

INESTABILIDAD DE UNA SONDA DE CENTELLEO ESTABILIZADA POR CIRCUITO DE CONTROL AUTOMATICO DE GANANCIA

Bronislaw Machaj

y

J. de Jesús Vázquez del Mercado

Instituto Tecnológico Regional de Chihuahua, C.R.E.G.I.T.

Av. Tecnológico No. 2909, Chihuahua, Chih. México

RESUMEN

La variación de la temperatura ambiental de una sonda de centelleo, aparte de la variación de las amplitudes de los pulsos de salida en un coeficiente constante, introduce también distorsión no-lineal del espectro diferencial. Otra fuente de distorsión no-lineal del espectro diferencial puede ser la variación de la amplificación del fotomultiplicador cuando éste opera en la región de alta densidad de corriente del pulso fluyendo a través del tubo. La variación de la ganancia en un coeficiente constante se puede estabilizar por medio de un circuito de control automático de ganancia, pero la distorsión no-lineal del espectro diferencial introduce una variación de la forma del espectro, la cual resulta en variaciones de la razón de conteo en diferentes niveles de discriminación de los pulsos de salida de la sonda.

Algunas mediciones efectuadas con sondas de centelleo conteniendo escintilador plástico, controladas por un circuito de control automático de ganancia, han mostrado que una inestabilidad de $(0.1\% - 0.2\%)/10^\circ\text{C}$ de la razón de conteo esta asociada con distorsión no-lineal del espectro de radiación. Eso impone límites de estabilidad que se pueden obtener para la sonda de centelleo controlada por un circuito de control automático de ganancia, aunque el coeficiente teórico de estabilización sea infinitamente grande.

ABSTRACT

Variation of ambient temperature of a scintillation probe, beside the variation of output pulse amplitudes by some constant coefficient, introduce also non-linear distortion of differential spectrum of the radiation. Other sources of non-linear distortion of the spectrum can be variation of amplification of fotomultiplier, when it operates with high pulse current densities. Variation of amplification of the probe by a constant coefficient can be stabilized by a circuit of automatic gain control (AGC), but non-linear distortion introduces deformation of the radiation spectrum shape, which results in variation of count rate at different discrimination levels.

Measurements performed with scintillation probes containing plastic scintillators and controlled by AGC circuits showed that instabilities $(0.1\% - 0.2\%)/10^{\circ}\text{C}$ are caused by non-linear distortion of radiation spectrum. This imposes limits to the achievable stability of AGC controlled probe.

I. INTRODUCCION

La eficiencia de detección del detector de centelleo es alta en comparación con la de los detectores de gas del mismo tamaño y la información que está contenida en el espectro diferencial del detector de centelleo sobre la energía de radiación detectada, así como la señal de salida de la sonda de centelleo en forma de secuencia de los pulsos permite procesamiento digital sin necesidad de transformar la señal análoga en señal digital, haciendo de la sonda de centelleo un muy buen detector de radiación.

Los detectores de centelleo exhiben como quiera que sea una pobre estabilidad, y, si se quiere obtener operación satisfactoria de la sonda, se necesita usar un circuito de control automático de ganancia. Esto es de especial importancia cuando se llevan a cabo mediciones en línea en condiciones de industria pesada donde ocurre un amplio rango de variaciones de la temperatura. Un ejemplo de aplicación de una sonda de centelleo con escintilador plástico de barra larga es la balanza isotópica para transportador de los materiales, otro ejemplo puede ser el medidor de nivel del material o líquido en un tanque. La sonda de centelleo debido a su alta eficiencia de detección, permite utilizar fuentes de radiación de baja actividad, pero para asegurar la operación estable se requiere un circuito de control automático de ganancia.

Las fuentes principales de inestabilidad de una sonda de centelleo son:

- Influencia de la temperatura sobre la ganancia del fotomultiplicador. El coeficiente de temperatura de un tubo fotomultiplicador puede variar de -0.2% hasta -2.0% por °C, dependiendo del tipo.
- Variación de ganancia del fotomultiplicador contra el tiempo que puede ser de 10% - 20% en sólo unos meses.
- Inestabilidad del alto voltaje de la fuente de alimentación del tubo fotomultiplicador, resultando en variación de la ganancia de acuerdo con: $\Delta k/k = a.m.\Delta U/U$ donde a-coeficiente de proporcionalidad, m-número de dínodos, U-alto voltaje del fotomultiplicador.
- Fluctuaciones estadísticas de la ganancia del tubo fotomultiplicador acumulándose hasta $\pm 0.7\%$ por día.
- Considerable dependencia del tubo fotomultiplicador con la razón de conteo.
- Influencia de la temperatura del escintilador mismo sobre su eficiencia de conversión de energía absorbida en la luz de centelleo.

Para obviar estas inestabilidades de la sonda de centelleo han sido desarrollados muchos circuitos de control automático de ganancia. Desde el punto de vista del principio de operación, ellos pueden dividirse en tres grupos.

- 1.a) Sensado de la posición de un fotopico seleccionado del espectro estabilizado de radiación.
 - b) Sensado de la posición de un pico artificial de referencia introducido a un circuito de control automático de la ganancia, cuando no existe fotopico natural en el espectro estabilizado/pulsadores alfa, pulsadores de luz .
El sensado de la posición de fotopicos esta unido por lo general con dos analizadores de monocanal ⁽¹⁻²⁰⁾.
2. Sensado de la amplitud del pulso de los pulsos más altos del espectro de radiación detectado, por medio de medidores de pico de voltaje o discriminador ^(21,22).
- 3.a) Sensado del borde de la caída del espectro diferencial por medio de un analizador monocanal y otro analizador monocanal colocado aparte en la mitad del espectro, de manera que la operación

de control automático de ganancia no es dependiente de la intensidad de radiación ^(23,24).

- b) Sensado del borde de caída del espectro de radiación por medio de un comparador simple y una evaluación de computadora del valor medio de los pulsos discriminados ⁽²⁵⁾.

Los métodos descritos en los puntos dos y tres son válidos para estabilizar espectros que no muestran fotopicos.

Estos métodos aplicados sucesivamente a muchos de los problemas de estabilización, tienen también sus limitaciones. Los circuitos de control automático de ganancia que emplean el principio de sensado de pico, pueden estabilizar la variación de ganancia del detector en un rango muy angosto. Además, cuando el pico de la señal de referencia es producido por una fuente de radiación adicional de otro tipo, o por la fuente de la luz, se puede producir un error como consecuencia de la diferencia de coeficientes térmicos de la señal de referencia y la señal que se estabiliza.

El principio de sensado de los pulsos más grandes del espectro, parece ser especialmente sensible a interferencias industriales. El detector de pico que se usa para medir estos pulsos, medirá también pulsos de interferencias cuyas amplitudes frecuentemente son más grandes que amplitudes máximas de la sonda de centelleo.

El método de dos analizadores de monocanal para sensar el borde de la caída del espectro de radiación, no requiere fotopicos para controlar la posición del espectro y de esa manera controla la variación de la ganancia de la sonda; pero la pendiente del borde de la caída debe ser distinguiblemente pronunciada si se quiere lograr un coeficiente de estabilización razonable.

El circuito de (3.b), el cual utiliza un discriminador para sensar posición del espectro, es simple en cuanto a su principio de operación, pero para obtener indicación independiente de la intensidad de la radiación, se requiere de un procesamiento de la señal más sofisticado y por ello está restringido a casos en los que se utilizan los microprocesadores.

Para evitar inconvenientes mencionados arriba y para asegurar un trabajo estable de la sonda de centelleo se desarrolló un circuito de control automático de ganancia, asegurando una operación correcta del circuito cuando el espectro diferencial de la radiación ionizante no presenta fo

topico⁽²⁶⁻²⁸⁾. El principio de operación de este tipo de control automático de ganancia está basado en la comparación de la razón de conteo en dos diferentes niveles de discriminación. Se han hecho investigaciones de sondas de centelleo equipadas con circuitos de este tipo de control automático de ganancia. Estas han mostrado que la inestabilidad alcanzada es menor que la inestabilidad teórica esperada, dado que se suponían relaciones lineales entre la ganancia del fotomultiplicador y el espectro de radiación registrado. Estas investigaciones también han mostrado que una fuente de inestabilidad es la distorsión no-lineal del espectro de radiación detectado. Los resultados de dichas mediciones son dados en este artículo.

II. FUENTES DE NO-LINEALIDAD

Existen dos fuentes principales de distorsión no-lineal del espectro de radiación, las cuales causan una operación inestable del circuito de control automático de ganancia de un detector de centelleo.

- a) La distorsión no-lineal del espectro de radiación causada por el tubo fotomultiplicador y el escintilador cuando éstos están expuestos a variación de la temperatura ambiente.
- b) La distorsión no-lineal del espectro de radiación causada por el tubo fotomultiplicador cuando fluye una gran intensidad de corriente dentro del mismo y se cambia la amplificación del fotomultiplicador. No-linealidad de la característica dinámica de los circuitos electrónicos también contribuye a esta distorsión.

En escintiladores de barra largos la intensidad de la luz que alcanza el fotocátodo de un tubo fotomultiplicador puede ser expresada como⁽²⁹⁾:

$$\phi = \frac{1}{2} \phi_0 \left\{ \left[1 - \frac{W_0}{W_1} \right] \exp(-B\ell) + \alpha \cdot \left[\exp -B(2L-\ell) \right] \right\} . \quad (1)$$

En donde:

- ϕ_0 - luz total del centelleo producida por el escintilador por fotón incidente,
- W_0, W_1 - índices de refracción del medio circunvecino y del material del escintilador respectivamente,

- B - coeficiente de atenuación de la luz
- α - coeficiente de reflexión en el otro lado del escintilador (el que no está en contacto con el tubo fotomultiplicador),
- L - longitud total del escintilador
- l - distancia del evento de centelleo al tubo fotomultiplicador.

La variación del coeficiente de atenuación de la luz B, debido a los cambios de temperatura ocasiona que los componentes del espectro de radiación correspondiente a los segmentos del escintilador a diferentes distancias del tubo fotomultiplicador sean atenuadas en grado diferente, causando una distorsión no-lineal del espectro.

Las mediciones del espectro de radiación de NaI(Tl) irradiado con una fuente gamma Cs-137, cuando el tubo fotomultiplicador sólo fue sometido a variación de temperatura, mostraron que aparte del corrimiento del fotopico, hubo un cambio en la forma del espectro registrado⁽³⁰⁾. El cambio de forma del espectro de radiación sólo puede ser explicado por la distorsión no-lineal causada por el tubo fotomultiplicador, al variarle la temperatura.

La Fig. 1, muestra el espectro diferencial de una sonda de centelleo irradiada con Cs-137 a la temperatura ambiente 20°C y a 50°C. Las curvas fueron normalizadas en la parte superior del borde de dispersión Compton para ambas temperaturas. La sonda de centelleo consta de un escintilador barra de plástico $\phi 50 \times 1250$ mm acoplado al tubo fotomultiplicador EMI-9656B. El cambio de forma del espectro diferencial a esas dos temperaturas puede ser notado.

El tiempo de medición de cada punto de las curvas en la Fig. 1 fue $t=10$ seg. El circuito de control automático de ganancia aseguró una amplificación constante de la sonda de centelleo por medio del control de alto voltaje del fotomultiplicador, como se ilustra en la Fig. 1. De tal manera, tanto el fotomultiplicador como los circuitos electrónicos del arreglo de medición que siguen al fotomultiplicador, operaron prácticamente con las mismas amplitudes de los pulsos, eliminando efectos de no-linealidad de la característica dinámica de los instrumentos de medición.

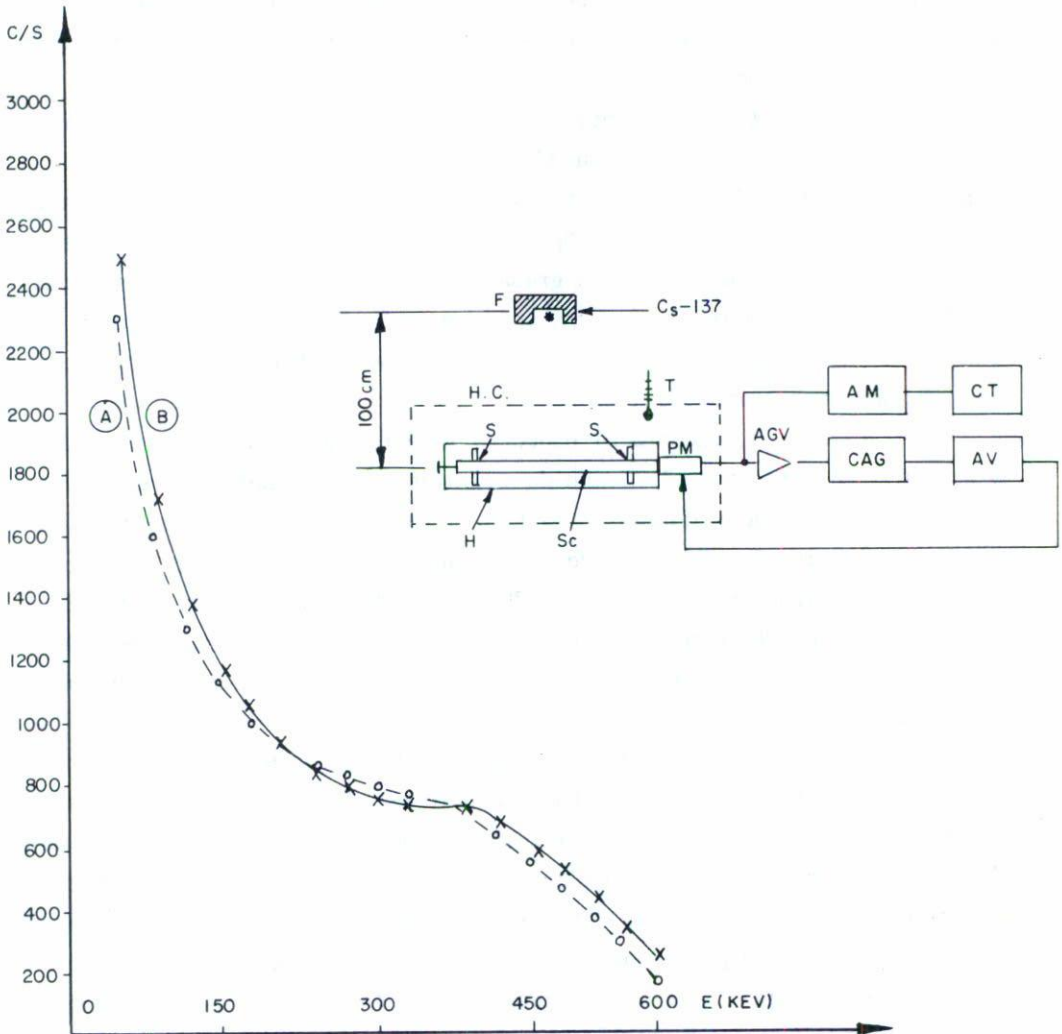


Fig. 1 Curvas del espectro diferencial del Cs-137 medido con escintilador plástico a 20°C curva A y a 50°C curva B, y arreglo de medición en donde: F - fuentes de radiación, Sc - escintilador, PM - fotomultiplicador, S - soporte del escintilador, H - caja de hierro, HC - horno, T - termómetro, AGV - amplificador, CAG - circuito de control automático de ganancia, Av - alto voltaje, AM - analizador de mono canal, CT - contador de pulsos.

Durante éste, así como en otros experimentos, las mediciones se comenzaban no menos de 24 horas después de cualquier desajuste de la sonda de centelleo, durante el cual el escintilador o el fotomultiplicador fueron expuestos a la luz. Antes de todos los experimentos el equipo de medición se precalentó por algunas horas hasta que la razón de conteo de sonda irradiada con la fuente de radiación se estabilizó.

El escintilador de barra larga bajo investigación se encontraba en una caja de metal, montado en dos soportes de forma de anillo. De tal manera el escintilador tuvo prácticamente contacto óptico sólo con el aire dentro de la caja. El contacto óptico del escintilador con el fotomultiplicador se aseguró por medio de grasa de silicón. La construcción mecánica del arreglo de medición aseguró una geometría constante de medición durante los experimentos. La temperatura de la sonda dentro del horno se midió con una inexactitud de 1°C .

La Fig. 2, muestra el espectro integral de la misma sonda a 20°C y a 50°C . En este caso el tiempo de medición de cada punto de las curvas fue de 100 seg. Ambas curvas en la Fig. 2 fueron normalizadas a un nivel de discriminación $E = 540 \text{ KeV}$, de manera que la razón de conteo en este nivel de discriminación fuera igual a 20°C y a 50°C . La curva C en la figura es la gráfica del cambio relativo de la razón de conteo de ambas temperaturas con respecto a la razón de conteo a 20°C y muestra más marcadamente la diferencia entre estos dos espectros integrales. Es evidente de las curvas, que si un circuito de control automático de ganancia controla un punto del espectro y ajusta la ganancia para este punto (en el caso mostrado en la Fig. 2, a $E = 540 \text{ KeV}$) el cambio de la razón de conteo será notado en cualquier otro nivel de discriminación cuando la sonda está sometida a variaciones de temperatura. Los experimentos han mostrado que la distorsión no-lineal del espectro de radiación puede en algunos casos decrecer cuando la sonda pasa ciclos de calentamiento y enfriamiento, pero siempre quedará alguna distorsión no-lineal del espectro. La Tabla I ilustra el comportamiento del escintilador barra de plástico NE-110, $\phi 50 \times 100 \text{ mm}$ después de que han pasado algunos ciclos de calentamiento y enfriamiento. Como puede ser visto en la Tabla I después de haber pasado un ciclo de calentamiento ha decrecido seriamente la distorsión no-lineal del espectro registrado causada por variaciones de temperatura y considerablemente estabilizada la razón de conteo contra un nivel de discriminación. Pero tam-

bién se observa, que después de transcurridos tres ciclos de calentamiento y enfriamiento permanece la dependencia de la razón de conteo sobre la temperatura ambiente de la sonda.

Un brusco incremento del ruido del fotomultiplicador acompañado de un incremento de la temperatura ambiente del tubo fotomultiplicador⁽³¹⁾ y los tiempos de resolución electrónicos finitos son también responsables de la distorsión del espectro de radiación.

Ha sido bastante observado⁽³²⁾ que el incremento de la ganancia del fotomultiplicador no es seguido linealmente por incrementos de la amplitud del pulso a la salida del tubo fotomultiplicador. Para pequeñas amplitudes de los pulsos de salida, la relación entre el incremento de la amplitud del pulso y la ganancia del fotomultiplicador es lineal, pero en cambio a grandes amplitudes se aparta bruscamente de la linealidad. Este efecto es especialmente importante para escintiladores con tiempo de decaimiento pequeño. El tiempo de decaimiento de un escintilador plástico en comparación con la de un escintilador NaI(Tl) es aproximadamente dos órdenes de magnitud menor. Así, para alcanzar la misma entrega de carga por un pulso simple a la salida de un tubo fotomultiplicador, la densidad de corriente fluyendo a través del tubo fotomultiplicador debe ser también dos órdenes de magnitud mayor en el caso de escintilador de plástico con respecto a NaI(Tl). Altas densidades de corriente en el tubo fotomultiplicador dan lugar a distorsión no-lineal en el mismo y aparecen pequeñas cargas de pulsos simples para escintiladores plásticos. Este efecto ocasiona que pulsos del espectro de radiación desde cero a una amplitud máxima sean amplificados en una manera diferente no-lineal dependiendo de las amplitudes de los pulsos de la salida del tubo fotomultiplicador.

Otro efecto descubierto mediante la medición de la forma de pulsos a la salida del tubo fotomultiplicador contra la de sus amplitudes, o la carga entregada en pulsos simples, es que cambia la forma de pulsos a diferentes amplitudes de pulsos⁽³³⁾. La relación entre amplitud de pulso y carga del mismo es no-lineal. Este efecto causa que el fotomultiplicador transfiera la luz del centelleo en voltaje de manera no-lineal dependiente de la amplitud.

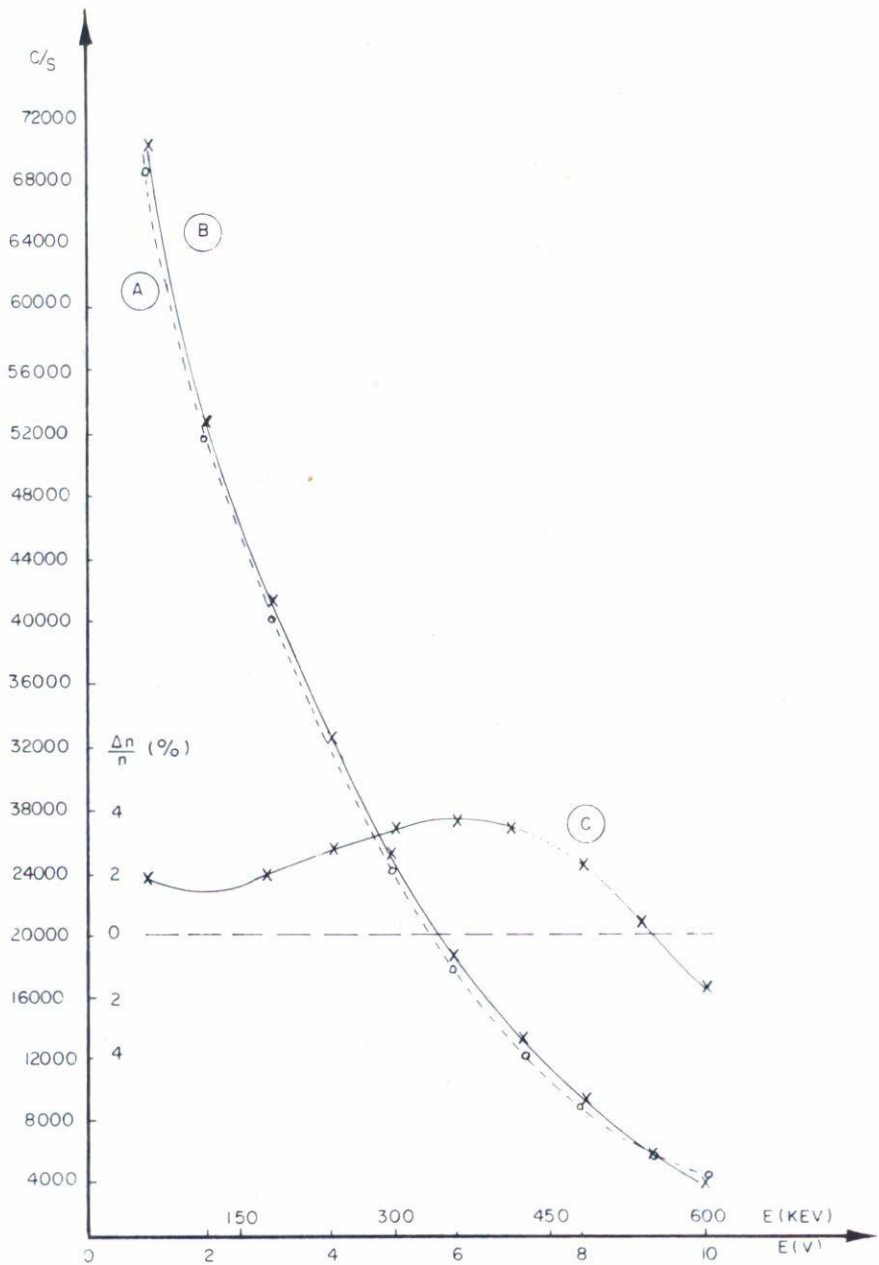


Fig. 2 Curvas del espectro integral del Cs-137 medido con escintilador plástico a 20°C curva A y a 50°C curva B, y su diferencia relativa $\frac{\Delta n}{n}$ curva C. Ambas curvas fueron normalizadas a $E = 540$ KeV. Arreglo de medición como en la Fig. 1.

TABLA I

Nivel de discr. KeV	1 ciclo			2 ciclo			3 ciclo				$\frac{\sigma(n)}{n}$ %
	20°C	42°C		20°C	42°C		20°C	30°C			
	c/s	c/s	$\Delta n/n$ %	c/s	c/s	$\Delta n/n$ %	c/s	$\Delta n/n$ %	c/s	$\Delta n/n$ %	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
92	40,516	37,284	- 7.9	37,201	37,174	-0.07	37,305	+0.3	37,143	-0.2	0.07
184	27,406	23,700	-13.5	23,549	23,457	-0.4	23,683	+0.6	23,498	-0.2	0.08
276	18,465	14,430	-21,8	14,207	14,192	-0.1	14,393	+1.3	14,221	+0.1	0.09
368	11,493	8,208	-28.5	8,070	8,091	+0.2	8,180	+1.4	8,074	+0.04	0.10
460	6,429	4,685	-27.0	4,640	4,630	-0.2	4,672	+0.7	4,604	-0.8	0.14
	Columnna 2 como refer.			Columnna 5 como referencia.							

TABLA I. Razón de conteo de una sonda de centelleo NE-110 con fotomultiplicador EMI-6097 contra variación de la temperatura.

NOTAS.

- Las mediciones empezaron 24 horas después de ensamblar la sonda con la geometría de la Fig. 3
- Tiempos de medición de cada lectura igual a 100 seg., correspondiente a la desviación estándar están dados en columna 12.
- El canal correspondiente a la mitad derecha del borde de dispersión Compton del Cs-137 fue tomado como 480 KeV para energía de calibración en columna 1.
- Las curvas integrales fueron normalizadas a 540 KeV. El alto voltaje del fotomultiplicador fue ajustado para tener la misma razón de conteo en este nivel para ambos espectros.

COMPORTAMIENTO DE LA SONDA DE CENTELLEO CONTROLADA POR UN
CIRCUITO AUTOMATICO DE CONTROL DE LA GANANCIA.

El diagrama de bloques de los arreglos de medición incluyendo el circuito automático de control de ganancia es mostrado en la Fig. 3. El principio de operación del circuito automático de control de ganancia es como sigue: Los pulsos del tubo fotomultiplicador son aplicados a dos discriminadores E_1 y E_2 . A la salida de los discriminadores son obtenidas dos secuencias de pulsos con una razón promedio de conteo n_1 y n_2 . Para cargar los convertidores Q_1 y Q_2 con pulsos, cada pulso de canal E_1 es convertido en carga q_1 y similarmente en el canal E_2 son convertidos a carga q_2 , de manera que se obtengan las corrientes $I_1 = n_1 \cdot q_1$ e $I_2 = n_2 \cdot q_2$ de la misma amplitud pero de sentido opuesto. La corriente fluyendo en el medidor I se hace igual a cero $\Delta I = 0$ y no se genera voltaje de error. En caso de cualquier cambio de la ganancia del fotomultiplicador, el balance entre las corrientes I_1 e I_2 se pierde. Una corriente de error $\Delta I \neq 0$ es generada resultando en la generación de un voltaje de error que controla la ganancia de un amplificador de ganancia variable o el alto voltaje suministrado al tubo fotomultiplicador en forma que se elimina la desviación de ganancia existente. La pendiente del espectro integral (curva de polarización), S , es alta en el nivel superior de discriminación E_2 comparada con el E_1 , por lo que el punto en el cual es espectro integral se estabiliza es prácticamente determinado obteniendo E_2 .

Puede ser mostrado (ver apéndice), que el coeficiente de estabilización de los circuitos de control automático de ganancia, cuando la regulación de la ganancia del fotomultiplicador es obtenida por medio de variación del alto voltaje, es

$$G_o = \frac{0.7 m}{U} \cdot n_2 \cdot q_2 (S_2 - S_1) R \cdot A_4 \quad , \quad (2)$$

donde

- m - número de díodos del tubo fotomultiplicador
- U - alto voltaje del tubo fotomultiplicador
- n_2 - razón de conteo en el nivel E_2
- q_2 - carga entregada por pulso simple en canal E_2
- $S_1 - \Delta n_1/n_1: \Delta E_1/E_1$ - pendiente de la curva del espectro integral en el nivel E_1

$S_2 - \Delta n_2/n_2: \Delta E_2/E_2$ - pendiente de la curva del espectro integral en el nivel E_2

R - resistencia de retroalimentación del medidor I

A_4 - función de transferencia (ganancia) de la fuente de alto voltaje para señal de error.

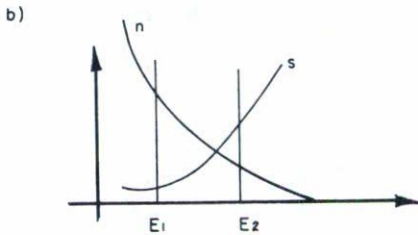
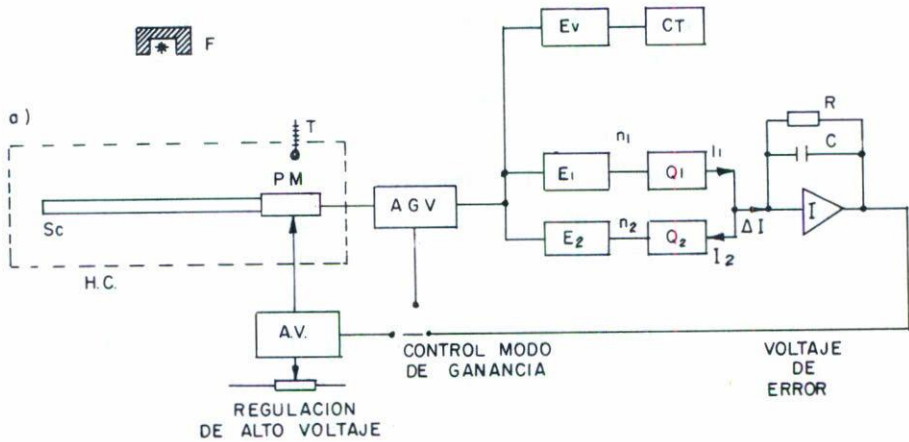


Fig. 3 El arreglo de investigación de estabilidad de la sonda de centelleo.

- a) Diagrama de bloques del arreglo de medición empleando dos discriminadores en circuito de control automático de ganancia.
 b) Forma típica del espectro integral de radiación detectada, de la pendiente del espectro integral S y la posición de los niveles de discriminación.

F - fuente de radiación, Sc - escintilador, PM - tubo fotomultiplicador, E_1 , E_2 - discriminadores, Q_1 , Q_2 - convertidores de pulsos en cargas, Av - fuente de alimentación de alto voltaje, I - medidor de razón de conteo, AGV - amplificador de ganancia variable, Ev - discriminador variable, CT - contador de pulsos, Hc - cámara de ralentamiento, T - termómetro.

Cuando la regulación de la ganancia se obtiene por medio de la regulación de la ganancia del amplificador de ganancia variable, el coeficiente de estabilización toma la forma

$$G'_O = n_2 \cdot q_2 (S_2 - S_1) \cdot R \cdot A_5 \quad , \quad (3)$$

donde A_5 es la función de transferencia del amplificador de ganancia variable y las otras definiciones son las mismas que se dieron anteriormente.

El amplificador de ganancia variable empleado en los experimentos descritos está basado en el principio del transistor de efecto de campo /FET/ como resistencia variable a la entrada de un amplificador con retroalimentación negativa⁽³⁴⁾.

La influencia de la temperatura ambiente sobre la estabilidad de la sonda de centelleo fue medida con el arreglo de la Fig. 3. La sonda de centelleo con escintilador de plástico de $\phi 50 \times 1250$ mm ó $\phi 50 \times 50$ mm se acopla a un tubo fotomultiplicador EMI-9656B o EMI-9514S. La sonda fue irradiada con una fuente gamma Cs-137. Los niveles de discriminación E_1 y E_2 del circuito de control automático de ganancia fueron puestos en niveles dados en tablas de resultados de medición. Los niveles E_1 y E_2 se ajustaron después de mediciones previas para asegurar estabilidad óptima. El coeficiente de estabilización teórico se calculó de acuerdo a las Ecs. (2) y (3). La regulación de la ganancia en el canal de medición fue obtenida por el amplificador de ganancia variable o regulación de alto voltaje del fotomultiplicador. Un día antes de efectuar las mediciones la sonda fue calentada y luego enfriada a la temperatura ambiente, para estabilizar su operación. Durante el experimento la razón de conteo fue medida a diferente nivel de discriminación E_v , así como al nivel $E_v = 150$ KeV para la sonda descrita en la Tabla II, y $E_v = 80$ KeV para la sonda de la Tabla IV, durante un ciclo de calentamiento. Los resultados de la medición de la influencia de la temperatura de las sondas son mostradas en las Tablas II, IV y VI, y en las Fig. 4 y 5.

La influencia de la no-linealidad del fotomultiplicador y de los circuitos electrónicos entre el fotomultiplicador y los discriminadores de niveles E_1 y E_2 , los cuales controlan la posición del espectro de radiación, fue medida también en el arreglo de la Fig. 3. En este caso la sonda de centelleo operaba a temperatura ambiente del laboratorio. La ganancia

del fotomultiplicador se cambió por medio del alto voltaje del fotomultiplicador, cuando el lazo del circuito de control automático de ganancia fue abierto. Después se cerró el lazo del circuito y se midió la razón de conteo. Los resultados de la medición de la influencia de la no-linealidad del fotomultiplicador y los circuitos electrónicos están dados en las Tablas III, V y VII.

Las Tablas II y III muestran los resultados de la medición de la sonda compuesta de un EM-9656B más un escintilador plástico $\phi 50 \times 1250$ mm, cuando el circuito de control automático de ganancia estabilizó la ganancia de la sonda por el amplificador de ganancia variable. La columna 2 de la Tabla II nos da la razón de conteo inicial, columnas 3 y 4 la variación de la misma a 45°C y 20°C , contra la obtenida en la columna 2. La columna 5 nos da la desviación estándar de las mediciones y la columna 6 nos da la variación teórica de la razón de conteo calculada para un 25% de variación de la ganancia del fotomultiplicador de acuerdo a $\Delta n/n = S_v(\Delta k/k) G'_o$, donde S_v es la pendiente del espectro integral al nivel de discriminación E_v , $\Delta k/k = 25$ y G'_o es el coeficiente teórico de estabilización. $G'_o = 10,000$ en este caso. La desviación estándar relativa de los resultados de medición se calcularon según

$$\sigma\left(\frac{\Delta n}{n}\right) = \frac{n_2}{n_1} \cdot \sqrt{\frac{1}{t} \left[\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right]}$$

donde:

- n_1 (c/s) - razón de conteo en temperatura T_1 ,
- n_2 (c/s) - razón de conteo en temperatura T_2 ,
- t (s) - tiempo de medición.

De esta manera se calcularon también la desviación estándar así como la variación de la razón de conteo teórica en otras Tablas.

Es evidente de la Tabla II que los errores de la razón de conteo son mucho más grandes que los esperados si la variación lineal del espectro de radiación fuera sólo causada por la influencia de la temperatura. La Fig. 4 muestra un proceso transistorio en la sonda cuando se calentó.

Cuando una variación del 50% de la ganancia del fotomultiplicador fue forzada por un cambio de voltaje del tubo fotomultiplicador, otra vez la inestabilidad de la razón de conteo fue mayor que la esperada, ver la Tabla III. Los datos en esta tabla muestran grandes no-linealidades del tubo fotomultiplicador y eventuales no-linealidades electrónicas.

Las Tablas IV y V muestran los resultados de la medición de la sonda EMI-9514S más escintilador plástico $\phi 50 \times 1250$ mm, cuando la ganancia del canal de medición fue regulada por medio de la variación del alto voltaje del fotomultiplicador y controlada por un voltaje de error del circuito de control automático de ganancia. Los pulsos de salida del tubo fotomultiplicador fueron mantenidos constantes. Tal arreglo eliminó los efectos de no-linealidades de la operación del tubo fotomultiplicador a diferentes amplitudes de pulso y eventuales no-linealidades electrónicas. La Tabla IV da los resultados de las mediciones de la razón de conteo a temperaturas de 20°C y 50°C . Comparando estos datos con los de la Tabla II para la sonda de centelleo controlada por medio del amplificador de ganancia variable, se puede ver un mejoramiento de la estabilidad de la sonda controlada por medio de alto voltaje, a pesar de que la sonda fue sometida a temperatura un poco más alta que anteriormente. Pero también en este caso la inestabilidad es más grande que la esperada según calculos teóricos, ver la última columna de la Tabla IV.

Las variaciones de la ganancia del fotomultiplicador a causa de la variación del alto voltaje del mismo, estuvieron en este caso prácticamente de acuerdo a lo esperado, o sea, casi dentro de los límites de exactitud de la medición, ver Tabla V.

Las Tablas VI y VII y la Fig. 5, ilustran las variaciones de la razón de conteo de la sonda compuesta de un EMI-9665B y un escintilador plástico $\phi 50 \times 50$ mm estabilizado por circuito de control automático de ganancia con amplificador de ganancia variable. La Tabla VI, ilustra las variaciones de la razón de conteo cuando la sonda fue sometida a variaciones de temperatura ambiente. La Tabla VII nos da la razón de conteo cuando se forzó un cambio de ganancia del fotomultiplicador de $\pm 45\%$ con respecto a la ganancia nominal (voltaje de error de CAG igual a cero) y el circuito de control automático de ganancia estabilizó este cambio de ganancia del fotomultiplicador.

Desde el punto de vista de operación del circuito de control automático de ganancia, los datos de la Tabla VI se pueden comparar con los datos de la Tabla II para un escintilador plástico $\phi 50 \times 1250$ mm. De esta comparación se puede ver la gran dependencia de la inestabilidad de la razón de conteo sobre las dimensiones del escintilador. También la variación

de la razón de conteo durante el período transitorio de calentamiento, ver la Fig. 5, la cual indica que las dimensiones del escintilador tienen gran influencia sobre la inestabilidad de la razón de conteo cuando la sonda es tá sometida a variación de la temperatura. La Tabla VII indica de nuevo grandes inestabilidades de la razón de conteo introducidas por no-linealidades del fotomultiplicador y los circuitos electrónicos.

Es importante mencionar que la sonda de centelleo conteniendo es cintilador de plástico largo mostró una inestabilidad de la razón de conteo menor de 0.2%, calculada como la desviación estándar de la medida de varias medidas aleatorias en un período de un mes. La sonda fue estabilizada por el circuito de control por medio de control de alto voltaje y la temperatura ambiente se cambio en algunos °C durante este período.

TABLA II

E_V KeV	20°C	45°C	20°C		$\sigma(\Delta n/n)$	Teórico
	c/s	$\Delta n/n$ %	$\Delta n/n$	%	%	$\Delta n/n$ %
1	2	3	4		5	6
75	64,874	+1.4	+0.1		0.05	0.0015
150	45,083	+0.7	-0.3		0.07	0.0018
300	22,459	+1.4	-1.2		0.09	0.0038
600	3,810	+0.9	-0.5		0.23	0.012

TABLA II. Razón de conteo de la sonda EMI-9656B con escintilador plástico $\phi 50 \times 1250$ mm a temperatura de 20°C y 45°C. Parámetros de CAG: $E_1 = 180$ keV, $E_2 = 580$ keV, $G'_0 = 10,000$, control por medio de AGV.

TABLA III

Variación de ganancia forzada, %, $\Delta k/k$	Variación de la razón de conteo medida, %, $\Delta n/n \pm \sigma(\Delta n/n)$	Variación de la razón de conteo esperada, %, $\Delta n/n$.
+50	-0.37 \pm 0.04	+0.004
-50	-0.08 \pm 0.04	-0.004

TABLA III. Razón de conteo de la sonda EMI-9656B con escintilador plástico $\phi 50 \times 1250$ mm contra amplificación del fotomultiplicador en nivel $E_V = 180$ keV. Parámetros de CAG: $E_1 = 180$ keV, $E_2 = 580$ keV, $G''_0 = 10,000$, control por medio AGV.

TABLA IV

E_v KeV	20°C c/s	50°C $\Delta n/n$ %	Teórico $\Delta n/n$ %	Observaciones
70	66,663	+0.37	0.015	El $\Delta n/n$ teórico co
140	50,119	+0.42	0.018	rrespondiente al
210	39,007	+0.65	0.025	25% de variación de
420	12,901	+1.2	0.04	la ganancia.

TABLA IV. Razón de conteo de la sonda EMI-9514S con escintilador plástico $\phi 50 \times 1250$ mm a temperatura de 20°C y 50°C.
Parámetros de CAG: $E_1 = 100$ keV, $E_2 = 460$ keV, $G_0 = 1,500$ control por medio de alto voltaje

TABLA V

Variación de ga nancia forzada, $\Delta k/k$; %	Variación de la razón de conteo medida, $\Delta n/n \pm \sigma(\Delta n/n)$; %	Variación de la razón de conteo esperada $\Delta n/n$; %
+60	+0.05 \pm 0.04	+0.02
-60	+0.04 \pm 0.04	-0.02

TABLA V. Razón de conteo de la sonda EMI-9514S con escintilador plástico $\phi 50 \times 1250$ mm en el nivel $E_v = 100$ keV, contra amplificación del fotomultiplicador.
Parámetros de CAG: $E_1 = 100$ keV, $E_2 = 460$ keV, $G_0 = 1,5000$ control por medio de alto voltaje

TABLA VI

E_v (KeV)	23°C (c/s)	47°C ($\Delta n/n$); %	$\sigma(\Delta n/n)$ (%)	Teórico $\Delta n/n$; %
80	25,212	-0.05	0.09	0.0003
160	20,441	-0.07	0.1	0.0005
240	16,325	-0.2	0.11	0.001
480	2,449	+0.2	0.28	0.012

TABLA VI. Razón de conteo de la sonda EMI-9656B con escintilador plástico $\phi 50 \times 50$ mm a temperaturas de 23°C y 47°C.
Parámetros de CAG: $E_1 = 80$ keV, $E_2 = 500$ keV, $G_0 = 16,500$ control por medio de AGV.

TABLA VII

Variación de ganancia del fotomultiplicador $\Delta k/k$; %	Variación de la razón de conteo medida $\Delta n/n \pm \sigma(\Delta n/n)$, %	Variación de la razón de conteo esperada $\Delta n/n$, %
+45	-0.25 ± 0.09	+0.001
-45	$+0.28 \pm 0.09$	-0.001

TABLA VII. Razón de conteo de la sonda EMI-9656B con escintilador plástico $\phi 50 \times 50$ mm en nivel $E_V = 80$ keV contra ganancia del fotomultiplicador.
Parámetros de CAG: $E_1 = 80$ keV, $E_2 = 500$ keV, $G_0^1 = 16,500$ control por medio de VGA.

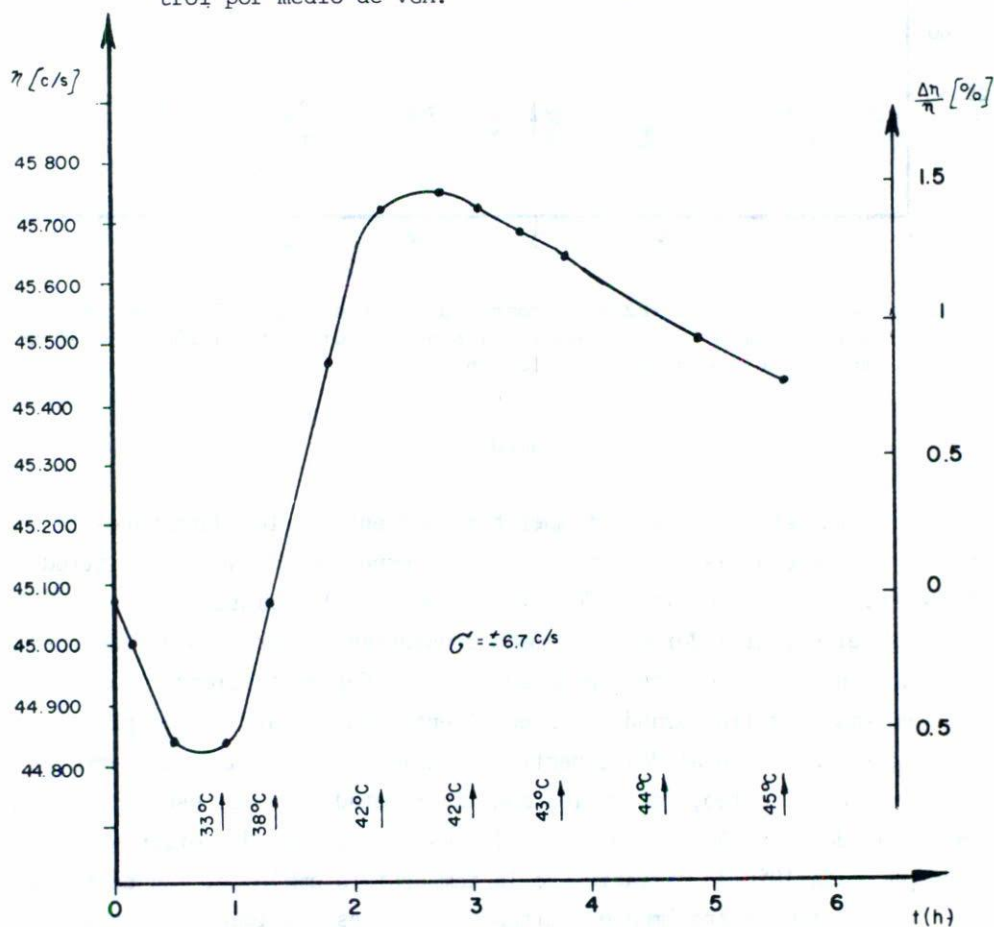


Fig. 4 Variación de razón de conteo de la sonda EMI-9656B con escintilador plástico $\phi 50 \times 1250$ mm en el nivel de discriminación $E_V = 150$ keV durante calentamiento de sonda.

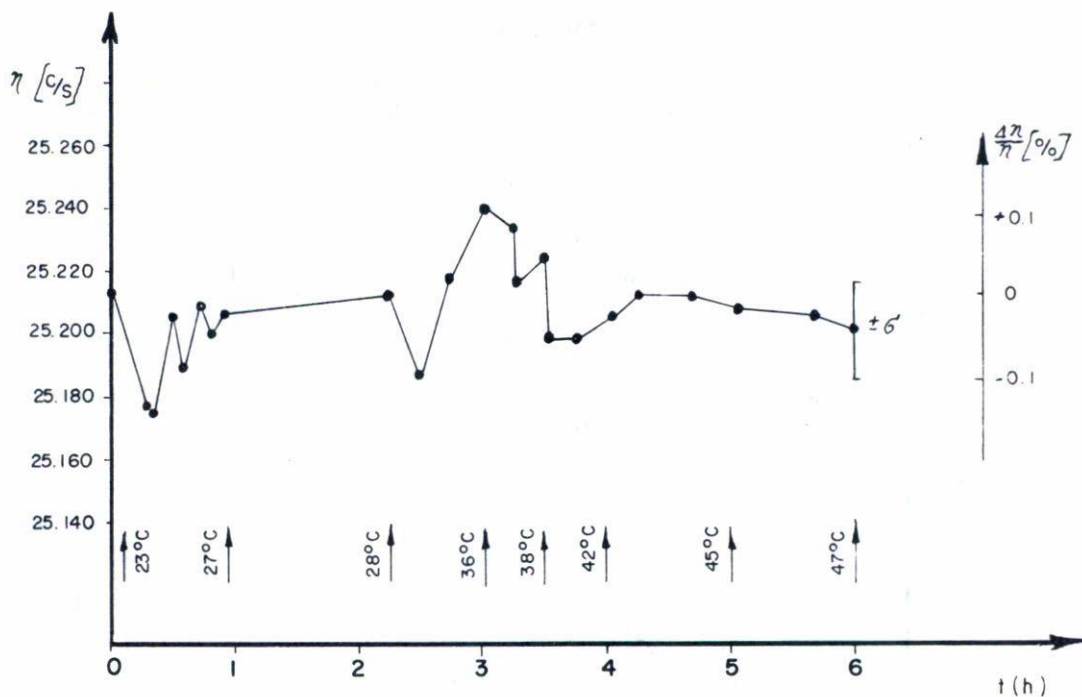


Fig. 5 Variación de la razón de conteo de la sonda EMI-9656B con escintilador plástico $\phi 50 \times 50$ mm en el nivel de discriminación $E_V = 80$ keV durante calentamiento de la sonda.

CONCLUSIONES

La variación de la temperatura ambiente de los detectores de centelleo causan una distorsión no-lineal del espectro de radiación introducida por el tubo fotomultiplicador tanto como por el escintilador, especialmente si el escintilador es de tamaño considerable. Otra fuente de distorsión no-lineal del espectro puede ser el tubo fotomultiplicador cuando opera a pulsos de salida grandes, especialmente con escintiladores plásticos. La distorsión no-lineal del espectro de radiación causa a su vez errores en la razón de conteo, los cuales son interpretados por el usuario como inestabilidad de la razón de conteo. Tal inestabilidad es del orden de 0.1% a 0.2% por cada 10°C de variación de la temperatura ambiente. La distorsión no-lineal del espectro impone límites sobre la estabilidad alcanzable de la sonda.

APENDICE

Cuando la ganancia del tubo fotomultiplicador es controlada por la variación del alto voltaje, el circuito que se dio en la Fig. 3, puede ser redibujado en la forma mostrada en la Fig. 6. El error de ganancia puede ser escrito como

$$\frac{\Delta k}{k}(s)_e = \frac{\Delta k}{k}(s)_d \frac{1}{1 + G(s)}, \quad (A1)$$

donde:

$\frac{\Delta k}{k}(s)_d$ - desviación relativa de ganancia del fotomultiplicador en lazo abierto.

$\frac{\Delta k}{k}(s)_e$ - desviación relativa de ganancia del fotomultiplicador en lazo cerrado.

$G(s) = A_1(s) \cdot A_2(s) \cdot A_3(s) \cdot A_4(s)$ - función de transferencia de lazo abierto

$A_1(s)$ - función de transferencia de los discriminadores con convertidores de pulso a carga

$A_2(s)$ - función de transferencia del medidor I

$A_3(s)$ - función de transferencia de la fuente de alimentación de alto voltaje

$A_4(s)$ - función de transferencia del tubo fotomultiplicador

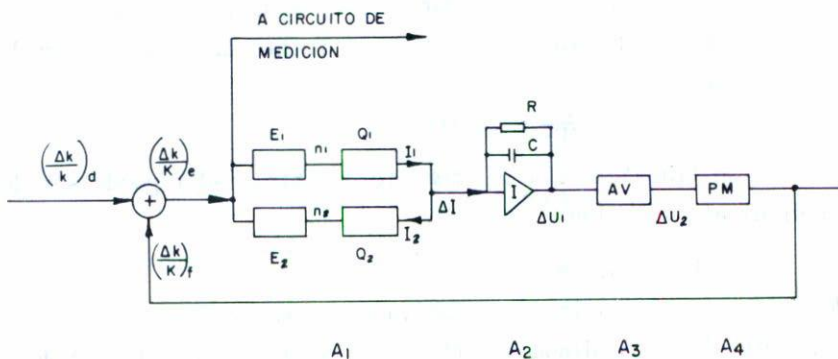


Fig. 6 Lazo de control automático de ganancia con fuente de alimentación de alto voltaje del tubo fotomultiplicador.

Los cambios de ganancia $(\Delta k/k)_e$ en la entrada de los discrimina-

dores E_1 y E_2 dan como resultado variación de las corrientes I_1 e I_2 por

$$\Delta I_1 = S_1 \cdot n_1 \cdot q_1 \left(\frac{\Delta k}{k} \right)_e ,$$

$$\Delta I_2 = S_2 \cdot n_2 \cdot q_2 \left(\frac{\Delta k}{k} \right)_e ,$$

donde:

$$S_1 = \frac{\Delta n_1/n_1}{\Delta E_1/E_1} - \text{pendiente del espectro integral en el nivel } E_1$$

$$S_2 = \frac{\Delta n_2/n_2}{\Delta E_2/E_2} - \text{pendiente del espectro integral en el nivel } E_2$$

$n_1; n_2$ - razón de conteo en canales E_1 y E_2 respectivamente

$q_1; q_2$ - cargas entregadas por pulsos simples en los canales E_1 y E_2 respectivamente

En condición de balance $I_1 = I_2 = n_1 \cdot q_1 = n_2 \cdot q_2$, así la diferencia de ΔI_1 y ΔI_2 puede ser escrita como

$$\Delta I = \Delta I_1 - \Delta I_2 = n_2 \cdot q_2 (S_2 - S_1) \cdot \left(\frac{\Delta k}{k} \right)_e ,$$

y la función de transferencia $A_1(s)$ es

$$A_1 = A_1(s) = \frac{\Delta I}{(\Delta k/k)} = n_2 \cdot q_2 \cdot (S_2 - S_1) . \quad (A2)$$

La función de transferencia del medidor I puede ser escrita como

$$A_2(s) = \frac{\Delta U_1(s)}{\Delta I(s)} = \frac{1}{1 + sRC} R , \quad (A3)$$

donde C es capacitancia del medidor I, R es resistencia paralela del medidor I. La función de transferencia de la fuente de alimentación de alto voltaje es igual a

$$A_3 = A_3(s) = \frac{\Delta U_2}{\Delta U_1} = \text{const.} \quad (A4)$$

La función de transferencia del tubo fotomultiplicador puede ser derivada de la siguiente relación⁽³¹⁾:

$$(\Delta k/k)_f = 0.7.m. (\Delta U/U)_2 ,$$

donde $(\Delta k/k)_f$ es la variación relativa de la ganancia del tubo fotomultiplicador, m el número de dínodos y $(\Delta U/U)_2$ la variación relativa del alto voltaje del fotomultiplicador. La función de transferencia del tubo fotomultiplicador puede ser escrita como

$$A_4 = A_4(s) = \frac{(\Delta k/k)_f}{U_2} = \frac{0.7 m}{U_2} . \quad (A5)$$

Sustituyendo las Ecs. (A2) - (A5) en la Ec. (A1) y realizando los cálculos, obtenemos por desviación de tipo escalón del fotomultiplicador $(\Delta k/k)_d \cdot 1(t)$, la variación de la ganancia en lazo cerrado

$$\left(\frac{\Delta k}{k}\right)_e = \left(\frac{\Delta k}{k}\right)_d \cdot \frac{1}{1 + G_0} \left[1 + G_0 \exp\left(-\frac{G_0 + 1}{RC} t\right) \right], \quad (A6)$$

donde

$$G_0 = A_1 \cdot R \cdot A_3 \cdot A_4 = \frac{0.7 \text{ m}}{U_2} n_2 \cdot q_2 (S_2 - S_1) \cdot R \cdot A_4. \quad (A7)$$

La Ec. (A6) muestra que la desviación de la ganancia de tipo escalón $(\Delta k/k)_d \cdot 1(t)$, resulta en una ganancia de error no compensada $(\Delta k/k)_e$ que tiende al valor de

$$\left(\frac{\Delta k}{k}\right)_e = \left(\frac{\Delta k}{k}\right)_d \cdot \frac{1}{G_0 + 1} = \left(\frac{\Delta k}{k}\right)_d \cdot \frac{1}{G_0},$$

con la constante de tiempo

$$\tau = \frac{RC}{G_0 + 1} \approx \frac{RC}{G_0} = \frac{C}{A_1 \cdot A_3 \cdot A_4} = \frac{C \cdot U_2}{n_2 \cdot q_2 (S_2 - S_1) \cdot 0.7 \cdot m \cdot A_3}, \quad (A8)$$

para $t \rightarrow \infty$ y para $G_0 \gg 1$. Así G_0 es el coeficiente de estabilización del circuito de control automático de ganancia.

En el caso de que el voltaje de error controle la ganancia del amplificador de ganancia variable y la salida del circuito de control automático de ganancia esté conectada al amplificador de ganancia variable, la fuente de alimentación de alto voltaje y el tubo fotomultiplicador en la Fig. 6 son reemplazados por un amplificador de ganancia variable. Si $A_5(s)$ es la función de transferencia del amplificador de ganancia variable, la función de transferencia de lazo se convierte en

$G(s) = A_1(s) \cdot A_2(s) \cdot A_5(s)$ y el coeficiente de estabilización del circuito de control automático de ganancia es igual a

$$G'_0 = A_1 \cdot R \cdot A_5 = n_2 \cdot q_2 \cdot (S_2 - S_1) \cdot R \cdot A_5. \quad (A9)$$

REFERENCIAS

1. H. de Ward, *Nucleonics* 13 (1955) 36.
2. J.M. Ferguson, *Nucl Instr. and Meth* 58 (1968) 318.
3. R.A. Dudley, *Nucl Instr. and Meth* 46 (1967) 116.
4. R.A. Dudley, R. Scarpetetti, *Nucl Instr. and Meth* 25 (1964) 297.
5. K.W. Marlow, *Nucl Instr. and Meth* 15 (1962) 188.
6. A. Pakkanen, E. Stenman, *Nucl Instr. and Meth* 44 (1966) 321.

7. J. Grinberg, B. Sabbach, M. Schuster, Nucl Instr. and Meth 82 (1970) 278.
8. M. Matoba, J. Kumabe, Nucl Instr. and Meth 74 (1969) 70.
9. K. Wolski, A. Wierzbicki, Repor INT 131/E, Cracovia 1978.
10. N.P. Sastry, R. Nagarajan, K. J. Menon, Nucl Instr. and Meth 65 (1968) 341.
11. J. Dixon, Nucl Instr. and Meth 25 (1963) 26.
12. U. Tamm, Nucl Instr. and Meth 40 (1966) 355.
13. M. Nadachowski, Report IBJ 1314/III/E/1971.
14. P.K. Patwardhan, Nucl Instr. and Meth 31 (1964) 261.
15. R. Borbas, D.J. Doyle, J.K. Atkins, L. Jones, Nucl Instr. and Meth 37 (1965) 183.
16. M. Nakamura, R.L. La Pierre, Nucl Instr. and Meth 32 (1965) 277.
17. O.M. Aszakov, W. A. Czudakov, Pribory i Tiekhnika Experimenta No. 2 (1979) 48.
18. U. Tharun, Nucl Instr. and Meth 69 (1969) 335.
19. Y. Karawassaki, T. Shoji, Nucl Instr. and Meth 96 (1972) 347.
20. Y. Karawassaki, Nucl Instr. and Meth 105 (1972) 37.
21. P. Polly, IEEE Conference Publication No. 84, Guilford 1972, p. 191.
22. K.E. Duftschmid, Nuclear Techniques and Mineral Resources, IAEA Vienna 1969, page 325.
23. M. Matoba, M. Sonoda, Nucl Instr. and Meth 92 (1971) 153.
24. M. Matoba, Y. Matsumoto, M. Hyakuteke, Nucl Instr. and Meth 111 (1973) 259.
25. M. Brendle, Nucl Instr. and Meth 141 (1977) 577.
26. B. Machaj, Nucl. Instr. and Meth 118 (1974) 231.
27. B. Machaj, F. Zrodely, J. Jaszczuk, Nukleonika 24 (1979) 549
28. P. Urbanski, A. Dybkowski, Report IBJ 1534/XVA/E/B, 1974.
29. D.W. Blincow, I.R. Webster, IEEE Trans Nucl Sci, June 1964, p. 38
30. J.F. Cameron, C.G. Clayton, R.A. Speckeman, Nuclear Electronics, IAEA Vienna 1962, pag. 95.
31. EMI Electronics Ltd. Photomultiplier tubes 1970.
32. J.B. Birks, Liczniki scyntylacyjne, PWT, Varsovia 1956.
33. G. Branchetti, B. Righini, Nucl Instr. and Meth 105 (1972) 45.
34. B. Remigolsky, L. Tepper, Nucl Instr. and Meth 53 (1967) 29.