

CNEA-AC 61/85

REPUBLICA ARGENTINA
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
Dependiente de la Presidencia de la Nación
GERENCIA DE PROTECCION RADIOLOGICA Y SEGURIDAD

Curso Protección Radiológica y Seguridad Nuclear

Nivel Técnico

TEMA: ELEMENTOS DE INSTRUMENTACION NUCLEAR

Ing. Roberto' SEGADO

Buenos Aires

1985

ELEMENTOS DE INSTRUMENTACION NUCLEAR

Apuntes recopilados por Ing. Roberto SEGADO

1.- PROCESAMIENTO ANALOGICO DE LA INFORMACION: Factores que afectan la resolución en espectroscopía.

Los detectores empleados en espectroscopía entregan señales eléctricas que son, generalmente, pulsos de corriente. Dado que la carga contenida por pulso es proporcional a la energía depositada por la partícula ionizante en el medio detector resulta de interés, por razones tecnológicas, disponer de pulsos de tensión con amplitud proporcional a la carga (o sea, a la energía).

Los pulsos así obtenidos pueden ser procesados posteriormente por un sistema de instrumentación adecuado (analizador mono o multicanal) a fin de obtener el espectro de energía de la muestra en cuestión. Si ésta fuera mono-energética, el resultado que se obtendría se grafica en la figura Nro. 1.

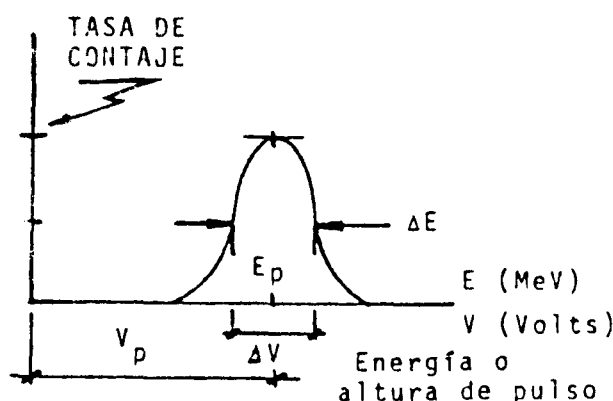


FIG.1: Concepto de resolución de picos.

El pico no es una línea, como debería serlo, sino acampanado debido a imperfecciones en el proceso de detección y en el sistema de análisis de pulsos. En estas condiciones se define la "resolución" como una figura de mérito del conjunto detector-sistema de instrumentación, que puede verse como su aptitud para separar (resolver) dos energías muy próximas entre sí.

Matemáticamente, la resolución se define en base a la siguiente expresión, (ver figura Nro 1):

$$r \% = \frac{\Delta E}{E_p} 100 = \frac{\Delta V}{V_p} 100 \quad (1)$$

donde:

ΔE : ancho del pico a mitad de la altura (FWHM, "FULL WIDTH HALF MAXIMUM")

En un sistema de detección ideal $r = 0$ y el pico es una línea. En un sistema real, la resolución toma valores mayores que cero y cuanto mayor es, más contribuye el sistema a degradar (acampanar) el pico, con lo cual menos se pueden discernir energías próximas entre sí.

NOTA: en espectroscopía de alta resolución se define además el ancho a un décimo de altura (FWTM)

Las causas de degradación de la resolución son básicamente cuatro a saber:

- 1) Naturaleza estadística de la interacción de la radiación con la materia:
Aún en el caso de un haz mono-energético, el número de pares de iones producidos en la interacción de cada una de ellas no es exactamente el mismo; además, no todas las partículas transfieren igual monto de energía al medio detector. En consecuencia las fluctuaciones estadísticas a nivel de la etapa de detección constituyen la primera causa de degradación de la resolución.
- 2) Apilamiento de pulsos:
Dada la naturaleza aleatoria de los eventos, existe la probabilidad de que algunos de ellos se den en coincidencia de tiempo o muy próximos entre sí.

En consecuencia pueden superponerse, total o parcialmente, los pulsos de tensión obtenidos, tal como se detalla en la figura Nro. 2

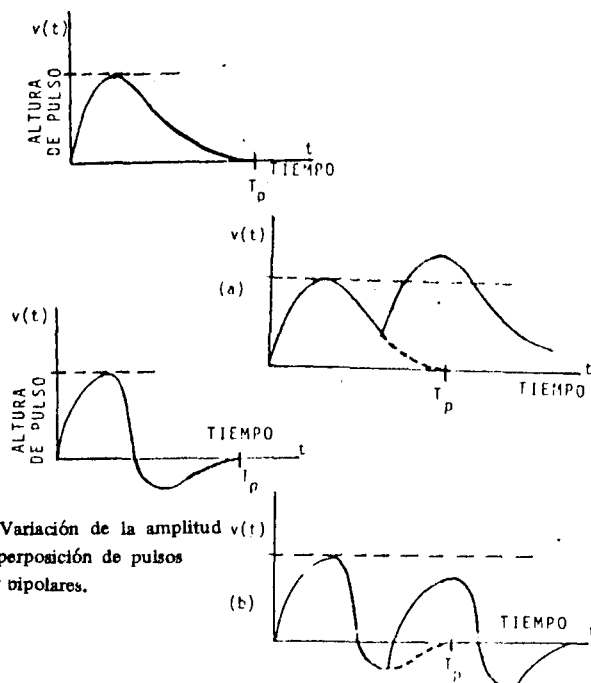


FIG.2: Variación de la amplitud $v(t)$ por superposición de pulsos mono y bipolares.

En a) se da el caso de un pulso unipolar, correspondiente a un evento aislado; si se produce un segundo pulso antes que el primero haya finalizado se "monta" sobre su flanco de decaimiento, dando lugar a uno de amplitud aparentemente mayor. En b) se tiene un caso similar para un pulso bipolar con el resultado de un pulso de amplitud aparentemente menor. En estas condiciones, la resolución global se degrada pues se tendrían picos tal como los indicados en la figura Nro. 3.

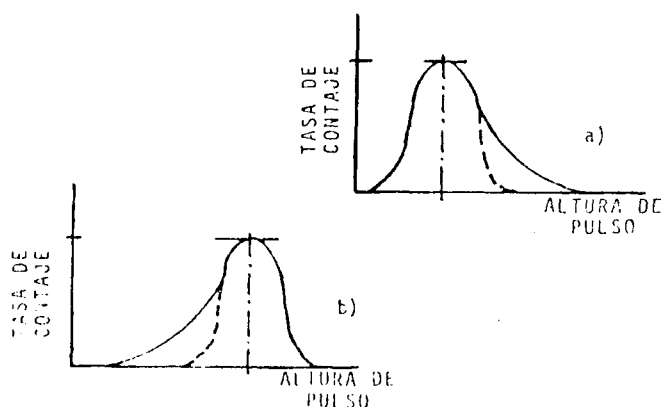


FIG.3 Degradación de la resolución por superposición de pulsos

A baja actividad, el espaciado medio entre pulsos es grande con lo cual el apilamiento es prácticamente despreciable. Para actividades elevadas, el efecto del apilamiento es considerable y en espectrometría de alta resolución se impone su minimización mediante técnicas electrónicas (restauradores de línea de base, amplificadores anti-apilamiento, etc.)

NOTA: el apilamiento es función de la actividad de la muestra y de la duración de los pulsos de tensión, ver "Conformación de Pulsos".

2.- PREAMPLIFICADOR Y AMPLIFICADOR PRINCIPAL. CONFORMACION DE PULSOS

La amplitud de los pulsos de tensión entregados por los detectores es, por lo general, de valor inferior al mínimo que pueden aceptar los sistemas de instrumentación asociados (tales como un analizador multicanal). Se impone, en consecuencia, amplificar linealmente tales pulsos.

Las características más importantes de un amplificador lineal para espectroscopía son las siguientes:

- amplificación elevada.
- amplificación constante para el rango de amplitudes a la entrada.
- ancho de banda adecuado.
- tiempo de respuesta breve.
- estabilidad de la amplificación en tiempo y temperatura.
- bajo ruido.
- rápida recuperación de saturación.
- impedancia de entrada adecuada.

Según el detector empleado y/o la aplicación, algunas características pueden ser más importantes que otras; además, no es posible disponer de un único amplificador que reúna todos los requisitos mencionados.

En consecuencia el criterio de diseño es emplear un preamplificador, específico para cada tipo de detector, y un amplificador de uso general, independiente y conectado en serie.

En general el detector se ubica alejado del sistema de instrumentación asociado por lo que el cable de interconexión representa una capacidad parásita. Por lo tanto, para no degradar la resolución, se instala el preamplificador contiguo al detector y su diseño debe contemplar, en consecuencia, alta impedancia de entrada y baja de salida a fin de que el ruido no enmascare la señal. Una forma de cuantificar ello es con la denominada "relación señal/ruido" que se define en base a la siguiente expresión

$$n = \frac{\text{Potencia de señal}}{\text{Potencia de ruido}} \quad (\text{en un dado punto de interés})$$

2.1.- Preamplificadores:

De acuerdo a lo ya visto, un preamplificador es un dispositivo diseñado para aceptar la señal proveniente de un detector y amplificarla con mínima distorsión y máxima relación señal/ruido.

Los preamplificadores se clasifican según su principio de diseño, en tres tipos básicos,

- sensibles a tensión o sea, la tensión de salida es proporcional a la tensión de entrada.
- sensibles a carga o sea, la tensión de salida es proporcional a la carga de entrada.
- sensibles a corriente o sea, la tensión de salida es proporcional a la corriente de entrada.

En espectroscopía nuclear los preamplificadores sensibles a tensión no son muy empleados pues su amplificación es función de la capacidad del detector, la cual puede o no ser constante (caso de los detectores semiconductores). En estas condiciones la estabilidad de la amplificación es inaceptable (al variar ésta varía en consecuencia la amplitud de los pulsos de tensión en su salida y se degrada por lo tanto la resolución).

Este problema se soluciona empleando preamplificadores que sean sensibles no a la tensión que entrega el detector sino a la carga eléctrica contenida en cada pulso, la cual es

proporcional a la energía de la partícula ionizante.

En ciertos casos se emplean preamplificadores sensibles a corriente, por ejemplo para enviar pulsos rápidos provenientes de un tubo foto-multiplicador en cables de longitud considerable con elevada capacidad asociada.

El rango de tensión de salida de los preamplificadores es generalmente de 0 a 1 V.

2.2.- Amplificador principal:

Su función es amplificar los pulsos de tensión entregados por el preamplificador al valor adecuado para el sistema de instrumentación posterior (por ejemplo, analizador mono o multicanal).

Además los pulsos de salida se conforman, a fin de reducir la relación señal/ruido, y filtran para reducir el tiempo de respuesta. El rango de tensión de salida es generalmente de 0 a 10 V.

3.- CONFORMACION DE PULSOS

La conformación de pulsos tiene por objeto reducir a un mínimo las causas que contribuyen a degradar la resolución (naturaleza estadística de la interacción de la radiación con la materia, apilamiento, ruido y déficit balístico). A ellas deben sumarse la alinealidad no-nula introducida por el preamplificador y amplificador principal y que contribuye a empeorar la relación señal/ruido.

De las causas mencionadas, las más importantes son apilamiento y ruido; para tasas de conteo mayores que 100 c/s, los métodos electrónicos para reducir el apilamiento están, generalmente, en conflicto con los que optimizan la relación señal/ruido y por lo tanto se adopta una solución de compromiso de acuerdo a cada caso particular.

4.- METODOS DE CONFORMACION DE PULSOS

Los métodos de conformación más empleados en espectrometría nuclear son básica-

mente dos:

- conformación en el preamplificador.
- conformación con redes CR y RC.

- a) Conformación en el preamplificador:
Los pulsos de salida típicos de un preamplificador de espectrometría son un rápido tiempo de crecimiento (algunos nano-segundos) y de un tiempo de decaimiento relativamente lento (del orden de decenas a centenas de micro-segundos). Por lo tanto si la actividad a medir es tal que se produce un apilamiento considerable, ver figura Nro. 4 se tienen fluctuaciones de la línea de base y en consecuencia, de la amplitud de los pulsos.

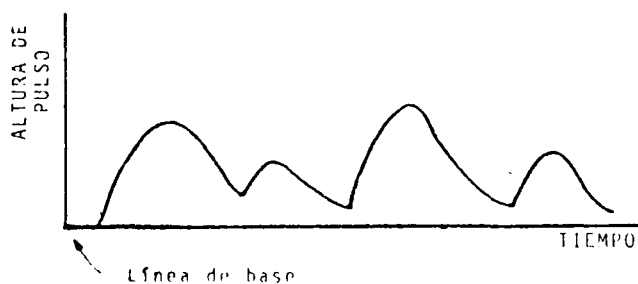


FIG.4: Fluctuaciones de la línea de base.

Si además la energía de las partículas ionizantes es elevada, las amplitudes de los pulsos también lo serán y el preamplificador puede saturarse, con lo que deja de ser lineal. En estas condiciones, el criterio es reducir por lo tanto la amplificación pero ello tiende a empeorar la relación señal/ruido (y se tiene así el conflicto mencionado)

- b) Compensación CR - RC:
Los circuitos de conformación con mallas CR - RC operan en el amplificador principal actuando sobre las constantes de tiempo de los flancos de crecimiento ("RISE-TIME") y decrecimiento ("FALL-TIME") del pulso de tensión, ver figura Nro. 5

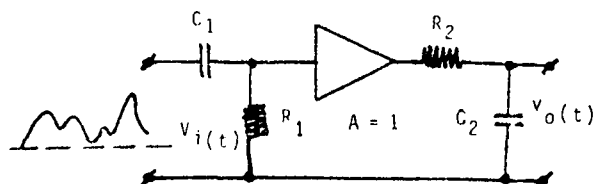


FIG.5: Compensación CR - RC

La malla $C_1 R_1$ funciona como derivadora y actúa sobre el flanco descendente del pulso de entrada, lo cual incide sobre el apilamiento. El triángulo indica un amplificador de ganancia unitaria cuya función es aislar la malla $C_1 R_1$ de la $C_2 R_2$ pues tiene alta impedancia de entrada y baja salida. Todo ocurre como si esta malla fuera excitada por un generador de tensión con lo cual no hay efectos de acoplamiento incorrecto.

La malla $R_2 C_2$ funciona como integradora y actúa sobre el flanco ascendente del pulso de entrada. Limita las componentes de alta frecuencia y disminuye en consecuencia el ruido. Como la malla $C_1 R_1$ actúa sobre las componentes de baja frecuencia, el conjunto derivador-integrador constituye un filtro pasa-banda con el cual se minimiza el apilamiento y mejora la relación señal/ruido.

Si se igualan las constantes de tiempo, $R_1 C_1 = R_2 C_2$, puede demostrarse que se optimizan los resultados para gran número de aplicaciones.

En la figura Nro. 6 se presenta un esquema simplificado del conjunto detector, preamplificador, conformador y amplificador principal.

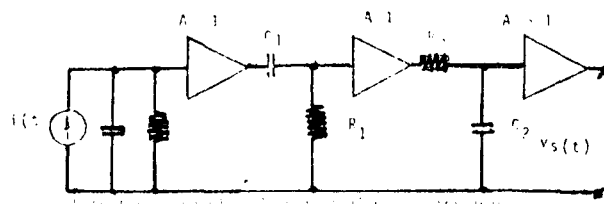


FIG.6 Esquema simplificado del conjunto detector, preamplificador y amplificador principal de conformación CR - RC.

5.- ANALIZADOR MONOCANAL

5.1.- Introducción:

Los pulsos de tensión a la salida del amplificador principal tienen una distribución de amplitudes proporcional al espectro de energía de las partículas ionizantes que interactúan con el detector. En consecuencia, para relevar el espectro en cuestión bastaría con analizar la distribución de amplitudes.

Pero es tecnológicamente imposible analizar una distribución continua de tensiones por lo cual se la analiza de manera discreta. Para ello se divide al rango de tensiones en bandas de ancho ΔV arbitrario, denominadas "canales", cuyo análisis permite obtener un histograma representativo del espectro de energía.

Si se conoce (a través de una calibración adecuada) la proporcionalidad entre energía y tensión, a cada ΔV le corresponderá un ΔE y para un cierto tiempo de conteo, puede obtenerse (por medición) el número de pulsos cuyo valor pico de amplitud quede comprendido en un dado ΔV o sea, la actividad para ese ΔE . Aplicando sucesivamente el procedimiento descrito para cada uno de los canales en que se dividió al espectro puede obtenerse el histograma buscado y cuanto menor sea el ancho de cada canal, mayor será el grado de aproximación entre el histograma y el espectro de energía.

En la figura Nro. 7 se da un ejemplo de espectro, del histograma y el concepto asociado de canal.

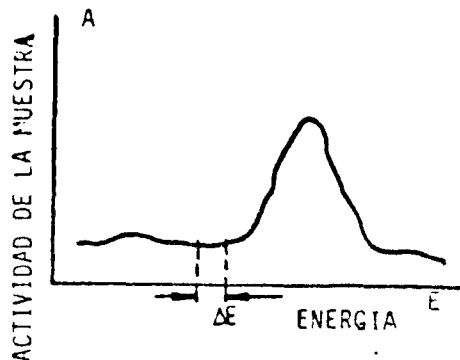
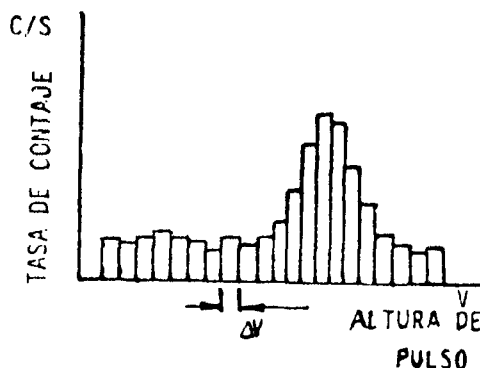


FIGURA 7



5.2.- Principio de funcionamiento:

El histograma representativo del espectro de energía de una muestra puede obtenerse con un analizador monocanal.

Con él es posible efectuar el conteo, durante un cierto tiempo prefijado, de los pulsos cuyo valor pico de amplitud quede comprendido en un canal de ancho ΔV prefijable, para un cierto número de canales prefijable por el operador. Cada canal debe ser analizado para el mismo tiempo de conteo y el "barrido" de los mismos es, por lo tanto, secuencial y debe ser efectuado manualmente por el operador.

5.3.- Diagrama en bloques:

El diagrama de bloques de un analizador monocanal se puede ver en la figura Nro. 8

El discriminador recibe los pulsos de salida del amplificador principal y su funcionamiento es tal que genera un pulso rectangular (conformado digitalmente) toda vez que el pulso nuclear (conformado analógicamente) de entrada es de amplitud tal que su valor pico queda comprendido entre los dos niveles V_{inf} y V_{sup} prefijables, ver figura Nro. 9

Todo pulso nuclear cuya amplitud sea menor que el nivel V_{inf} o mayor que V_{sup} será rechazado por el discriminador. Los valores de los niveles V_{inf} y V_{sup} son prefijables por el ope-

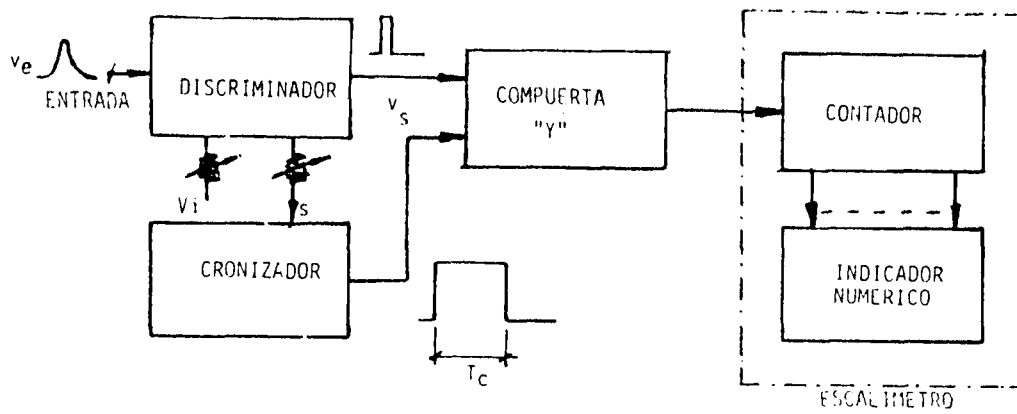


FIGURA 8
Diagrama en bloques de un analizador monocanal

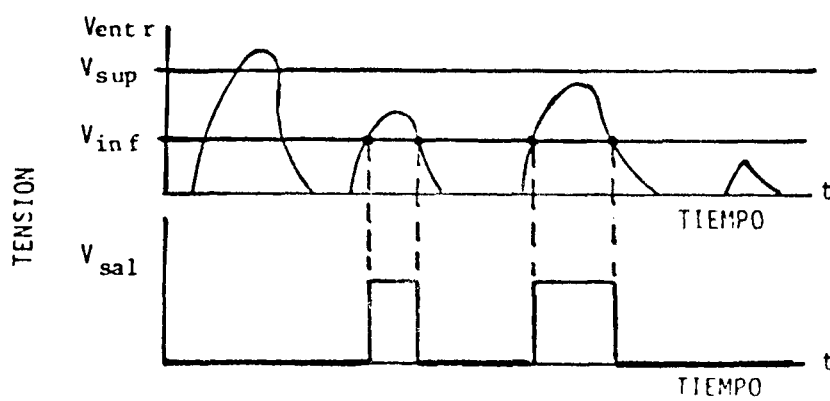


FIGURA 9
Principios de funcionamiento del discriminador

rador y ajustados en unidades de tensión o de energía; la diferencia ($V_{sup} - V_{inf}$) constituirá el ancho del canal y el barrido del espectro podrá obtenerse variando manual y sucesivamente ambos niveles, manteniendo constante su diferencia.

Los pulsos de salida del discriminador se envían a una de las entradas de una compuerta electrónica "Y" cuya segunda entrada es controlada por un cronizador, que permite prefiar el tiempo de conteje para cada canal. El funcionamiento de la compuerta es tal que los pulsos del discriminador se transferirán a su salida sólo cuando el cronizador así lo habilite (o sea, durante el tiempo prefijado), ver figura Nro. 10

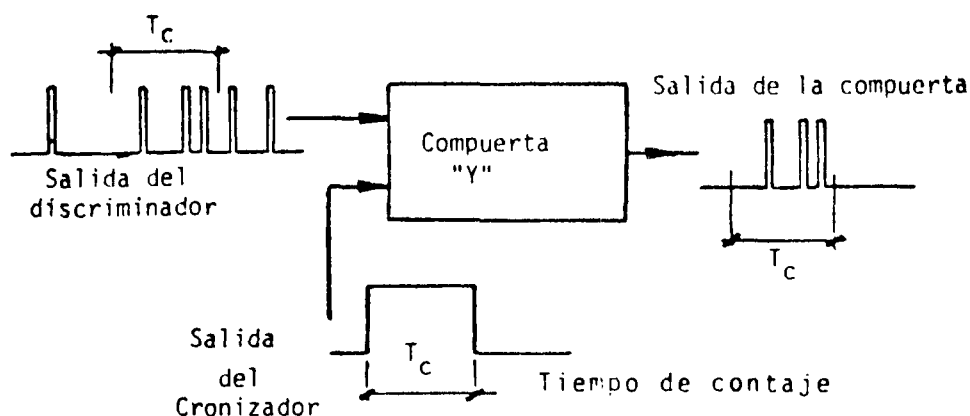


FIG.10: Control del tiempo de conteje por una compuerta "Y".

Los pulsos (conformados digitalmente) entregados por la compuerta a su salida (durante el tiempo de conteje) se almacenan en un contador (registro) cuyo contenido se visualiza en código decimal por medio de un indicador numérico (display).

Al conjunto contador - indicador numérico se lo denomina generalmente "escalímetro" y su función es presentar el número de pulsos que, durante el tiempo de conteje, han tenido una amplitud pico mayor que el nivel inferior del discriminador, pero menor que el superior (o sea, para cada canal de energía prefijado puede conocerse por lo tanto su actividad y construir

así, canal por canal, el histograma que representará su espectro).

5.4.- Circuitos de anticoincidencia:

Son circuitos que generan un pulso conformado de salida cuando sólo hay pulsos en una de sus entradas, elegida arbitrariamente, y no en la otra.

Su principal aplicación se da en las mediciones de partículas ionizantes de baja energía a baja actividad (por ejemplo, en el monitoreo de contaminaciones internas con elementos transuránicos por medición externa de la radiación fotónica emitida, en mediciones de contaminaciones ambientales, etc.)

5.5.- Otras características de los circuitos de coincidencia:

- Tiempo muerto:

Tiempo durante el cual una de las entradas de un circuito de coincidencia queda bloqueada luego de haber recibido un pulso de señal.

El tiempo muerto limita la tasa de conteje por entrada.

5.6.- Amplificador ventana:

Los amplificadores "ventana" posibilitan el análisis lineal de la porción de un pulso que supera un dado nivel de discriminación, sin tener en cuenta el resto del pulso. De esta manera es posible expandir zonas de interés de un espectro, por ejemplo un pico en particular (ver "Analizador Multicanal").

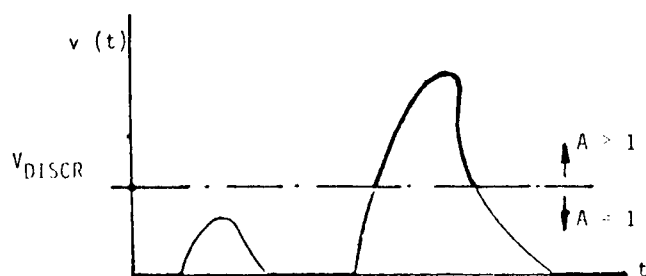


FIG.11. Principio de funcionamiento de un amplificador ventana

6.- ANALIZADORES MULTICANAL

6.1.- Introducción:

Las aplicaciones de los analizadores monocanal son limitadas. En efecto, si se desea relevar con un monocanal la distribución espectral de energías de una dada muestra se impone un proceso reiterativo de acumular y contar, canal por canal, los pulsos correspondientes para el número total de canales seleccionados manualmente por el operador. En consecuencia, durante el tiempo de conteo de cada canal se ignora los demás pulsos provistos por el detector lo cual implica una pérdida de información.

A su vez, si la actividad es débil el tiempo de conteo por canal debe ser suficientemente grande como para tener una precisión estadística razonable, con lo cual el tiempo total será de una duración excesiva. En estas condiciones no siempre puede asegurarse una adecuada

estabilidad de los niveles de discriminación, lo cual constituye una importante fuente de error.

Si la actividad no fuera constante en el tiempo de medición habría que medir, simultánea y continuamente con otro detector, la actividad relativa de la muestra y normalizar respecto a dicha actividad, las mediciones obtenidas para cada canal. Además el tiempo de medición de cada canal debería ir en aumento con el transcurso de la medición para compensar así la disminución de actividad, a fin de obtener una precisión estadística suficientemente constante.

Se concluye así lo engorroso de la operación y la dificultad de obtener resultados aceptables en estas condiciones y surge así la necesidad de analizar simultáneamente los pulsos entregados por el detector para todos los canales en que se divide el espectro. Para ello se emplean los analizadores multicanal.

6.2.- Modos de análisis de los analizadores multicanal:

El analizador multicanal puede funcionar en dos modos de operación diferentes, a saber:

- Como analizador de altura de pulsos ("pulse-height-analysis mode", PHA)
- Como multiescalímetro ("multichannel-scaling mode" MCS)

En el modo PHA el espectro se obtiene midiendo la amplitud de cada pulso nuclear individualizando así el canal correspondiente y acumulando en él la cuenta pertinente. El número total de cuentas acumuladas en un dado canal será igual al número de pulsos nucleares procesados, cuyas amplitudes corresponden al canal en cuestión. El modo PHA se emplea en espectrometría de energía.

En el modo MCS los canales actúan como una secuencia de contadores, acumulando cada canal durante un período pre-determinado llamado "tiempo de vida". Al finalizar el "tiempo de vida" de un canal, la operación

de conteo pasa automática y periódicamente al siguiente canal durante otro "tiempo de vida" y así sucesivamente, obteniéndose finalmente un histograma de las cuentas acumuladas en cada canal durante el tiempo de vida, según una secuencia dada prefijable. El modo MCS es de gran utilidad en aquellas aplicaciones donde interesa el análisis de la tasa de conteo en función del tiempo (por ejemplo, en la medición de la tasa de decaimiento de isótopos de vida corta).

6.3.- Funcionamiento y operación de los analizadores multicanal:

— Principio de funcionamiento:

El funcionamiento de un analizador multicanal se basa en los siguientes pasos fundamentales:

- 1) El rango de energía del espectro se divide en cierto número de canales.
- 2) Cada pulso nuclear que entrega el detector lleva en sí tres informaciones básicas:
 - a) su amplitud proporcional a la energía transferida por la partícula al detector.
 - b) la existencia del pulso en sí, lo cual indica que ha tenido lugar una interacción en el detector.
 - c) el instante en que tal interacción tuvo lugar.
- 3) Con la primera de las informaciones se ubica el canal correspondiente; con la segunda se adiciona una cuenta al contenido previo de ese canal. La tercera información se emplea en análisis de tiempos (por ejemplo, coincidencias beta-gamma).
Estas operaciones, individualización de un dado canal y adición de una cuenta a su contenido previo, son un proceso repetitivo y automático para cada pulso nuclear que arribe a la entrada del analizador. Dado que

en el proceso de análisis y clasificación de un dado pulso no se puede evaluar simultáneamente a otros pulsos, aquellos que arriben en el mismo tiempo que demora su análisis y clasificación no serán tenidos en cuenta; este tiempo, denominado "tiempo muerto", debe ser lo más breve posible a fin de minimizar la pérdida de información.

- 4) Finalizado el tiempo de análisis y clasificación, o sea de conteo, se presenta la información acumulada generalmente en forma de histograma.

NOTA: La secuencia descrita es en esencia el funcionamiento automático de un analizador multicanal en el modo PHA.

6.4.- Diagrama en Bloques: (Ver figura Nro.12)

En base a la secuencia de la figura se describirá primeramente la función de cada bloque.

6.4.1.- Conversor analógico - digital:

El conversor analógico digital (CAD) tiene por objeto transformar la amplitud de un pulso nuclear en un número proporcional de pulsos conformados digitalmente (rectangulares); por lo tanto, para pulsos nucleares de distintas amplitudes se tendrán distintos trenes de pulsos rectangulares y se digitaliza así la información analógica que contiene dicho pulso (o sea, su amplitud). Como a su vez la amplitud del pulso nuclear es proporcional a la energía de la partícula, con el CAD se obtiene una información digital de la energía de la radiación.

El esquema básico de un CAD se detalla en la figura Nro.13

Consta de un circuito de conversión tal que al recibir en su entrada un pulso nuclear de amplitud V_p , genera a la salida un pulso rectangular conformado digitalmente (rectangular) de ancho T_c , siendo lineal la relación entre la amplitud del pulso de entrada y el ancho del de salida.

La salida del circuito de conversión se envía

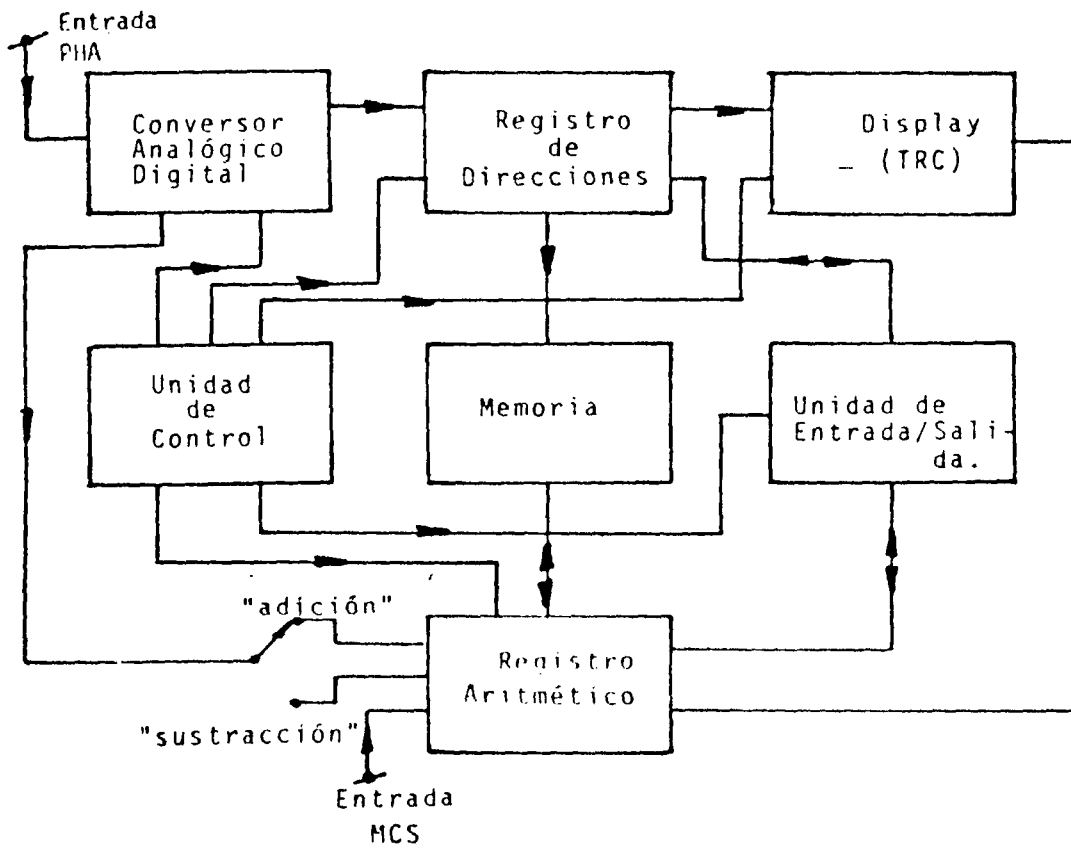


FIGURA 12
Diagrama en bloques del analizador multicanal

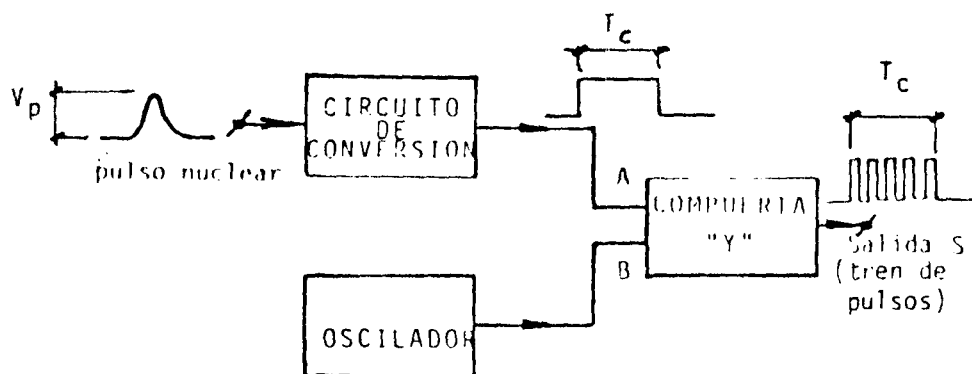


FIGURA 13
Diagrama en bloques de un CAD"

a una de las entradas de una compuerta lógica "Y", que recibe en su segunda entrada los pulsos rectangulares provenientes de un oscilador periódico. El funcionamiento de la compuerta "Y" es tal que esos pulsos se transfieren a su salida sólo durante el ancho T_c del pulso de conversión.

En consecuencia, el número N de pulsos que se transfieren a la salida S de la compuerta es función de T_c , que a su vez lo es de V_p o sea de la energía E transferida por la partícula ionizante al detector.

En conclusión:

$$\begin{aligned} V_p &= k_1 \cdot E \\ I_c &= k_2 \cdot V_p \\ N &= k_3 \cdot I_c = N = k \cdot E \end{aligned} \quad (1)$$

Se logra así obtener un número de pulsos proporcional a la energía de la partícula. Al arribar al CAD pulsos nucleares de distintas alturas se tendrán en consecuencia trenes de distinto número de pulsos rectangulares, lográndose una medida digital de las energías de las partículas que interactúan con el detector.

Los CAD comerciales tienen generalmente incorporados circuitos adicionales que aseguran un funcionamiento adecuado, tales como:

- Bloqueo de la entrada, posteriormente al arribo de un pulso nuclear, y durante el tiempo de su conversión.
- el número de pulsos rectangulares de cada tren generado en la salida del CAD es entero.

restauración de la línea de base, etc.

6.4.2.- Memoria:

La memoria de un analizador multicanal es un dispositivo de almacenamiento de datos formado por un conjunto de celdas, cada una de las cuales corresponde a un canal. Por lo tanto habrá tantas celdas como número de canales en que se divida al espectro y en cada una de ellas se almacenará el número de cuentas que correspondan a ese canal durante el tiempo de medición.

En consecuencia, el contenido de la memoria dispone de la información necesaria para relevar el espectro buscado pues individualizando una celda se individualiza un canal y al número de cuentas almacenadas en él durante el tiempo de conteo.

NOTA: Para operar con la memoria se hace necesario contar con circuitos de "escritura" y "lectura" que se distribuirán oportunamente.

En la terminología técnica cada celda recibe el nombre de "dirección de memoria" o canal pero por razones didácticas se empleará en lo sucesivo el término celda.

Los multicanales modernos poseen memorias de gran capacidad de almacenamiento (hasta 10^6 cuentas por celda) y gran número de celdas (1024, 2048 o 4096) es decir que el espectro puede llegar a dividirse en 4096 canales. Los datos se "escriben" o "leen" en forma de dígitos binarios por lo que cada celda se comporta como un registro binario con una capacidad de 10^6 cuentas.

6.4.3.- Registro de direcciones, RD:

Su función es habilitar adecuadamente a cada una de las celdas de la memoria a fin de permitir su escritura o lectura. El registro de direcciones permite:

- a) clasificar los pulsos nucleares según su amplitud en las celdas de la memoria que le correspondan.
- b) comandar el proceso de lectura una vez finalizado el tiempo de conteo.

Como ejemplo puede considerarse un analizador de 100 canales y una memoria en consecuencia, de 100 celdas lo que se detalla en la figura Nro. 14 con el conversor analógico-digital y el registro de direcciones.

El registro de direcciones es básicamente un contador, y dado que en este ejemplo se supuso una memoria de 100 celdas, estará en consecuencia formado por dos contadores en serie de 10 dígitos cada uno, tal como se

indica en la figura (en el caso general de una memoria de $n \times m$ celdas, el RD estará formado por dos contadores en serie de n y m dígitos respectivamente).

El CAD puede, en el ejemplo considerado, entregar trenes de pulsos rectangulares tales que el número de pulsos de cada tren puede variar de 1 a 100, según la altura del pulso nuclear a analizar. Si la memoria de $n \times m$, el máximo número de pulsos por tren no debe sobrepasar $n \times m$.

Si en el ejemplo de la figura Nro. 14 se considera un pulso nuclear tal que al ser analizado el CAD genere un tren de 65 pulsos rectangulares, dicho tren será almacenado en el registro de direcciones. En consecuencia se habilitarán las salidas "5" del primer registro y "60" del segundo tal que sólo se habilitará para su lectura la celda ubicada en la intersección de la fila y columna respectivas.

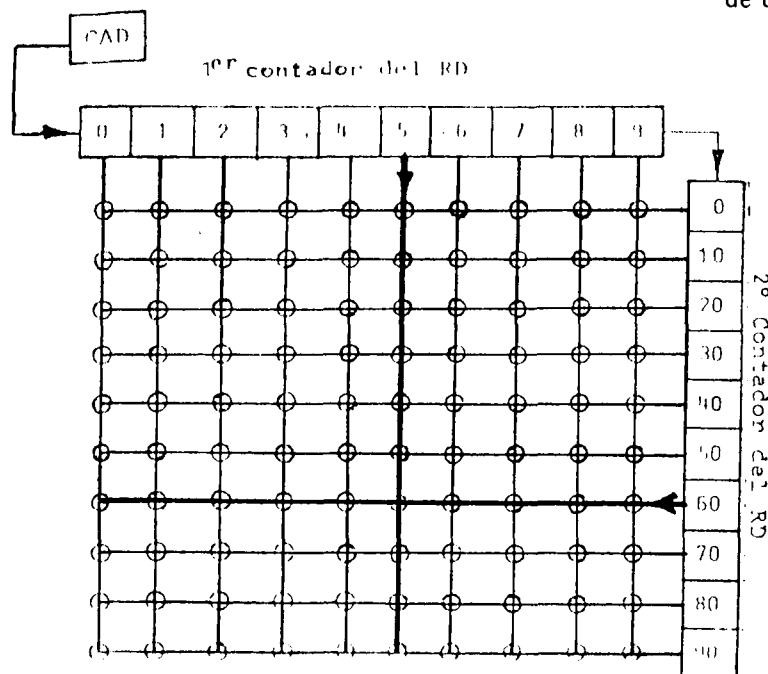


FIG.14: Esquema de un plano de memoria.

La información así extraída está constituida por las cuentas acumuladas en la celda 65 (canal 65) hasta el instante previo a la llegada del pulso nuclear que se está procesando. Por

lo tanto a su contenido se le adiciona 1, que es la cuenta que corresponde al pulso nuclear en análisis, (la operación de adición de una cuenta se realiza en el "registro aritmético").

Una vez efectuada la adición, la nueva información se escribe en la celda 65 pues sólo ésta sigue habilitada por el RD. Recién al finalizar la escritura el RD se pone a cero mediante una orden apropiada, con lo que la celda 65 queda bloqueada hasta ser eventualmente habilitada si algún pulso nuclear que deba ser clasificado en ese canal así lo requiere. El ciclo de lectura del contenido de una celda adición (o sustracción) de una cuenta y escritura de la nueva información en la celda correspondiente, se denomina "ciclo de memoria".

6.4.4.- Registro aritmético:

El registro aritmético (RA) permite extraer, de una dada celda habilitada, la información previa que contiene, sumarle (o restarle) una cuenta y devolver a la celda la nueva información (ciclo de memoria); el RA realiza esta secuencia durante el proceso de acumulación o escritura del espectro de interés. Por el contrario, si el espectro debe ser presentado RA extrae y devuelve la información de cada celda, sin adicionar o restar ninguna cuenta (cuando el analizador opera en el modo PHA). En el modo MCS el RA funciona como un contador y al final del "tiempo de vida" transfiere el número total de pulsos acumulados a la celda habilitada por el RD. Un diagrama en bloques del RA se detalla en la figura Nro. 14

Por ejemplo, si la capacidad de la memoria fuera de 10 cuentas por celda el registro aritmético constaría de 6 décadas en serie, tal como indica la figura Nro. 15. La secuencia de RA está formada por tres pasos básicos que se detallan a continuación.

a) la información previa contenida en una

- dada celda se envía a las entradas paralelo e_{p1} a e_{p6}
- b) con un pulso en la entrada serie e_s se carga el registro aumentando su contenido en 1 (o en -1, según el caso).
- c) se transfiere dicho contenido a la celda en cuestión.

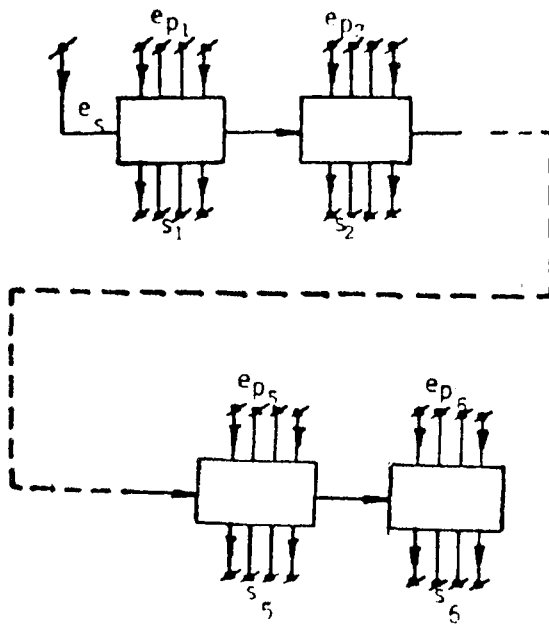


FIG.15: Diagramas en bloques del registro aritmético.

Esta operación se repite para cada celda en que deba ser clasificado un pulso nuclear; cuando el registro aritmético se emplea en el proceso de lectura se extrae y repone la información de cada celda sin alterar su contenido (proceso también denominado ciclo de memoria pero sin hacer uso de la entrada serie del RA).

NOTA: Estas funciones se llevan a cabo con decodificadores, amplificadores de sensado, compuertas, etc. que no se detallan en la figura Nro. 4, pues no hacen a su principio de funcionamiento.

6.4.5.- Presentación de la información (display):

La función del display es proveer una representación visual del espectro almacenado en la memoria mediante un gráfico bidimensional con el número de cuentas en ordenadas y canales en abscisas para el modo PHA (tiempo en el MCS). El display provee además información visual de parámetros de interés tales como el número de canal, tiempo de análisis, etc.

Hay una gran variedad de sistemas de display si bien casi todos utilizan un tubo de rayos catódicos (TRC), en general incorporado al multicanal. El espectro se presenta así como un conjunto de puntos luminosos en un sistema de coordenadas cartesianas donde la abscisa es proporcional a la energía (o al tiempo en MCS) y la ordenada es proporcional al número de cuentas.

A su vez, el espectro puede presentarse en forma dinámica o estática. En el modo dinámico se observa, durante el período de medición, la acumulación de las cuentas en los distintos canales pues las ordenadas de los puntos en cuestión van creciendo en el tiempo. De esta manera el operador puede fácilmente identificar los picos de interés. En el modo estático el espectro se presenta tal como aparece al cabo del período de medición y el operador puede así evaluar la cantidad total de cuentas correspondientes a cada canal.

NOTA: el funcionamiento del TRC como display se basa en la aplicación de una tensión analógica, (proporcional al contenido digital de cada canal de la memoria) a las placas de deflexión vertical en tanto que a las de deflexión horizontal se aplica una tensión de barrido (en forma de "diente de sierra")

La tensión analógica proporcional al contenido digital de cada canal, o celda de la memoria, se obtiene con un circuito denominado "convertor digital-analógico", CDA.

Un diagrama en bloques de este tipo de display se da en la figura Nro. 16.

La presentación de los datos acumulados por el multicanal al cabo del tiempo de medi-

ción puede realizarse además en cinta perforada, teleimpresora, cinta o disco magnético, etc. incluso, se la puede almacenar en una computadora para su ulterior procesamiento (ver diagrama en bloques "unidad de entrada/salida").

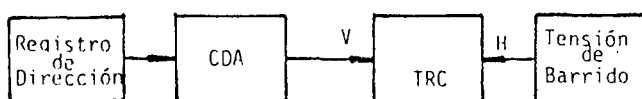


FIG.16: Diagrama en bloques de un display TRC

6.4.6.- Unidad de control:

Su función es de gran importancia, pues sincroniza y ordena todas las operaciones del multicanal (como ser las órdenes de escritura y lectura de cada celda de la memoria, el pulso de adición de una cuenta, el pulso de puesta a cero, etc.)

7.- OPERACION DE LOS ANALIZADORES MULTICANAL

De lo expuesto se infiere que la operación de un multicanal se basa en dos etapas fundamentales.

la acumulación (escritura) del espectro durante el tiempo de conteaje.

— la presentación (lectura) de la información.

7.1.- Tiempo muerto, tiempo vivo y tiempo real:

Mientras se realiza el proceso de análisis y clasificación de un pulso nuclear, la entrada del multicanal se mantiene bloqueada para evitar que el arribo de un nuevo pulso nuclear perturbe el proceso. Sólo cuando éste finaliza se habilitará la entrada y un nuevo pulso nuclear podrá ser analizado; todos los pulsos nucleares inter-

medios se habrán perdido para el análisis. El intervalo de tiempo comprendido entre la admisión de dos pulsos nucleares durante el cual la entrada permanece bloqueada se denomina "tiempo muerto por pulso" del multicanal (t_m), lo cual se visualiza en la figura Nro. 17.

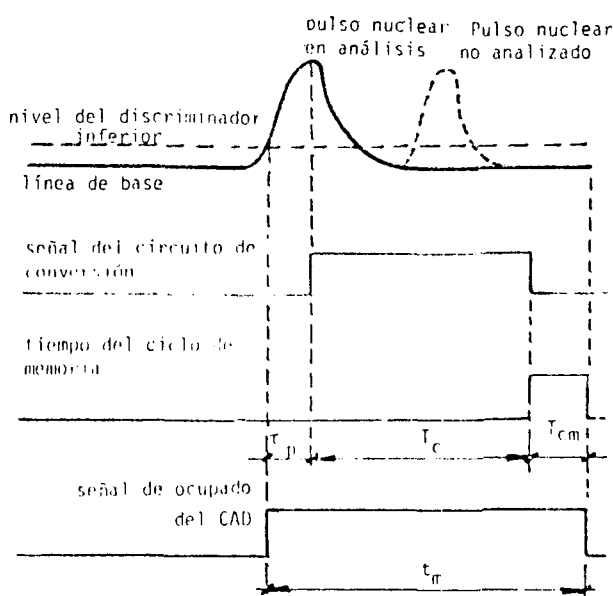


FIG.17: Concepto de tiempo muerto por pulso

El tiempo muerto por pulso está formado por el tiempo de crecimiento del pulso nuclear, τ_p (o su ancho) por el tiempo de conversión, T_c , del CAD y por el tiempo del ciclo de memoria T_{cm} . Es decir:

$$t_m = \tau_p + T_c + T_{cm} \quad (2)$$

El tiempo muerto debe ser lo más corto posible a fin de minimizar la pérdida de información. El tiempo τ_p depende del detector y de la cadena amplificadora utilizada; en general es del orden de 0,1 a $1\mu s$.

El tiempo de conversión, T_c , es proporcional a la altura del pulso nuclear y por ende variable. El tiempo del ciclo de memoria, T_{cm} , o sea el tiempo que se tarda en completar un ciclo de memoria, es fijo y no depende del pulso de análisis; es del orden de 1 a $10\mu s$.

- dada celda se envía a las entradas paralelo e_{p1} a e_{p6}
- b) con un pulso en la entrada serie e_s se carga el registro aumentando su contenido en 1 (o en -1, según el caso).
- c) se transfiere dicho contenido a la celda en cuestión.

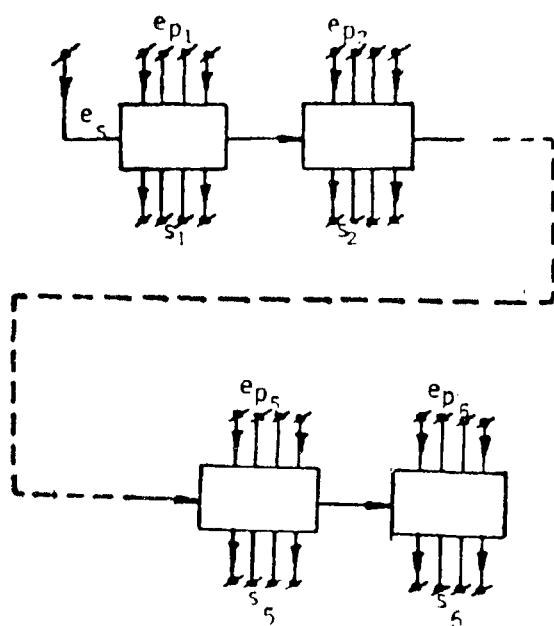


FIG.15: Diagramas en bloques del registro aritmético.

Esta operación se repite para cada celda en que deba ser clasificado un pulso nuclear; cuando el registro aritmético se emplea en el proceso de lectura se extrae y repone la información de cada celda sin alterar su contenido (proceso también denominado ciclo de memoria pero sin hacer uso de la entrada serie del RA).

NOTA: Estas funciones se llevan a cabo con decodificadores, amplificadores de sensado, compuertas, etc. que no se detallan en la figura Nro. 4, pues no hacen a su principio de funcionamiento.

6.4.5.- Presentación de la información (display):

La función del display es proveer una representación visual del espectro almacenado en la memoria mediante un gráfico bidimensional con el número de cuentas en ordenadas y canales en abscisas para el modo PHA (tiempo en el MCS). El display provee además información visual de parámetros de interés tales como el número de canal, tiempo de análisis, etc.

Hay una gran variedad de sistemas de display si bien casi todos utilizan un tubo de rayos catódicos (TRC), en general incorporado al multicanal. El espectro se presenta así como un conjunto de puntos luminosos en un sistema de coordenadas cartesianas donde la abscisa es proporcional a la energía (o al tiempo en MCS) y la ordenada es proporcional al número de cuentas.

A su vez, el espectro puede presentarse en forma dinámica o estática. En el modo dinámico se observa, durante el período de medición, la acumulación de las cuentas en los distintos canales pues las ordenadas de los puntos en cuestión van creciendo en el tiempo. De esta manera el operador puede fácilmente identificar los picos de interés. En el modo estático el espectro se presenta tal como aparece al cabo del período de medición y el operador puede así evaluar la cantidad total de cuentas correspondientes a cada canal.

NOTA: el funcionamiento del TRC como display se basa en la aplicación de una tensión analógica, (proporcional al contenido digital de cada canal de la memoria) a las placas de deflexión vertical en tanto que a las de deflexión horizontal se aplica una tensión de barrido (en forma de "diente de sierra")

La tensión analógica proporcional al contenido digital de cada canal, o celda de la memoria, se obtiene con un circuito denominado "convertor digital-analógico", CDA.

Un diagrama en bloques de este tipo de display se da en la figura Nro. 16.

La presentación de los datos acumulados por el multicanal al cabo del tiempo de medi-

ción puede realizarse además en cinta perforada, teleimpresora, cinta o disco magnético, etc. incluso, se la puede almacenar en una computadora para su ulterior procesamiento (ver diagrama en bloques "unidad de entrada/salida").

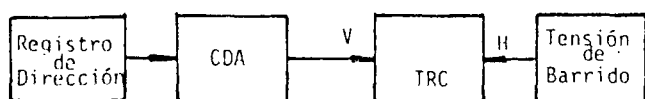


FIG.16: Diagrama en bloques de un display TRC

6.4.6.- Unidad de control:

Su función es de gran importancia, pues sincroniza y ordena todas las operaciones del multicanal (como ser las órdenes de escritura y lectura de cada celda de la memoria, el pulso de adición de una cuenta, el pulso de puesta a cero, etc.)

7.- OPERACION DE LOS ANALIZADORES MULTICANAL

De lo expuesto se infiere que la operación de un multicanal se basa en dos etapas fundamentales.

la acumulación (escritura) del espectro durante el tiempo de conteaje.

— la presentación (lectura) de la información.

7.1.- Tiempo muerto, tiempo vivo y tiempo real:

Mientras se realiza el proceso de análisis y clasificación de un pulso nuclear, la entrada del multicanal se mantiene bloqueada para evitar que el arribo de un nuevo pulso nuclear perturbe el proceso. Sólo cuando éste finaliza se habilitará la entrada y un nuevo pulso nuclear podrá ser analizado; todos los pulsos nucleares inter-

medios se habrán perdido para el análisis. El intervalo de tiempo comprendido entre la admisión de dos pulsos nucleares durante el cual la entrada permanece bloqueada se denomina "tiempo muerto por pulso" del multicanal (t_m), lo cual se visualiza en la figura Nro. 17.

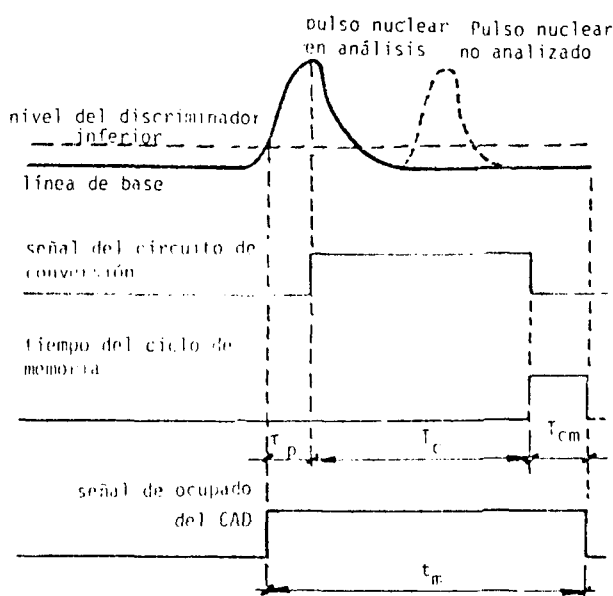


FIG.17: Concepto de tiempo muerto por pulso

El tiempo muerto por pulso está formado por el tiempo de crecimiento del pulso nuclear, τ_p (o su ancho) por el tiempo de conversión, T_c , del CAD y por el tiempo del ciclo de memoria T_{cm} . Es decir:

$$t_m = \tau_p + T_c + T_{cm} \quad (2)$$

El tiempo muerto debe ser lo más corto posible a fin de minimizar la pérdida de información. El tiempo t_p depende del detector y de la cadena amplificadora utilizada; en general es del orden de 0,1 a $1\mu s$.

El tiempo de conversión, T_c , es proporcional a la altura del pulso nuclear y por ende variable. El tiempo del ciclo de memoria, T_{cm} , o sea el tiempo que se tarda en completar un ciclo de memoria, es fijo y no depende del pulso de análisis; es del orden de 1 a $10\mu s$.

Al finalizar el tiempo t_m la entrada del multicanal se habilita nuevamente durante un intervalo t_v hasta que un nuevo pulso nuclear se hace presente para su análisis. El tiempo t_v en que permanece abierta la entrada del multicanal entre dos pulsos nucleares analizados consecutivos se denomina "tiempo vivo por pulso"; su valor depende de la frecuencia de los pulsos nucleares, o sea de la actividad y del valor del tiempo muerto por pulso.

Supóngase ahora que durante un cierto tiempo T_r , medido por el operador con un reloj independiente del multicanal, arriben a su entrada n pulsos nucleares.

El primero de ellos, de amplitud V_1 hace que la entrada se bloquee durante un tiempo t_{m1} , perdiéndose la posibilidad de analizar, en este intervalo, P_1 pulsos nucleares; al cabo de t_{m1} se habilita la entrada y permanece abierta durante un tiempo t_{v1} hasta que un segundo pulso nuclear de amplitud V_2 ingresa, con lo que nuevamente el tiempo t_{m2} en el cual se pierde P_2 pulsos nucleares (con $t_{m1} \neq t_{m2}$ si $V_1 \neq V_2$); al final t_{m2} la entrada se habilita nuevamente y permanece abierta durante un tiempo t_{v2} hasta que un tercer pulso nuclear de amplitud V_3 se hace presente, etc.

Al cabo del tiempo T_r , de los " n " pulsos nucleares que arribaron a la entrada del multicanal, sólo se analizaron " m " tal que:

$$m = n - (p_1 + p_2 + \dots + p_j) = n - \sum_j P_j \quad (3)$$

A su vez, la entrada del analizador permaneció bloqueada un tiempo T_m tal que:

$$T_m = t_{m1} + t_{m2} + \dots + t_{mj} = \sum_j t_{mj} \quad (4)$$

donde:

T_m : "tiempo muerto del multicanal"

El tiempo T_v , en el cual la entrada permaneció abierta, denominado "tiempo vivo del multicanal" tiene como expresión:

$$T_v = T_{v1} + T_{v2} + \dots + T_{vj} = \sum_j T_{vj} \quad (5)$$

Resulta en consecuencia:

$$T_m + T_v = T_r$$

donde T_r se denomina "tiempo real o verdadero" y es el tiempo que realmente debe durar la medición para computar m de los n pulsos nucleares que arriben a la entrada del analizador.

Se destaca que en este tiempo no todos los pulsos nucleares se analizan como sería de desear; sólo con un multicanal ideal, en el cual los t_{mj} fueran nulos y por ende T_m nulo, no se perderían pulsos nucleares y toda la información sería computada (resultando en este caso $T_v = T_r$)

7.2.- Posibilidades de los analizadores multicanal:

Los multicanales modernos disponen de circuitos adicionales que permiten implementar una serie de funciones auxiliares:

- Prefijación del Tiempo de Medición:** permite prefijar el tiempo de medición de la muestra entre algunos segundos y varias horas, ya sea en tiempo real o vivo.
- Generador de Caracteres:** facilita la tarea del examen visual de los parámetros (tales como tiempo de medición, cuentas en un dado canal, etc.) los que son presentados en el display.
- Cursor o Marcador:** permite examinar un canal de interés entre todos los del espectro acumulado. De esta manera, y con ayuda del Generador de Caracteres, posibilita la lectura en el display del número de cuentas acumuladas en el canal seleccionado.
- Expansión del Espectro:** permite expandir horizontal o verticalmente una porción cualquiera de espectro acumulado sobre todo el margen de operación del multicanal, lo cual resulta particularmente interesante al trabajar con detectores semiconductores dada su buena resolución.
- Control de la Región de Interés:** permite seleccionar una o varias regiones del espectro a fin de simplificar y acelerar los proce-

tos de acumulación y lectura, puesto que son pocas las zonas del espectro que generalmente presentan interés para el observador (por ejemplo, los fotopicos).

- f) Superposición de Espectros: permite superponer en el FRC dos espectros previamente acumulados; esta función es útil cuando se compara un espectro desconocido con otro patrón, que se toma como referencia. Para ello la memoria se divide en dos o más partes de igual número de celdas, pudiendo imprimirse cada espectro por separado.
- g) Integración: permite calcular automáticamente la integral de una región de interés del espectro y presentar, con auxilio del generador de caracteres, el resultado de dicho valor.
- h) Calibración en Energías: en ciertos casos el eje de abscisas del espectro acumulado no se calibra en número de canales sino directamente en energías, lo que simplifica considerablemente su análisis.
- i) Cómputo del Area Neta: la integración de una región de interés es una información útil, pero incluye la contribución del fondo; el cómputo del área neta permite obtener la integración de la muestra descontando el fondo.
- j) Remoción de espectros: permite sustraer de un espectro desconocido un espectro de fondo (o uno de referencia), para lo cual se desdobra la memoria; ello simplifica el análisis, particularmente cuando se usan detectores de baja resolución, y permite eliminar de un espectro compuesto la contribución de un dado isótopo, cuyo espectro simple se tenga previamente acumulado. De esta manera, y disponiendo de un banco de espectros de isótopos puros, se facilita el análisis de una muestra compleja.
- k) Sistema Automático para Identificación de Isótopos: permite la identificación de isó-

topos en forma automática y se lo emplea en el análisis cualitativo de un gran número de muestras. En general la identificación de isótopos desconocidos la realiza el operador con técnicas rudimentarias y laboriosas, pues esta función sólo se provee en analizadores sofisticados de alto costo.

- l) Sistema Automático para Análisis cuantitativos: se usa sólo cuando una gran cantidad de muestras debe ser analizada cuantitativamente con alto grado de exactitud y rapidez; se emplea para ello un sistema de computación con programas apropiados.

Las funciones descriptas no son obviamente cumplidas por todos los multicanales comerciales; en general se puede decir que las detalladas de a) a g) las dispone cualquier multicanal moderno pero las restantes sólo las poseen equipos sofisticados.

7.3.- Calibración de un analizador multicanal

Tiene por objeto conocer la relación entre número de canal y energía, para lo cual es necesario disponer de muestras patrones con energías conocidas, preferentemente monoenergéticas. En base a los resultados hallados (N_1 , N_2 , N_3 , N_4 , etc.) a los cuales les corresponden las energías conocidas (E_1 , E_2 , E_3 , E_4 , etc.), se tiene un conjunto de puntos que permiten obtener una recta que constituye la función transferencia buscada (ver figura Nro. 18.)

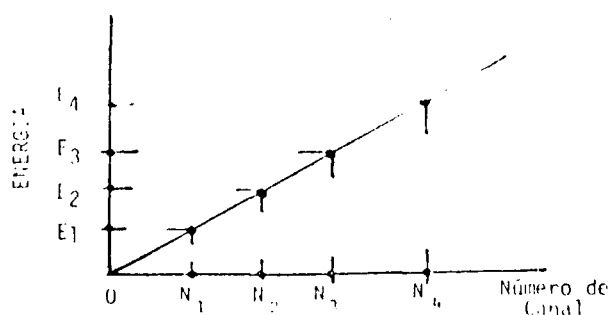


FIG. 18: Relación entre energía y número de canal.

Teóricamente, la función transferencia energía vs número de canal debe ser una recta que pase por el origen. En la práctica, debido a alinealidad del sistema puede no tenerse tal condición pero los errores cometidos son pequeños si se adopta una función lineal (pues son pequeños los valores de alinealidad).

NOTA: En base al rango de energía previsto, deben ubicarse adecuadamente los picos de las muestras patrones en función del número de canales disponibles. Para ello se adoptan valores convenientes de la alta tensión de alimentación del detector y/o de la ganancia del amplificador lineal de entrada.