

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

MANUAL DEL CURSO DE METODOLOGIA  
Y APLICACION DE RADIOISOTOPOS

CAPITULO 17

MEDICION DE RADIACION GAMMA

JOSEFINA RODRIGUEZ

BUENOS AIRES

-1972-

Reimpresión 1976

## MEDICION DE RADIACION GAMMA

### DETECTORES DE CENTELLEO

Los detectores Geiger Müller miden con alta eficiencia intrínseca la radiación beta, entendiéndose por eficiencia intrínseca la relación entre el número de partículas o rayos detectados y el número que entra al detector. Esta eficiencia intrínseca alcanza al 100% para beta en el caso de contadores Geiger Müller de ventana.

La eficiencia intrínseca de estos mismos detectores para radiación gamma es muy baja (1 al 3%).

Existen otros tipos de detectores, entre los cuales se pueden seleccionar algunos que presentan alta eficiencia y otras características que los hacen especialmente aptos para la detección y medición de la radiación gamma, son los llamados detectores de centelleo.

Efectivamente, existen ciertos productos constituidos por una o más sustancias que presentan la característica de que al ser chocados por la radiación emiten un pequeño destello de luz visible o ultravioleta, de ahí que estos productos hayan recibido el nombre genérico de centelleadores.

Estas sustancias pueden ser sólidas o líquidas, naturales (orgánicas o inorgánicas) o artificiales (plásticas). A los sólidos, como en general son cristales de sustancias puras, se los suele llamar también cristales de centelleo, y a veces se hará referencia a ellos en esos términos.

Para cada tipo de radiación se tienen uno o varios centelleadores, que presenten características óptimas para la detección y medición de la misma.

Para medir radiación gamma se utilizan universalmente cristales de yoduro de sodio activados con talio  $\text{Na}(\text{Tl})$ .

Se trata de cristales de yoduro de sodio, a los que durante su crecimiento se les incorpora una pequeñísima cantidad de talio que distorsiona la red del cristal, dándole la característica de centellear a la temperatura ambiente cada vez que interacciona con él la radiación, ya que los cristales puros de  $\text{Na}$  solo emiten luz a muy bajas temperaturas.

Estos cristales, la mayoría cilíndricos, están cubiertos con una lámina de aluminio, salvo en una de sus bases en la que generalmente se coloca una ventana de vidrio. En la cara interior del aluminio, la que va adherida al cristal, se deposita óxido de magnesio que aumenta la reflexión de la luz hacia el interior del cristal.

Originariamente los centelleos se detectaban en forma visual, pero en la actualidad lo que se hace es transformar los centelleos en pulsos de tensión o de

corriente que son registrados.

No solo se logra el registro de los centelleos, sino la medición de su intensidad. La observación y medida de los centelleos producidos en centelleadores por partículas ionizantes individuales, constituye la base del instrumento llamado contador de centelleo.

La figura 6.1, presenta un esquema del contador de centelleo conocido con el nombre de monocanal.

### FOTOMULTIPLICADOR

Observando el esquema se ve que el centelleador es seguido por el fotomultiplicador. Efectivamente, el centelleador tiene la ventana de vidrio unida íntimamente al fotomultiplicador.

El fotomultiplicador es fundamentalmente una célula fotoeléctrica, seguida en la misma unidad por un amplificador de corriente de alta ganancia. En la figura 6.2 se puede ver un esquema de un fotomultiplicador.

Está constituido por:

- 1) un fotocátodo
- 2) una serie de blancos para emisión secundaria llamados dinodos
- 3) un sistema óptico-electrónico, que permite guiar los electrones de un dinodo al vecino que se encuentra a más alto potencial.
- 4) un ánodo, donde es liberada una corriente de electrones que dará origen al pulso de tensión o señal que después de ser amplificado y clasificado será registrado

La superficie del fotocátodo y de los dinodos suele ser de níquel, recubierto con una capa de cesio-antimonio.

Entre ánodo y fotocátodo se aplican tensiones dependientes de las características del fotomultiplicador (generalmente entre 600 y 1.400 voltios), la que se reparte en partes iguales entre los dinodos. El cátodo generalmente está a tierra

La tensión está aplicada de tal manera que el primer dinodo está a más alta tensión que el fotocátodo, el segundo dinodo a más alta tensión que el primero, el tercer dinodo a más alta tensión que el segundo y así sucesivamente.

La actuación del fotomultiplicador se basa en el aprovechamiento de la emisión fotoeléctrica y la emisión secundaria de electrones, se trata de evitar la emisión termoeléctrica y la emisión por acción de campos eléctricos.

La emisión fotoeléctrica no es más que el resultado de la interacción de la radiación electromagnética con la superficie del fotocátodo. Efectivamente, al actuar fotones sobre el fotocátodo pueden producir la salida de electrones, generalmente se necesita que incidan varios fotones para lograr la salida de un electrón. En otras palabras la conversión de fotones a electrones en el fotocátodo es siempre menor que 1.

Un electrón arrancado del fotocátodo es atraído por el primer dinodo debido a que se encuentra a mayor potencial que el fotocátodo, el campo eléctrico establecido entre fotocátodo y primer dinodo le imprime a ese electrón suficiente energía como para poder arrancar por lo menos dos electrones, los que a su vez son solicitados por el segundo dinodo. Cada uno de estos dos electrones, sometidos a un campo eléctrico similar, son capaces de arrancar cada uno de ellos dos electrones a su vez.

En resumen si se supone, por un lado, que del fotocátodo sale un electrón, y que éste a su vez arranca del primer dinodo dos electrones y, por otro lado, que la diferencia de potencial entre un dinodo y el siguiente es la misma, se puede concluir que en cada etapa cada electrón arranca dos. De ahí que del primer dinodo saldrán dos electrones, del segundo cuatro, del tercero ocho, del cuarto diez y seis, del quinto treinta y dos, y así siguiendo. El número de electrones que se liberaron en el ánodo será proporcional a una potencia, en la cual la base será el número de electrones arrancados del primer dinodo y el exponente el número de dinodos.

El número de electrones arrancados del primer dinodo depende, a igualdad de las demás variables, de la tensión aplicada al fotomultiplicador.

En condiciones ordinarias de trabajo, por lo tanto, se podrá cambiar la base de la potencia pero no el exponente del factor de multiplicación. Para ello bastará con variar la tensión aplicada al fotomultiplicador.

A mayor tensión aplicada al fotomultiplicador, se logrará mayor multiplicación de electrones, y más se liberarán en el ánodo, y mayor será la señal (pulso).

De lo expuesto anteriormente se ve, que la multiplicación o ganancia del fotomultiplicador aumenta exponencialmente con la tensión aplicada al mismo.

Las demás etapas electrónicas del equipo se indicarán en forma muy somera más adelante.

Las características principales que ofrece un equipo como el indicado en el esquema de la figura 6.1 para detectar radiación gamma son los siguientes:

1) La amplitud del impulso, en que se ha transformado el destello de luz, liberado en el fotomultiplicador es proporcional a la energía dejada por el rayo gamma en el cristal.

2) La alta densidad del INa (Tl) lo hace muy eficiente para la detección de la radiación gamma.

3) El tiempo de resolución del equipo depende fundamentalmente de las etapas electrónicas, y no del tiempo de resolución del cristal que es del orden de pocos microsegundos.

El tiempo de resolución es proporcional al tiempo que debe mediar en la entrada de dos rayos al detector, para que puedan ser detectados en forma individual. Cuanto mayor sea el tiempo de resolución, menor será la actividad que se podrá medir sin cometer error.

#### INTERACCION DE LA RADIACION GAMMA CON EL CENTELLEADOR

Si un rayo gamma choca con el centelleador, de acuerdo a lo indicado en el capítulo 4, podrá interaccionar principalmente de tres maneras diferentes: por efecto fotoeléctrico, por efecto Compton y por formación de pares.

En el efecto fotoeléctrico prácticamente toda la energía del rayo gamma es transferida a un electrón del centelleador.

$$E_e = E_\gamma - W \quad (6.1)$$

siendo:

$E_e$  : energía adquirida por un electrón del centelleador  
 $E_\gamma$  : energía del fotón incidente  
 $W$  : energía de unión del electrón en la órbita.

El valor  $W$  es pequeño y generalmente queda también absorbido en el cristal.

En el efecto Compton, solamente parte de la energía del rayo gamma es transferida a un electrón del cristal (electrón Compton), el resto lo lleva consigo el rayo gamma dispersado (fotón Compton).

$$E_\gamma = E'_\gamma + E_e \quad (6.2)$$

siendo:

$E_\gamma$  : energía del rayo gamma incidente  
 $E'_\gamma$  : energía del rayo gamma dispersado  
 $E_e$  : energía del electrón Compton

El electrón Compton puede salir con energías comprendidas entre 0 y un valor máximo dado por la siguiente expresión:

$$E_{\text{comp. máx}} = \frac{E_{\gamma}}{(1 + m_0c^2/2 E_{\gamma})} \quad (6.3)$$

siendo:

$m_0c^2$  : masa en reposo del electrón en unidades de energía: 0,51 MeV

El fotón Compton puede salir en todas direcciones con energías comprendidas entre el valor original y el valor

$$E_{\text{fotón}} = E_{\gamma} - \frac{E_{\gamma}}{(1 + m_0c^2/2 E_{\gamma})} \quad (6.4)$$

cuando el electrón sale con la energía máxima que puede salir (6.3). Como se recordará (capítulo 4), en este caso, el fotón sale formando un ángulo de  $180^\circ$  con la dirección incidente (vuelve hacia atrás, pero con una energía dada por la 6.4).

En la formación de pares, el rayo gamma desaparece y se crea un par: positrón y electrón con energías cinéticas tales que se cumple:

$$E_{\gamma} = 2 m_0c^2 + E_{e^-} + E_{e^+} \quad (6.5)$$

siendo:

$E_{e^-}$  : energía del electrón

$E_{e^+}$  : energía del positrón

Para cristales de INa, el efecto fotoeléctrico es preponderante a bajas energías, de ahí que sea la única interacción en el ámbito de los rayos X

El efecto Compton es el más probable a medianas energías.

La formación de pares sólo se insinúa a partir de energías de 1,02 MeV. (fig. 4.16)

A fin de seguir la historia del rayo  $\gamma$ , se supondrá que se tiene una fuente activa que emite rayos  $\gamma$  de la misma energía, por ejemplo el  $^{137}\text{Cs}$  (ver fig. 2.10) que emite rayos  $\gamma$  de una única energía: 0,661 MeV.

Al interaccionar un rayo  $\gamma$  proveniente del  $^{137}\text{Cs}$  con el cristal, podrá sufrir cualquiera de los tres efectos mencionados, se supondrá que sufre efecto fotoeléctrico. En este caso el rayo transfiere toda su energía a un electrón del centelleador (figura 6.3)

Supongamos que entra otro rayo gamma, y que en lugar de sufrir efecto fotoeléctrico tiene lugar efecto Compton, y que el fotón Compton sufre una interacción fotoeléctrica. Como estos dos efectos tienen lugar muy pocos separados en el tiempo el resultado es igual al caso anterior: toda la energía del rayo gamma es transferida a electrones del cristal (fig. 6.4)

La acción Compton puede ser seguida por esta variante: el fotón Compton escapa del cristal sin sufrir nueva interacción, por lo tanto sólo parte de la energía del rayo gamma es transferida al electrón del cristal, la otra se pierde (fig. 6.5)

Si en lugar de tener una fuente de  $^{137}\text{Cs}$  se tuviera una fuente que emite rayos de energías mayores que 1,02 MeV, entraría en competencia la formación de pares, en este caso el rayo gamma desaparece y se crea un electrón y un positrón. Qué sucede con ese positrón y ese electrón? Podrían tener lugar las siguientes variantes:

a) el electrón y el positrón son frenados dentro del cristal. El positrón da lugar a dos rayos gamma de 0,51 MeV cada uno, que a su vez pueden transferir toda su energía a electrones del cristal

b) el electrón y el positrón sólo dejan parte de su energía

c) el electrón y positrón dejan toda su energía, pero escapan ambos rayos de aniquilamiento

d) el electrón y el positrón dejan toda su energía, pero escapa un solo rayo de aniquilamiento

e) alternativas combinadas

Por lo tanto, a través de la formación de pares el rayo gamma puede transferir toda su energía a electrones del cristal (caso a), parte de su energía (caso b), su energía menos 1,02 MeV (caso c), su energía menos 0,51 MeV (caso d) y variantes intermedias.

Resumiendo, los mecanismos por los cuales un rayo gamma puede transferir toda su energía a electrones del cristal es por:

- 1) efecto fotoeléctrico
- 2) efecto Compton seguido por efecto fotoeléctrico, o diferentes interacciones que conduzcan a la absorción total del fotón Compton.
- 3) formación de pares, variante a)

¿ Qué sucede con la energía absorbida por los electrones del cristal?

Se sabe que éstos, si el cristal tiene un tamaño adecuado, realizarán todo su camino dentro del cristal y por lo tanto entregarán toda su energía al centelleador,

esto es lo que se observa en las figuras 6.3, 6.4 y 6.5. En otras palabras, en condiciones óptimas, la energía del rayo gamma transferida a electrones del cristal queda retenida en el cristal.

Independientemente del tipo de interacción primaria que tenga lugar (efecto fotoeléctrico, Compton o de formación de pares), si ésta se lleva a cabo en la superficie del cristal, puede darse el caso de que él o los electrones sólo realicen parte de su recorrido en el mismo (fig. 6.6). En ese caso, a pesar de haber tenido inclusive efecto fotoeléctrico, no toda la energía gamma se transfiere al cristal.

Como conclusión, la energía del rayo gamma que interaccionó con el centelleador quedará dentro del mismo, siempre que no sólo el rayo haya sido absorbido sino también los electrones (o positrones) a que dió origen, en acciones primarias y secundarias dentro del cristal.

### TRANSFORMACION DE LA ENERGIA ABSORBIDA POR EL CRISTAL EN ENERGIA LUMINOSA

¿Qué sucede con esta energía que queda en el cristal?

En gran parte es devuelta en forma de luz, y como la longitud de onda de los fotones emitidos por el cristal es característica del mismo, (en el caso de  $\text{Na(Tl)}$  se emiten fotones, presentando la mayoría de ellos una longitud de onda de 4.100  $\text{\AA}$  Armstrong, independientemente de la radiación que haya interaccionado con el cristal), el número de fotones emitidos será proporcional a la energía absorbida siempre que la eficiencia de transformación de energía absorbida por el cristal a fotones sea independiente de la energía absorbida por el centelleador, hecho que tiene lugar cuando se trata de radiación gamma y cristales de  $\text{Na(Tl)}$ . Este hecho se hace notat diciendo que el centelleador responde linealmente a la energía.

En otras palabras, existe una correspondencia entre la energía absorbida en el cristal y el número de fotones liberados por el mismo. En los casos en que el rayo gamma dejó toda su energía hay proporcionalidad entre la energía del rayo gamma y el número de fotones producidos en el centelleador.

### TRANSFORMACION DE LA LUZ EMITIDA POR EL CRISTAL EN PULSOS

Los fotones producidos en el cristal, salen del mismo y chocan con el cátodo del fotomultiplicador. Si bien la mayoría de los fotones llegan al fotocátodo algunos se pierden en el camino centelleador-fotocátodo. Para reducir esta pérdida al mínimo, es necesario que el cristal esté unido íntimamente al fotomultiplicador.

Los fotones al interaccionar con el fotocátodo producen emisión de electrones, con eficiencia inferior a 1 como ya se indicó.

Estos electrones producidos en el fotocátodo generan emisión de electrones secundarios en los dinodos del fotomultiplicador en forma multiplicada, de manera que al final se libera una corriente de electrones (se genera un pulso) que será proporcional al número de electrones producidos en el fotocátodo.

Recordando que éstos últimos son proporcionales al número de fotones generados en el cristal, y éstos a su vez a la energía absorbida por el cristal, se tiene:

$E_{\text{absorbida}} \longrightarrow$  altura del pulso a la salida del fotomultiplicador

Idealmente, en el caso del  $^{137}\text{Cs}$  (fig. 2.10) que tiene un rayo gamma de 0,660 MeV y un rayo X, si solamente se tuvieran en cuenta por un lado los efectos primarios de la radiación con el cristal (efecto fotoeléctrico y efecto Compton, en este caso en que la energía de la radiación es menor que 1,02 MeV) y por otro lado que los electrones fotoeléctricos y Compton fueran absorbidos totalmente, en tanto que los fotones Compton escapan del cristal, se debiera obtener una distribución de pulsos a la salida del fotomultiplicador similar al gráfico de la figura 6.7 .

Los impulsos de mayor tamaño tienen su origen en los fotoelectrones, de ahí que su altura sea proporcional a los mismos y por lo tanto a los rayos gamma.

La distribución Compton tiene su origen en los electrones Compton, de ahí que esa distribución de pulsos sea proporcional a la energía de los electrones Compton. Los pulsos correspondientes al pico Compton se originan en los electrones Compton de máxima energía (expresión 4.9).

Los impulsos denominados con X se originan en los fotoelectrones del efecto fotoeléctrico de los rayos X del  $^{137}\text{Cs}$ .

En la práctica se observan variantes al gráfico anterior que se traducen en la figura 6.8 .

En lugar de aparecer impulsos del mismo tamaño en el pico fotoeléctrico, aparece una verdadera distribución Normal y con una frecuencia mayor que la que le correspondería teniendo en cuenta los rayos gamma que sufrieron efectos fotoeléctrico.

La aparición de una distribución de amplitudes se debe a ciertas alteraciones a las condiciones ideales siendo las principales:

a) a pesar de que se trata de utilizar fuentes de poder altamente estabilizadas es inevitable que se produzcan alteraciones, lo que origina fluctuaciones en la multiplicación que se traduce en variaciones en el tamaño de los impulsos originados en la absorción de una misma cantidad de energía en el cristal.

b) variación, aunque en pequeña escala, en la eficiencia de transformación

de fotones a electrones en el fotocátodo

c) cierta opacidad del cristal que aumenta con el uso del mismo, que impide que todos los fotones generados en el cristal logren salir

d) mala unión del cristal al fotomultiplicador

e) mala conducción de los electrones dentro del fotomultiplicador

f) quebraduras en el cristal

Fundamentalmente inciden los factores a) y b).

La mayor frecuencia de pulsos que lo esperado, en esta zona, se debe a que no solamente contribuyen a ella los impulsos generados en el efecto fotoeléctrico, sino todos aquellos provenientes de rayos que se absorbieron totalmente en el cristal (figs. 6.3 y 6.4). De ahí que a esa distribución se le suele llamar fotopico en lugar de pico fotoeléctrico.

En la distribución Compton no sólo habrá impulsos originados en la absorción total de electrones Compton, sino otros originados en electrones provenientes de otros efectos y que no se absorbieron totalmente (fig. 6.6). Esta última contribución es pequeña, ya que el recorrido de un electrón en el cristal es en promedio de 1 mm.

Por lo tanto, a no ser que el cristal sea muy pequeño o que la interacción se lleve a cabo en la superficie, son muy pocos los que logran escapar.

Por otro lado aparece una novedad: la dispersión. La dispersión, que aparece montada sobre la distribución Compton, se origina en la interacción de los rayos gamma con elementos ajenos al cristal (geometría externa al cristal).

Dentro de la dispersión se definen pulsos de un tamaño determinado que configuran lo que se conoce con el nombre de pico de dispersión. Esos pulsos se originan en rayo gamma que interaccionaron en forma Compton con el material externo, principalmente la ventana del fotomultiplicador, y mediante un ángulo de  $180^\circ$  entraron nuevamente al cristal (tabla 4.2 y fig. 6.9)

Resumiendo:

1) la transferencia de energía del rayo gamma al cristal se hace a través de electrones del mismo

2) la altura de los pulsos a la salida del fotomultiplicador es proporcional a la energía absorbida en el cristal (fig. 6.10)

3) el fotopico se origina en aquellos rayos que dejaron toda su energía en el cristal (figs. 6.3 y 6.4)

4) la distribución Compton tiene su origen, en primer lugar, en aquellos rayos que sufrieron efecto Compton y el rayo dispersado escapó del cristal, y en se-

gundo lugar, en pequeña proporción, en todos aquellos casos en que los electrones encargados de transferir la energía al cristal no lograron totalizar su recorrido dentro del mismo (figs. 6.5 y 6.6)

5) la dispersión tiene su origen en rayos gamma que interaccionaron con materiales externos al cristal y luego entraron al mismo.

De lo expuesto se comprende que la distribución de frecuencias de impulsos o espectro de impulsos a la salida del fotomultiplicador depende a igualdad de energía del rayo gamma, del:

- a) tamaño del cristal
- b) lugar de la interacción

Efectivamente, cuanto mayor sea el cristal mayor será el área relativa del fotopico (fig. 6.11). Se entiende por área relativa del fotopico el cociente entre el área del fotopico y el área total del espectro.

Si la interacción gamma con el cristal tiene lugar en la superficie del mismo es más probable que el rayo no pueda dejar toda su energía (fig. 6.5 y 6.6)

A igualdad de tamaño del cristal, el área relativa del fotopico depende de la energía de la radiación. El área es mayor cuanto menor es la energía de la radiación. Los rayos X, que prácticamente sólo sufren efecto fotoeléctrico, dejan toda su energía dentro del cristal y por lo tanto su espectro sólo presenta fotopico.

## AMPLIFICACION DE LOS PULSOS

Una vez que los pulsos salen del fotomultiplicador, pasan al preamplificador y de ahí al amplificador donde son amplificados entre 100 y 1000 veces para alcanzar el tamaño necesario para ser registrados.

## CONTROL DE GANANCIA O ATENUADOR

Del amplificador pasan los impulsos a otra etapa electrónica: el control de ganancia.

El control de ganancia puede operar, en general, en ganancia total, a  $1/2$  de ganancia total, a  $1/4$  de ganancia total, a  $1/8$  de ganancia total, a  $1/16$  de ganancia total y a  $1/32$  de ganancia total.

¿ Cómo opera el control de ganancia ?

Cuando se trabaja en ganancia total, el pulso atraviesa esa etapa sin alteración. Cuando se trabaja a  $1/2$  de ganancia, el pulso es cortado a la mitad, cuando

se trabaja a  $1/4$  de ganancia total el pulso es disminuído a la cuarta parte, cuando se trabaja a  $1/8$  de ganancia total el pulso es reducido a la octava parte, y así sucesivamente.

## ANALIZADORES DE IMPULSOS - DISCRIMINADORES

Una vez que los pulsos salen del control de ganancia pueden pasar, en el caso de un equipo monocanal como el de la figura 6.1, a la etapa discriminadora.

Los discriminadores actúan como filtros electrónicos, como verdaderos ce-dazos, que permiten decidir que impulsos (de acuerdo a su tamaño) serán registra-dos y cuales no. En otras palabras analiza y clasifica los impulsos de acuerdo a su tamaño.

Los equipos monocanales pueden funcionar con uno o dos discriminadores. Cuando funcionan con dos discriminadores se dice que están operando como espec-trómetros. Cuando funcionan con un sólo discriminador se dice que están operando con discriminador simple o integral.

Mediante un espectrómetro se puede obtener un espectro diferencial similar al de la figura 6.8., puesto que ya que tanto la etapa amplificadora como el control de ganancia son lineales, el espectro obtenido a la salida del amplificador es si-milar al de la salida del fotomultiplicador con la diferencia que los impulsos han sido multiplicados por un factor comprendido entre 100 y 1.000

Con un equipo en el que actúa un solo discriminador, solo se pueden obtener espectros integrales como se verá más adelante.

Veremos como realizan la clasificación de pulsos los discriminadores.

En la figura 6.12 se observa un tren de pulsos distribuídos en el tiempo a la salida del control de ganancia.

Cuando el equipo funciona con un solo discriminador se pueden elegir algunas variantes. La más usual consiste en mantener constantes la tensión aplicada al fotomultiplicador y el control de ganancia durante el desarrollo del trabajo, e ir variando la tensión de base (umbral) del discriminador. En esa forma solo pasarán al sistema de registro aquellos impulsos cuya tensión supere la tensión umbral del discriminador. En este caso se dice que el equipo funciona con discriminador in-tegral y lo que se obtiene mediante el equipo funcionando en esas condiciones recibe el nombre de espectro integral.

Si el discriminador se ubica en el nivel más bajo (cero por ejemplo) serán enviados al sistema de registro todos los impulsos (los representados en la fig. 6.12)

Si el umbral se ubica en 1 unidad de tensión, sólo pasarán aquellos impulsos cuyo tamaño (tensión) supere ese valor: pasarán 21 pulsos. Si al discriminador se le aplican 2 unidades de tensión, sólo pasarán aquellos impulsos cuya tensión supere ese valor: se registrarán 18 impulsos. Si el nivel de discriminación se establece en 3 unidades solamente se registrarán 16 impulsos. Si el umbral se fija en 8 unidades solamente se tienen 2 impulsos que superan ese valor. Si al discriminador se le da una tensión de 10 unidades, solamente un impulso superará ese valor y solamente él podrá ser registrado. Si el nivel se lleva por encima de 11 unidades todos los impulsos serán rechazados y no se registrarán impulsos (fig. 6.13)

Cuando el equipo actúa con dos discriminadores se dice que funciona como espectrómetro.

Uno de los discriminadores discrimina por la base y fija el nivel inferior del impulso, impulsos cuyas alturas sean menores que la base del discriminador serán rechazados. El otro discriminador, llamado discriminador superior, discrimina por la altura máxima del impulso. Impulsos que superen la tensión del discriminador superior también serán rechazados.

A la tensión asignada al discriminador inferior se le suele llamar base del discriminador ( $V$ ), y a la diferencia entre la tensión del discriminador superior e inferior se la conoce por ventana o canal ( $\Delta V$ ).

La ventana puede variarse tomando valores diferentes.

Resumiendo: sólo serán aceptados impulsos cuyas alturas estén comprendidas entre  $V$  y  $V + \Delta V$ .

Cuando el equipo funciona como espectrómetro se pueden también elegir variantes. La más común es la utilizada en el caso anterior: mantener la tensión aplicada al fotomultiplicador y el control de ganancia constantes, manteniendo también la ventana invariable, e ir modificando la tensión de base del discriminador.

Volviendo a la figura 6.12, si la base del discriminador se fija en 0 y la ventana en 1 unidad, sólo serán registrados 4 impulsos. Si la base se fija en 1 y la ventana se mantiene constante sólo 3 impulsos responderán a las condiciones requeridas y serán contados. Si la base se fija en 2 con la misma ventana sólo se contarán 2 impulsos. Si la base se fija en 3 manteniendo la ventana sólo se registrará un impulso. El resultado de representar los impulsos registrados en función de la tensión aplicada al discriminador inferior (base del discriminador) manteniendo la ventana constante en una unidad se puede apreciar en el gráfico a) de la figura 6.14

Si se representan las mismas variables pero utilizando una ventana constante de dos unidades de tensión ( $\Delta V = 2$ ) se obtiene el gráfico b) de la figura 6.14

Como se ha dicho anteriormente, el gráfico de la figura 6.13 representa un espectro integral de los impulsos indicados en la figura 6.12

Los gráficos de la figura 6.14, representan espectros diferenciales de los impulsos mostrados en la figura 6.12.

En la práctica, el rango de tensiones que se pueden aplicar al discriminador de base es dependiente del equipo, en los valvulares es del orden de 0 a 100 voltios en general, en el caso de los transistorizados puede ser de 0 a 8 ó de 0 a 10 voltios

Las ventanas que se pueden utilizar son generalmente del 1%, 2%, 5%, y 10% del rango total de la escala.

#### SISTEMA DE REGISTRO

Los sistemas de registro pueden ser escalímetros o integradores.

Los escalímetros registran los impulsos en forma individual, de manera que para obtener el número de impulsos por unidad de tiempo (actividad aparente) es necesario acumular un número de impulsos y dividir por el tiempo de acumulación, en cambio el integrador es un equipo que informa directamente actividad aparente.

#### CALIBRACION DEL ESPECTROMETRO - RESOLUCION

Ya se indicó que la altura del impulso liberado en el fotomultiplicador y por lo tanto el que entra en el discriminador (puesto que todas las etapas amplificadoras tienen caracter lineal) son proporcionales a la energía absorbida en el cristal.

Por lo tanto, una vez encontrada la correspondencia entre energía absorbida y amplitud del impulso al que dió origen (en otras palabras, una vez calibrado el espectrómetro en energías), en lugar de graficar en abscisas amplitud de impulsos se podrían graficar energías.

Para calibrar el espectrómetro hay que recordar que la altura de los impulsos que originan el fotopico es proporcional a la energía de la radiación gamma del nucleído utilizado ( el fotopico se origina en aquellos rayos gamma que dejaron toda su energía en el cristal). De ahí que disponiendo de nucleídos cuyas energías gamma se conocen se puedan lograr gráficos similares a los de la figura 6.15, en los cuales se encuentra una correspondencia entre el tamaño del impulso y la energía del rayo gamma que lo originó. Conviene disponer de por lo menos tres rayos gamma cuyas energías se conozcan.

La amplitud del impulso utilizado para la calibración, es la del más frecuente en la distribución fotopico, y de la figura 6.16 se puede pasar a la 6.15 .

Anteriormente se había indicado que había una distribución gaussiana alrededor de ese valor. Esa dispersión determina la resolución en energías del instrumento.

La resolución es simplemente la desviación standard porcentual de la distribución fotopico, y por lo tanto estará dada por la siguiente expresión:

$$\text{Resolución \%} = \frac{100 \cdot \Delta V}{V} = \frac{100 \cdot \Delta E}{E} = \frac{100 \cdot \Delta l \text{ (cm)}}{l \text{ (cm)}} \quad (6.6)$$

siendo:

$\Delta l$  : ancho del pico a mitad de altura

$l$  : amplitud del pulso de mayor abundancia en la distribución fotopico en unidades de longitud (ver figura 6.16)

La resolución mejora con la tensión aplicada al fotomultiplicador y con la energía del rayo gamma. Obviamente empeora con el tamaño de la ventana utilizada.

#### Influencia del control de ganancia o atenuador en la calibración

De acuerdo al esquema de la figura 6.1 , antes de la etapa discriminadora se ha intercalado un control de ganancia, que se le suele llamar atenuador.

Se tratará de indicar como se traduce en la práctica la operación del atenuador.

Cuando se hace una calibración hay que fijar ciertas condiciones de trabajo, las más usuales son las que mantienen estos tres controles constantes durante la operación:

1) Tensión aplicada al fotomultiplicador, a esta tensión se la suele llamar tensión de trabajo (T.T.)

2) Control de ganancia o atenuación

3) Ventana

Teniendo en cuenta que la calibración presentada en la figura 6.15.a ha sido realizada en las siguientes condiciones:

T.T. = 600 voltios

$\Delta V$  = 1% de escala total = 0,1 voltios

At = Control de ganancias = ganancia total = X1

el impulso pasará de los amplificadores a los discriminadores sin sufrir alteración

Si se repite la calibración manteniendo las características anteriores, salvo la atenuación que se lleva a 1/2 de ganancia total (X 2), los impulsos antes de pasar al discriminador son reducidos a la mitad, por lo tanto para una absorción de energía similar al caso anterior se obtendrán impulsos de amplitud mitad (fig. 6.15.b)

Si se hace una tercera calibración manteniendo tensión de trabajo y ventana, pero operando a 1/4 de ganancia total (X 4) se obtendría un gráfico similar al de la figura 6.15.c

A medida que aumentamos la atenuación, la recta de calibración adquiere más pendiente (se hace más empinada). El ancho de los picos disminuye, y por lo tanto la frecuencia del pulso más frecuente en la distribución aumenta (fig. 6.17)

¿Qué ventaja nos incorpora el control de ganancia?

El pulso de mayor tamaño que puede ser registrado, es el que tiene una amplitud igual al total de la escala de tensiones aplicables al discriminador inferior (10 voltios en los transistorizados). Si no se dispusiera del control de ganancia sólo se podría, en el caso de la figura 6.15 detectarse impulsos originados en la absorción total de energías de cerca de 1,08 MeV.

En cambio, trabajando en las condiciones utilizadas para lograr el gráfico de la figura 6.15.b (At = X 2) se pueden detectar impulsos originados en la absorción total de rayos gamma de cerca de 2,1 MeV.

#### Efecto de la tensión aplicada al fotomultiplicador

Se dispone de otra variable, que nos permite ampliar la energía límite que se puede detectar, permitiendo, en general, medir radiaciones de cualquier energía, esta variable es la tensión aplicada al fotomultiplicador.

Se sabe que la tensión aplicada al fotomultiplicador nos da el factor de multiplicación secundaria en los dinodos.

A medida que la tensión aumenta se lograrán, para la misma energía absorbida, pulsos de más amplitud (figs. 6.18, 6.19, 6.20, 6.21, 6.22, 6.23, 6.24 y 6.25)

Es interesante hacer notar, como ya se indicó, que la amplitud del impulso crece exponencialmente con la tensión aplicada al fotomultiplicador (fig. 6.26)

Contando con un espectrómetro calibrado, no sólo se pueden determinar actividades de una fuente activa, sino algo muy importante como es determinar la energía gamma de un nucleído activo.

### EQUIPO CON DISCRIMINADOR SIMPLE O INTEGRAL

Los métodos de trabajo pueden ser los siguientes:

- 1) T.T. = constante  
Control de ganancia o atenuador = constante  
Tensión base del discriminador ; se irá variando

Si se confecciona un gráfico en el que en ordenadas se indica actividad, y en abscisas tensión base del discriminador se obtiene un gráfico similar al de la figura 6.27 b

Se elige luego la tensión base del discriminador óptima para realizar las mediciones de fuentes activas.

- 2) Atenuador = constante  
Tensión base del discriminador = constante  
T. T. ; se irá variando

Si se representa en un gráfico actividad medida en función de tensiones aplicadas al fotomultiplicador se obtiene algo similar al gráfico de la figura 6.28

En estas condiciones trabajan también los escalímetros acoplados a sondas centelleadoras. La diferencia radica en que en éstos últimos la base del discriminador no se puede elegir, viene ya prefijada en el escalímetro. La figura 6.28 se obtuvo con un equipo de este tipo.

Para realizar mediciones de fuentes activas, se elige la tensión de trabajo óptima que generalmente se elige sobre la pendiente más suave de la curva. -

## REFERENCIAS

- (1) BIRKS, J. B., Scintillation Counters, Pergamon Press Ltd., London, (1953).
- (2) CHASE, G. D., RABINOWITZ, J. L., Principle of Radioisotope Methodology, Burgess Publishing Company, Minneapolis 15, Minnesota.
- (3) HARRIS, C. C., HAMBLIN, D. P., FRANCIS, J. E., Basis Principles of Scintillation Counting for Medical Investigators, Oak Ridge National Laboratory, ORNL - 2808/ORINS - 30, Biology and Medicine.
- (4) HINE, G. J., Instrumentation in Nuclear Medicine, Volumen I, Academic Press Inc., 111 Fith Avenue, New York, New York 10003, U.S.A., (1967).
- (5) LEDERER, C. M., HOLLANDER, J. M., PERLMAN, I., Table of Isotope, Sexta edición, John Wiley and Sons, Inc., New York, (1968).
- (6) ROSS, D. A., Medical Gamma - Ray Spectrometry, Oak Ridge Institute of Nuclear Studies, ORNL - 2808/ORINS - 30, Biology and Medicine.
- (7) SEELMANN EGGBERT, W., PFENNING, G., MUNZEL, H., Tabla de Núclidos, Karlsruhe, Alemania, Tercera edición, (1968).

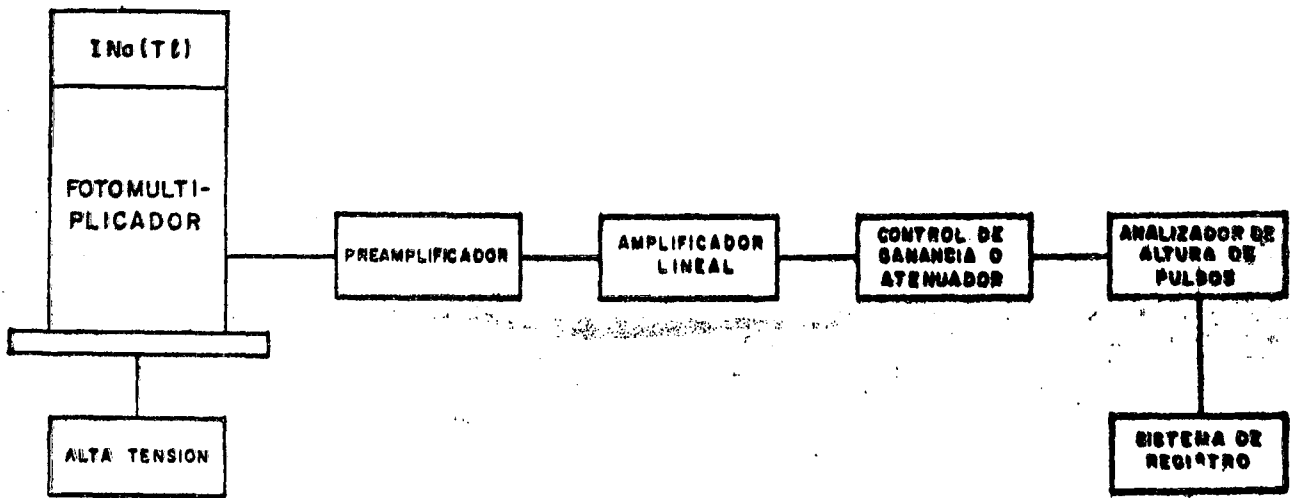


Fig. 6.1 Esquema del contador de centelleo monoanal

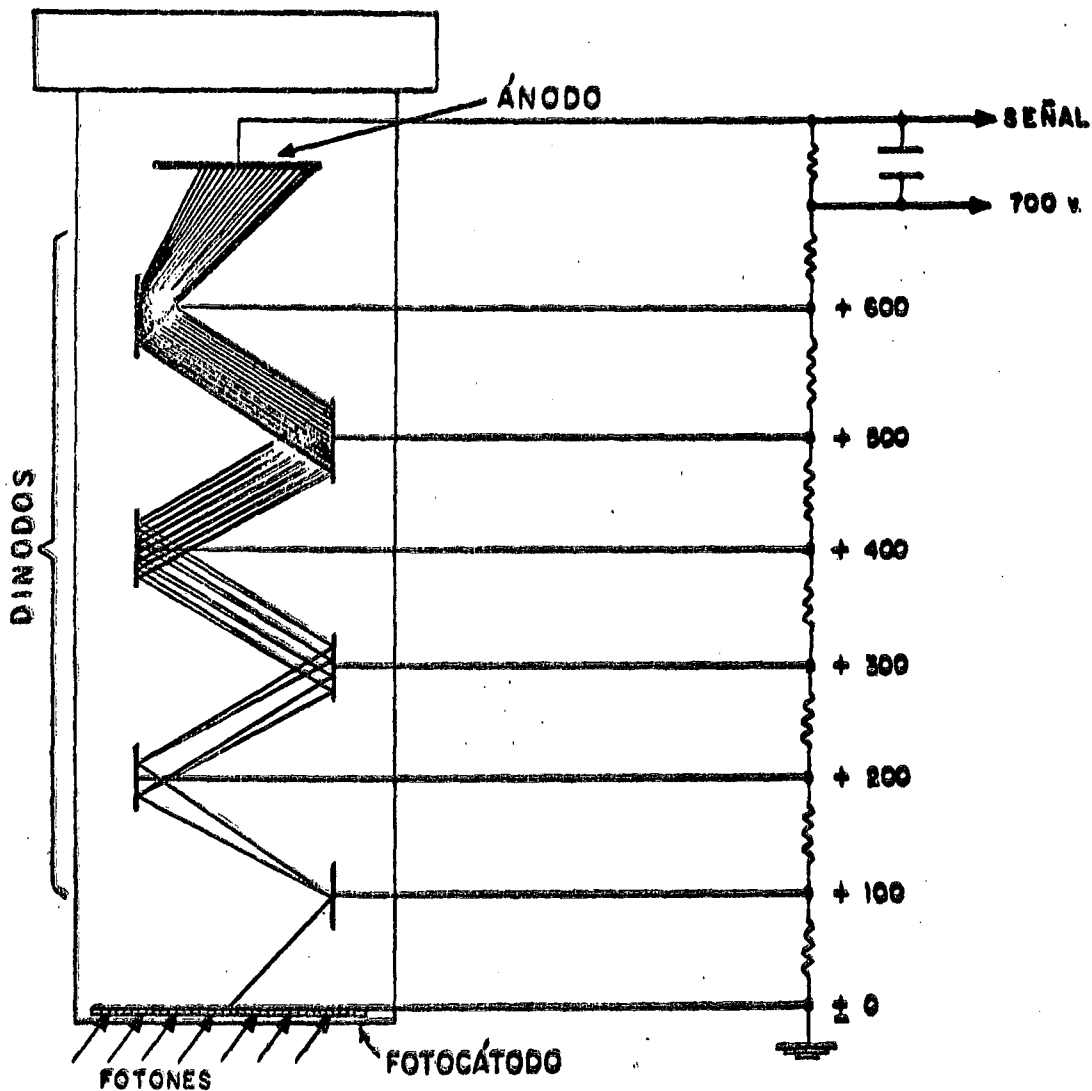


Fig. 6.2 Principio de operación del fotomultiplicador

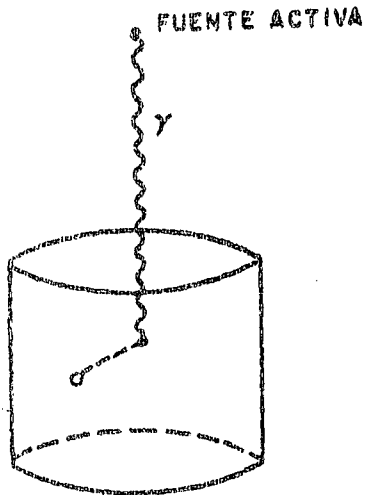


Fig. 6.3 Absorción total de la radiación gamma a través de efecto fotoeléctrico

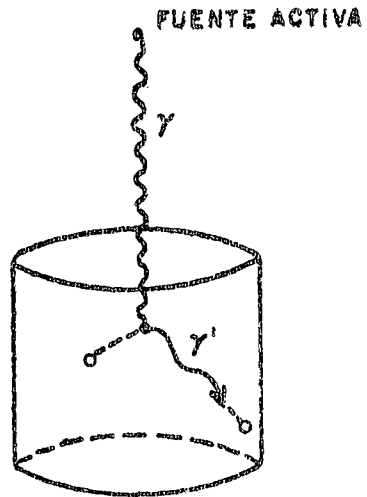


Fig. 6.4 Absorción total de la radiación gamma a través de efecto Compton seguido por fotoeléctrico

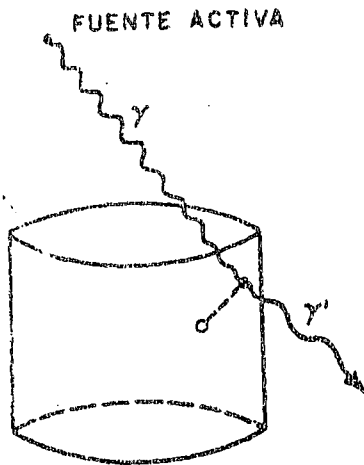


Fig. 6.5 Absorción parcial de radiación gamma con pérdida del fotón dispersado

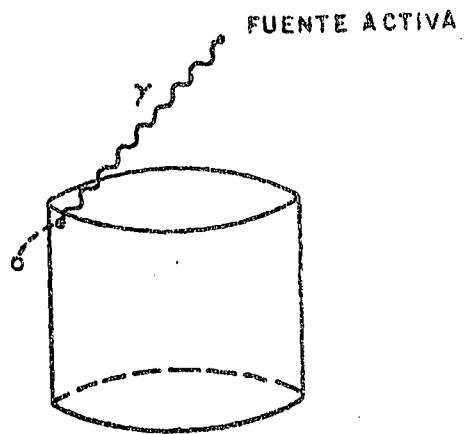


Fig. 6.6 Absorción parcial de radiación gamma con pérdida del fotoelectrón

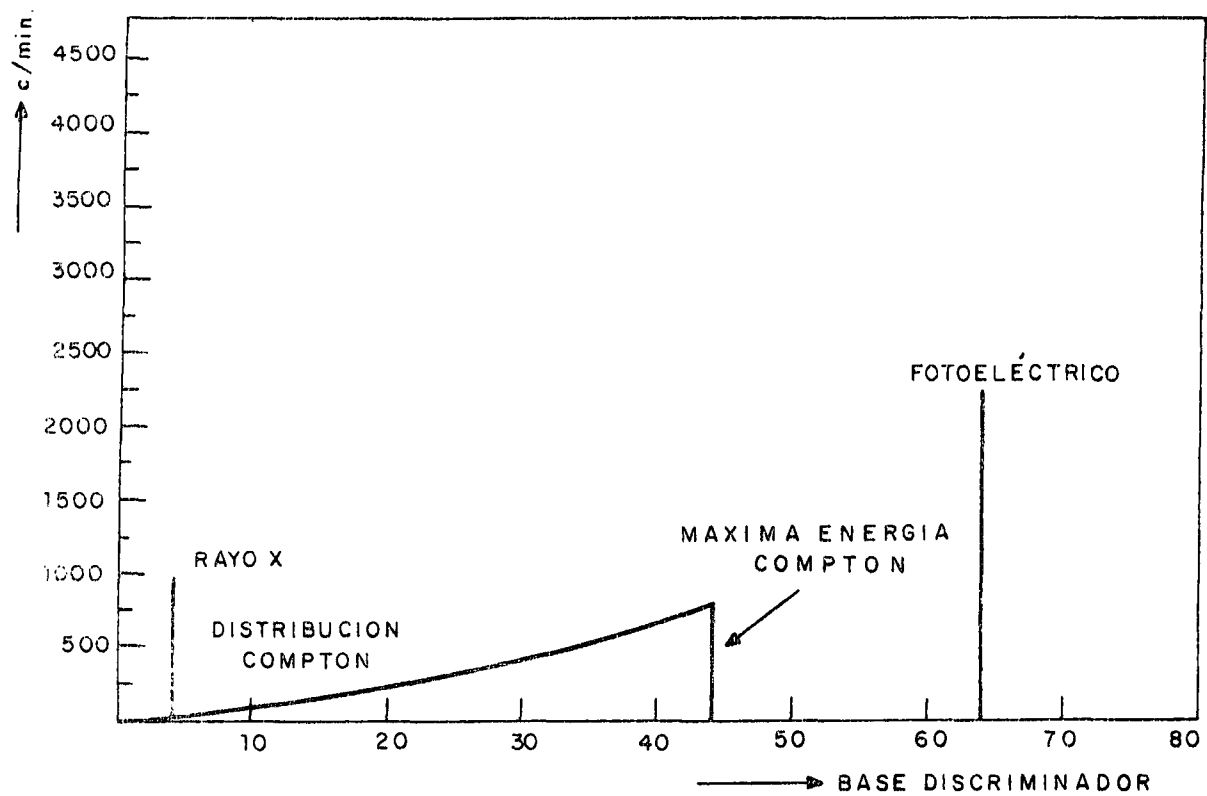


Fig. 6.7 Espectro ideal de  $^{137}\text{Cs}$

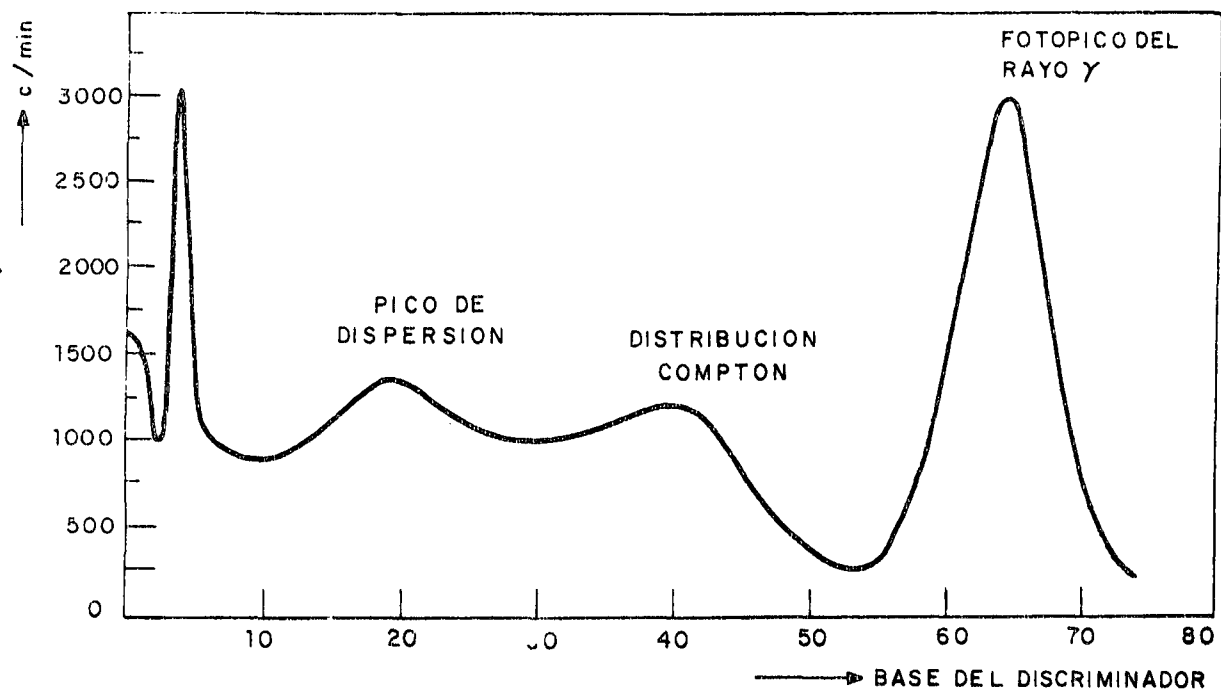


Fig. 6.8 Espectro real de  $^{137}\text{Cs}$

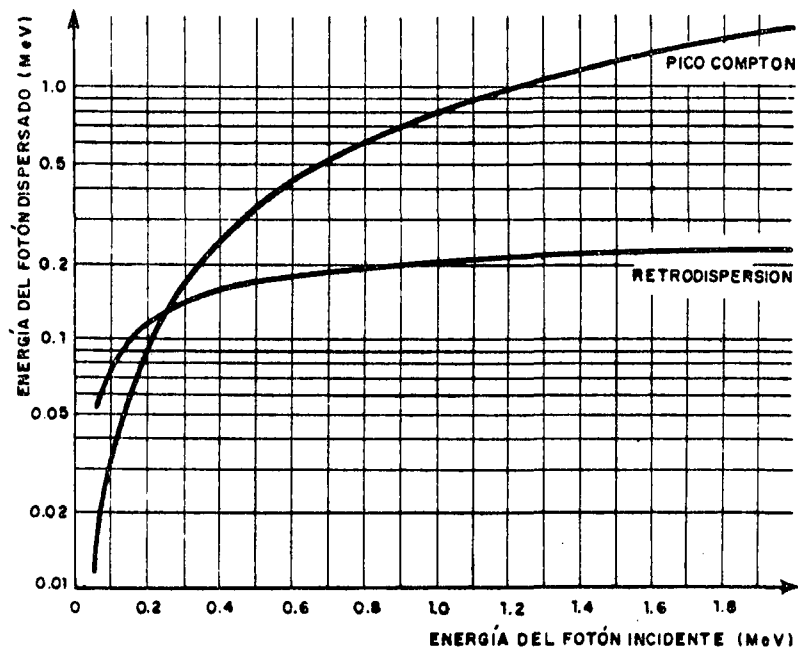


Fig. 6.9 Energías del pico Compton y de la retrodispersión en función de la energía de la radiación gamma incidente.

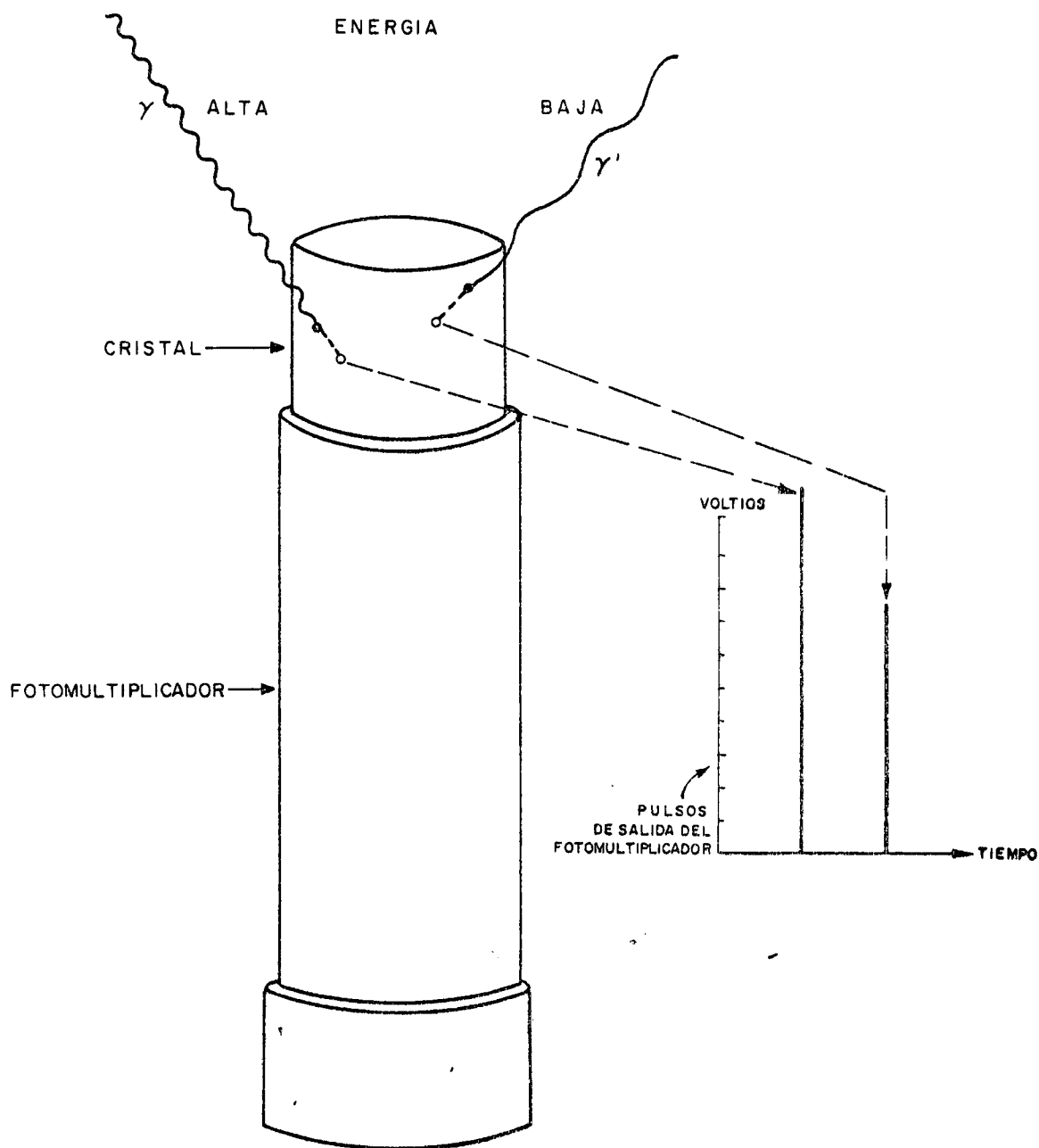


Fig. 6.10 Los pulsos liberados en el fotomultiplicador son proporcionales a la energía absorbida en el cristal

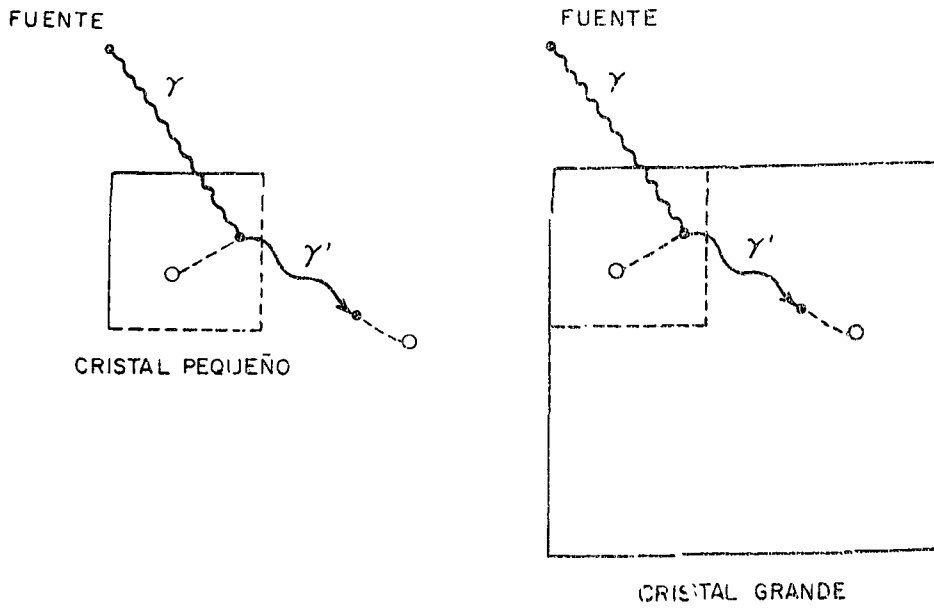


Fig. 6.11 La absorción de la radiación gamma fué total en el cristal grande, no así en el pequeño

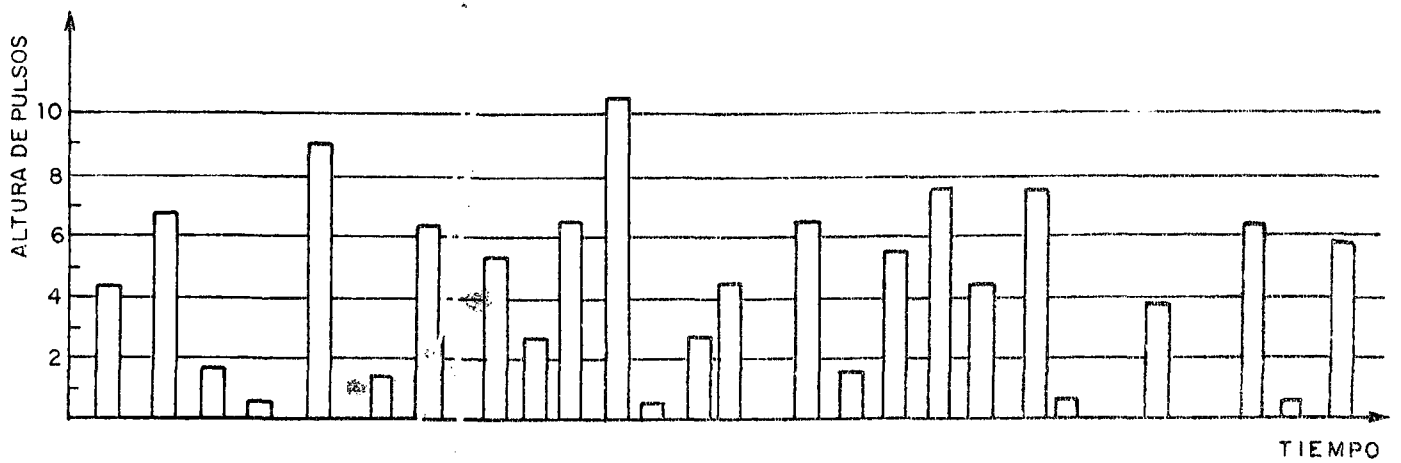


Fig. 6.12 Tren de pulsos a la entrada del analizador

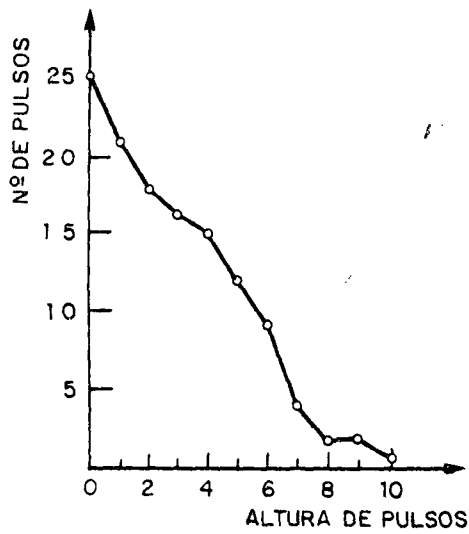


Fig. 6.13 Espectro integral

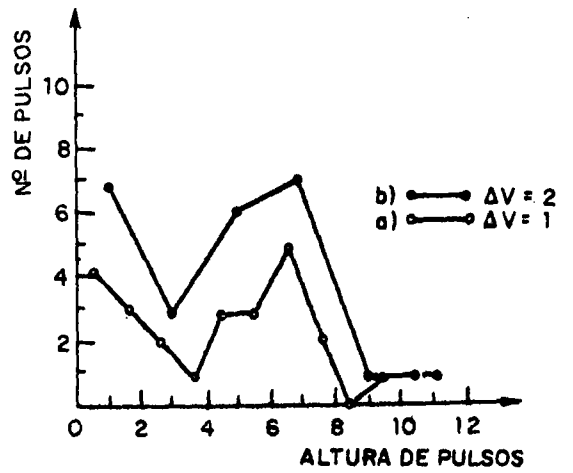


Fig. 6.14 Espectro diferencial

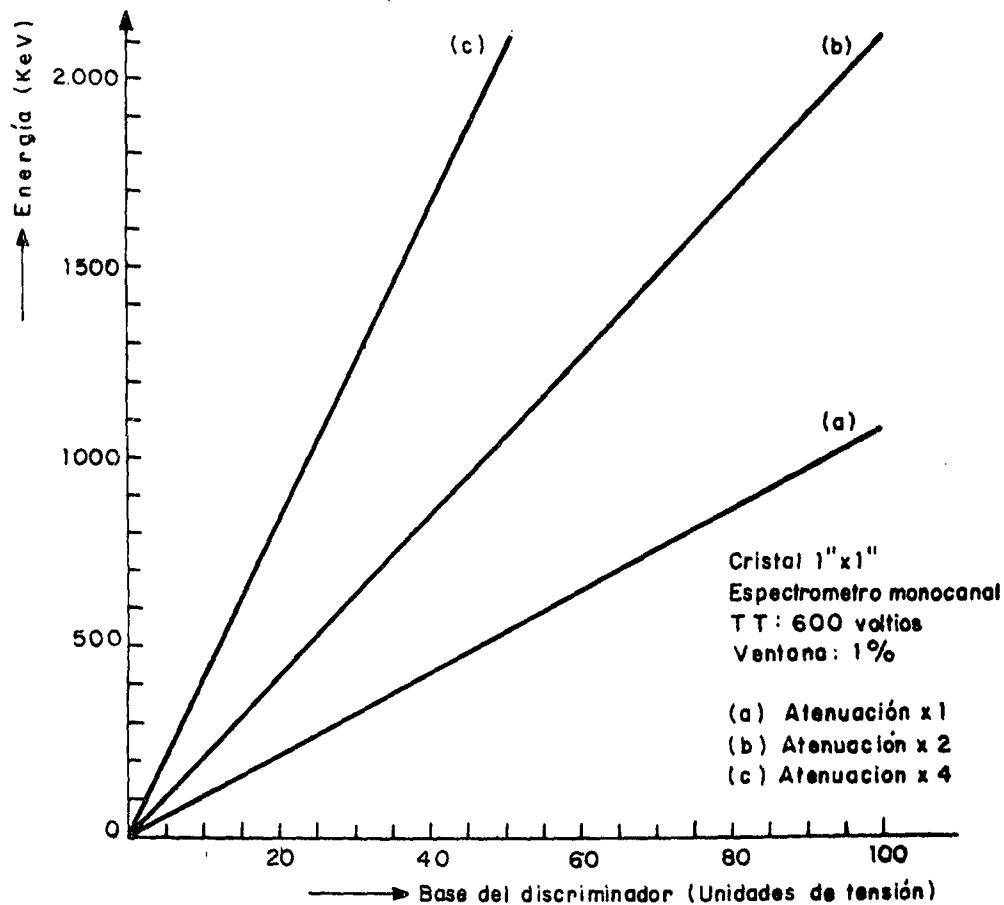


Fig. 6.15 Calibración del espectrómetro a diferentes atenuaciones

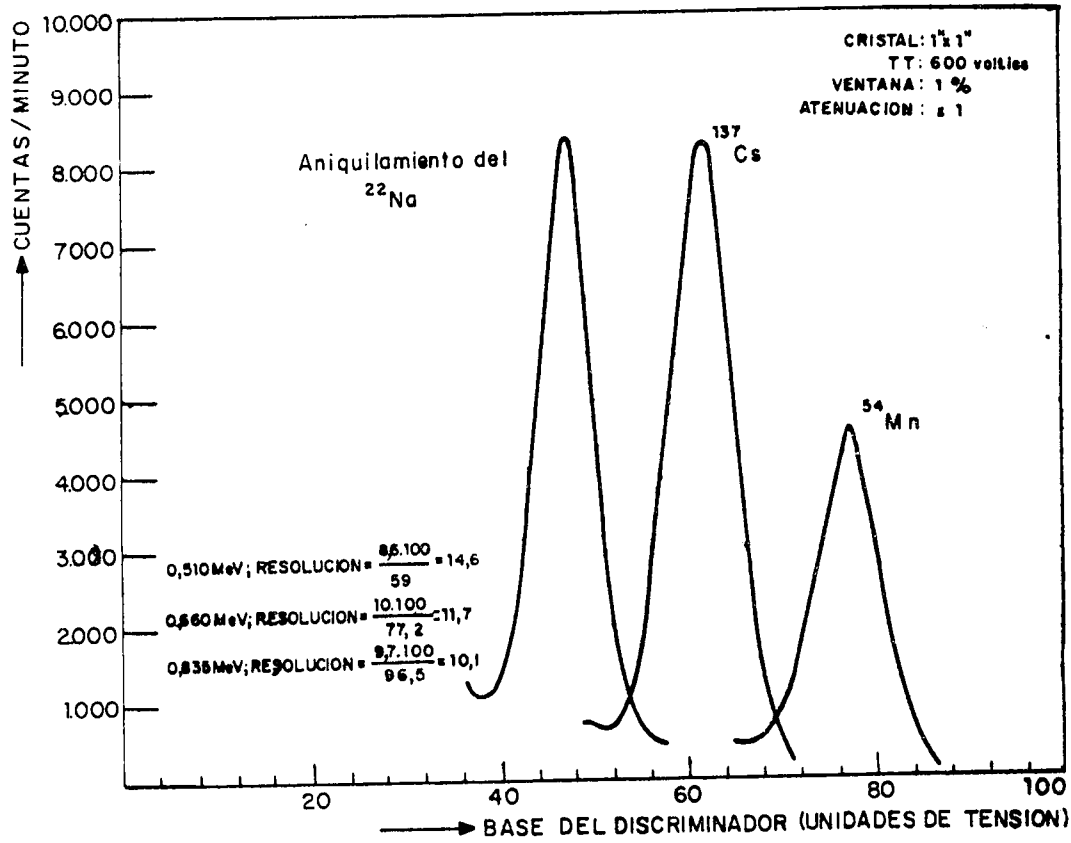


Fig. 6.16 Fotopicos para tres rayos gamma y cálculo de la resolución de los mismos

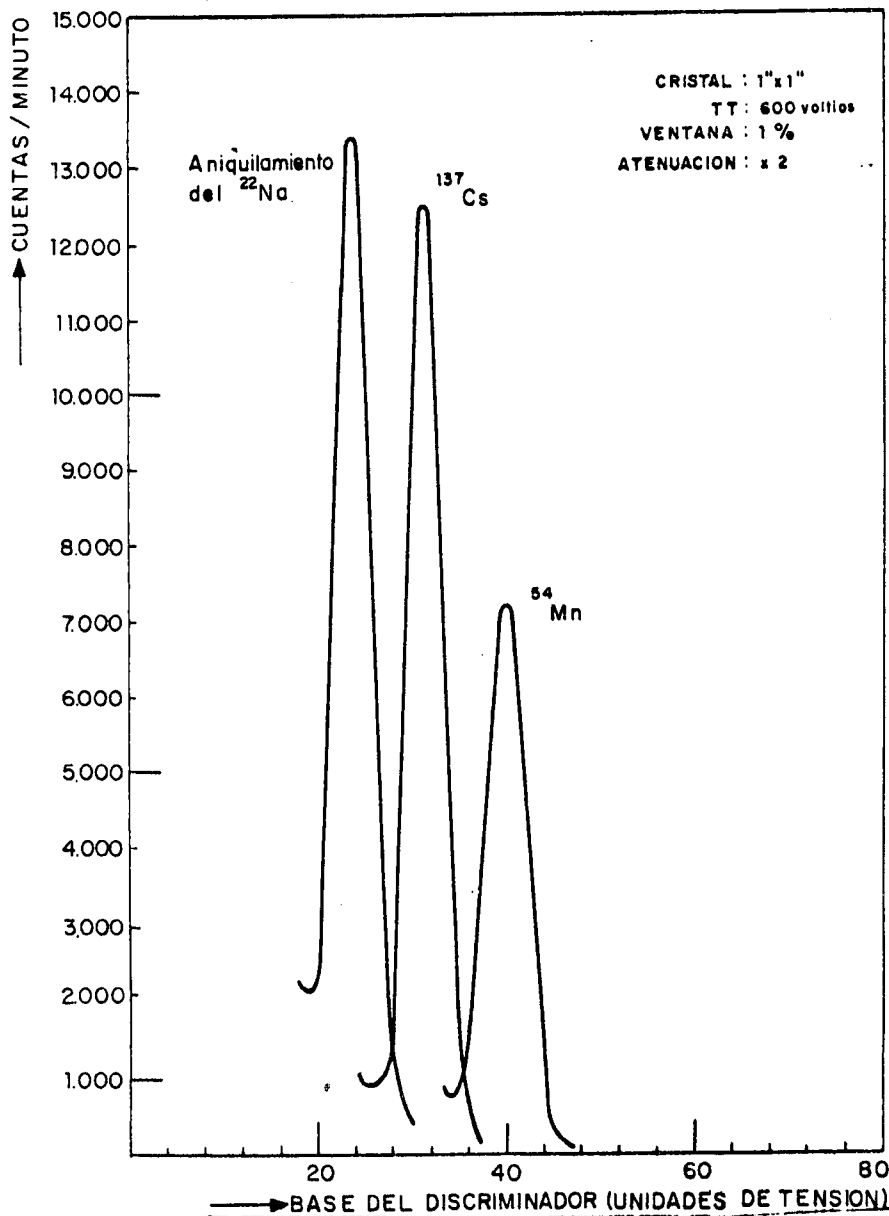


Fig. 6.17 Espectrómetro monocanal. Fotopicos para tres rayos gamma

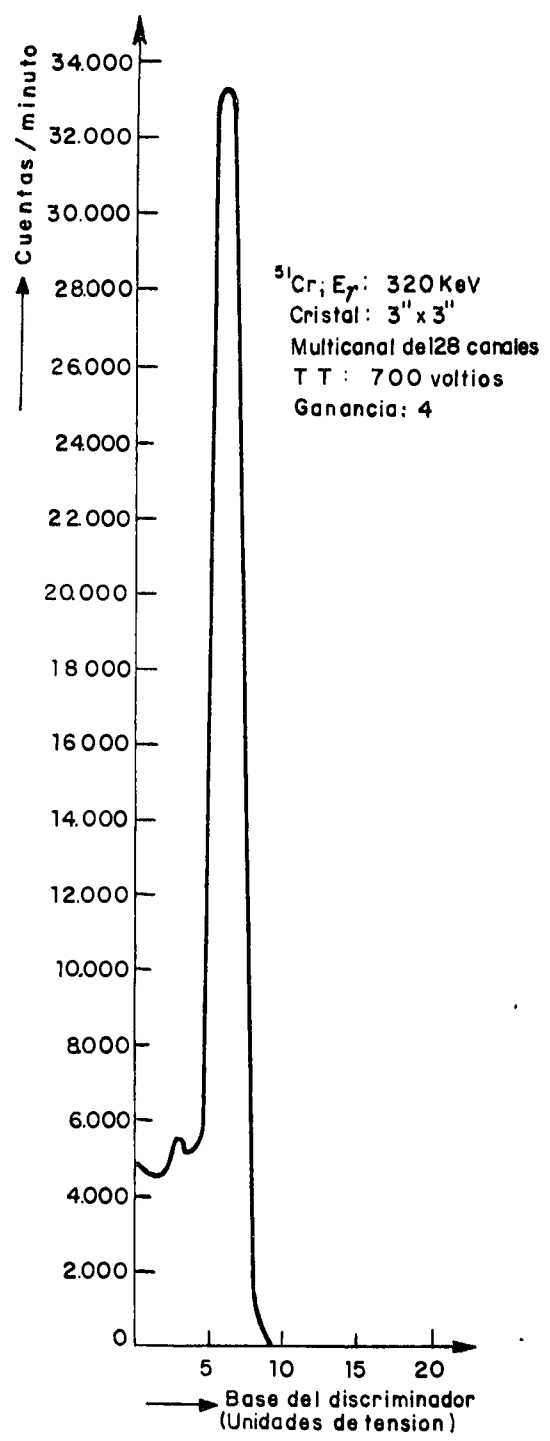


Fig. 6.18 Espectro de  $^{51}\text{Cr}$

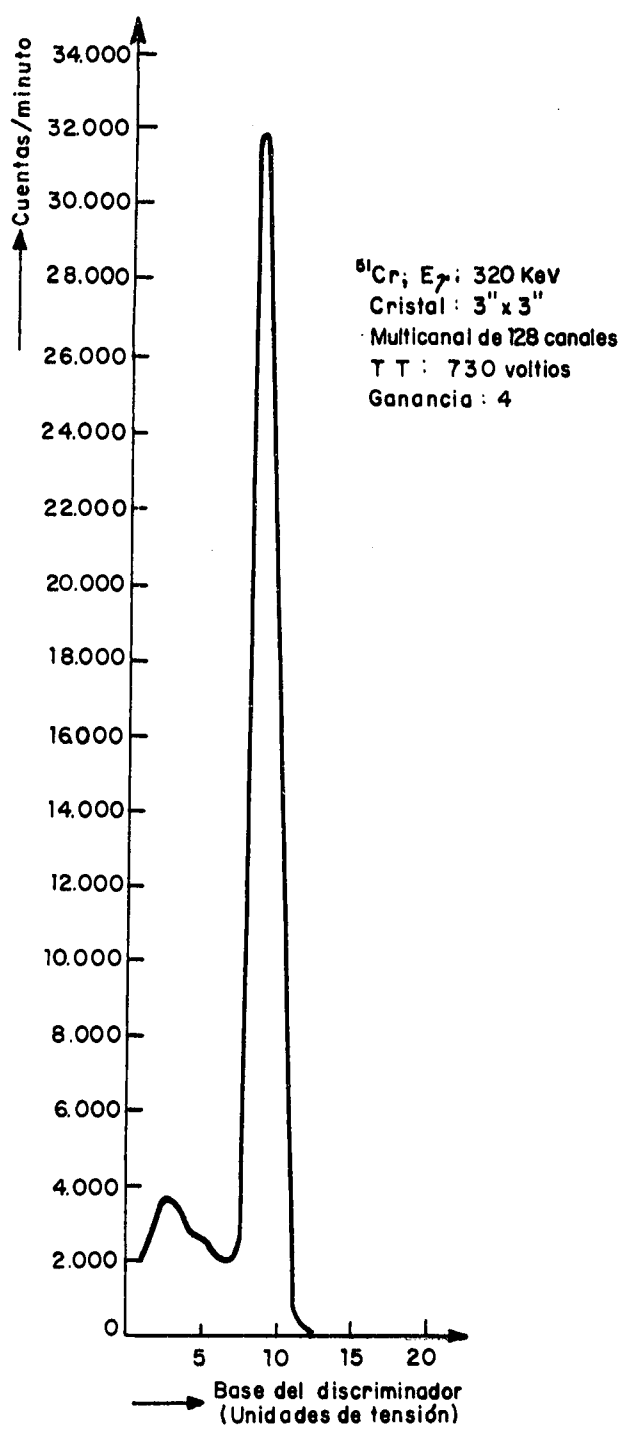


Fig. 6.19 Espectro de  $^{51}\text{Cr}$

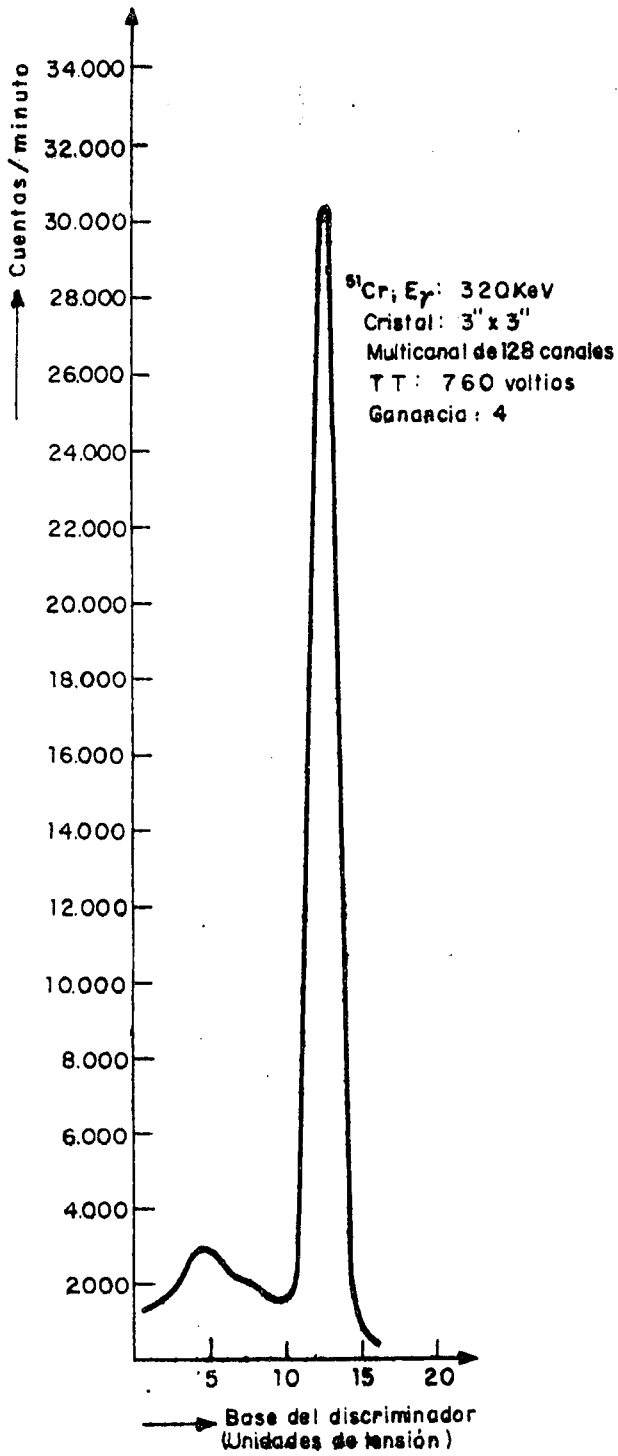


Fig. 6.20 Espectro de  $^{51}\text{Cr}$

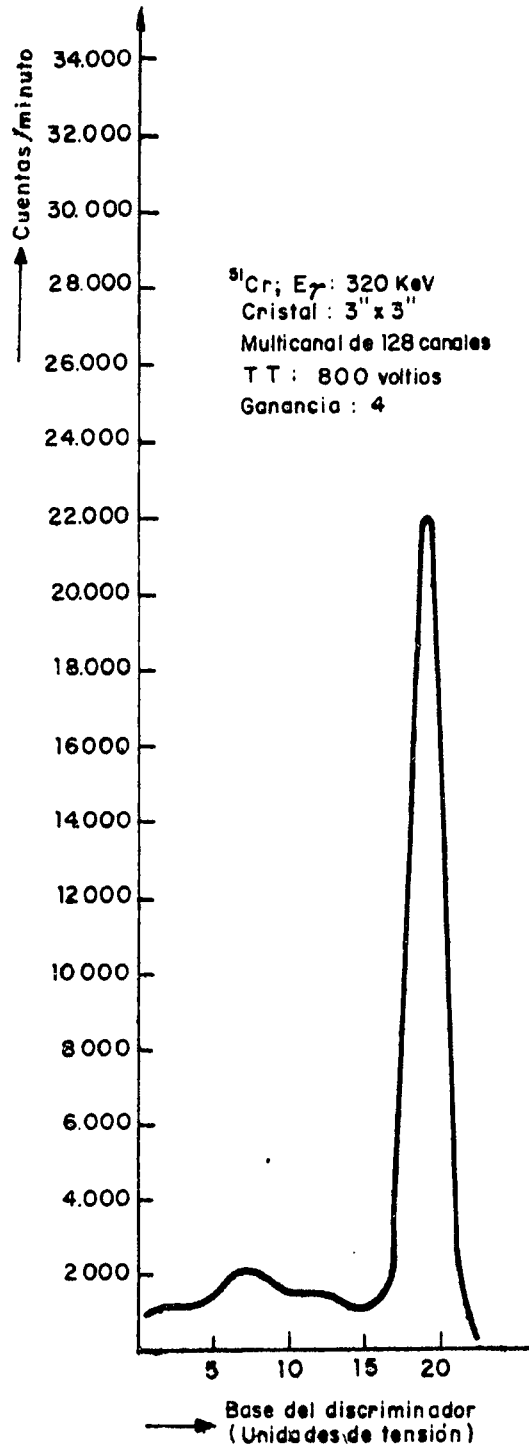


Fig. 6.21 Espectro de  $^{51}\text{Cr}$

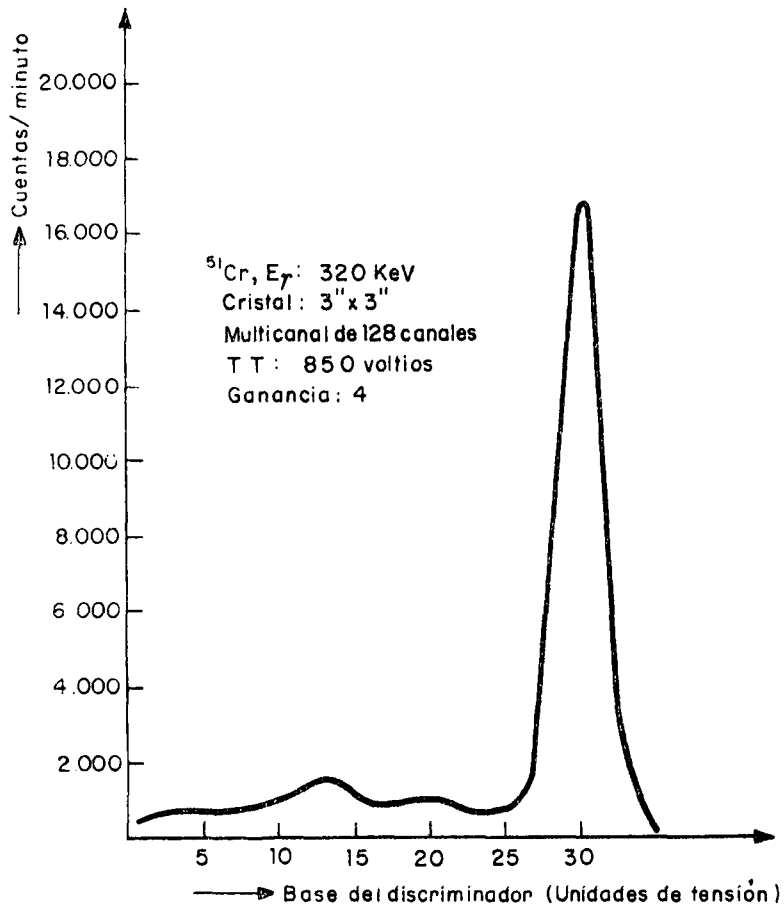


Fig. 6.22 Espectro de  $^{51}\text{Cr}$

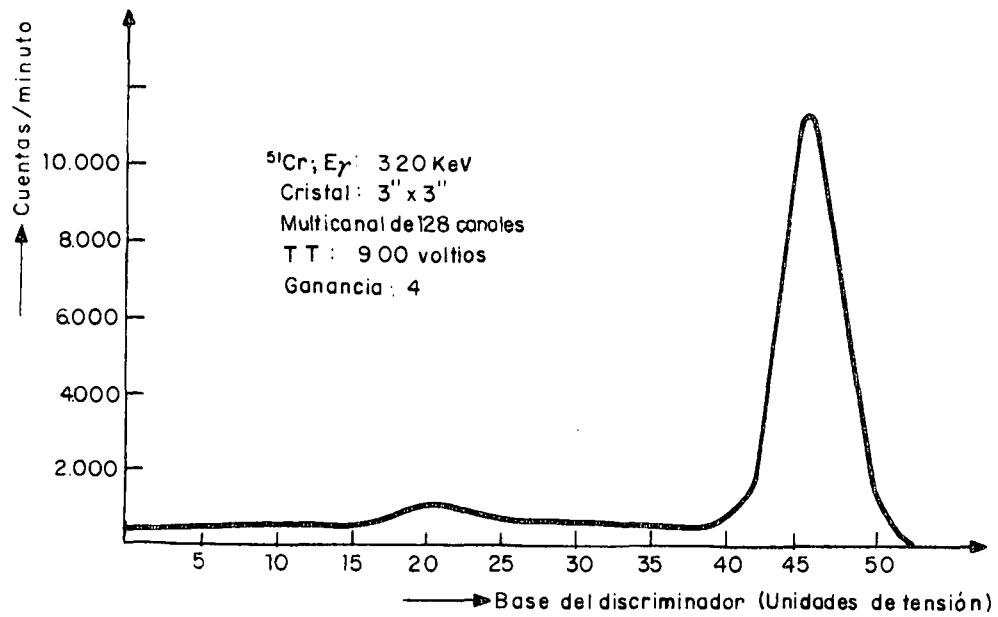


Fig. 6.23 Espectro de  $^{51}\text{Cr}$

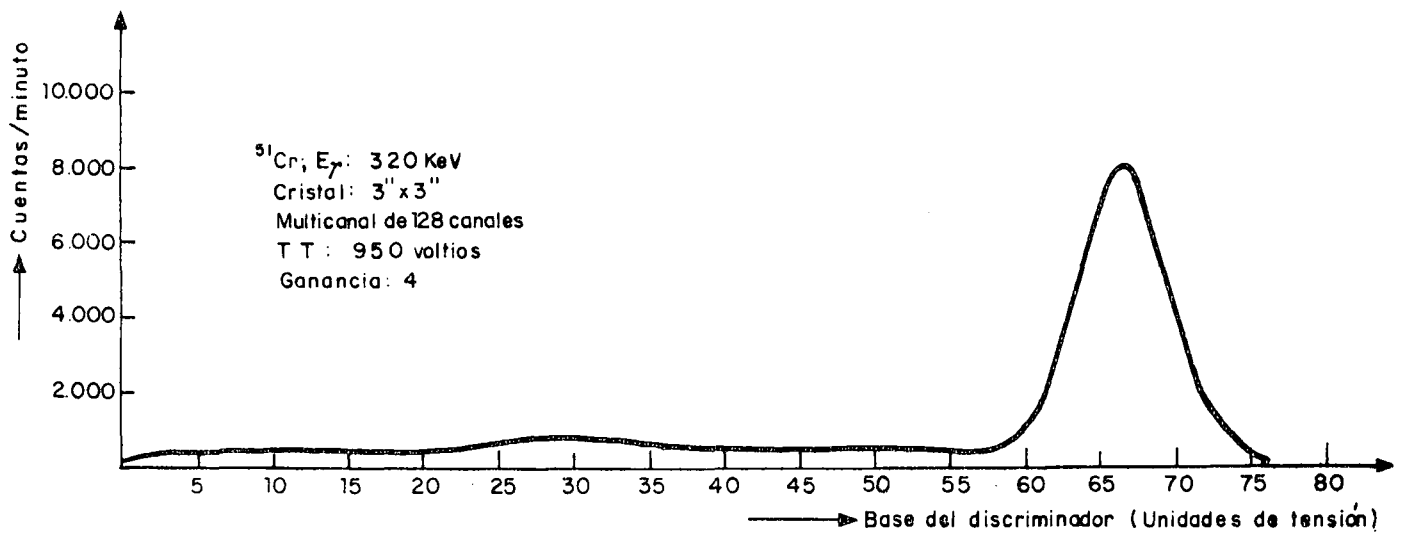


Fig. 6.24 Espectro de  $^{51}\text{Cr}$

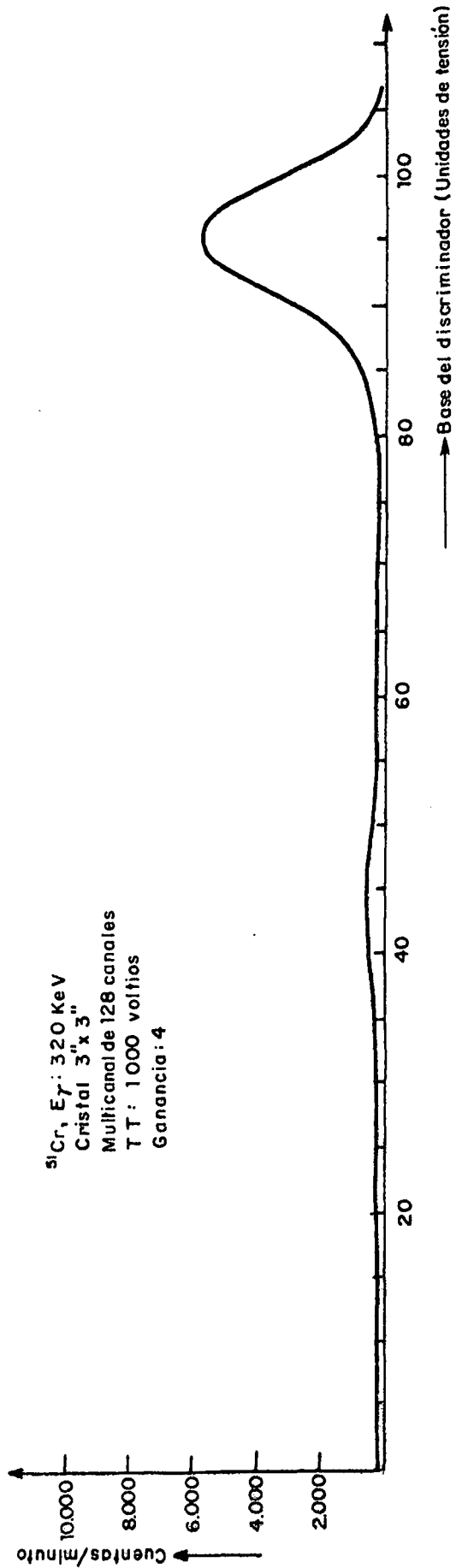


Fig. 6.25 Espectro de  $^{51}\text{Cr}$

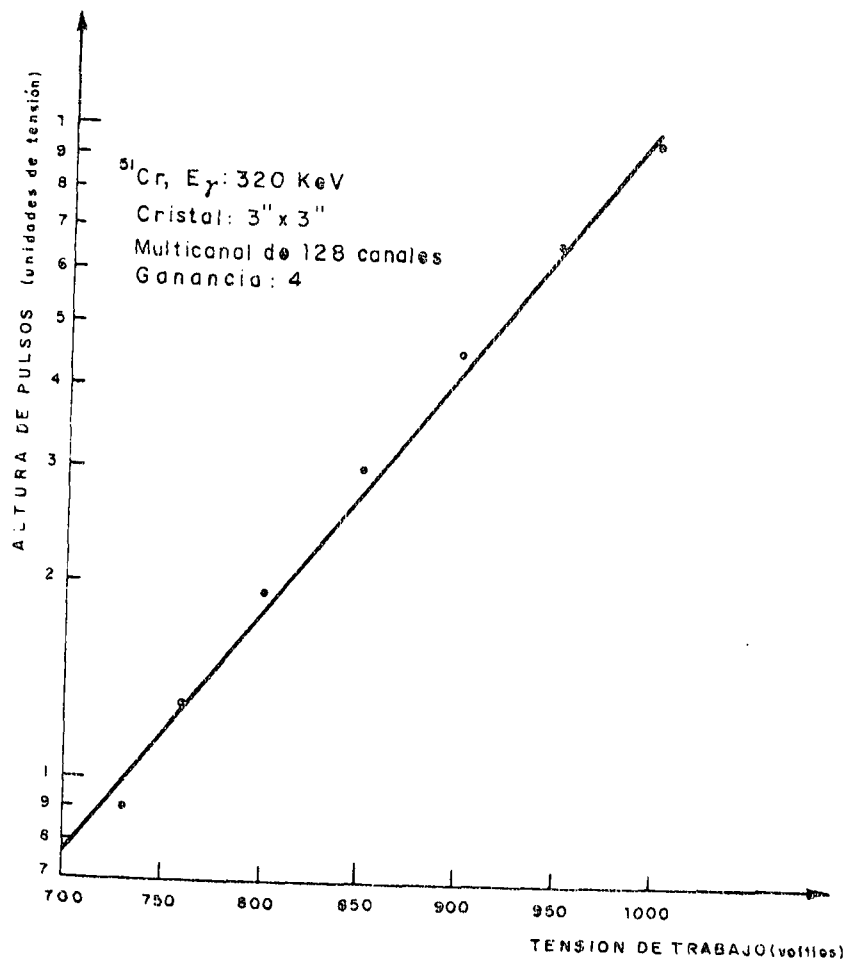


Fig. 6.26 Altura de pulsos en función de la tensión aplicada al fotomultiplicador.

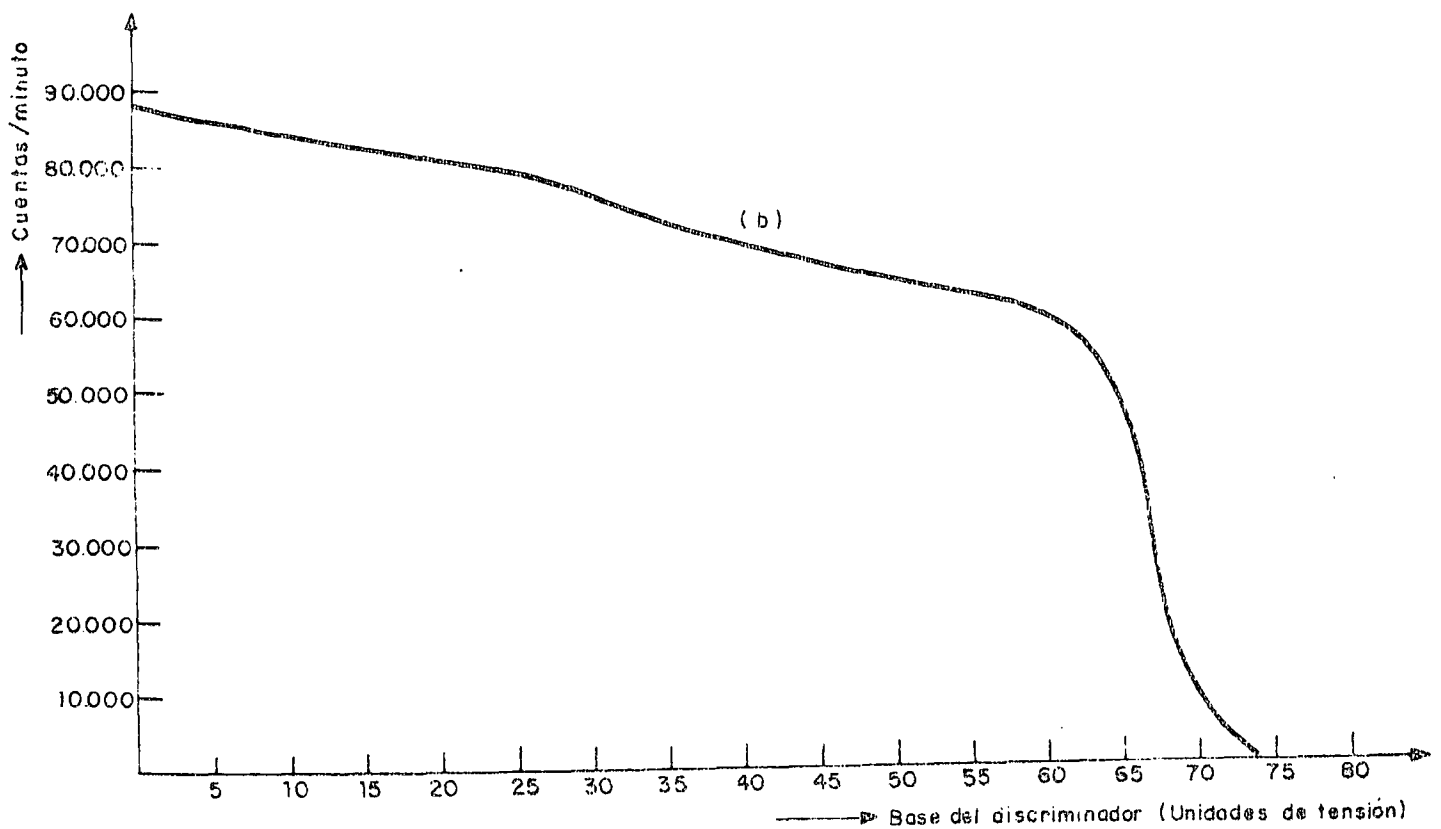
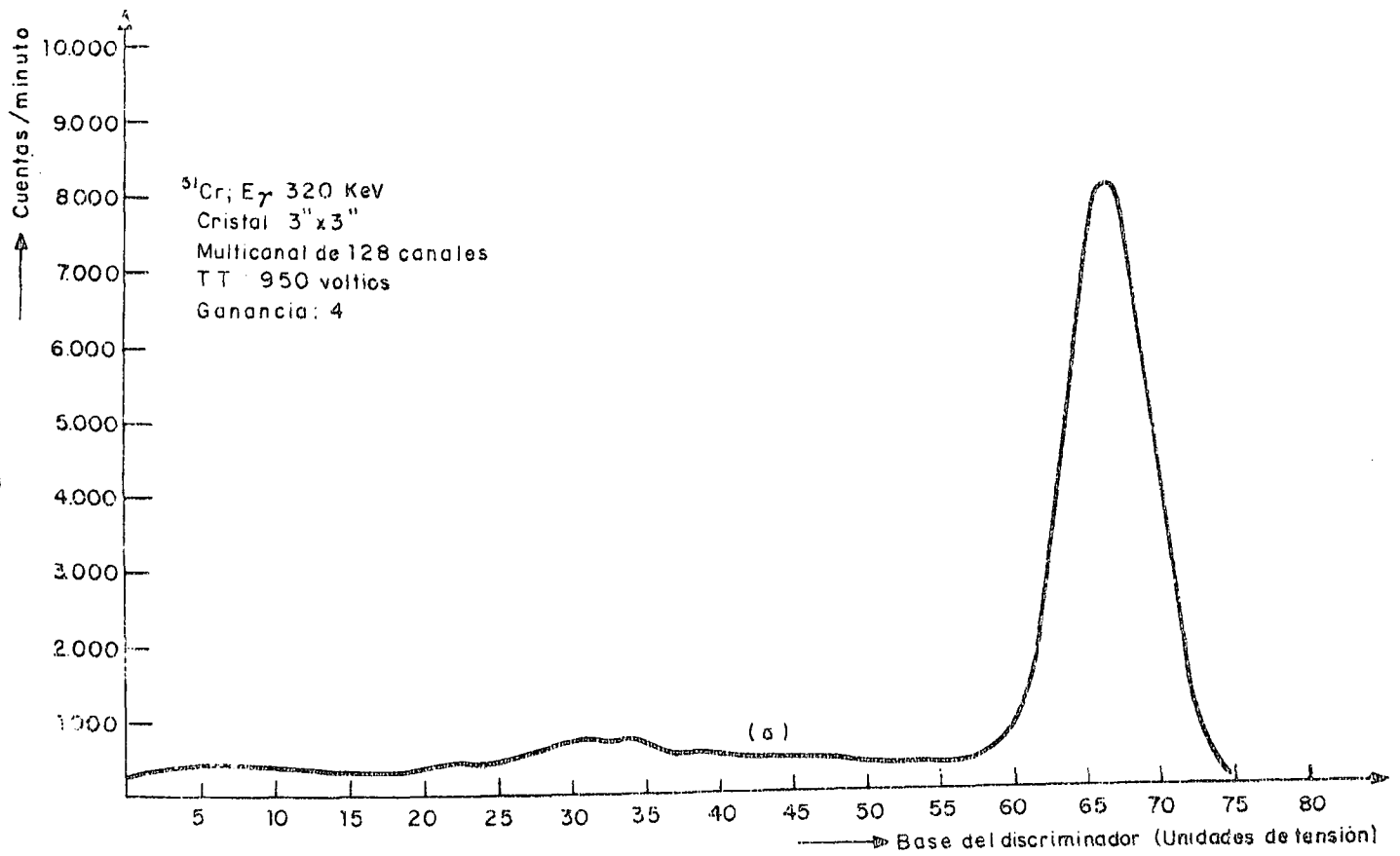


Fig. 6.27  $^{51}\text{Cr}$  a) Espectro diferencial  
 b) Espectro integral

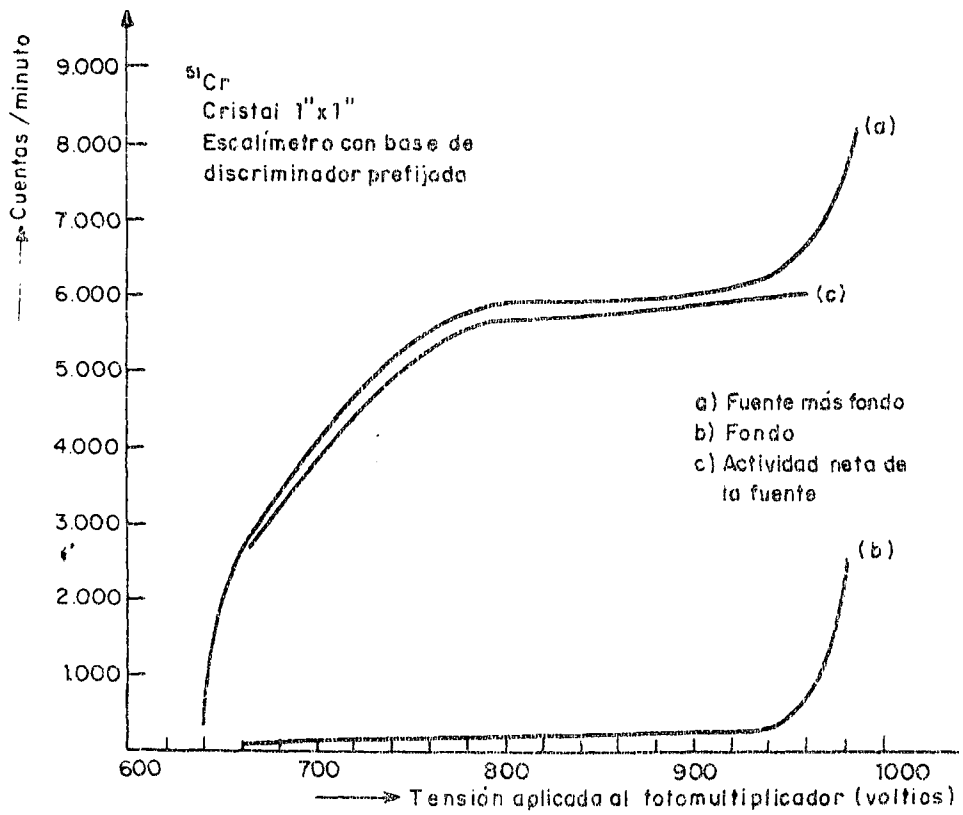


Fig. 6.28 Curva característica del fotomultiplicador