anode circuit exceeds this time (Knoll, 2000, pp. 292–297). Phoswich detectors are normally used to detect low intensity radiation. In those situations the phoswich operates as a low background detector where one of the crystals has sufficient thickness to absorb the radiation of interest, whereas the other crystal acts as an anticoincidence shielding. In our case, instead of rejecting the coincidence signals we have chosen the coincidence mode.

Pulse shape discrimination analysis is an essential part of the procedure and can be performed with analog or digital methods. The recent availability of fast digital cards offers the advantage of a higher reliability and simplicity of use and it allows to work without the electronic equipment necessary when employing conventional analog procedures, i.e., multi-channel analyzers (MCA), amplifiers, SCA, etc. (White and Miller, 1999). The direct analog to digital conversion of the detector signal offers many other possibilities (Warburton et al., 2000), i.e., $\alpha/\beta/\gamma$ discrimination by PSD analysis, precise detection time determination (time stamping) which allows the identification of coincident pulses proceeding from two different detectors or electronic chains, dead time reduction with possibility of high activity measurements (about 10^6 pulses/s), etc.

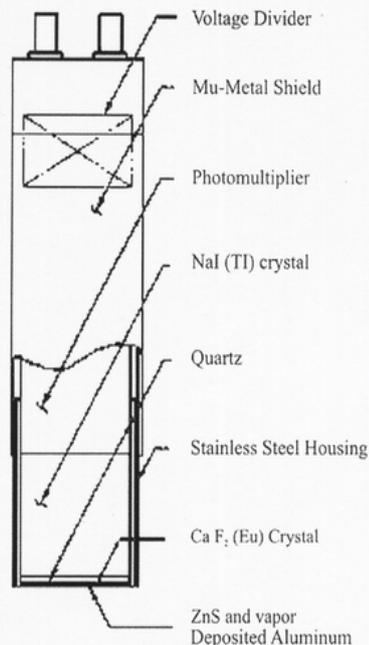


Fig. 1. Saint-Gobain three-phoswich detector for simultaneous α , β and γ detection. The device is composed of ZnS, $\text{CaF}_2(\text{Eu})$, and $\text{NaI}(\text{Tl})$ scintillators with fluorescence decay times of 5000, 940, and 230 ns, respectively.

The electronic treatment of the signal is performed by a digital card of the following technical specifications: two channels independently sampled at 12-bit resolution, 30 Msamples/s sampling rate, multiple possibilities of triggering, multiple record, and time stamping. Two channels are used when coincidence measurements are performed with two separated detectors. In this case the digitized signals are stored jointly with their arrival time. Coincidences are identified by comparing the arrival time of pulses proceeding from two different detectors. In our case the resolving time (time stamping precision) is 20 ns.

The digital card (AlazarTech ATS330 PCI) was supplied with basic software to set up the acquisition hardware. It contained a software development kit to fully control the card. In order to develop a complete system able to perform $\alpha/\beta/\gamma$ spectrometry and coincidence experiments many other functions were developed and incorporated to the original software. The developed system acts like a digital oscilloscope that visualises each individual pulse and a conventional MCA. Several selection functions were incorporated: voltage amplitude, record length, sampling rate, trigger level, input impedance, etc. The characteristics incorporated to the MCA were identification of region of interest, peak area determination, calibration of energies, dead time determination, and loading and recording of spectra.

Several algorithms were developed to perform the PSD analysis. They separated the signals that came from different scintillators, allowing the simultaneous acquisition of $\alpha/\beta/\gamma$ spectra from a radioactive sample. Besides, AND and OR relations can be used during the acquisition to obtain the compound spectrum of the sample.

Fig. 2 shows four signals arising from the detection of $\alpha/\beta/\gamma$ radioactivity in four different scintillators: ZnS(Ag), plastic/liquid, $\text{CaF}_2(\text{Eu})$, and $\text{NaI}(\text{Tl})$. The rise time is significantly large in the ZnS(Ag) for α particles due to its large fluorescence decay time. The shortest rise time corresponds to α/β particles detected in the plastic or liquid scintillators. Intermediate rise time are caused by $\alpha/\beta/\text{X}$ -rays detected in the $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ and γ -rays in the $\text{NaI}(\text{Tl})$.

Pulse rise time was the main characteristic employed for particle identification. Algorithms were improved by recording or rejecting mixed signals that could correspond to pulses coming from a single scintillator or to a compound of signals caused by coincidences. Second level tests were then carried out trying to classify the pulses by comparison with standard reference signals typical of each scintillator. These last sets of tests were abandoned because it was considered that the marked rise time characteristics of each scintillator allowed a relatively simple and fast radiation type classification. In the case of particles detected in the ZnS(Ag) and plastic scintillators, the identification was easy, however, for $\text{CaF}_2(\text{Eu})$, and $\text{NaI}(\text{Tl})$ pulses the algorithms had to be more precise because they had similar rise times. In this case an algorithm that determined the pulse slopes at 10% of its maximum peak value and after the peak maximum was developed. The slope difference determined the pulse type. Using these procedures, 99% of pulses were identified correctly.

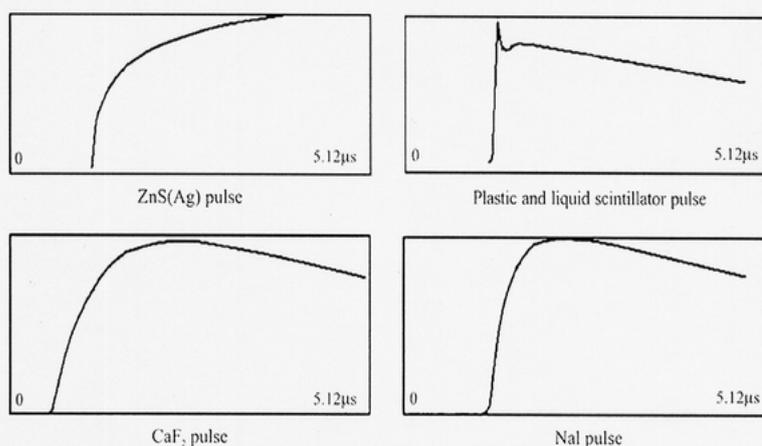


Fig. 2. Digitized signals from four scintillators. The pulses were obtained applying the following parameters: sampling rate 50 Ms^{-1} , 256 samples per pulse, and 64 samples pre-trigger.

3. Experimental

Scintillators were coupled independently to the photomultiplier tube to study their pulse shape characteristics, the optimum bias voltage, and the card parameters (sampling rate, samples per pulse, triggering thresholds, voltage range, input impedance, noise level, etc). Those hardware conditions determined the optimum parameters for the phoswich setup when the different scintillator crystals were coupled together. The device was then tested with radioactive sources of known radioactivity and different particle and energy emissions: ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{152}Eu , and ^{226}Ra .

In previous work (de Celis et al., 2006) a double crystal phoswich composed by $\text{CaF}_2(\text{Eu})/\text{NaI}(\text{Tl})$ was employed to detect α/γ and β/γ coincidences. With these scintillators the coincident pulse was difficult to identify because its shape was very similar to the shape of the pulse corresponding to the coincident particle with greater amplitude, Fig. 3, therefore, a 0.5 mm plastic scintillator was superimposed to detect β particles.

In this new configuration β particles with energies under 1 MeV were stopped in the plastic scintillator, X-rays in the $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ crystal and γ 's in the $\text{NaI}(\text{Tl})$ crystal. The short fluorescence decay time of the plastic allowed the precise identification of the coincidence pulses as they are preceded by a sharp peak, Fig. 4. An algorithm was developed to numerically analyse the coincidence pulse and determine the shape and amplitude of the two constituent signals which identify the type and energy of each coincident particle.

This device can be used to detect β -decaying fission products, using β/γ coincidence. The radioactive source used for the tests was ^{137}Cs . Since the half-life of ^{137}Ba is 2.5 min, the 662 keV γ -ray is not coincident with β particles, but it is possible to use the 32 keV X-rays in coincidence with 624 keV electrons produced by internal conversion (CE), Fig. 4.

4. Results and discussion

Determination of the low level environmental activities of fission products could be performed using our system as far as small mass samples with small β self-absorption are measured, i.e., air filters, residues from evaporated liquids, gaseous samples (radioactive xenons), etc. In order to extend the procedure to a more general type of sample, liquid scintillators were employed for α/β detection. In this case the dissolvent is its own detector and the efficiency of the α/β detection can reach very high values (80%) increasing significantly the sensitivity of the analysis. The new procedure allows the Q3

determination of transuranic nuclides in the environment, i.e., Am, Pu, U, Th, etc., which usually decay by α particle emission in coincidence with low energy X- or γ -rays.

In this case tests were performed with a ^{241}Am liquid source of known activity dissolved in 10 mL of liquid scintillator. A vial containing the radioactive source and the liquid scintillator was placed directly over the phoswich NaI crystal, no other scintillators were used. ^{241}Am emits 5.4 MeV α particles in coincidence with 59 keV γ -rays. The liquid scintillator has a very short fluorescence decay time, similar to the plastic, therefore, the coincidence pulses are easily identified and analysed, Fig. 5.

The α , γ and coincidence intensities were measured and the absolute activity of the source determined by the equations:

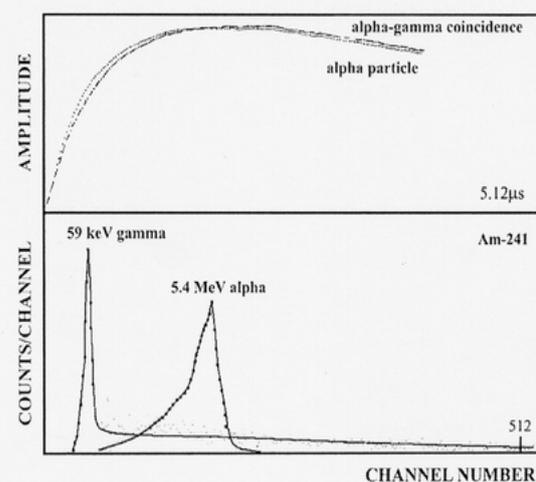


Fig. 3. Am-241 α/γ coincidence and α/γ spectra obtained with a CaF_2/NaI phoswich. The coincidence amplitude is composed of a 90% α pulse and a 10% γ pulse, therefore, the coincidence is difficult to identify because its shape is very similar to an α particle. The α pulse has been normalized to the same amplitude.

Please cite this article in press as: de la Fuente, R. et al., Low level radioactivity measurements with phoswich detectors using coincident techniques and digital pulse processing analysis, J. Environ. Radioact. (2008), doi:10.1016/j.jenvrad.2007.12.008

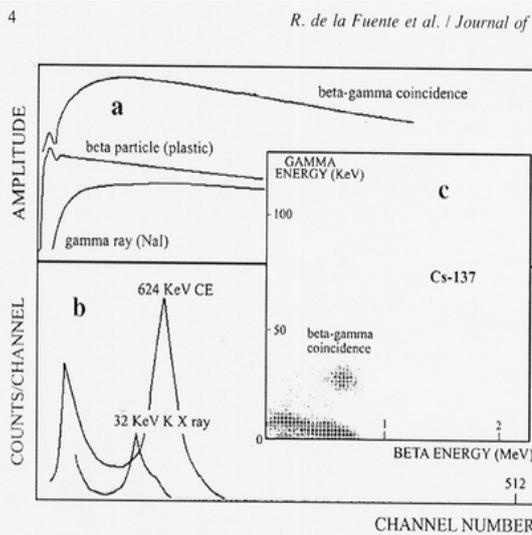


Fig. 4. (a) ^{137}Cs β/γ coincidence signal and its deconvolution obtained with a plastic scintillator/NaI phoswich. The pulse starting with a sharp peak corresponds to β particles (624 keV conversion electrons) detected in the plastic scintillator. The smaller pulse corresponds to 32 keV K X-rays detected in the NaI scintillator. (b) β and γ coincidence spectra. (c) 2-D coincidence diagram.

$$N_{\alpha} = \epsilon_{\alpha} Y_{\alpha} A \quad (1)$$

$$N_{\gamma} = \epsilon_{\gamma} Y_{\gamma} A \quad (2)$$

$$N_{\text{coin}} = \epsilon_{\alpha} Y_{\alpha} \epsilon_{\gamma} Y_{\gamma} A \quad (3)$$

$$A = N_{\alpha} N_{\gamma} / N_{\text{coin}} \quad (4)$$

where N_{α} , N_{γ} , and N_{coin} are the α , γ and coincidence count rates, ϵ is the detection efficiency, Y is the emission probability, and A is the absolute activity of the sample in Bq.

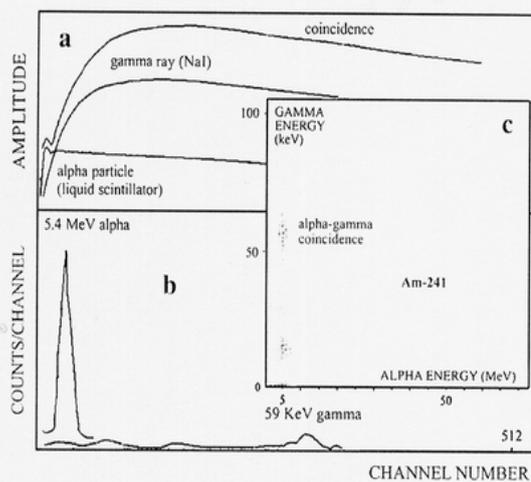


Fig. 5. (a) ^{241}Am α/γ coincidence and deconvolution coincidence of an α particle (5.6 MeV) and a γ particle (59 keV) using a liquid scintillator and an NaI crystal. (b) α and γ coincidence spectra. (c) 2-D coincidence diagram.

The results predicted satisfactorily the activity of the source. The background in the 2-D coincidence area was also tested with a multi-elemental radioactive standard to check possible interferences and estimate the minimum detectable activity (MDA) of the analysis. A typical background count rate on the area of interest in the 2-D diagram is less than 0.1 cpm which gives MDA of 0.01 Bq for the geometry and acquisition time employed in the measurements.

The NaI crystal has not enough resolution to separate X-rays and low energy γ peaks of many transuranic nuclides. Therefore, a low energy germanium detector (LEGe) was employed in the analysis. This new configuration forces us to abandon the simplicity of previous measurements with a single phoswich. Two independent electronic chains for each detector (liquid scintillator and germanium) must be used, however, the system is now able to separate the very close transuranic X-ray peaks present in the γ spectrum with a background strongly reduced by the coincidence effect. The pulses given by the two detectors are stored jointly with their detection time and coincidences are identified by comparing the arrival time of pulses proceeding from the liquid detector (α particles) and germanium (X and γ rays). A delay time between pulses smaller than 2 μs was considered appropriate to indicate a coincidence event.

Experimental tests were performed with a soil sample of known activity, previously ashed and dissolved in nitric acid. The sample contained transuranic elements (^{241}Am and ^{238}Pu) with activities below 0.1 Bq kg^{-1} . In conventional analysis most of these radionuclides are only detectable if radiochemical separation is combined with α spectrometry. With this procedure it was possible to identify and determine quantitatively the ^{241}Am activity. The MDA of the procedure was 0.01 Bq kg^{-1} which can be considered very low compared with 10 Bq kg^{-1} when using directly γ spectrometry and lower than 0.1 Bq kg^{-1} using radiochemical separation combined with α spectrometry. Other α /X-ray radionuclides like ^{238}Pu

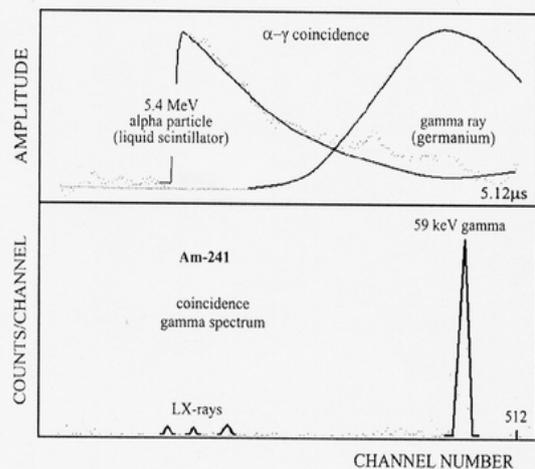


Fig. 6. Am-241 α/γ coincidence and coincidence γ spectrum using liquid scintillator and a low energy germanium detector.

Please cite this article in press as: de la Fuente, R. et al., Low level radioactivity measurements with phoswich detectors using coincident techniques and digital pulse processing analysis, J. Environ. Radioact. (2008), doi:10.1016/j.jenvrad.2007.12.008

were not identified because the α efficiency reduction in the 10–20 keV region by the Ge absorption edge and self-absorption in the own sample. Tests to increase the MDA at these energies could be carried out with a Si(Li) detector or using a phoswich with a higher resolution scintillator. Fig. 6 shows a coincidence event (α/γ) and the coincidence γ spectrum of the soil sample. The γ pulse is delayed respect to the α pulse because an analog amplifier with a shaping constant of 1 μ s was employed to reduce the electronic noise and obtain a better resolution. The electronic noise reduction could also be achieved using digital procedures.

The procedure has the advantage of using the same geometry and chemical preparation for samples and standards reducing the necessity of corrections for quenching. Interferences by β/γ coincidences are easily avoided as β particle pulses produced in the liquid scintillator are usually smaller than α particle pulses. The use of a digital PSD system offers many other advantages, i.e., the background of the detection system, that ultimately determines the sensitivity of the procedure, can be further reduced by studying the shape and detection time of the coincident particles, excluding those pulses which do not accomplished certain conditions.

5. Conclusions

The analytical procedure of using coincidences and digital PSD analysis has a high sensitivity for the determination of very low radioactivity levels. It can be used to measure fission products by β/γ coincidence and transuranic nuclides by α/γ

coincidence. In the first case the procedure is simpler to use than conventional coincidence techniques because it uses a unique detector and electronic circuit (phoswich). In the second case, by using solid state detectors, the system is able to determine quantitatively transuranic nuclides present in environmental samples without necessity of using radiochemical separations.

References

- de Celis, B., de la Fuente, R., Willart, A., de Celis Alonso, B., 2006. Coincidence measurements in $\alpha/\beta/\gamma$ spectrometry with phoswich detectors using digital pulse shape discrimination analysis. In: ISRP10 Symposium, Coimbra, Portugal, 17–22 September 2006.
- Ely, J., Aalseth, C., McIntyre, J., 2005. Novel beta–gamma coincidence measurements using phoswich detectors. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 263 (1), 245–250.
- Knoll, G.F., 2000. *Radiation Detection and Measurement*, third ed. John Wiley and Sons, New York.
- McIntyre, J.L., Schrom, B., Aalseth, C.E., Cooper, M., Hayes, J.C., Heimbigner, T.R., Hossbach, T., Hubbard, C., Litke, K.E., Ripplinger, M., Seifert, C.E., Suarez, R., 2005. Beta–gamma coincidence counting using an yttrium aluminum perovskite and bismuth germanate phoswich scintillator. In: *Nuclear Science Symposium Conference Record, IEEE*, 23–29 October 2005, vol. 3, pp. 1301–1304.
- Warburton, W.K., Momayez, M., Hubbard-Nelson, B., Skulski, W., 2000. Digital pulse processing: new possibilities in nuclear spectroscopy. *Applied Radiation and Isotopes* 53, 913–920.
- White, T., Miller, W., 1999. A triple crystal phoswich detector with digital pulse shape discrimination for alpha/beta/gamma spectroscopy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 422, 144–147.