

INTRODUCCION

1. DETECTORES DE ESTADO SOLIDO

Las energías de los electrones de un átomo aislado poseen, de acuerdo con los postulados de la Mecánica Cuántica, valores discretos. Existe, en consecuencia, un número finito de niveles de energía tales, que sólo pueden ser ocupados por electrones cuyas energías sean iguales a las de los niveles en cuestión (los que quedan definidos por cuatro números cuánticos). Además, por el principio de exclusión de Pauli, dichos niveles son diferentes entre sí. En el caso de los gases, los átomos están tan alejados entre sí que se los puede considerar aislados y aplicarles, en consecuencia, los conceptos mencionados.

En los sólidos cristalinos, por el contrario, la distancia entre átomos es muy pequeña (del orden de algunos angstroms), por lo que su interacción es considerable: los niveles energéticos de los electrones de las capas internas prácticamente no son afectados pero, en cambio los de las capas externas se desdoblan, pues son compartidos por varios átomos.

En la figura 1 se esquematizan los niveles de energía aludidos, para los casos de gases y sólidos cristalinos.

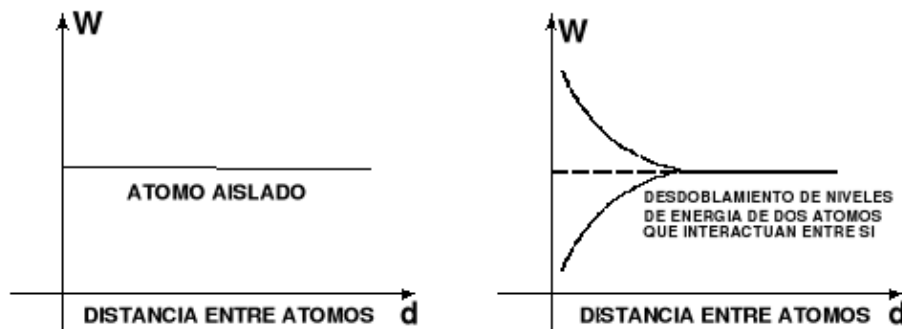


Figura 1 –Desdoblamiento de los niveles de energía

de los electrones de las capas externas

La separación entre niveles depende de la distancia interatómica d y dado que en un cristal son muchos los átomos que interactúan, un dado nivel se desdobla en varios, dando origen a lo que se denomina bandas de energía. En la figura 2 se esquematiza la formación de las bandas de energía, en función de la distancia interatómica d .

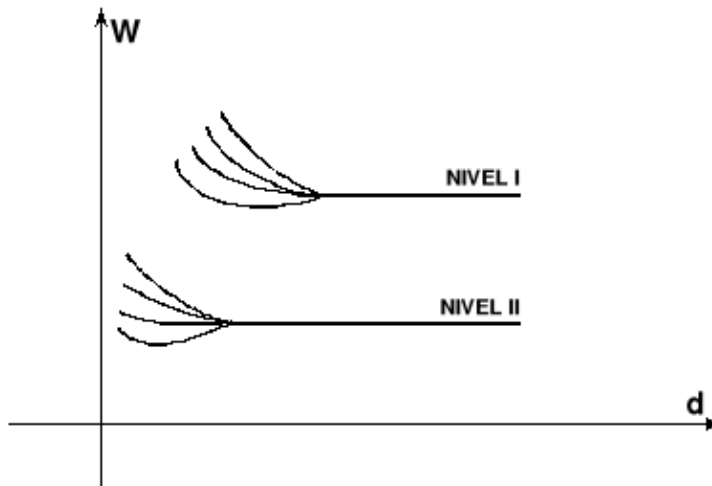


Figura 2 – Esquema de la formación de las bandas de energía en función de la distancia interatómica

Para un dado cristal, la distancia interatómica d es constante y las bandas se pueden representar de la manera indicada en la figura 3.

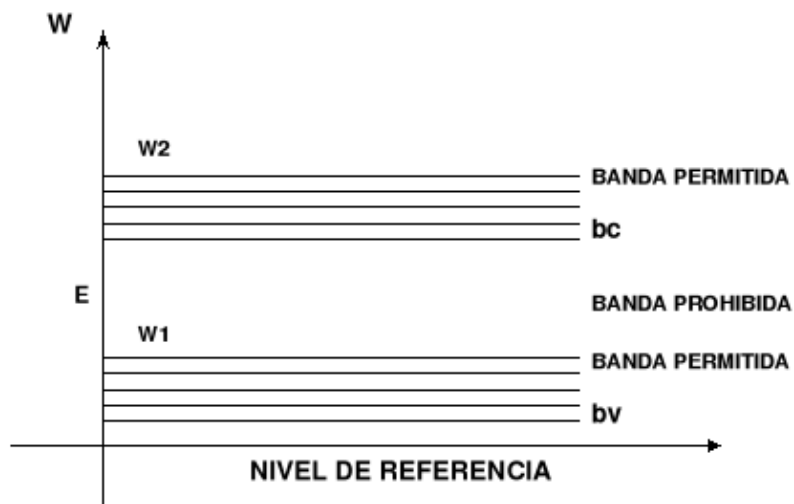


Figura 3 – Banda de conducción y banda de valencia

Entre las bandas permitidas (bp) existen las denominadas bandas prohibidas (bph) o sea, niveles de energía que los electrones de los átomos del cristal no pueden ocupar.

1.1. Semiconductores

Los semiconductores más importantes son el germanio y el silicio. Un semiconductor a 0°K tiene todas sus bandas llenas o vacías, por lo tanto se comporta como un aislador. A temperatura ambiente es considerable el número de electrones que adquieren energía suficiente como para pasar de la bv a la bc, por lo que el cristal tiene estas bandas parcialmente llenas y, en consecuencia, es capaz de conducir la corriente eléctrica.

1.2. Semiconductores intrínsecos

Los semiconductores intrínsecos son semiconductores que, desde el punto de vista cristalográfico, son absolutamente puros y sin ningún tipo de imperfección en su estructura cristalina. También se los denomina semiconductores homogéneos. En un semiconductor intrínseco la única causa de su conductividad es la temperatura. Considérese por ejemplo un cristal de Ge (ver figura 4)

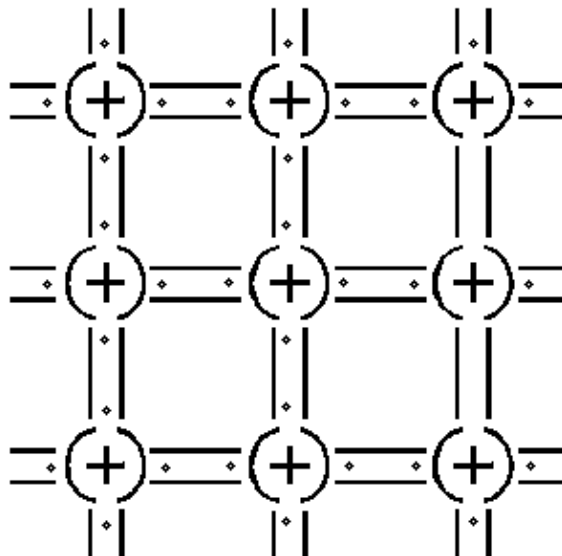


Figura 4

El Ge es tetravalente, por lo que cada átomo comparte cuatro electrones con cuatro átomos vecinos de la estructura cristalina; estos electrones están fuertemente ligados al núcleo y sus niveles están dentro de la bv. A 0° K el cristal es un aislante, pues todos los electrones de valencia llenan completamente la bv, y la bc está totalmente vacía.

A temperatura ambiente, algunos electrones de valencia adquieren suficiente energía como para pasar a la bc o sea, se transforman en electrones libres. La estructura cristalina se puede representar, en consecuencia, tal como se indica en la figura 5.

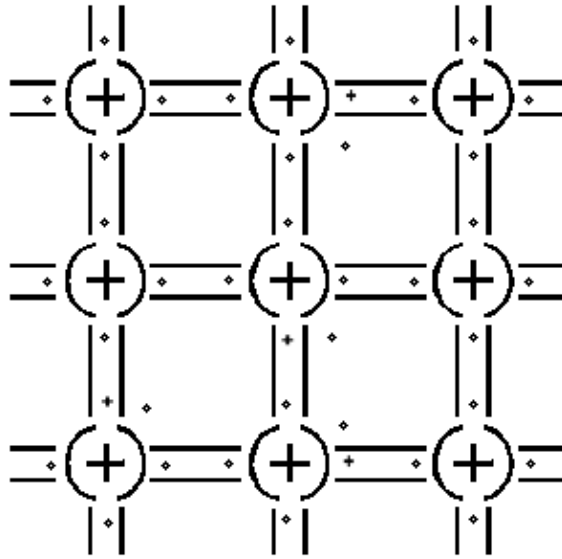


Figura 5

La ausencia de un electrón en un enlace covalente se denomina hueco y se lo puede asimilar a un portador libre de carga positiva, cuyo nivel energético está en la bv.

Nota: al perder el átomo uno de sus electrones queda ionizado positivamente con una carga $+e$ y el electrón que pasó a la bc deja un nivel vacío en la bv.

El hueco es fácilmente llenado por un electrón de valencia, pues sus niveles energéticos están muy próximos, ya que ambos están dentro de la bv; en consecuencia el hueco aparece en otro lugar del cristal y como el átomo correspondiente queda ionizado positivamente, todo ocurre como si dicho hueco fuese un portador libre de carga $+e$.

En resumen, a temperatura ambiente se tienen electrones libres y huecos libres que bajo la acción de un campo eléctrico dan lugar a una corriente eléctrica.

2. DETECTORES SEMICONDUCTORES

El principio de funcionamiento de los detectores semiconductores puede asemejarse al de la cámara de ionización, donde el medio ionizable, en vez de un gas, consiste en un semiconductor (Ge o Si) de alta resistividad. La alta resistividad se alcanza mediante la formación de zonas del material exentas de portadores libres (zonas de carga espacial), las que se logran mediante métodos que son característicos de los diversos semiconductores que a continuación se detallan.

Las ventajas de los detectores semiconductores son:

- La alta densidad del medio ionizado; esto implica una considerable eficiencia de detección por unidad de volumen efectivo del detector.
- La energía necesaria para producir un par de portadores de carga en los semiconductores es aproximadamente 10 veces menor que en los gases, y 100 veces menor que en un centellador.

- Por lo tanto, para una misma energía impartida, la cantidad de portadores de carga producidos es mucho mayor en los semiconductores que en gases o centelladores, lo cual se traduce en menores fluctuaciones estadísticas, por lo que se tiene una mejor resolución.
- La movilidad de los electrones y huecos es elevada y por otra parte, es reducido el volumen efectivo del medio detector; ello se traduce en un tiempo de recolección de cargas muy breve (del orden del nano segundo), en consecuencia es elevada la resolución en tiempo.
- Pueden obtenerse fácilmente detectores muy delgados de manera que absorban una fracción de la energía de las partículas incidentes, a fin de medir su ionización específica (dE/dx).

A su vez, los inconvenientes tecnológicos de los semiconductores son:

- Su alta conductividad en comparación con la de los gases, lo cual se traduce en ruido que tiende a enmascarar la medición de partículas ionizantes de muy baja energía.
- Los defectos en su estructura cristalina (es decir, las vacancias y dislocaciones) producen recombinación de los portadores y, por lo tanto, pérdida de algunos de ellos, lo que resta eficiencia de detección.

2.1. Detectores semiconductores hiperpuros

Si se pretendiera utilizar germanio o silicio del nivel de pureza que se emplea para la construcción de componentes electrónicos en la construcción de detectores semiconductores, sería imposible lograr zonas de carga espacial de espesor mayor que unos pocos milímetros. En consecuencia se recurrió a la compensación con litio, que permitió alcanzar zonas de carga espacial cuyo espesor puede llegar a 10 ó 15 mm, con lo cual es posible construir detectores que permiten realizar espectrometría de radiación gamma de alta energía.

La principal desventaja de este tipo de detectores reside en que la distribución de litio a temperatura ambiente resulta sumamente inestable, por lo que estos detectores se deben almacenar y operar a bajas temperaturas (normalmente la que corresponde a la de evaporación de nitrógeno líquido a presión atmosférica , 77° K).

A partir del logro de semiconductores de muy alta grado de pureza (10–6 ppm; 1010 átomos de impureza/cm³), se puede obtener germanio de resistividad específica sumamente elevada, que posibilita la obtención de zonas de carga espacial de aproximadamente 10 mm de espesor, con tensiones de polarización no demasiado elevadas.

Así se pueden obtener detectores con volúmenes activos de detección comparables a los logrados mediante la difusión de litio en la red cristalina. Estos detectores reciben la denominación de hiperpuros, ya sea de germanio o silicio, y han comenzado a ser ampliamente utilizados en espectrometría de radiación fotónica de alta resolución.

Para la obtención de semiconductores de muy alto grado de pureza debe recurrirse a técnicas sofisticadas de purificación. Aunque los costos son actualmente elevados la principal ventaja, frente a los compensados con litio, reside en que si bien deben ser operados a bajas temperaturas (a efectos de no permitir la elevación de corriente a través de los mismos) no se requiere su almacenamiento en esas condiciones ya que no existe el peligro de la redifusión del litio por efectos térmicos. No obstante el alto grado de pureza alcanzado, el semiconductor obtenido aún tiende a ser del tipo P debido a residuos de impurezas aceptoras y a la existencia de centros aceptores por defectos de la red cristalina.

La configuración básica de un detector de germanio–hiperpuro (HPGe), dado que el sustrato base es del tipo p de muy bajo nivel de dopaje, es del tipo $n^+ - p - p^+$ (la designación + corresponde a alto grado de dopaje). La zona n^+ está generalmente constituida por un depósito de litio logrado por evaporación y al cual se lo ha hecho migrar ligeramente por efecto térmico; la zona de carga espacial queda constituida en la zona de juntura $n^+ ; p$ polarizada en inversa y el contacto p^+ , por un depósito metálico adecuado (ver figura 6).

Polarizando la zona p^+ negativamente respecto de la zona n^+ con valores suficientemente altos de tensión, puede lograrse que la zona de carga espacial se extienda a todo lo largo de la región p y que los tiempos de colección sean suficientemente reducidos como para minimizar la recombinación de pares electrón–hueco que degradan la resolución.

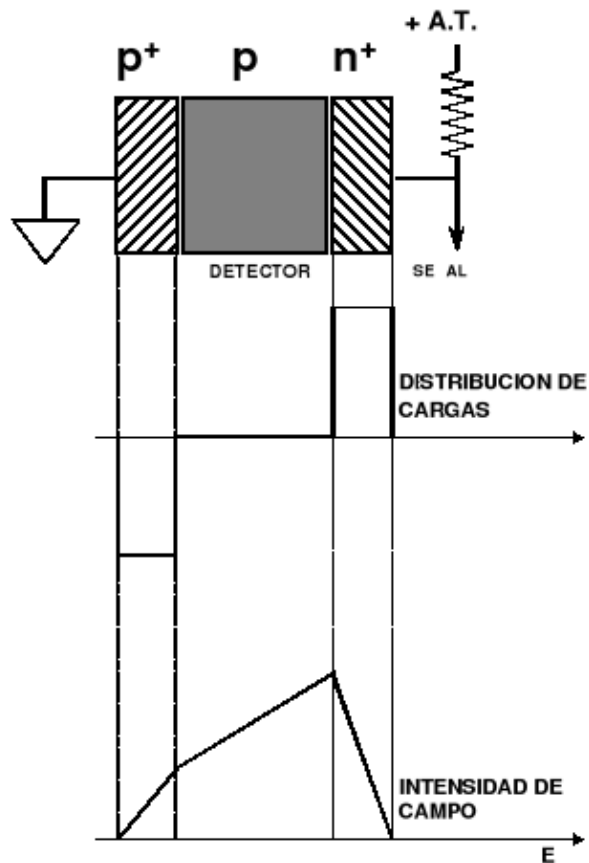


Figura 6

2.2. RESOLUCION DE UN DETECTOR

Una importante propiedad de un detector para su uso en espectrometría es la capacidad para poder discriminar partículas ionizantes de energía muy próximas entre sí. Supóngase dos detectores distintos, simultáneamente expuestos a radiación monoenergética proveniente de un cierto radionucleído. En la figura 7 se presentan las respectivas distribuciones de amplitudes de impulsos (función respuesta de cada detector).

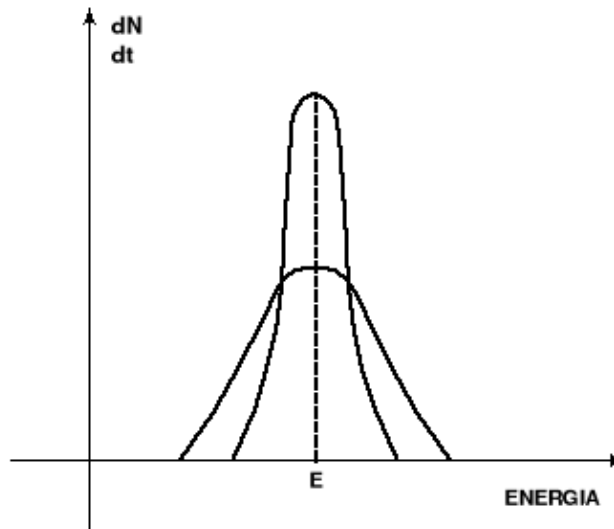


Figura 7

Aunque ambas distribuciones están centradas en el mismo valor E , el ancho de ambas difiere notablemente. Estos anchos reflejan la distinta magnitud de las fluctuaciones estadísticas de las señales producidas en cada interacción, suponiendo que por cada interacción se aportó la misma energía al detector.

La capacidad de un detector para discriminar las energías de las partículas ionizantes incidentes es tanto mayor cuanto menor sea el ancho de su función respuesta. Ello se cuantifica con un parámetro denominado resolución del detector, el cual está dado por el ancho a mitad de altura de la función distribución de amplitudes de las señales, para partículas ionizantes monoenergéticas, dividido por la energía del pico (figura 8):

$$r = \frac{\text{AMA}}{E}$$

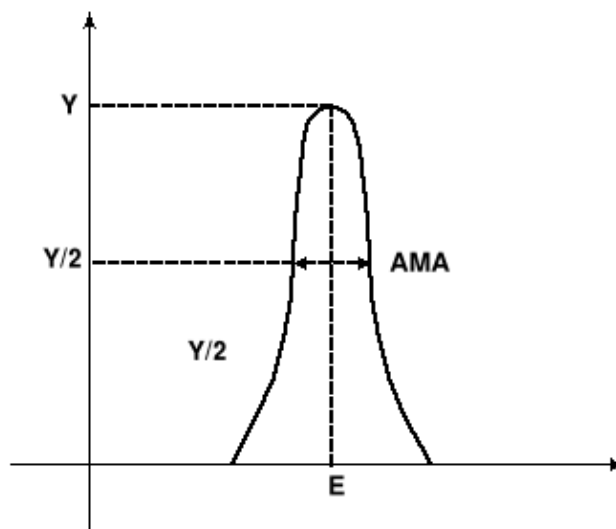


Figura 8

La resolución es un parámetro adimensional. Cuanto menor sea el valor de la resolución de un dado detector, mejor diferenciará energías de valores cercanos entre sí.

2.3. Eficiencia geométrica de detección

Si se supone una fuente radiactiva de pequeñas dimensiones (un orden de magnitud más pequeña que la distancia que la separa del detector) como un emisor isotrópico, la fracción del número total de partículas emitidas por la fuente que llegan al detector se define como eficiencia geométrica de la configuración:

$$E = \frac{S}{4 \pi d^2}$$

3. ESPECTRO DE ENERGÍAS

3.1. Concepto y factores que intervienen en su formación

En aplicaciones radioquímicas, radiofísicas o de física nuclear es necesario conocer la distribución energética (espectro de energías) de las radiaciones electromagnéticas emitidas por una muestra. Para determinar el espectro de energía de un dado emisor, se debe contar con un dispositivo detector y analizador, que entregue una respuesta proporcional a la energía de la radiación incidente. La utilización de detectores permite determinar la energía y la intensidad de la radiación incidente valiéndose de una calibración adecuada. Uno de los detectores más empleado para la identificación de radiación gamma es el detector semiconductor HP Ge.

3.2. Cálculo de eficiencia

La eficiencia de un sistema para una dada geometría de medición se define como:

$$Eficiencia = \frac{\text{cuentas netas por unidad de tiempo}}{\text{Actividad de la fuente}}$$

3.3. Límite de detección

Es la actividad mínima significativa medida y representa la menor medición digna de reportarse como mayor que cero. Para calcularla se establecen las siguientes hipótesis:

- Se supone una distribución de Poisson.
- Existe un tiempo fijo de conteo para las observaciones individuales (esto permite trabajar directamente con el número de cuentas).
- El tiempo de conteo es lo suficientemente largo como para permitir una distribución del número de cuentas que pueda aproximarse por una distribución normal de valor medio y varianza igual al número de cuentas estimado.

Al conocer con exactitud el fondo (se entiende por fondo, el conteo para la banda de integración en ausencia de la fuente).

3.4. Interferencia del fondo natural

Cuando se mide radiación gamma poco intensa, la presencia del fondo natural de radiación puede dificultar su detección. En estos casos, es indispensable conocer bien el espectro de fondo para determinar que picos lo componen. Los elementos naturales que en general interfieren pertenecen a las cadenas naturales de torio y uranio, Pb²¹², Pb²¹⁴, Bi²¹⁴, etc. Además podemos observar otros interferentes naturales como el K⁴⁰, y en algunos casos elementos artificiales como el Cs¹³⁷ y Co⁶⁰ que se encuentran en los materiales estructurales del blindaje o del propio detector.

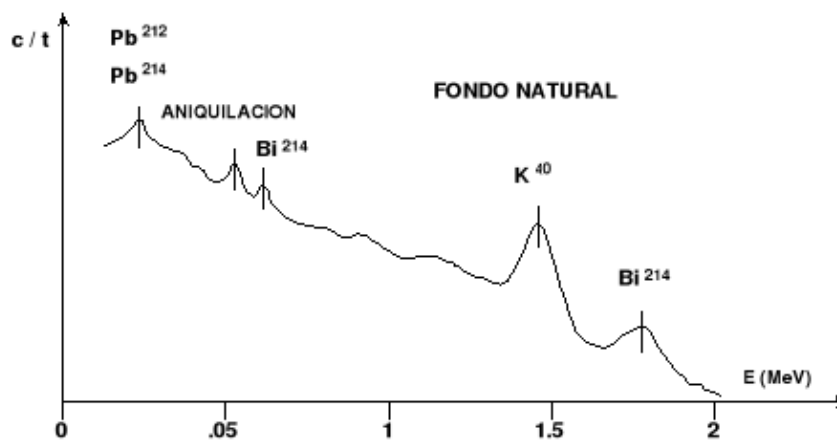


Figura 9

3.5. Espectros compuestos por más de una radiación

Es muy común registrar espectros de radiación electromagnética compuesto por varios picos. Cuando se trata de picos bien distanciados resulta fácil asociar a su posición una energía usando una relación funcional (lineal o cuadrática) establecida experimentalmente sobre la medición de fuentes conocidas y luego calcular la actividad a través del área bajo el pico.

Cuando los picos están parcialmente superpuestos esta tarea resulta más difícil dado que deben desarmarse los picos compuestos en individuales. Actualmente existen códigos computacionales que facilitan mucho esta tarea.

4. ANALIZADOR MULTICANAL

4.1 Descripción general

El principio del funcionamiento de un analizador multicanal (denominación abreviada MCA del inglés Multi-Channel Analyzer) consiste en clasificar pulsos de entrada según su amplitud en diferentes categorías, llamadas canales, y acumular separadamente el número de pulsos generados en cada canal. La figura 10 muestra un diagrama de bloques elemental de un analizador multicanal de altura de pulsos.

Tres son los bloques constitutivos a saber:

- *Selector*: permite el pasaje de las señales que satisfacen algún criterio de aceptación, para su posterior análisis.
- *Convertidor Analógico-Digital* (denominación abreviada ADC del inglés Analog to Digital Converter): clasifica las señales de entrada, emitiendo un número proporcional a su altura.
- *Acumulador multicanal*: acumula los eventos detectados, clasificados por su altura. Esto constituye la salida del sistema y puede visualizarse en forma de espectro o mediante el trazado gráfico vía algún otro equipamiento externo.

Generalmente el selector no es un instrumento separado sino que se encuentra integrado al convertidor analógico digital y muy a menudo las tres funciones se encuentran formando parte de un único instrumento.

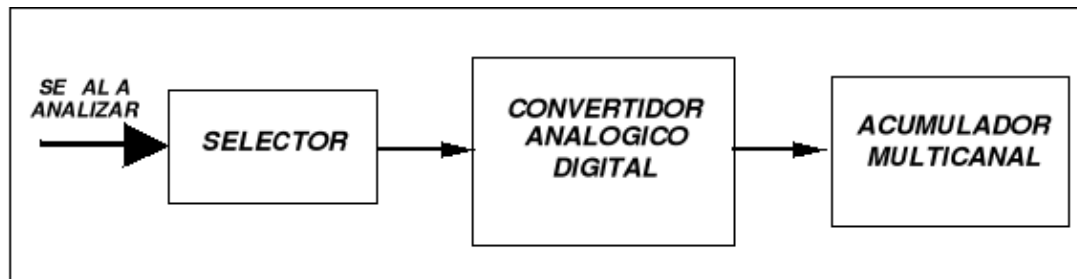


Figura 10 – Diagrama de bloques de un analizador multicanal de altura de pulsos

4.2 Selectores

El Selector está formado al menos por un conjunto analizador monocanal de altura de pulsos de entrada y una compuerta lineal, cuya función es la de permitir el pasaje de solo los pulsos de entrada cuya amplitud se encuentre dentro del rango de entrada del analizador. La importancia de esta selección reside en que los convertidores analógico-digitales suelen tener un tiempo muerto considerable, y resulta deseable que, para reducir el tiempo muerto total de una medición, no se analicen señales que no son de interés como el ruido de baja amplitud.

Unidad de Visualización

La representación gráfica de los datos acumulados, es decir el espectro es normalmente exhibido en una pantalla de rayos catódicos. Son tres los tipos básicos de visualización, a saber:

Visualización estática: Es aquella que, cuando el multicanal no esta en el modo adquisición, lee la información contenida en la memoria, canal por canal y la exhibe.

Visualización viva: Es aquella que cuando el multicanal esta en el modo adquisición, exhibe el último canal en el que se ha hecho acumulación y su contenido. Si la tasa de conteo es muy reducida la pantalla muestra solamente y en cada momento un punto. Si la tasa de conteo es lo suficientemente elevada, los canales reciben una cuenta a intervalos menores que el tiempo de persistencia de una imagen en la retina, de modo que se visualiza el espectro completo en la pantalla.

Visualización permanente: Es aquella que, este o no el multicanal en el modo adquisición, lee la información contenida en la memoria, canal por canal y la exhibe. Si se halla en el modo adquisición, esta lectura es suspendida, cuando es necesario acumular un pulso de entrada y reasumida luego de la acumulación.

La visualización permanente es la más confortable desde el punto de vista del usuario a bajas tasa de conteo. La viva ofrece un menor tiempo muerto dado que la acumulación en ningún caso debe esperar a la finalización de la exhibición de un canal. La visualización en un determinado acumulador multicanal ofrece además las siguientes posibilidades :

Escala vertical lineal o logarítmica : Es donde se representa el contenido de los distintos canales. Cuando es lineal es de rango seleccionable no así en la logarítmica utilizada a los fines de comparar partes del espectro que no serían visibles en escala lineal.

Escala horizontal línea: Es donde se representan los sucesivos canales. Su rango es seleccionable de forma de expandir el espectro y proveer mejor observación.

Regiones de interés: Definidas para grupos de canales adyacentes, pudiendo ser seleccionadas e intensificadas a los fines de resaltar su visualización.

Comparación: Definida sobre los contenidos de dos sectores de memoria a los fines de ser visualizados simultáneamente.

Unidad de control

La unidad de control regula el funcionamiento de todo el conjunto de acuerdo al modo seleccionado por el usuario y a la fase de operación en que se encuentre ya sea adquisición, salida o visualización. El acceso a esta unidad lo constituyen una serie de llaves y teclas distribuidas sobre un tablero en el frente de la misma. La unidad de control suele, muchas veces, incluir automatismos que permiten al analizador pasar por las distintas fases operativas en forma secuencial o cíclica. En este caso los tiempos asignados a cada fase como los de rotación son fijados por el usuario. Los analizadores suelen incluir en la unidad de control, un reloj para limitar la duración de una medición a un tiempo predeterminado. Estas mediciones se denominan en tiempo reloj y de no mediar una adecuada corrección por tiempo muerto, las cuentas acumuladas en el analizador adolecerán de diferencias por defecto. Esta pérdidas pueden ser compensadas de dos formas distintas dependiendo de la constancia de la tasa de conteo a lo largo de la medición. Si la tasa de conteo permanece constante a lo largo de la medición se utiliza el método denominado corrección por tiempo vivo, caso contrario se utiliza un instrumento auxiliar al analizador denominado módulo para conteo sin pérdidas que permite corregir los tiempos muertos aun en el caso de tasa de conteo variable. Su funcionamiento y principios se especifican más adelante.

Unidad de Análisis

A los fines de facilitar el procesamiento de los datos acumulados los multicanales incorporan funciones como :

Alisado de espectros: A los fines de suavizar los espectros que presentan dispersiones estadísticas importantes en el número de cuentas de cada canal, se realiza un promedio ponderado del contenido de cada canal con el de los canales próximos.

Localización de picos: Se realiza el barrido del espectro a los fines de localizar e identificar picos.

Análisis de picos: Se determina la ubicación del centro del pico, su energía, dispersión, FWHM (ancho a mitad de altura) y su área neta.

Calibración de energía: Se calibra el eje de abscisas en energías suponiendo una buena linealidad integral del sistema, asignando la energía correspondiente a dos canales en los que se encuentren sendos picos conocidos del espectro. Por interpolación lineal el usuario determina la energía correspondiente a cualquier otro canal. Existen algunos analizadores que toman en cuenta la presencia de alinealidades, en cuyo caso la determinación anterior se realiza por interpolación polinómica lo que exige la asignación de energía a más de dos canales.

Identificación de radionucleidos : Se identifica un radionucleído emisor de un pico determinado, consultando una tabla interna con los valores de energía de los picos de los espectros de los radionucleidos posibles.

Stripping : Se sustrae de un espectro determinado otro de referencia. Generalmente esta facilidad es utilizada para descontar el espectro debido al fondo como así también para descomponer el espectro.

Funcionamiento

En el punto Unidad de Interfase se describen los diferentes modos de operación de un acumulador multicanal. Los más frecuentes son los modos correspondientes a análisis de altura de pulsos y multiescala, que son los que se desarrollaran a continuación.

4.4 Analizador de altura de pulsos

En la figura 39 se observa un diagrama de bloques de un acumulador multicanal. Para el caso de su funcionamiento como analizador de altura de pulsos, el acumulador multicanal debe conectarse a un convertidor a través de su correspondiente entrada. Inicialmente el contenido de todos los canales es cero. Luego de efectuada cada conversión, el convertidor informa al acumulador multicanal la finalización de la misma. Este toma del convertidor el resultado de la conversión que es el canal correspondiente a la amplitud del pulso de entrada, lee el contenido de dicho canal, obteniendo su número de cuentas hasta ese momento. Actualiza dicho contenido, incrementándolo en 1 y escribe el nuevo contenido en ese mismo canal. Este proceso se repite para el pulso siguiente. Así vía las sucesivas conversiones realizadas por el convertidor analógico-digital, seguidas cada una de ellas por el proceso que realiza el acumulador multicanal :

leer–sumar 1–escribir

en el canal seleccionado, se va acumulando el espectro de amplitudes. El canal 0 que debiera almacenar pulsos de amplitud nula es utilizado para otros fines, como por ejemplo para registrar el tiempo que lleva realizándose una medición.

Multiescala

En este modo de funcionamiento el analizador multicanal se comporta como un conjunto de contadores que van contando secuencialmente los pulsos de entrada durante un cierto tiempo prefijado por un generador de pulsos denominado reloj, en muchos casos incorporado al analizador como puede observarse en la figura 39, otras veces externo. Los distintos canales de memoria deben estar todos en cero al comenzar la medición. Prefijado el periodo de conteo para cada canal, los pulsos de entrada son contados y acumulados en el canal 0 de la memoria. Reiniciado el conteo de los pulsos de entrada durante el correspondiente periodo de tiempo prefijado, los mismos son acumulados en el canal 1 de la memoria.