

ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA Y  
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA DE LA REPÚBLICA ARGENTINA

## CURSO REGIONAL DE CAPACITACIÓN EN LA PROSPECCIÓN DE URANIO

BUENOS AIRES, 8 de setiembre - 31 de octubre 1969

---

### III. MÉTODOS DE PROSPECCIÓN URANÍFERA

#### 2. ~~2.~~ INSTRUMENTAL-FUNDAMENTOS Y APLICACIONES

ARTURO GUSTAVO TAJANI

## INSTRUMENTAL-FUNDAMENTOS Y APLICACIONES

ARTURO GUSTAVO TAJANI

Comisión Nacional de Energía Atómica

### 1. RADIATIVIDAD

La radiactividad es la propiedad física que poseen ciertos elementos, de emitir espontáneamente radiaciones particulares, que en general impresionan placas fotográficas, provocan la fluorescencia de ciertas sustancias, ionizan los gases, liberan energía, pueden atravesar espesores más o menos grandes de materia y tienen acción fisiológica sobre tejidos vivos.

Por experiencias más o menos sencillas se ha determinado que las radiaciones son de tres tipos diferentes y se denominan respectivamente  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  (alfa, beta y gamma).

#### 1.1. Rayos Alfa ( $\alpha$ )

Son partículas materiales. Átomos de helio que han perdido sus dos electrones exteriores. En consecuencia son núcleos de helio constituidos por el agrupamiento de dos protones y dos neutrones. Su carga eléctrica es igual a dos unidades elementales positivas y su número de masa es 4. Son expulsadas del elemento radiactivo con una velocidad muy variable, comprendida entre 14.000 y 25.000 km/s. Tanto la velocidad como la energía correspondiente son características del material emisor. Los rayos alfa son muy rápidamente absorbidos por pequeños espesores de materia. Así, se detienen completamente en espesores de aire que van desde 2 hasta 7 cm,

mientras que sólo atraviesan algunos micrones cuando el medio es una hoja metálica. A título de ejemplo la radiación alfa emitida por el elemento conocido como radio C (Ra C) atraviesa 6,94 cm. de aire y es detenida por 40  $\mu$  de aluminio. El poder de penetración de los rayos alfa es pues muy débil y habrá que tenerlo en cuenta cuando se quiera proceder a su detección.

Cuando una partícula alfa atraviesa un gas, choca con los átomos del mismo, provocando a su paso un reguero de iones, formados por los electrones negativos arrancados de los átomos y los núcleos positivos residuales. La formación de pares de iones libres vuelve conductor al gas, es decir, que lo ioniza.

### 1.2. Rayos Beta ( $\beta$ )

Son también partículas materiales. En este caso, simplemente electrones que tienen una energía considerable. La carga eléctrica es de una unidad negativa. Recordemos que la masa de un electrón es aproximadamente 1.840 veces menor que un protón.

Mientras que las partículas alfa son detenidas por algunos centímetros de aire o algunas decenas de micrones de aluminio, los rayos beta tienen en el aire recorridos del orden de varios metros y en el aluminio de algunos milímetros. Son por lo tanto mucho más penetrantes que los rayos alfa, pero en oposición, debido a su menor masa, la ionización de gases es considerablemente menor. La velocidad de las partículas beta es próxima a la velocidad de la luz. Además, son emitidas con un espectro continuo de energías.

### 1.3. Rayos gamma ( $\gamma$ )

Esta radiación no es de carácter material, por lo que no tiene sentido hablar de carga ni de masa. Está formada por ondas electromagnéticas análogas a la radiación infrarroja, visible, ultravioleta y rayos X, pero sus longitudes de onda, muy cortas, son del orden de 1/100 de  $\text{\AA}$  ( $10^{-10}$  cm). La propiedad

fundamental de los rayos gama es su gran poder de penetración. Puede decirse que la radiación gama atraviesa 100 m de aire y varios centímetros de metales y sólidos. En cuanto a la ionización de gases, esta radiación es poco efectiva.

#### 1.4. Desintegración radiactiva

La emisión de radiaciones es debida a que existen ciertos núcleos de átomos inestables que tienden a desintegrarse para convertirse en átomos de elementos más livianos; los que a su vez pueden ser estables o inestables. En este último caso, ellos también se desintegran. La desintegración se cumple inexorablemente y la fuente misma de la energía está en el interior del núcleo. Existe un cierto número de elementos radiactivos naturales. Estos se consumen lentamente al desintegrarse núcleo por núcleo. En efecto; los átomos de un elemento radiactivo se desintegran obedeciendo en su conjunto a las leyes de la estadística. Así, la probabilidad de que se desintegre un átomo radiactivo en la unidad de tiempo, no depende ni de la historia del mismo, ni de los átomos vecinos, ni del estado químico del elemento, ni de las condiciones físicas. Es un hecho gobernado exclusivamente por el azar, que se puede tratar mediante los métodos estadísticos. La probabilidad que tiene un núcleo de desintegrarse en la unidad de tiempo, se llama "constante de desintegración"  $\lambda$ .

La ecuación fundamental del fenómeno de desintegración radiactiva es:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N$$

donde  $dN/dt$  es la velocidad de desintegración llamada comúnmente "actividad" y  $N$  el número de átomos radiactivos en el instante inicial. Esa ecuación expresa que la actividad es proporcional al número de átomos inestables presentes.

Si se integra la ecuación fundamental, para  $N = N_0$  en el instante  $t = 0$ , resulta:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

o lo que es lo mismo:

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda \cdot t}$$

Para un tiempo  $t = T = \frac{0,693}{\lambda}$  ;  $\frac{N}{N_0} = \frac{1}{2}$

lo que significa que la cantidad de átomos inestables se ha reducido a la mitad. El tiempo  $T$  se denomina en consecuencia "período de semidesintegración" o simplemente período y, al igual que la constante  $\lambda$  de la cual es función, depende del elemento radiactivo considerado.

Del carácter exponencial de la ley de desintegración se deduce que al cabo de  $n$  períodos, la actividad queda reducida en  $2^n$  veces. A título ilustrativo citamos el caso de uranio ( $^{235}\text{U}$ ) cuyo período es de  $700 \times 10^6$  años. Si se admite que los terrenos más antiguos tienen  $3.000 \times 10^6$  años, el tenor de  $^{235}\text{U}$  de los mismos no pasa de 5/100 del tenor inicial.

#### 1.5. Elementos radiactivos

Ciertas sustancias radiactivas derivan unas de otras: la primera, o sustancia madre, da nacimiento al desintegrarse a una segunda sustancia, que a su vez se desintegra para dar nacimiento a una tercera y así sucesivamente hasta la aparición de una sustancia estable no radiactiva. Cuando la sustancia madre tiene un período mayor que todas sus hijas, se establece una relación constante entre las cantidades de las hijas y la cantidad de sustancia madre. Se dice entonces que hay "equilibrio radiactivo", y en este caso el número de átomos que se desintegran en la unidad de tiempo, simultáneamente para madre e hijas en conjunto, es una constante. Existen tres grandes familias radiactivas: la del Uranio-Radio que termina en Plomo 206; la del Actinio-Uranio que da Plomo 207 y la del Torio cuyo término estable es Plomo 208. El equilibrio radiactivo se alcanza en un tiempo que varía con la sustancia madre; es de  $10^6$  años para el U,  $10^5$  años para el actinio y  $10^2$  años para el torio. En consecuencia no puede considerarse en equilibrio, un mineral

de uranio, a menos que éste se haya formado en una época anterior a los  $10^6$  años.

Además de las tres grandes familias radiactivas, existen alrededor de diez elementos naturalmente radiactivos, de los cuales se destacan especialmente el rubidio y el potasio.

No hacemos referencia a los materiales radiactivos artificiales por no ser de interés en este curso.

#### 1.6. Magnitudes y unidades radiactivas.

##### 1.6.1. Energía.

Definida en física como la capacidad que tiene un cuerpo o sistema para producir trabajo, se mide en el sistema cgs en ergios y en el MKS en kilográmetros. En física nuclear se usa como unidad de energía el electrón-volt (eV) y se lo define como la energía que adquiere un electrón que parte del reposo y es acelerado en un campo eléctrico por una diferencia de potencial de 1 voltio. Es una unidad muy pequeña y en consecuencia son de uso frecuente los múltiplos de aquella: el kiloelectrón-volt (KeV) y el megaelectrón-volt (Mev).

$$1 \text{ eV} = 10^{-12} \text{ ergios}$$

$$1 \text{ KeV} = 1.000 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ erg.}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ erg.}$$

##### 1.6.2. Actividad

Ya la hemos definido como la velocidad de desintegración de un material radiactivo. La unidad de medida es el Curie (Ci), definido como la cantidad de cualquier material radiactivo en el cual se producen  $3,7 \times 10^{10}$  desintegraciones por segundo. Esta es aproximadamente, la actividad de 1 g de radio. El milicurie (mC) y el microcurie ( $\mu$ C) son submúltiplos comúnmente utilizados.

##### 1.7.3. Dosis

Es la energía entregada por un material radiactivo, a un volumen determinado de aire o tejido. La unidad es el roet-

gen (r) y corresponde a la cantidad de radiación gamma que produce en 1 cm<sup>3</sup> de aire a P.T.N. una unidad electrostática de carga ( 1 u.e.s. = 2,082 x 10<sup>9</sup> pares de iones).

Se demuestra que: 1 r = 87,7 ergios/g en aire.

La absorción de energía equivalente, para agua o tejido, debida a 1 r de radiación gamma, es de 97 ergios/g.

Como el roetgen sólo es aplicable a radiación electromagnética, para poder referirse a otros tipos de radiación, se define una nueva unidad: el Rad, que es la cantidad de radiación de cualquier fuente que entrega una energía de 100 ergios a un gramo de un medio considerado. Es evidente que para los fines prácticos, ambas unidades se consideran numéricamente iguales.

Se utilizan en la práctica submúltiplos tales como el miliroetgen (mr) y el milirad (mrad).

#### 1.6.4. Intensidad de dosis (ID)

Es la dosis recibida en la unidad de tiempo. Se expresa habitualmente en r/h y mr/h o rad/h y mrad/h. La intensidad está relacionada con la actividad de la fuente radiactiva. La ID. en mr/h está dada por la expresión:

$$ID \left[ \text{mr/h} \right] = \frac{K \left[ \text{mr/h/mc cm} \right] \cdot c \left[ \text{mc} \right]}{d^2 \left[ \text{cm} \right]}$$

donde K es la ID. proporcionada por una fuente de 1 mc a 1 cm de distancia. Este valor de K es diferente y característico para cada sustancia y se encuentra tabulado en los manuales especializados.

Vemos de la expresión anterior, que la I.D. es proporcional a la actividad de la fuente e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que separa a ésta del punto de medición.

Debe destacarse que la aplicación de esta expresión tiene validez mientras pueda considerarse la fuente puntual,

sea porque realmente su tamaño, es pequeño o porque siendo discreta, sea grande la distancia considerada.

#### 1.6.5. Generalidades

Veremos más adelante que en cuanto se refiere a mediciones de radiactividad para el trabajo geológico de prospección y evaluación de minerales de uranio, las unidades arriba citadas tienen un interés sólo académico, ya que en la realidad de esas tareas, no se cumplen ciertas premisas: las fuentes no son puntuales, los minerales no son elementos puros y las distancias de las fuentes al detector no son en general medidas con precisión. Se prefiere en estos casos una unidad relativa al efecto de la radiación sobre el detector en uso. Este efecto es la producción de un impulso eléctrico en correspondencia con la llegada de un evento radiactivo. La cantidad de impulsos recibidos en la unidad de tiempo es en tal caso un índice de la actividad de la muestra considerada. Las unidades utilizadas son en consecuencia el impulso por segundo o por minuto (I/seg o I/min) o como también suele expresarse, la cuenta por segundo o minuto (c/seg. o c/min). Sobre lo expresado volveremos más adelante.

### 2. DETECCION DE LA RADIATIVIDAD

La presencia de radiactividad, sólo se pone de manifiesto mediante ciertos dispositivos electrónicos que se denominan genéricamente detectores. Los detectores pueden dividirse en dos grupos: aquellos que se basan en la ionización de un gas producida por una partícula alfa o beta o por una radiación gamma y los que aprovechan la emisión de luz (o centelleo) emitida por ciertas sustancias transparentes, cuando sobre ellas inciden emisiones radiactivas. Al primer tipo pertenecen la cámara de ionización, el contador proporcional y el tubo Geiger-Müller; al segundo grupo corresponden el sulfuro de cinc (S Zn), el yoduro de sodio (INa), el yoduro de cesio (ICs) y algunos compuestos orgánicos como el antraceno, el estilbeno,



o el naftaleno, que dan buenos cristales y sustancias tales como el tetrafenilbutadieno o el terfenilo, en solución en un material plástico. Todos los cristales o sustancias centelladoras se utilizan normalmente con un tubo electrónico llamado fotomultiplicador con el cual forman un conjunto.

### 2.1. Cámara de ionización. (Fig.1)

Es un recinto que contiene dos piezas metálicas aisladas del mismo, a manera de electrodos. Una está conectada al polo positivo y otra al negativo de una fuente que provee una tensión del orden de los 100 V. El gas que se encuentra en el recinto puede ser aire seco, argón o nitrógeno y también mezclas gaseosas. Las partículas ionizantes (alfa o beta) al penetrar en la cámara producen pares de iones, (electrones e iones positivos) que, influenciados por el campo eléctrico, se dirigen respectivamente a los electrodos positivo y negativo. Esta migración de iones equivale a una corriente eléctrica.

El gas ya no es un aislante perfecto y en consecuencia conduce una pequeña corriente. La medición de la corriente circulante en el circuito exterior dará idea de la radiación recibida por la cámara. Esto requiere equipos electrónicos muy sensibles y sumamente estables. Se los emplea frecuentemente en tareas de gran precisión, pero su uso está limitado a técnicas de laboratorio. No se utiliza en instrumentos para uso general en las tareas que nos ocupan.

### 2.2. Contadores proporcionales. (Fig.2)

Su nombre proviene de la proporcionalidad que existe entre el impulso de corriente obtenido a la salida y la ionización inicial. Son esencialmente similares en su construcción a una cámara de ionización y al igual que aquella, suele tener el electrodo positivo como un filamento en el eje de un cilindro, constituyendo este cilindro el electrodo negativo. La diferencia de comportamiento está en la tensión de trabajo que suele

ser mayor que la de la cámara.

Se emplean contadores proporcionales especiales para partículas alfa en las que la muestra se aloja dentro mismo del recinto con gas. Esta disposición permite medir la totalidad de las partículas alfa emitidas en todas direcciones, por lo que suelen denominarse disposiciones  $4\pi$ .

### 2.3. Tubos Geiger-Müller (G.M.) (Fig. 3)

Es el tipo más conocido de detector de radiaciones, y dentro de sus limitaciones, es capaz de responder a partícula alfa, beta y radiación gamma. El principio según el cual opera el tubo G.M. es el siguiente: si a una cámara de ionización o un contador proporcional se le aumenta la tensión aplicada a sus electrodos hasta llegar a las vecindades del valor del potencial de ionización del gas en cuestión, la corriente de ionización, cuando entra una radiación ionizante, crece muy rápidamente, hasta el pasaje de una descarga disruptiva de gran intensidad. La amplitud de esa corriente no depende de la energía de la partícula detectada, pues es suficiente que comience una escasa ionización inicial para que el elevado campo eléctrico aplicado provoque la descarga descripta. En la construcción real de un tubo G.M. se trabaja con presiones de gas mucho menores que la atmosférica (algunos cm de Hg), con lo que se evita la necesidad de operar con tensiones excesivamente altas. Generalmente constan de un cátodo cilíndrico con un diámetro que normalmente es de 1 a 2 cm y a lo largo de cuyo eje está el ánodo formado por un alambre rígido de tungsteno.

El cátodo puede ser metálico o de vidrio con un recubrimiento interior de vapor metálico o grafitado y en todos los casos constituye el tubo propiamente dicho. El espacio interior, donde previamente se ha evacuado el aire, contiene un gas, generalmente helio, neón, argón o mezcla de ellos a una presión relativamente baja. Además, con el objeto de extinguir la descarga cuando ha cesado la ionización inicial, se

introduce otro gas, que según su naturaleza, da origen a dos tipos distintos de tubos G.M.: los extinguidos con vapores orgánicos (formiato de etilo, alcohol etílico o éter) y los extinguidos con un halógeno (cloro o bromo).

Detallamos algunas mezclas típicas de gases para dos tubos G.M. típicos:

|                   |              |                  |             |
|-------------------|--------------|------------------|-------------|
| a) helio          | 60 cm de Hg  | b) neón 99,9%)   | 40 cm de Hg |
| argón             | 4,3 cm de Hg | argón 0,1%)      |             |
| formiato de etilo | 0,7 cm de Hg | bromo 1 mm de Hg |             |

Generalmente se habla de los dos tipos de tubos como "comunes" y "de halógenos".

Algunas diferencias entre ambos tipos de tubos G.M. son de hacer notar:

- a) un tubo con vapor de extinción orgánico queda destruido permanentemente con una tensión excesiva o de signo cambiado, mientras que un tubo de halógeno se inestabiliza momentáneamente pero se recupera en 24 horas.
- b) la tensión de trabajo de un tubo de halógeno, es del orden de la mitad, a la tercera parte de la tensión de un tubo similar común.

La curva que representa la actividad contada en función de la tensión aplicada para un tubo G.M. (Fig. 4), muestra que existe una zona prácticamente horizontal llamada meseta o "plateau", donde el conteo no depende prácticamente del potencial de la fuente. La efectividad del tubo G.M. es buena para partículas alfa, siempre que el mismo tenga una ventana de mica muy delgada. Para tubos sin ventana, las partículas detectadas son exclusivamente betas y en menor proporción, alguna radiación gamma. Cuando el tubo es colocado dentro de un envase metálico y la actividad de la radiación gamma es considerable, puede afirmarse que responde específi-

camente a esta última. Aunque para radiación gamma brinda poca eficiencia de detección, su costo relativamente reducido lo hace utilizable en numerosas aplicaciones prácticas, donde la sensibilidad a bajas actividades no es factor importante. Por otra parte, siempre es posible acercar la muestra al detector tanto como sea necesario.

#### 2.4. Detectores de centelleo

Las sustancias que emiten luz cuando sobre ella inciden radiaciones nucleares, son conocidas generalmente con el nombre de "fósforos". Los fósforos son empleados siempre en compañía de un tubo fotomultiplicador que describiremos más adelante.

##### 2.4.1.

Para la detección de partículas alfa se utiliza sulfuro de cinc activado con plata. Es un polvo blanco que se deposita en una capa delgada sobre una hoja de material plástico transparente, tal como el acrílico. Las partículas alfa que inciden sobre el sulfuro de cinc, ceden su energía a los electrones externos de los átomos de esta sustancia, los que quedan excitados y al volver a su órbita inicial emiten luz visible. La base plástica transparente se aplica sobre la cara sensible del fotomultiplicador.

##### 2.4.2.

La detección de partículas beta puede hacerse por centelleo, utilizando un monocristal de antraceno o plásticos como el poliestireno o el polivinil-tolueno. Su uso es muy restringido ya que no lleva ventaja este método sobre el tubo G.M.

##### 2.4.3.

El sitio de honor en la detección de la radiación gamma lo ocupa, sin lugar a dudas, el cristal de yoduro de sodio activado con talio ( $\text{Ina} + \text{Tl}$ ) que puede obtenerse en monocristales de tamaños considerables. Es prácticamente transparente y como es fuertemente higroscópico, se cubre el cristal, salvo

una cara, con una capa de óxido de magnesio que actúa como superficie reflectora blanca y se la sella herméticamente en una cápsula de aluminio con una ventana plástica transparente que corresponde a la cara que quedó libre de óxido. La presentación comercial habitual es la de cilindros que tienen desde 12 mm. hasta 200 mm de diámetro y alturas desde 5 mm hasta 150 mm.

La forma en que la radiación gamma interacciona con la materia, es según tres fenómenos diferentes:

- a) Efecto fotoeléctrico. Por este fenómeno el fotón gamma comunica toda su energía a un electrón, lo arranca de su átomo y le da una energía casi igual a la que tenía originalmente el fotón.
- b) Efecto Compton. El fotón gamma choca con un electrón y le cede sólo parte de su energía; el resto es cedido al cristal en forma de fotón gamma de menor energía.
- c) Producción de pares. Un fotón gamma de energía elevada puede convertirse íntegramente en un electrón positivo (positón) y uno negativo.

Los electrones que han cobrado energía por cualquiera de los tres efectos, desalojan electrones de los átomos del fósforo que quedan excitados; cuando vuelven a su estado normal emiten luz visible.

Resumiendo, la llegada de rayos gamma a un cristal de yoduro de sodio, hace que éste emita luz visible en forma de puntos luminosos. La energía de la radiación incidente, es entregada al cristal y convertida por éste en energía luminosa.

Como se dijo anteriormente, los puntos luminosos son "vistos" por un tubo electrónico que pasamos a describir.

#### 2.4.4. Tubo fotomultiplicador. (Fig.5)

Consiste en un tubo de vacío que contiene básicamente un fotocátodo (cátodo sensible a la luz), que emite electrones cuando su superficie es iluminada. Una serie de 10 dinodos

están dispuestos geométricamente escalonados y están exteriormente conectados a potenciales sucesivamente crecientes. El material de los dinodos favorece la emisión secundaria (emisión de electrones por salpicaduras). Por cada electrón primario que reciben, desprenden un promedio de cuatro a cinco electrones secundarios. Este fenómeno se repite en los 10 dinodos y es fácil imaginar que al ánodo final llegará una ráfaga de electrones por cada electrón emitido por el fotocátodo. En otras palabras, se ha transformado un punto luminoso en una corriente eléctrica apreciable. Aclaremos estos fenómenos con un ejemplo numérico: un rayo gamma de 130 KeV produce en el yoduro de sodio, un fotoelectrón de 100 KeV; éste produce unos 1.000 fotones, cuya longitud de onda está próxima al ultravioleta. Los 1.000 fotones crean en el fotocátodo del tubo 100 electrones. Acelerados hasta el primer dinodo, hacen impacto y desalojan de su superficie 500 electrones. Estos 500 crean 2.500 en el segundo dinodo, 12.500 en el tercero, etc. El factor de multiplicación para los 10 dinodos es  $5^{10}$ , luego se comprende que los electrones que llegan al ánodo final, conforman una corriente realmente importante.

Cabe decir, que los fenómenos son absolutamente lineales, es decir, que la magnitud de la corriente a la salida del fotomultiplicador es proporcional a la energía del rayo gamma incidente en el cristal de centelleo.

## 2.5. Mecanismo de formación de un impulso eléctrico.

En la Fig. 6 una fuente o batería, de diferencia de potencial  $E$ , es aplicada a través de un circuito formado por la resistencia de carga  $R_e$  y el tubo G.M., cuya resistencia interna está representada por  $R_i$ . En la fig. 7, se representa la tensión eléctrica  $U$  en el punto A en función del tiempo. Desde el instante 0 hasta  $t_1$ , ningún evento radiactivo llega a G.M. La tensión en A, al no circular corriente por el circuito, vale

E. En el instante  $t_1$ , una partícula ionizante llega a G.M. y ioniza el gas que se hace conductor. Circula por el circuito una corriente  $I$ , que provoca sobre  $R_c$  una caída de potencial  $\Delta U = I.R_c$ . En el instante  $t_2$ , el gas de extinción detiene la ionización, deja de circular corriente y la tensión en el punto A vuelve a valer  $E$ . Se repite lo mismo cuando en  $t_3$ , llega nuevamente una radiación ionizante a G.M.

Puede verificarse entonces, que cada evento radiactivo que provoca la ionización del gas de G.M. se traduce en términos eléctricos en la aparición de una variación  $\Delta U = I.R_c$  en la tensión presente en el punto A del circuito. Esa variación de tensión que se corresponde con la llegada de la radiación ionizante al detector, se denomina "impulso" o simplemente "pulso". Si en el punto A del circuito se conecta una disposición eléctrica que impida el paso de la tensión de valor constante  $E$ . y deje circular las variaciones  $\Delta U$  o impulsos, se tendrá esquematizado el sistema mediante el cual todo evento radiactivo incidente en un detector, se convierte en un pulso eléctrico utilizable en el sistema de medición.

Un tubo G.M. entrega pulsos de la misma amplitud, independiente de la energía y naturaleza de la radiación que lo produjo.

La fig. 8 muestra el circuito correspondiente para un fotomultiplicador con cristal de centelleo. Es válido todo lo dicho para el caso anterior, sólo que ahora la amplitud de los pulsos sucesivos dependerá de la corriente anódica final, la que es función como ya hemos visto, de la energía del rayo gamma incidente. De otro modo, a una distribución de energías en la radiación incidente, corresponde una distribución proporcional de amplitudes de impulsos.

## 2.6. Distribución de pulsos en el tiempo.

Ya se dijo en 1.4. que la desintegración radiactiva

es un fenómeno regido por las leyes del azar. Es decir, que no había ningún tipo de regularidad ni periodicidad para la aparición de eventos radiactivos. En la Fig. 9, se intenta mostrar una posible distribución, en el eje tiempo, de aparición de pulsos a la salida de un detector de radiactividad.

### 3. INSTRUMENTOS

Ya expresamos que la desintegración de los átomos de una sustancia radiactiva es un proceso aleatorio, es decir que el momento en que se desintegra un átomo en particular, no puede ser predicho.

Aplicando las reglas de la estadística, podremos sin embargo, expresar el número de desintegraciones que probablemente se producirán en un tiempo determinado. La velocidad de desintegración o actividad de la muestra en estudio  $dN/dt$ , puede ser medida en consecuencia contando la cantidad de impulsos que entrega un detector y referirlo al tiempo transcurrido en la medición. Se tendrá así el número de impulsos en la unidad de tiempo, llamado "velocidad de conteo", Pero, desde que la magnitud a medir es aleatoria, no existe una velocidad de conteo "verdadera" o "precisa" y sólo podremos hablar de un promedio o "velocidad media de conteo".

Si la velocidad promedio de conteo, registrada para una fuente radiactiva y detector dados, en un período prolongado, es de  $n$  impulsos por unidad de tiempo, el número de impulsos obtenido experimentalmente en un período de medición  $t$ , no será, en general, igual, a  $n.t$ , sino algo mayor o menor. El valor más probable será  $n.t$  y cuanto mayor sea el tiempo de medición, menor será la desviación de una serie de resultados alrededor de  $n.t$ .

De la discusión precedente, vemos que el principal objetivo de las mediciones radiactivas, es determinar la velocidad de conteo o sea el número de impulsos que entrega un de-



ector en la unidad de tiempo(también llamada "frecuencia de repetición").

La determinación pedida puede ser cumplida por instrumentos electrónicos que responden a dos concepciones diferentes: la medición "digital" y la medición "analógica".

Los primeros cuentan, utilizando dígitos (números), cada impulso proveniente del detector y producen una cifra acumulativa con presentación instantánea de la lectura. Por supuesto que debe ser medido además, el tiempo, mediante un cronómetro. Estos instrumentos se llaman "escalímetros".

Los segundos, llamados "integradores", presentan la información mediante un instrumento de aguja. La deflexión de la aguja sobre el cuadrante, es proporcional en todo instante a la frecuencia de repetición o velocidad de conteo.

### 3.1. Escalímetros.

Un escalímetro es simplemente un contador decimal de impulsos. Consta de circuitos electrónicos llamados "décadas" que poseen diez estados estables. Los diez estados se indican con los números sucesivos del 0 al 9. Con la llegada de cada impulso, la década de entrada pasa de un estado al siguiente, lo que también se indica en forma visual. Cuando han llegado diez impulsos eléctricos a una década, ella vuelve a indicar el número 0 y a su vez crea un impulso que mueve a la década siguiente. Este proceso es repetido en forma permanente y se conectan en cascada tantas décadas, como cifras útiles deseen contarse. Una característica del escalímetro será precisamente el número de cifras de la cantidad que puede contar. Así por ejemplo, 7 cifras permiten llegar a la cifra 9.999.999 (prácticamente  $10^7$ ).

Existen distintas clases de décadas, las que difieren no sólo en su funcionamiento desde el punto de vista electrónico, sino en la forma en que presentan la información de su

estado o indicación numérica. Describirlas íntimamente, está fuera del alcance de este trabajo, pero las mencionaremos y daremos algunas características. Un valor a tener en cuenta, es aquel que expresa la capacidad que tiene un sistema para absorber una determinada velocidad de conteo o velocidad de llegada de impulsos. Existen unidades electrónicas que son contadoras; otras son sólo indicadoras numéricas y las hay también que son tanto contadoras como indicadoras simultáneamente.

a) Válvula tipo ELT. Es una válvula de vacío con cátodo termoiónico. En ella, un haz electrónico se dirige a unas de las diez posiciones numeradas, sobre el costado de la ampolla y por brillo del recubrimiento interior fluorescente, queda indicada la cifra correspondiente. El movimiento del rayo mencionado, lo ocasiona el impulso que se ha aplicado a la válvula a través de un circuito electrónico accesorio. Este tubo es contador e indicador a la vez, y puede trabajar a velocidades del orden de 30.000 a 100.000 pulsos por segundo.

b) Válvula Dekatrón. Es una válvula gaseosa de cátodo frío. Un ánodo central, puede mantener una descarga que hará luminiscente uno de diez cátodos simétricos colocados en la periferia de la ampolla. La descarga pasará de un cátodo a otro en sincronismo con la llegada de impulsos a contar por el sistema. La indicación, está dada por un cuadrante exterior a la ampolla, numerado en correspondencia con los diez cátodos de la válvula. También en este caso se trata de un tubo contador e indicador, siendo su velocidad máxima de conteo de unos 3.000 impulsos por segundo.

c) Válvula tipo Nixie. Es una válvula gaseosa sólo indicadora. Consta de un ánodo y diez cátodos yuxtapuestos pero independientes. Cada cátodo tiene la forma geométrica que corresponde a los signos 0 a 9. Cuando la tensión se aplica entre el

ánodo común y uno cualquiera de los cátodos, la luminiscencia que se produce alrededor de éste, destaca el número que quiere indicarse.

d) Década binaria. Existen circuitos electrónicos; de válvulas o de transistores, que tienen dos estados estables. En consecuencia, pueden contar en forma binaria (o hasta 2). Un impulso eléctrico lo cambia de estado y un segundo pulso lo vuelve al original, creando ahora él, un impulso que puede excitar otro circuito binario y así sucesivamente. Cuatro circuitos de esta clase, son conectados de manera de formar un conjunto capaz de contar  $2 \times 2 \times 2 + 2 = 10$ , los que constituyen una década. La velocidad que pueden alcanzar estas décadas es del orden de 1.000.000 de impulsos por segundo.

e) Foquitos indicadores. Una década binaria puede acusar su estado mediante foquitos de neón o incandescentes, que se encenderán según la orden de la década contadora. Así, se utilizan dos sistemas de indicación: diez foquitos en coincidencia con otros tantos números o cuatro foquitos que señalen las cifras 1, 2, 4, 8. El valor final en el último caso será la suma de los foquitos encendidos.

f) Contadores electromecánicos. Cuando la velocidad de recuento es menor que 10 impulsos por segundo suelen utilizarse contadores-indicadores electromecánicos, que consisten en un sencillo numerador de engranajes que se impulsa mediante un crique accionado por un electroimán, sobre cuya bobina se aplica el impulso a registrar.

### 3.2. Escalímetros comerciales.

Entre las unidades para recuento de pulsos que se pueden obtener actualmente en el comercio, se encuentran muchas combinaciones de los elementos citados. Válvulas ELT, válvulas Dekatrón o Décadas binarias indicadas con foquitos o lámparas Nixie, son antepuestas a contadores electromecáni-

cos. Una disposición muy usual, coloca siete cifras totales, de las cuales, unidades, decenas y centenas son contadas en forma electrónica por válvulas o transistores y las cuatro cifras siguientes son registradas por un contador electromecánico. También es normal que un escalímetro como el citado, posea una resolución o tiempo mínimo a que deben de estar separados dos pulsos sucesivos, del orden de  $1 \mu$  seg. Esta característica, es conveniente cuando se utilice en conjunto con un detector de centelleo y tubo fotomultiplicador y las muestras sean de actividad considerable. Cuando en cambio, se trabaje con un tubo G.M. y actividades moderadas, pueden utilizarse escalímetros que tengan menor resolución.

En general, puede afirmarse que actualmente todo escalímetro trae conjuntamente con la unidad contadora, una fuente de alta tensión regulable y estabilizada. Esta permite alimentar con el valor de tensión conveniente, el detector de radiactividad que se utilice.

Algunos escalímetros poseen también un sistema "prefijador de tiempos" o "timer" que permite hacer operar al mismo durante un tiempo elegido y al cabo del cual el contador se detiene. Esto evita la operación utilizando un cronómetro convencional que introduce inevitablemente un cierto "error de operador".

También es normal que se incluya una llave de "puesta a cero" y un sistema de calibración que envía a la unidad contadora pulsos, que son generalmente obtenidos de la corriente alternada de la red de alimentación del instrumento. La cantidad de pulsos contada en un minuto es, si el sistema funciona bien, un valor característico para el equipo.

### 3.3. Integradores.

Cuando tiene que procederse a la medición de un gran número de fuentes radiactivas y no es de importancia fundamen

tal la precisión, puede preferirse un integrador al empleo de un escalímetro. La ventaja mayor de un integrador, está en el hecho de que provee una indicación instantánea de la cantidad de pulsos en la unidad de tiempo, que se han recibido del detector. El funcionamiento de una unidad de este tipo, puede ser más o menos elaborada desde el punto de vista electrónico, pero no obstante, puede resumirse de una manera sencilla: cada impulso de entrada, hace que una carga eléctrica fija, sea entregada a un capacitor llamado de "integración", que tiene conectado en paralelo una resistencia de "drenaje" (Fig.10). De esta manera el condensador por un lado, se carga con cada impulso aplicado y, por otro lado, se descarga a un ritmo fijo sobre la resistencia en paralelo.

Para una determinada frecuencia media de repetición de los pulsos de entrada, las cargas que fluyen en forma de corriente a través de la resistencia, son iguales a las cargas que aportan los impulsos. El capacitor alcanza así, una tensión fija entre sus placas, que podrá ser medida por cualquier método electrónico.

Insistimos en que la tensión de equilibrio es diferente para cada velocidad de llegada de pulsos y además, es proporcional a ésta.

Hemos visto que la desintegración nuclear es un fenómeno aleatorio; en consecuencia, es también aleatoria la llegada de pulsos a un integrador. La frecuencia media instantánea varía de un instante a otro. Es de esperar entonces, que la aguja esté permanentemente fluctuando alrededor de un "valor promedio".

El circuito del integrador posee un capacitor de valor  $C$  medido en faradios y una resistencia que vale  $R$ , medida en ohmios. El producto  $R.C.$  en segundos se llama "constante de tiempo" del integrador:  $t = R.C$

Puede demostrarse que las fluctuaciones estadísticas serán, una vez alcanzado el equilibrio, las mismas que se habían obtenido con una unidad digital, durante un período de tiempo igual a 2.C.R. La fluctuación estadística porcentual, o desvío medio cuadrático, ambos conceptos similares al de error standard  $\sigma$  está dado por la relación:

$$\sigma = \text{fluctuación estadística porcentual} = \frac{100}{\sqrt{2.R.C.N}}$$

donde N es la actividad contada en cuentas/segundo.

Es evidente que para un error standard fijo, la constante de tiempo deberá ser diferente, según varíe la actividad de la fuente. La aguja del instrumento indicador de un integrador se dirige lentamente al valor medio final. En consecuencia, debe esperarse un tiempo, antes de efectuar la lectura. Se comprueba que el tiempo necesario para que la indicación llegue al 90% de la velocidad de conteo final, es de 2,3 constantes de tiempo, mientras que para llegar al 99%, la espera es de 4,6 veces aquel valor.

En los integradores reales, puede elegirse el valor de constante de tiempo R.C mediante una llave que cambia el capacitor C conectado.

Para que las lecturas puedan ser efectuadas con comodidad, y teniendo en cuenta que el detector que acciona un integrador puede tomar actividades que cubren varios órdenes de magnitud, se dispone en general de una llave que conmuta rangos o escalas de medidas.

En algunas ocasiones, la llave de cambio de escalas, varía simultáneamente la constante de tiempo del integrador, haciendo que la fluctuación de la aguja sea de un valor porcentual constante.

En la práctica, antes de efectuar una lectura, se ajustan tanto la llave selectora de rangos, como la llave de constantes de tiempo, adecuando la posición de ambas con la

actividad detectada y la magnitud de las fluctuaciones.

En la casi totalidad de los integradores normalmente en uso, se encuentra formando una sola unidad con éste, una fuente de alta tensión estabilizada que alimenta el detector de radiactividad.

Generalmente son integradores todos los equipos que sin exigírsele mucha precisión, se utilizan en forma flexible y cómoda, tales como monitores manuales o de laboratorio y equipos para usos especiales que veremos más adelante.

### 3.4. Instrumentos utilizados en la CNEA.

Pasaremos revista al instrumental utilizado en la Gerencia de Materias Primas en las tareas de prospección, evaluación y producción de minerales uraníferos. Citaremos en cada caso, el detector empleado, el dispositivo de medición y haremos una referencia breve a la técnica de operación.

Recordemos que un análisis funcional de un sistema de medición, sea éste sencillo o complicado, nos muestra sólo tres elementos básicos que cumplen con operaciones definidas y principales:

- a) un "detector primario"
- b) uno o más "dispositivos intermedios".
- c) un "dispositivo final".

#### 3.4.1. Escalímetro de laboratorio

Utiliza como detector un tubo G.M. extinguido con vapor orgánico. Está colocado dentro de un blindaje de plomo que tiene un portamuestras. El tubo G.M. envía sus impulsos a un escalímetro de siete cifras que tiene tres décadas electrónicas y un contador electromecánico.

Se emplea este sistema para hacer un análisis radiométrico que permite evaluar el tenor químico o contenido de uranio de una muestra de mineral uranífero.

Sea:  $T_p$  = tenor químico de una muestra tomada como

patrón.

$r_p$  = Actividad de la muestra patrón, medida en c/m en el escalímetro.

$T_s$  = Tenor químico de la muestra de mineral en estudio.

$r_x$  = Actividad correspondiente a esta última.

$r_f$  = Actividad medida sin muestra, o "fondo".

$R_p$  = Actividad propia del patrón =  $r_p - r_f$

$R_x$  = Actividad propia de la muestra =  $r_x - r_f$

Entre las magnitudes indicadas se cumple la siguiente relación:

$$\frac{T_x}{R_x} = \frac{T_p}{R_p} \quad \therefore \quad T_x = \frac{T_p}{R_p} \cdot R_x \quad (1)$$

La expresión (1) permite calcular el tenor químico de la muestra bajo análisis, en función de la radiactividad medida  $R_x$  y la constante  $T_p / R_p$  dada por la muestra patrón.

Este método permite analizar en un tiempo breve una gran cantidad de muestras de minerales, a condición de que éstas estén preparadas en forma homogénea, con geometría constante.

Se utiliza el Escalímetro de laboratorio como apoyo del trabajo de geoquímica.

#### 3.4.2. Monitor portátil tipo "pistola"

Es una disposición muy empleada en la que el detector, los elementos electrónicos intermedios y el instrumento indicador forman un conjunto con aspecto de "pistola". El detector es un cristal de INa (Tl) (sensible a radiación gamma) de 38 mm de diámetro por 25 mm de espesor, adosado a un tubo fotomultiplicador. El resto del sistema es un integrador, que funciona con transistores, y la indicación la suministra un sensible instrumento de aguja. Un modelo, ya antiguo, tiene aparte, pero vinculada por cables con la pistola, la caja de



pilas y baterías que puede ser llevada en el cinturón del operador. La llave de escalas y constantes de tiempo están en la pistola. La indicación del sistema es en mr/hora escala que no tiene ningún valor real como se desprende de lo dicho en el parágrafo 1.6.5.

Otro modelo, muy nuevo, tiene en una caja aparte, además de las pilas, el integrador electrónico con la llave de rangos. Las escalas de esta pistola están taradas en impulsos/segundo lo que pone de manifiesto el carácter relativo de estas mediciones. Tiene cinco rangos que cubren desde 150 I/seg hasta 15.000 I/seg. El modelo nuevo tiene un avisa dor sonoro que emite un sonido agudo cuando se sobrepasa un nivel radiactivo fijado.

Estas pistolas monitoras se utilizan para tareas de prospección terrestre detallada y en general, en cualquier oportunidad donde sea necesario determinar la presencia de radiactividad con mucha sensibilidad.

#### 3.4.3. Monitor portátil manual

Se utiliza una pequeña sonda con un tubo G.M. como detector. Este está unido con un equipo donde se encuentra el integrador, el instrumento indicador y las pilas de alimentación. El conjunto es muy compacto, pero de menor sensibilidad que el monitor tipo pistola. Las indicaciones se proveen en mr/h y su uso es frecuente en frentes de explotación, capas mineralizadas y otros usos en los que el detector pueda ponerse en contacto directo con el material radiactivo en es tudio.

#### 3.4.4. Equipo de sondeo

En una sonda cilíndrica de acero inoxidable, de 32 mm de diámetro por 360 mm de largo, se aloja un tubo G.M. y un preamplificador electrónico. La sonda está en el extremo de un cable de 150 m de longitud, arrollado sobre un carrete que se opera manualmente. Una conexión fija el carrete, una

la sonda detectora con el integrador, que tiene la llave de encendido, la llave de rangos y constantes de tiempo y el instrumento de aguja, colocados en el frente del gabinete. La alimentación del equipo es provista por un acumulador exterior.

Las indicaciones son en impulsos por segundo y cubren un amplio rango de medición (15 I /s hasta 15.000 I/s, en siete escalas).

Estos equipos se emplean para analizar en forma radiométrica los distintos estratos de un terreno. Por una perforación realizada previamente se hace descender la sonda. Midiendo simultáneamente la longitud del cable y la indicación del integrador, puede trazarse la curva de radiactividad en función de la profundidad. El geólogo obtiene mediante este sistema, información sobre profundidad y potencia de las capas mineralizadas.

#### 3.4.5. Equipo de Prospección Aérea.

Es un equipo que debe detectar radiación gamma, cuando está colocado a bordo de un pequeño avión que vuela a alturas del orden de los 80 m. Por razones de geometría y energía de las radiaciones a detectar se utiliza un cristal de centelleo de INa (Tl) de gran volumen (125 mm de diámetro por 75 mm de espesor). El fotomultiplicador (125 mm Ø ) forma un conjunto con el cristal y ambos están encerrados en un envase de aluminio, vinculado mecánicamente al piso del avión mediante soportes antivibrantes. El integrador está en un gabinete separado, con las llaves de encendido, cambio de escalas y constantes de tiempo. El dispositivo final es en este caso un instrumento registrador, que mediante tinta y pluma, inscribe en una cinta de papel graduado las indicaciones radiométricas correspondientes. Como el avance de la cinta de papel es gobernado por un mecanismo de relojería a cuerda, el gráfico que se obtiene es en función del tiempo. Conociendo la velocidad del avión se

tiene la posibilidad de hacer mediciones en distancia sobre la cinta gráfica. Las indicaciones del registrador son repetidas en un instrumento común de aguja, en el tablero del piloto del avión.

#### 3.4.6. Túnel radimétrico para medición de vagonetas.

Para medir un valor radiactivo, proporcional al contenido total de uranio, del mineral que contiene una vagoneta, a la salida de la galería de una mina, se utiliza el equipo siguiente:

Dos cabezales detectores que contienen cristales de yoduro de sodio (25x25mm) y fotomultiplicadores, se colocan en un bastidor de modo que queden centrados con ambas caras laterales de la vagoneta y a una distancia de 50 cm. La salida de pulsos de ambos detectores se suman y accionan un integrador electrónico que tiene por elemento indicador un instrumento de aguja. Cinco escalas pueden ser elegidas para la medición, que se efectúa en impulsos/seg. (150 I/seg. a 15.000 I/seg). La interpretación de las lecturas, para llevarlas a valores de tenores químicos, se efectúa mediante el uso de la llamada "recta de correspondencia", cuyo trazado y utilidad se basa en consideraciones estadístico-matemáticas que se verán oportunamente.

#### 3.4.7. Túnel radimétrico para medición de camiones

Es un equipo similar al anterior, pero esta vez los dos cabezales detectores, se colocan arriba y centrados con cada una de las dos mitades en que se divide idealmente la caja útil del camión, cuyo contenido quiere valorizarse. También en este caso las lecturas se efectúan en I/seg y la interpretación se realiza mediante el uso de otra "recta de correspondencia" trazada al efecto.

#### 3.4.8. Emanómetro

Es un equipo destinado a medir los rayos alfa perte-

necientes al gas radón y similares, contenido en una muestra de aire que se desea analizar. El detector es un frasco de vidrio cuyas paredes están recubiertas interiormente por sulfuro de cinc (S Zn) activado con plata (Ag), que forma una capa delgada. Como se vió en 2.4.1. este fósforo centellea con rayos alfa y los destellos luminosos son "vistos" por un fotomultiplicador convencional. Un integrador se ocupa de excitar a un instrumento de aguja que produce la indicación en cinco escalas seleccionables mediante una llave.

#### 3.4.9. Medidor de rayos alfa

Para tareas de laboratorio existe un instrumento capaz de medir las partículas alfa provenientes de una muestra de mineral. El detector es un contador proporcional que funciona con gas Argón. Envía sus impulsos a una unidad contadora o escalímetro, formada por tres décadas binarias con indicación decimal seguidas de un contador electromecánico. Un prefijador de tiempos y la fuente de alta tensión para el C.P. conforman el equipo que pasa a ser sumamente compacto. También dentro del gabinete del sistema está la válvula que da paso al gas para el contador.

#### 3.4.10. Analizadores multicanales.

Como se recuerda, un conjunto formado por un cristal de centelleo de INa (Tl) con un tubo fotomultiplicador, entrega a la salida un impulso eléctrico cuya amplitud es proporcional a la energía del rayo gamma incidente (2.4.4. y 2.5.).

Si se obtiene un gráfico cartesiano en el que se lleva en el eje horizontal, energía de la radiación gamma, proveniente de un material radiactivo y en el eje vertical la actividad o el número de impulsos en la unidad de tiempo que corresponde a cada energía se tendrá un "espectro" como el de la fig. 11.

No explicaremos el motivo físico del espectro, pero

basta decir que los "picos" de energías o "máximos relativos" que aparecen en el mismo son absolutamente característicos de la sustancia radiactiva considerada.

Luego nuestro fotomultiplicador, traducirá los picos de energía característicos, en pulsos de tensiones definidas.

Un sistema puramente electrónico permite que pasen a través de un circuito llamado "discriminador", pulsos cuya amplitud supere un determinado valor. Otro circuito llamado de "ventana" acepta los impulsos comprendidos entre valores de tensión prefijados anteriormente.

Mediante "discriminadores" y/o "ventanas" puede hacerse que un integrador totalice sólo los pulsos de determinada amplitud o sea que cuente los rayos gamma de una banda estrecha de energía.

Eligiendo convenientemente los picos de energía, puede identificarse la presencia de un determinado elemento de espectro conocido. Lo anterior es la base teórica del funcionamiento de los llamados analizadores multicanales. En tareas de prospección aérea, puede utilizarse un analizador de cinco canales, que mediante un ajuste adecuado de sus "discriminadores y ventanas" permite seleccionar separadamente los elementos, Cesio (Cs), Potasio (K), Torio (Th) y Uranio (U). Un canal se reserva para control total o radiación cósmica.

## B I B L I O G R A F I A

- [1] R.A.FAIREs y PARKS,B.H.:Radioisotope Laboratory Techniques, George Newnes Ltd.London, 1963.
- [2] WEALL N. y VETTER H.: Técnicas con radioisótopos para la investigación y el diagnóstico en clínica, EUDEBA, Buenos Aires, 1964.
- [3] BAIRD-ATOMIC, Inc.: La espectrometría de centelleo. Sumario Técnico. Massachussetts, E.U.A.
- [4] LEFORT,M.: Las radiaciones nucleares, EUDEBA, Buenos Aires, 1962.
- [5] COPPENS, Rene: La radiactividad de las rocas, EUDEBA, Buenos Aires, 1963.
- [6] CERNUSCHI, Félix: GRECO,Francisco I.: Teoría de errores de mediciones, EUDEBA, Buenos Aires, 1968.
- [7] NAT.BUREAU OF STANDARS, Measurements of Radioactivity, circ. Nº 476.

FIG. Nº 1

# CÁMARA DE IONIZACIÓN

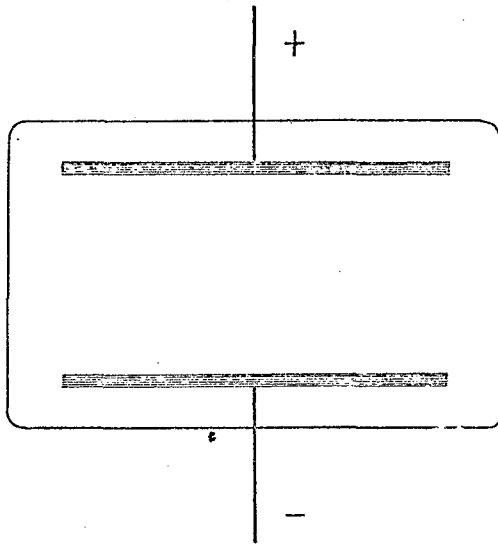


FIG. Nº 2

# CONTADORES PROPORCIONALES

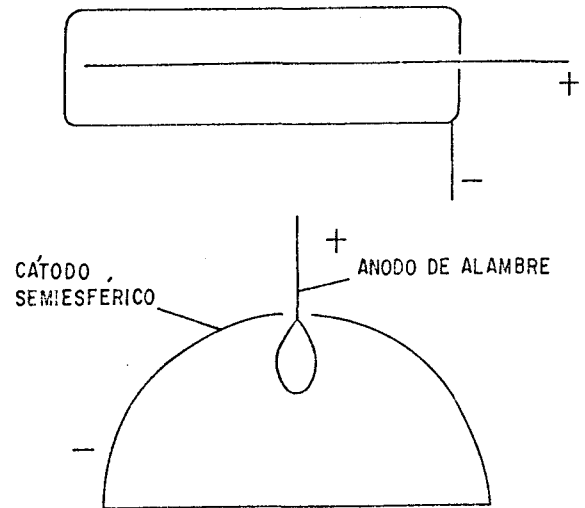


FIG. Nº 3

# TUBOS GEIGER MÜLLER

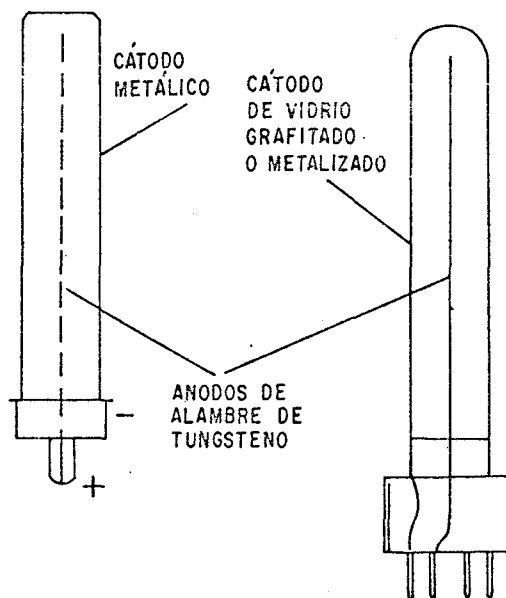


FIG. Nº 4

# FUNCIÓN ACTIVIDAD = f(V)

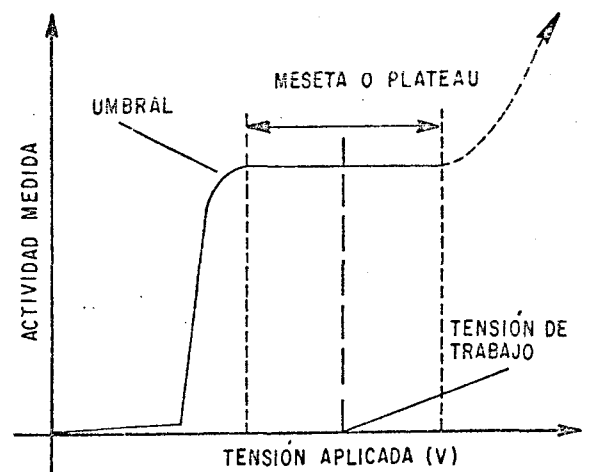


FIG. Nº 5

## TUBO FOTOMULTIPLICADOR O FOTOTUBO

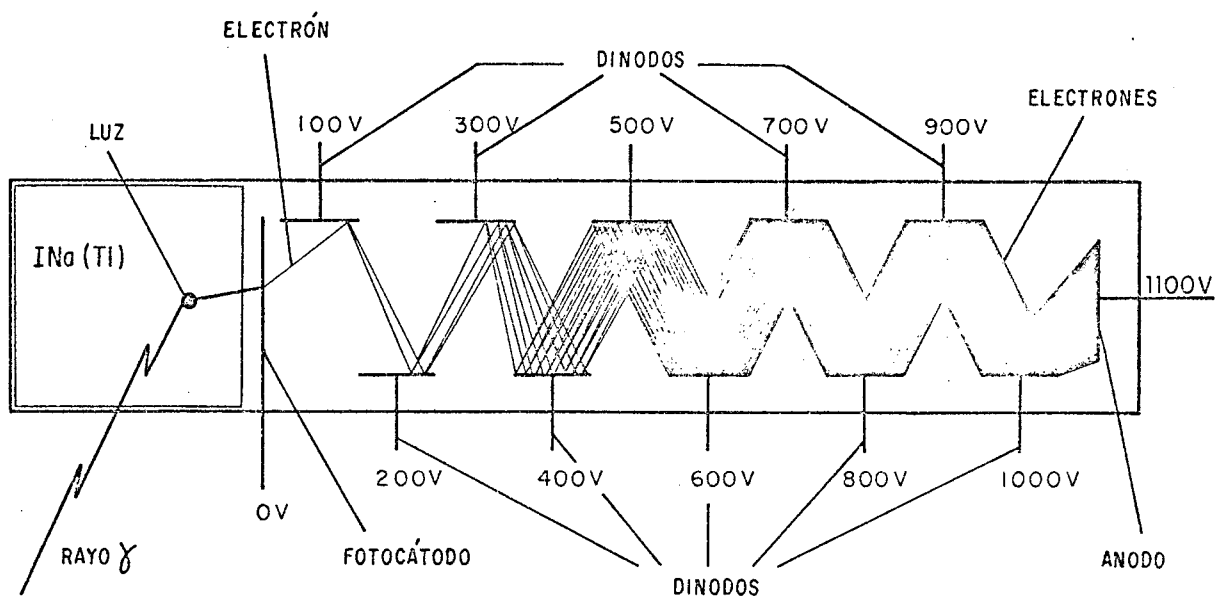
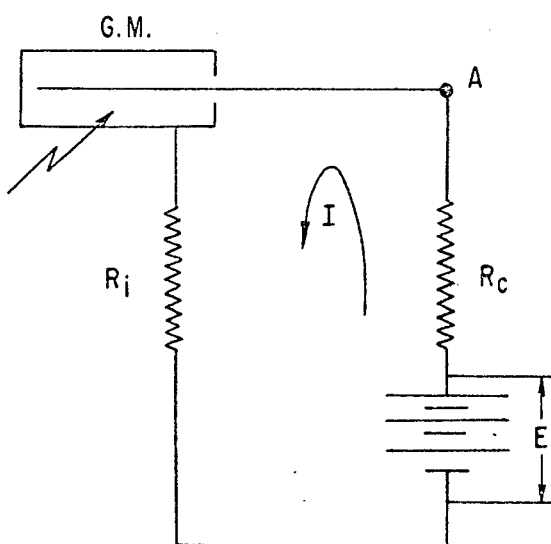


FIG. Nº 6



CIRCUITO BÁSICO DE UN G.M.

FIG. Nº 7

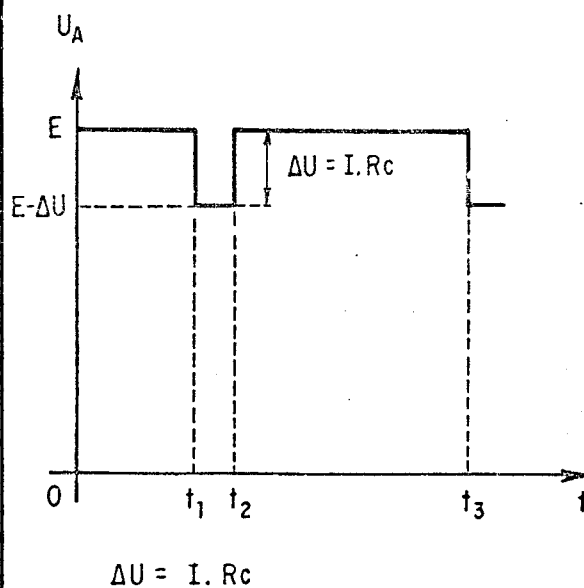
MECANISMO DE FORMACIÓN  
DE UN PULSO



FIG. N° 8

## CIRCUITO BÁSICO DE UN FOTOTUBO

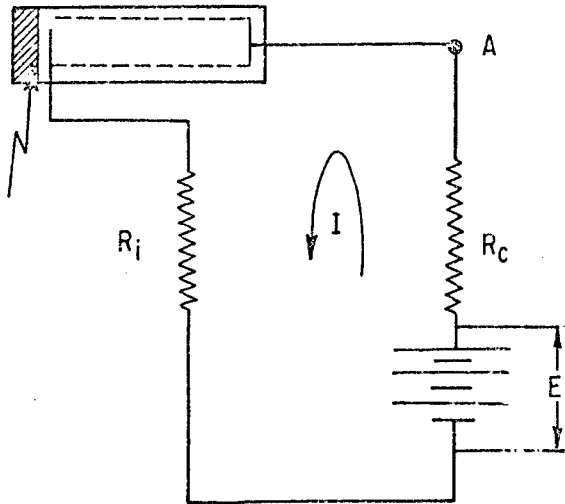


FIG. N° 9

## DISTRIBUCIÓN DE PULSOS EN EL TIEMPO

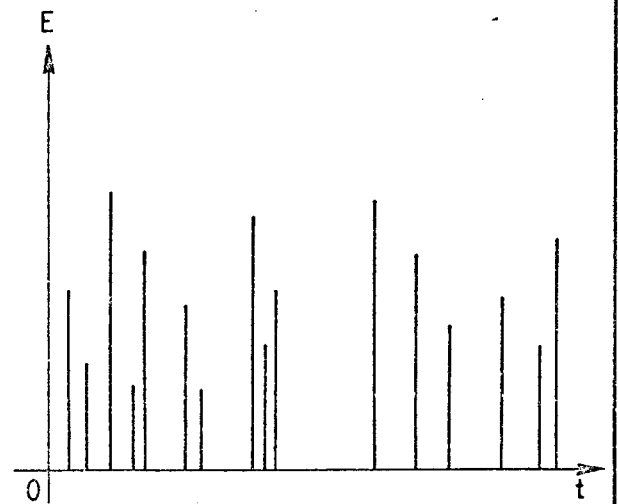


FIG. N° 10

## CIRCUITO BÁSICO DE UN INTEGRADOR

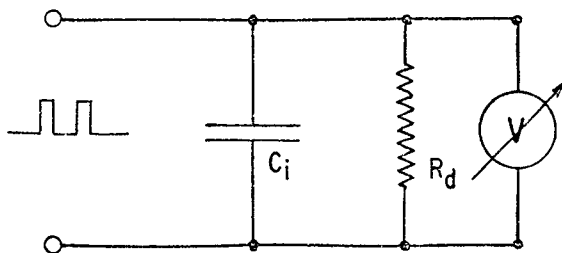


FIG. N° 11

## ESPECTRO DE ENERGÍAS

