

96
29



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

"DETECTORES DE RADIACION EMPLEADOS
EN SEGURIDAD RADIOLOGICA"

TRABAJO ESCRITO
para obtener el Título de
QUIMICO FARMACEUTICO BIOLOGO
p r e s e n t a

EDUARDO ODRIUZOLA REYES



ASESOR: M. EN C. LUIS CABRERA MOSQUEDA

México, D. F.

1994



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

PRESIDENTE : PROF. MANUEL NAVARRETE TEJERO

VOCAL : PROF. GUILLERMINA BURILLO AMEZCUA

SECRETARIO : PROF. LUIS CABRERA MOSQUEDA

1ER SUPLENTE : PROF. TRINIDAD MARTINEZ CASTILLO

2DO SUPLENTE : PROF. MARTIN JESUS SOBERON MOBARAK

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA: EDIFICIO "D" DE LA FACULTAD
DE QUIMICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO.

ASESOR : PROF. LUIS CABRERA MOSQUEDA

SUSTENTANTE : EDUARDO ODRIEZOLA REYES

DEDICATORIA

A MI ESPOSA MONICA ROCIO POR TODO EL APOYO, CONSEJOS Y AMOR QUE DIA CON DIA FORTALECE NUESTRO MATRIMONIO, ASI COMO SU AYUDA PARA LA CULMINACION DE ESTA TESIS PROFESIONAL

A MI HIJA JESSICA POR CADA MOMENTO DE FELICIDAD QUE DA A MI VIDA DIA A DIA.

A MIS PADRES EDUARDO Y MARCELINA, POR TODA SU COMPRENSION Y DARLE GRACIAS A DIOS POR DARME UNOS PADRES MARAVILLOSOS; LOS CUALES ME DIERON LA OPORTUNIDAD DE DESARROLLAR UNA CARRERA PROFESIONAL.

A MI ASESOR DE TESIS, M.EN C. LUIS CABRERA M. POR SU VALIOSO APOYO PARA LA REALIZACION DE ESTA TESIS PROFESIONAL.

Y A TODA LA GENTE QUE ME AYUDO DIRECTA O INDIRECTAMENTE A LA TERMINACION DE ESTA TESIS.

INTRODUCCION

CAPITULO I

TIPOS DE RADIACIONES NUCLEARES

1.1 RADIACION

1.1.1 RADIACION IONIZANTE

1.2 RADIATIVIDAD

1.2.1 RADIATIVIDAD INDUCIDA

1.2.2 RADIATIVIDAD NATURAL

1.3 PARTICULAS ALFA

1.4 PARTICULAS BETA

1.5 ELECTRONES

1.6 ENERGIA NUCLEAR

1.7 RAYOS GAMMA

1.8 RAYOS EQUIS

1.9 NEUTRONES

1.10 PROPIEDADES DE LA RADIACION

CAPITULO II

INTERACCION DE LA RADIACION CON LA MATERIA

2.1 INTERACCION ELECTRONICA

2.2 INTERACCION NUCLEAR

2.3 INTERACCION DE LAS PARTICULAS CARGADAS

2.3.1 ALCANCE O RANGO DE LAS PARTICULAS ALFA

2.3.2 ESPECTRO DE LAS PARTICULAS ALFA

2.4 TRAYECTORIA DE LAS PARTICULAS BETA

2.4.1 ALCANCE O RANGO DE LAS PARTICULAS BETA

2.4.2 CURVA DE ABSORCION DE PARTICULAS BETA

2.4.3 RADIACION BREMSSTRAHLUNG

2.4.4 RADIACION DE ANIQUILACION

2.4.5 ANALISIS DE FEATHER

2.4.6 ESPECTRO DE LAS PARTICULAS BETA

2.4.7 ALCANCE MEDIO DE PARTICULAS BETA

2.5 INTERACCION DE LAS RADIACIONES ELECTROMAGNETICAS

CON LA MATERIA

2.5.1 EFECTO FOTOELECTRICO

2.5.2 EFECTO COMPTON

2.5.3 PRODUCCION DE PARES

2.5.4 COEFICIENTE DE ATENUACION LINEAL DE LA RADIACION

GAMMA CON LA MATERIA

2.5.5 ABSORCION DE RAYOS GAMMA EN LA MATERIA

2.5.6 ESPECTRO GAMMA

2.6 INTERACCION DE NEUTRONES CON LA MATERIA

CAPITULO III

TECNICAS DE DETECCION Y MEDICION DE RADIACION IONIZANTE

3.1 RADIACION DE FONDO

3.2 VOLTAJE DE OPERACION DE UN DETECTOR GEIGER

- 3.3 TIEMPO DE RESOLUCION
- 3.4 VOLTAJE DE OPERACION DE UN DETECTOR DE CENTELLEO
- 3.5 VOLTAJE DE OPERACION DE UN DETECTOR PROPORCIONAL
- 3.6 PREPARACION DE MUESTRAS RADIATIVAS
- 3.7 AUTOABSORCION
- 3.8 FACTORES GEOMETRICOS
- 3.9 FACTORES DE ABSORCION EXTERNA
- 3.10 MAGNITUD DE DOSIS DE EXPOSICION
- 3.11 MAGNITUD DE RAZON DE DOSIS DE EXPOSICION
- 3.12 MONITORES DE SUPERFICIE PARA RAZON DE DOSIS TIPO G.M.

CAPITULO IV

EQUIPOS EMPLEADOS EN SEGURIDAD RADIOLOGICA

- 4.1.1 DETECCION DE PARTICULAS ALFA
- 4.1.2 DETECCION DE PARTICULAS BETA
- 4.1.3 DETECCION DE RAYOS GAMMA
- 4.1.4 TECNICAS ESPECIALES DE DETECCION
- 4.1.5 DETECCION EN COINCIDENCIA
- 4.1.6 DETECCION EN ANTICOINCIDENCIA
- 4.2 TIPOS DE DETECTORES EN INSTRUMENTACION NUCLEAR
 - 4.2.1 DETECTORES GASEOSOS
 - 4.2.2 CAMARAS DE IONIZACION
 - 4.2.3 DETECTORES PROPORCIONALES
 - 4.2.4 DETECTORES GEIGER -MULLER

4.2.5 TIEMPO MUERTO

4.3 DETECTORES DE CENTELLEO

4.4 TIEMPO DE RESPUESTA

4.5 FOTOMULTIPLICADORES

4.6 ESPECTROSCOPIA GAMMA

4.7 DETECTORES DE ESTADO SOLIDO O DETECTORES

SEMICONDUCTORES

4.8 SEMICONDUCTORES

4.9 MONITORES DE AIRE

4.10 OTROS INSTRUMENTOS

CAPITULO V

APLICACION DE LA ESTADISTICA A LA MEDICION DE LA RADIATIVIDAD

5.1 GENERALIDADES

5.2 INTERPRETACION DE RESULTADOS

5.3 DESVIACION DE LAS CUENTAS PROMEDIO.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

INTRODUCCION

El hombre con sus sentidos, normalmente no puede detectar la radiación proveniente de los materiales radiactivos. El cuerpo humano puede ser atravesado por radiaciones de alta intensidad y no sentir dolor aún cuando sea severamente dañado por las mismas.

Esto es similar a la reacción del hombre a las ondas de radio y ultravioleta. Una persona puede estar expuesta a los rayos ultravioleta del sol y sentir dolor por la exposición hasta varias horas más tarde. Igualmente, una persona que recibe una exposición puede no darse cuenta de ello hasta algún tiempo después, cuando se desarrolla la enfermedad por radiación. Por lo tanto el hombre depende de alguna clase de instrumentos para detectar y medir la radiación nuclear que puede ser potencialmente dañina. Los animales no tienen conocimiento de la sensación de la detección de la radiación nuclear. Esto puede ser muy dañino por exposiciones largas a la radiación y esto afectar a los animales de varias maneras.

Los astronautas del Apollo observaron centelleo en sus ojos cuando la tripulación al cruzar el espacio, fue irradiada por una lluvia de rayos cósmicos de alta intensidad.

El término detección generalmente incluye únicamente una determinación de la presencia de la radiación, mientras que la medición incluye la detección y alguna medición de la magnitud de la radiación presente.

Algunos instrumentos están basados en la ionización producida en instrumentos por el paso de la radiación. En otros instrumentos se utiliza la excitación de los materiales para detectar la radiación. Estos últimos son instrumentos de monitoreo del tipo centelleo.

También se emplean técnicas de detección química y fotográfica. Los instrumentos para medir la radiación generalmente proporcionan la magnitud de una dosis de radiación recibida en un periodo de tiempo. Los segundos se refieren a la medición inmediata de intensidad de la radiación.

Los programas generales de medición o evaluación de riesgos de exposición a la radiación asociados con la producción, uso o existencia de materiales radiactivos u otra fuente de radiación son los cuatro siguientes:

- 1.- En plantas.
- 2.- Personal.
- 3.- Ambiental.
- 4.- En emergencias.

En cada uno de estos programas incluye una evaluación radiológica para determinar la presencia de radiación, contaminación o material radiactivo en el ambiente. Las evaluaciones se hacen para determinar el tipo y la magnitud de riesgo radiológico.

CAPITULO I

TIPOS DE RADIACIONES NUCLEARES

1.1 Radiación

- a) La emisión y propagación de energía a través del espacio o a través de un medio material en forma de onda, por ejemplo, la emisión y propagación de ondas electromagnéticas o de ondas de sonido.
- b) La energía propagada a través del espacio o a través de un medio material como ondas, por ejemplo la energía en forma de ondas electromagnéticas. El término radiación o energía radiante, cuando no se especifica normalmente se refiere a radiación electromagnética. Tal radiación comúnmente es clasificada de acuerdo a su frecuencia, como hertziana, infraroja, visible (luz), ultravioleta, rayos X y rayos gamma.
- c) Por extensión, emisiones corpusculares, tales como radiaciones alfa y beta, o rayos de tipo mezclado o desconocidos, como radiación cósmica. (1)

1.1.1 Radiación Ionizante

Cualquier radiación electromagnética o de partículas capaces de producir iones, directa o indirectamente, en su paso a través de la materia.

1.2 Radiactividad

La propiedad de ciertos núclidos de emitir espontáneamente partículas o radiación gamma o la emisión de rayos equis seguida de una captura de electrón orbital o de una fisión espontánea.

1.2.1 Radiactividad Inducida

Radiactividad producida en una sustancia después de bombardeo con neutrones u otras partículas. La actividad resultante es "radiactividad natural" si es formada por reacciones nucleares que ocurren en la naturaleza, y "radiactividad artificial" si la reacciones son producidas por el hombre.

1.2.2 Radiactividad Natural

La propiedad de radiactividad exhibida por los radionúclidos naturales.

1.3 Partículas Alfa ${}^4_2\text{He}$, α

Emisiones nucleares que consisten en la asociación de 2 protones y 2 neutrones, o sea núcleos de Helio. Los radioisótopos que emiten partículas alfa disminuyen en cuatro unidades su número de masa y en dos unidades su número atómico, convirtiéndose por lo tanto en isótopos de elementos situados dos lugares atrás en la tabla periódica. (1)

1.4 Partículas Beta β

Emisiones nucleares de masa muy pequeña, equivalente a la del electrón.

Cuando tienen carga negativa son llamadas negatrones partículas β^- y si tienen carga positiva son llamados positrones partículas β^+ . Los radioisótopos que emiten partículas beta negativas aumentan en uno su número atómico y aquellos que emiten partículas beta positiva disminuyen en uno su número atómico permaneciendo en ambos casos con igual número de masa.

1.5 Electrones

El electrón es una partícula de masa muy pequeña ($1 / 1832$ de aquella del protón e igual a 0.000549 u.m.a.) con una carga eléctrica negativa y que gira en órbita definida en torno al núcleo atómico.

1.6 Energía Nuclear

Energía obtenida en planta nucleoelectrica por la transformación de calor producido durante la fisión de núcleos de metales pesados (Uranio o Plutonio).

1.7 Rayos Gamma

Emisiones nucleares sin masa, ni carga, constituidos por pura radiación electromagnética. Los núcleos que emiten rayos gamma permanecen con igual masa y carga, pero pierden energía y por lo tanto descienden en su nivel energético, pasando a menudo de un estado metaestable a otro estable, conocido como transición isomérica.

Fotón. - Una cantidad de energía electromagnética.

(E) cuyo valor es en joules es el producto de la frecuencia (ν) en hertz y la constante de Planck (h). La ecuación es la siguiente :

$$E = h * \nu \quad \text{en donde}$$

$$h = (6.62517 + 0.00023) * 10^{-27} \text{ erg-seg.}$$

1.8 Rayos Equis X

Radiaciones electromagnéticas penetrantes cuyas longitudes de onda son más cortas que las de la luz visible.

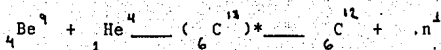
Generalmente son producidas por bombardeo de un blanco metálico con electrones rápidos de un alto vacío.

En reacciones nucleares es costumbre referir a los fotones originados en un núcleo como rayos gamma y aquellos operando en la parte extranuclear del átomo como rayos equis. Estos rayos equis son alguna veces llamados rayos Roentgen después de su descubrimiento por W.C. Roentgen.

1.9 Neutrones

En 1932 James Chadwick descubre el neutrón cuando bombardeó berilio con partículas alfa de núclidos radiactivos naturales de polonio.

Chadwick propuso la reacción nuclear siguiente:



La partícula alfa interacciona con el núcleo del Be , produciendo el núcleo compuesto de C_{13} del cual es expulsado un neutrón y el núcleo residual C_{12} es estable.

El neutrón es una partícula sin carga, con una masa de 1.008982 u. m. a. De acuerdo con su energía o velocidad puede ser clasificados como sigue:

Neutrones lentos	0.03 - 100 eV
Neutrones térmicos	0.025 eV
Neutrones intermedios	100 eV - 10 Kev
Neutrones rápidos	10 Kev - 10 Mev
Neutrones de alta energía	Mayor de 10 Mev

En 1932, Heisenberg sugirió que el neutrón era un constituyente fundamental de la materia. De acuerdo a ello, todos los núcleos están compuestos de protones y neutrones (nucleones) sin electrones dentro del núcleo.

La masa del neutrón es semejante a la del protón y su carga es cero. Si existen A nucleones dentro del núcleo, habrá Z protones y $A - Z$ neutrones.

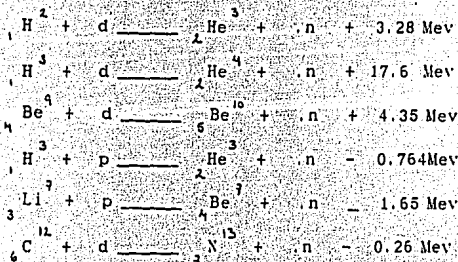
Producción de neutrones, dependiendo de la energía e intensidad del haz de neutrones, se han empleado diferentes métodos para la producción de neutrones:

a) Neutrones de reacciones nucleares (α, n)

b) Reacciones de fotodesintegración, por reacción del tipo siguiente:

${}^9_4\text{Be}(\gamma, n){}_4\text{Be}^8$ y ${}^1_1\text{H}(\gamma, n){}_1\text{H}^0$. Los neutrones producidos por este método son casi monoenergéticos.

c) Reacciones de bombardeo de ciertos blancos con partículas aceleradas. Las reacciones más comúnmente empleadas son:



De todas ellas, la más utilizada son las dos primeras.

d) Reacciones de fisión. La mayor parte de los métodos discutidos anteriormente producen neutrones de alta energía y flujos bajos. Para producir neutrones de baja energía y flujos altos, los reactores nucleares no pueden ser superados. Flujos de electrones de 10^{14} n/cm²-seg pueden ser obtenidos de reactores nucleares comparativamente mucho mayores que los flujos de 10^7 n/cm²-seg de fuentes y de 10^8 n/cm²-seg de aceleradores. La energía de los neutrones de fisión varía desde energías térmicas hasta 18 Mev con un valor promedio de energía de los neutrones de 2 Mev. Para producir

un haz de neutrones térmicos, la fuente es rodeada por un material que frena (slow down) los neutrones sin absorberlos.

Tales materiales se conocen como "moderadores" incluyen, agua, agua pesada y grafito. (1)

1.10 Propiedades de la Radiación

Símbolo	Energía (Mev)	Masa (uma)	Carga (signo)
Alfa, α	2 - 9	4	+2
Beta, β^-	0 - 3	0.0005	-1
Beta, β^+	0 - 3	0.0005	+1
Gamma, γ	0.01- 10	0	0
Neutrones, n^0	0 - 14	1	0

CAPITULO II

INTERACCION DE LA RADIACION CON LA MATERIA.

En este capítulo serán considerados los eventos que ocurren en la materia cuando es atravesada por las radiaciones nucleares. En vacío perfecto, las radiaciones continuarán moviéndose indefinidamente pero en un medio sólido, líquido o gaseoso, todas las formas de radiación pierden energía y acaban por ser absorbidas. La energía transferida a la materia, origina diversos eventos de ionización con los átomos que la constituyen, según el tipo de radiación y la cantidad de energía disipada, lo que hace posible la detección de las radiaciones.

2.1 Interacción Electrónica.

La interacción de la radiación con los electrones orbitales puede clasificarse como excitación e ionización.

La excitación es el incremento de la energía de un electrón a otro nivel de mayor energía; el electrón no sale del átomo o de la molécula. Después de un corto periodo de tiempo el electrón excitado regresará a su estado original de energía, al mismo tiempo libera radiación electromagnética en forma de calor, luz o rayos X.

La excitación puede producir disociación de la molécula (es decir que puede romper los enlaces químicos).

La ionización involucra la transferencia de energía suficiente para sacar un electrón de su órbita en un átomo o en una molécula.

El electrón y el átomo remanente, ahora cargado positivamente forman un par iónico.

El electrón liberado puede poseer desde muy poca hasta gran cantidad de energía cinética, dependiendo de la magnitud de la interacción. Si el electrón liberado tiene suficiente energía puede causar excitación e ionización en otros átomos del material absorbedor.

2.2 Interacción Nuclear.

En una interacción nuclear la radiación incidente es absorbida por un núcleo blanco para formar lo que es llamado un núcleo compuesto; el núcleo compuesto existirá en un estado altamente excitado.

El núcleo compuesto lanzará una partícula y/o radiación gamma para caer a un estado de menor energía.

El núcleo resultante puede o no ser radiactivo, dependiendo de la interacción que se efectúe.

2.3 Interacción de Partículas Cargadas.

Debido al hecho de que las partículas alfa consisten de la asociación de dos protones y dos neutrones, resultan extremadamente pesadas y grandes en relación a los otros tipos de radiación nuclear. Por lo tanto, cuando una partícula alfa incide sobre un electrón, lo despiende fuera del átomo sin que su trayectoria sea modificada.

De este modo, la trayectoria de las partículas alfa es muy corta debido a que por su tamaño y peso su ionización específica es muy grande, o sea que entregan su energía en gran número de colisiones durante un corto trayecto. Una gráfica de distancia recorrida por la partícula alfa contra la ionización específica producida, es la llamada curva de Bragg; misma que muestra como se produce un máximo de ionización específica hacia el término de la trayectoria.

2.3.1. Alcance o rango de las Partículas Alfa.

El espesor que las partículas alfa pueden atravesar antes de perder toda su energía es llamado alcance o rango de las partículas. Así el alcance o rango es función de la energía de las partículas.

La energía puede ser determinada al obtenerse el alcance por un procedimiento experimental consistente en la absorción de las partículas en espesores conocidos de materiales. En el caso de las partículas alfa todas tienen la misma energía para un emisor dado y solo pueden recorrer trayectorias muy cortas. Una ecuación que expresa el alcance como una función de la energía, para partículas alfa entre 4 y 7 Mev viajando en el aire, es como sigue:

$$A = 0.309 E^{3/2}$$

A= alcance en cm para partículas alfa atravesando el aire.

E= Energía de las partículas alfa en Mev.

Alcance en otros materiales puede ser aproximado por la ecuación:

$$AM = 0.519 E^{3/2}$$

AM= alcance de las partículas alfa en cualquier absorbedor, expresado en unidades de espesor másico mg/cm^2 .

E = Energía de las partículas alfa en Mev.

La unidad de espesor másico mg/cm^2 es comúnmente empleada en medidas de alcance y energía. Se obtiene multiplicando el espesor lineal por la densidad de un material absorbedor dado, de este modo el alcance de las partículas alfa y beta puede ser expresado por unidades de espesor másico, con valores fijos para una energía determinada, y no solamente como espesores medidos con unidad de longitud de un material específico.

2.3.2. Espectro de las Partículas Alfa.

Ya que todas las partículas alfa emitidas por un radioisótopo dado tienen la misma energía, serán paradas como un todo por un determinado espesor de materia y su espectro o distribución de energía mostrará un pico correspondiente a su energía característica.

O sea que si es trazada una gráfica de energía contra actividad de las partículas alfa emitidas por un radioisótopo determinado, se obtiene un pico en el valor determinado de su energía. El trazado

de esta gráfica o espectro es posible porque existen instrumentos de detección radiactiva capaces de clasificar según su tamaño las señales electrónicas o pulsos producidos por la radiación, tamaño que resulta proporcional a la energía de la radiación detectada. De este modo, en el caso del espectro de las partículas alfa, se obtienen los impulsos de un solo tamaño correspondiente a la naturaleza monoenergética de la radiación.

2.4. Trayectoria de las partículas Beta.

Las partículas beta son mucho más pequeñas y ligeras que las partículas alfa y se mueven más rápidamente. En consecuencia, causan una ionización específica menor y su trayectoria resulta más larga.

2.4.1. Alcance o rango de las partículas Beta.

A diferencia de las partículas alfa, no todas las partículas beta emitidas por un radioisótopo determinado tienen la misma energía. Una partícula beta puede tener una energía desde casi cero hasta un valor máximo determinado por la cantidad de energía disponible en la transformación nuclear. Por lo tanto las partículas beta emitidas por un específico núcleo radiactivo, tienen su propia energía máxima característica, es decir, que solo las más energéticas podrán atravesar los mayores espesores de materia mientras que las débiles son absorbidas por él. En esta forma el espesor de materia, usualmente expresado en términos de espesor másico, que resulta capaz de parar o absorber las partículas beta, de máxima energía emitidas por un radioisótopo, es llamado su rango de alcance máximo. Así, el alcance máximo y la energía máxima son valores característicos de las radiaciones beta y representan su poder de penetración.

La energía promedio de las partículas beta emitidas por un fuente

dada, es aproximadamente $1/3$ de su energía máxima, y ésta es una cifra utilizada para cálculos de la velocidad de emisión y absorción de energía.

2.4.2. Curvas de absorción de partículas Beta.

Cuando absorbedores de un material ligero, son interpuestos entre un emisor beta puro y un detector adecuado, las curvas que relacionan los diferentes espesores del material expresado en mg/cm^2 con el logaritmo de las actividades detectadas es llamada la curva de absorción beta de ese emisor en particular.

Con ella se determina el alcance máximo de las partículas beta, cuando la actividad detectada cae a un valor constante dentro de una zona de distribución estadística, lo que significa que todas las partículas beta han sido absorbidas por un espesor de materia representando al alcance máximo.

2.4.3. Radiación Bremsstrahlung.

Cuando una partícula beta cambia su trayectoria al pasar cerca de un núcleo, el cambio en velocidad y consecuentemente pérdida de energía da lugar a una radiación electromagnética llamada Bremsstrahlung, similar a los rayos X, la cual resulta más abundante cuando la radiación beta atraviesa materiales de alto número atómico. Por tanto, los absorbedores seleccionados para determinaciones del alcance de las partículas beta deberán ser materiales de bajo número atómico, tales como el aluminio.

2.4.4. Radiación de aniquilación.

Los positrones interactúan con los electrones, produciendo lo que se llama reacciones de aniquilación, que consiste en dos rayos gamma de 0.51 MeV cada uno, que se produce cuando el positrón desaparece al mismo tiempo que el electrón con el cual interactúa.

2.4.5. Análisis de Feather.

Si las partículas beta son acompañadas de radiación gamma en un decaimiento radiactivo dado, la curva de absorción será considerablemente alterada al detectarse los dos de tipos radiación simultáneamente, obteniéndose al principio de la curva la absorción de las partículas beta y al final la contribución de los rayos gamma, los cuales son poco afectados por los absorbedores y cuya detección permanece casi constante. O sea que cuando todas las partículas beta han sido absorbidas, se detectan las radiaciones gamma y Bremsstrahlung, ocultando a las partículas beta al fin de la curva e imposibilitando la determinación de su alcance máximo en forma directa.

La corrección más sencilla a este tipo de curva para obtener el alcance máximo de las partículas beta en presencia de rayos gamma se debe a Feather.

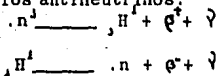
Existen otros procedimientos para determinar el alcance máximo de las partículas beta en presencia de rayos gamma como el de

Bleuler y Zunti. No obstante el análisis de Feather sigue siendo el más sencillo, debido a la simplicidad de las gráficas utilizadas.

2.4.6. Espectro de las partículas beta.

El hecho de que las partículas beta de un emisor dado tengan todas diferentes energías hasta un máximo determinado por el cambio de masa ocurrido en la transformación nuclear, ha sido explicado postulando la existencia del neutrino y el antineutrino. Los neutrinos son partículas subatómicas sin carga, de masa muy pequeña.

De acuerdo a esta teoría, la energía es compartida entre la partícula beta y el antineutrino en proporciones variables, dando así lugar a un espectro continuo cuando es trazada una gráfica de energía contra número de partículas detectadas o actividad. Es interesante apuntar aquí que los positrones comparten su energía con los neutrinos en tanto que las partículas beta o negatrones lo hacen con los antineutrinos.



2.4.7. Alcance medio de partículas beta.

Existe un espesor medio en la absorción de partículas beta, el cual se define como el espesor necesario para absorber la mitad de las partículas beta de energía máxima E , y resulta aproximadamente 0.1 a 0.2 del alcance máximo.

Puede obtenerse de la reacción :

$$d \frac{1}{2} = 32 E \quad \text{mg/cm}^2$$

Esta es una cifra útil cuando se considera el blindaje necesario para emisores beta o el espesor de la ventana para la detección de partículas beta con baja energía.

Sin embargo, es necesario aclarar que la absorción beta no es verdaderamente exponencial y el espesor medio no constituye una característica precisa de la radiación como sucede en el caso de la absorción de rayos gamma.

2.5 Interacción de radiaciones electromagnéticas con la materia.

Los rayos gamma son emitidos por el núcleo, cuando éste se encuentra en un estado de excitación y decae a un nivel inferior de energía. La energía de los rayos gamma abarca un intervalo de keV a MeV en tanto que aquella de los rayos X va de valores próximos a cero hasta 50 keV. El modo de interacción de los rayos X y gamma con la materia es el mismo en esencia, difiriendo solamente en la cantidad de energía que disipan en la materia al ser absorbidos.

La ionización específica en promedio 1/100 de aquella causada por las partículas beta, de manera que la mayor parte de la ionización (2) causada por los rayos X o gamma resulta ionización secundaria.

Aunque existen varios tipos de interacción de radiación gamma con la materia, solo tres tienen importancia en la detección

de radiación, éstas son:

- a) Efecto Fotoeléctrico
- b) Efecto Compton
- c) Producción de pares

2.5.1 Efecto Fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico, es la interacción de un fotón gamma o X incidente sobre los electrones de un átomo absorbedor, el fotón desaparece totalmente y se produce un electrón con gran energía cinética, es decir, un fotoelectrón. El origen más probable del fotoelectrón son las capas electrónicas interiores o sea, K o L. El fotoelectrón resulta con una energía dada por:

$$E_e = h\nu - E_b$$

Donde E_b , representa la energía de enlace de la capa donde se origina el fotoelectrón.

Después de la salida del fotoelectrón las capas electrónicas del átomo se rearreglan emitiendo rayos X característicos del átomo primario, que producen más ionizaciones y excitaciones en los otros átomos y éstos a su vez al rearreglarse producen rayos X de menor energía. En algunos caso las emisiones secundarias pueden ser electrones Auger.

El proceso fotoeléctrico es el modo predominante de interacciones para rayos gamma (o rayos X) de baja energía y para materiales absorbedores de alto número atómico.

2.5.2 Efecto Compton

El efecto Compton se produce entre un fotón gamma incidente y un electrón del material absorbedor. Muy a menudo es este el mecanismo predominante de interacciones en el rango de energías típicas que emiten los radioisótopos. En el efecto Compton el fotón gamma incidente es desviado en ángulo θ con respecto a su dirección original. El fotón transfiere una cantidad de su energía al electrón (que se supone originalmente en reposo), el cual es conocido como electrón de retroceso.

Como todos los ángulos de desviación son posibles, la energía es transmitida en energías que van desde cero hasta grandes fracciones de la energía del rayo gamma.

La probabilidad del efecto Compton se incrementa con el número atómico del absorbedor, ya que a mayor Z , habrá más electrones que sirvan de blanco. Esta probabilidad fue calculada por Klein y Nishima.

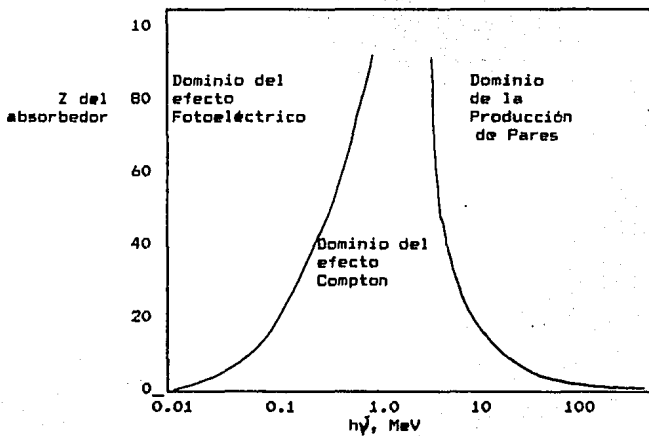
2.5.3. Producción de Pares

Si la energía del rayo gamma excede el doble de la energía equivalente de la masa del electrón (1.02 MeV), el proceso de producción de pares es energéticamente posible y por lo tanto este proceso es solo viable para rayos gamma de alta energía. En esta interacción (en la cual toma parte el campo Coulombiano del núcleo), el

fotón gamma desaparece y es reemplazado por un par de electrón positrón. El exceso de energía cinética de 1.02 MeV, será dado en energía cinética al electrón y al positrón.

El positrón y el electrón ceden su energía cinética al medio, pero mientras el electrón se recombina con el medio, el positrón toma un electrón del medio, ambos se colapsan y aniquilan produciendo dos fotones gamma de 0.51 MeV que salen en sentidos opuestos.

En la siguiente figura se ve la importancia relativa de los tres efectos más importantes de la interacción de los rayos gamma en función de la energía y el número atómico del absorbedor. Las líneas muestran los valores de Z y $h\nu$ para los cuales los dos efectos son iguales.



2.5.4 Coeficiente de atenuación lineal de la radiación gamma con la materia.

Cada proceso de interacción tiene una probabilidad por unidad de longitud de quitar fotones gamma del haz, la probabilidad total de quitar fotones del haz por unidad de longitud es el coeficiente de atenuación lineal, que es:

$$\mu_{\text{total}} = \mu_{\text{fotoeléctrico}} + \mu_{\text{Compton}} + \mu_{\text{par}}$$

Una alternativa al uso del coeficiente de atenuación lineal es el coeficiente de atenuación másico μ/ρ , pues no depende del estado físico del material absorbedor (sólido, líquido, vapor).

El espesor másico es útil también cuando se discuten interacciones de partículas cargadas y de electrones rápidos. Si se usan diferentes materiales con Z no muy diferente, pero de igual espesor másico, la partícula interactuará con aproximadamente la misma cantidad de electrones.

2.5.5 Absorción de rayos gamma.

Cuando un haz de rayos gamma pasa a través de materia, el número de radiaciones detectada decrece exponencialmente con el espesor del material absorbente.

Por lo tanto, existe una relación análoga a la ley fundamental del decaimiento radiactivo. Los rayos gamma absorbidos según una ley exponencial caracterizada por un espesor medio y un coeficiente de atenuación.

El coeficiente de atenuación lineal es una función de la energía de la radiación y de la densidad del medio absorbente.

Si llamamos a la intensidad inicial de un flujo de rayos gamma, medida en términos de cuentas por unidad de tiempo en un sistema de detección, I_0 al espesor en cm de un determinado material colocado entre una fuente radiactiva y el detector, y μ al coeficiente de atenuación lineal de ese determinado material, estará dada por la expresión:

$$I = I_0 e^{-\mu X}$$

Se llama espesor medio o capa hemirreductora al espesor de material absorbente requerido para absorber la mitad de los rayos gamma incidentes. Cuando $I = I_0/2$ la relación entre el espesor medio $X_{1/2}$ y el coeficiente de atenuación μ será igual aquella entre la vida media y el coeficiente de decaimiento.

$$X_{1/2} = 0.693/\mu$$

Si el espesor X del material absorbente es expresado en unidades de espesor másico (g/cm^2) en vez de unidades de longitud usualmente cm, entonces el coeficiente de atenuación μ tendrá también otro valor numérico al ser expresado en unidades diferentes.

En este caso cambia su nombre por el de coeficiente de absorción másico, el cual puede ser obtenido dividiendo el coeficiente de atenuación lineal μ expresado en cm^{-1} por la densidad D del material absorbedor expresado en g/cm^3 .

$$\mu \text{ (absorción másico, cm}^2\text{/g)} = \frac{\mu \text{ (atenuación lineal cm}^{-1}\text{)}}{D \text{ (g/cm}^3\text{)}}$$

2.5.6 Espectro Gamma.

Cuando los rayos gamma son absorbidos por la materia, su energía es transferida al absorbedor, teniendo lugar los efectos fotoeléctrico, Compton y producción de pares como hemos visto. Si los rayos gamma son absorbidos por el detector adecuado, esta energía es transformada en pulsos de corriente, cuya altura es proporcional a la energía del rayo absorbido. Los dos tipos de detectores más usados para producir estos pulsos con radiación gamma son conocidos como detectores de centelleo y detectores semiconductores. Si los pulsos son aceptados o rechazados según su altura por un equipo electrónico adicional conectado al detector, son registrados aquellos de un determinado tamaño. En esta forma, registrando sucesivamente los pulsos producidos por los rayos gamma de una energía dada, es posible trazar un diagrama de energía de las radiaciones contra la actividad detectada, el cual mostrará picos en los lugares correspondientes a la energía característica de los rayos gamma absorbidos por el detector.

Estos picos son producidos por los rayos gamma cuya energía total es absorbida, pero en algunos otros rayos gamma ceden sólo una fracción de la misma y escapan del sistema.

Estas fracciones de energía absorbidas son variables y producen pulsos más pequeños. Así, una energía ancha y baja aparecerá antes del pico correspondiente a una energía de rayo gamma totalmente absorbida.

La selección de altura de los pulsos puede realizarse con equipo relativamente sencillo por medio de un discriminador que permite sean registrados por el escalador solo pulsos sobre un cierto tamaño mínimo. De esta manera puede ser obtenida la curva integral de un espectro gamma. Pero la distribución de altura de pulsos o señales electrónicas se obtiene directamente con un analizador monocanal. Una gran variedad de analizadores multicanales o espectrómetros ha sido desarrollada en los últimos años, permitiendo a la espectrometría gamma alcanzar altos niveles de refinamiento, siempre que sea requerido un análisis de energía de este tipo de radiación.

Entre los detectores utilizados, los de NaI(Tl) proporcionan una mayor eficiencia, o sea que es mayor la relación entre el número de cuentas obtenidas en el sistema y el número de rayos detectados de cada energía, pero los semiconductores (Ge-Li, Si-Li) tienen mayor

poder de resolución, ésto es, son capaces de producir pulsos con diferencia de tamaño más pequeña, correspondientes a valores de energía más cercanos de la radiación disipada en el detector.

2.6. Interacción de Neutrones

Al igual que los rayos gamma, los neutrones no tienen carga eléctrica y no interactúan con la materia a través de fuerzas coulombianas. Los neutrones pueden atravesar muchos centímetros de materia sólida sin tener algún tipo de interacción y por lo tanto pueden ser "invisibles" para algunos detectores de tamaño común.

Una lista de varios mecanismos de interacción de neutrones con la materia es la siguiente:

1. - Dispersión Elástica

El neutrón es absorbido y reemitido con su energía cinética inicial completa, el núcleo absorbedor no queda en el estado excitado.

2. - Dispersión Inelástica

Este proceso es energéticamente posible solo para neutrones rápidos.

3. - Captura simple

Es probablemente la reacción más común pues los neutrones térmicos inducen esta reacción en casi todo los núclidos y también es probable para neutrones epitérmicos en algunos núclidos.

Este proceso es llamado también captura resonante o captura radiactiva y la energía del gamma emitido es de varios MeV.

4. - Emisión de Partículas Cargadas

Para que una partícula cargada salga del núcleo debe vencer la barrera coulombiana, este tipo de interacciones es más probable para núcleos ligeros y neutrones rápidos, aunque existen algunas excepciones importantes en donde la reacción es viable con neutrones térmicos gracias a que son suficientemente exotérmicas.

5. - Fisión

El núcleo original se rompe en dos fragmentos de fisión y uno o más neutrones. La fisión ocurre con neutrones térmicos en ^{235}U , ^{239}Pu y ^{233}U y con neutrones rápidos con muchos núcleos pesados.

CAPITULO III

TECNICAS DE DETECCION Y MEDICION DE RADIACION IONIZANTE

Las técnicas de detección radiactiva y la interpretación de los resultados obtenidos son temas de la mayor importancia en el estudio y las aplicaciones de los radioisótopos, debido a que siempre resulta indispensable manejar datos que sean verdaderamente representativos del nivel de radiactividad y energía de radiación que se desean evaluar con un propósito dado.

Los instrumentos que se utilizan para evaluar la magnitud de una dosis de exposición, miden la dosis de radiación acumulada en un periodo de tiempo y son los llamados dosímetros y los monitores de superficie.

Por ejemplo si un trabajador va a permanecer en un área en donde estará expuesto a la radiación, tiene que conocer cual es la dosis que recibió. Para poder darle la información de la dosis total recibida, se necesita un dosímetro o un contador de tipo G.M.

Técnicas de Detección

3.1 Radiación de fondo.

Cuando un detector es conectado y se aplica su voltaje de operación empieza a registrar un número dado de cuentas por unidad de tiempo aunque no tenga muestra radiactiva en posición a ser detectada.

Estas cuentas provienen de manera natural en nuestro medio ambiente y en menor medida del ruido electrónico del detector. La llamada radiación de fondo que existe en nuestro planeta tiene diversos orígenes. La tierra recibe una corriente más o menos constante de partículas de alta energía, como protones que provienen del espacio. Cuando estas partículas interactúan con la atmósfera superior son producidos dos neutrones, mesones (partículas elementales que forman parte de la radiación cósmica e interactúan fácilmente con los núcleos atómicos) y rayos gamma. En la superficie de la tierra se detecta la radiación gamma casi en forma exclusiva, constituyendo el componente principal de lo que se llama radiación de fondo. Pero además de la radiación cósmica, otras contribuciones son añadidas a la radiación de fondo por los isótopos radiactivos existentes en la tierra, el agua y organismos vivos.

Por lo que en cada medida de radiactividad, la radiación de fondo debe ser medida en las condiciones de operación escogidas y sustraída de las lecturas representando la actividad de la muestra más la radiación de fondo. Esta corrección resulta de la mayor importancia en la medida de bajas actividades.

3.2. Voltaje de operación de un detector Geiger.

Si una muestra radiactiva es puesta en posición de ser detectada por un contador Geiger y empieza a elevarse el voltaje aplicado

en los electrodos, ningún pulso o señal será producido por el detector sino que hasta que alcanza un cierto valor de voltaje. Cuando el voltaje va siendo incrementado regularmente más allá de este valor, la rapidez de las cuentas aumenta hasta alcanzar un umbral después del cual las cuentas por unidad de tiempo se mantienen sensiblemente constantes dentro de sus variaciones estadísticas, para intervalos de 150 a 200 voltios, o más, de manera de trazar una gráfica de voltaje contra cuentas por minuto se obtiene una meseta para valores dentro de este intervalo. La pendiente de esta meseta es normalmente expresada como un porcentaje de incremento de rapidez de cuentas por voltio, y debe ser menor a 0.1% por voltio si el detector está en buenas condiciones. La fórmula siguiente puede ser usada para calcular dicho porcentaje:

$$\frac{(C_2 - C_1) * 100}{V_2 - V_1} = < 0.1 \% \text{ por volt}$$

$$(V_2 - V_1) * C_1$$

donde:

V_1 es el voltaje en el umbral

C_1 es la rapidez de las cuentas en el umbral

V_2 es el voltaje al final de la meseta

C_2 es la rapidez de las cuentas al final de la meseta

El voltaje usual escogido para el punto de operación es 50 a 75 voltios sobre el umbral, si la meseta tiene una longitud de 200 voltios. Al final de la meseta, el tamaño de los pulsos se incrementa con el voltaje, así que a valores mayores existe una tendencia más acusada para que sean iniciadas descargas espúreas en los electrodos.

A medida que los vapores orgánicos usados como atenuador envejecen, el voltaje del umbral aumenta y la meseta se vuelve más corta y con una mayor pendiente. Un método de verificar las condiciones de un detector Geiger es el siguiente:

1. Con una muestra radiactiva en posición de ser detectada elevar lentamente el voltaje hasta empezar a obtener cuentas.
2. Elevar el voltaje 50 voltios ($V_1 + 50$) voltios, y contar la muestra el tiempo suficiente para obtener aproximadamente 10,000 cuentas.
3. Elevar el voltaje 100 voltios adicionales ($V_1 + 150$) voltios, y contar la muestra por igual tiempo que en el paso anterior.
4. Las cuentas obtenidas en ambas ocasiones deben diferir por más de 10%. Si sucede así, significa que la meseta tiene una longitud menor a 100 voltios o su pendiente es mayor a 0.1% por voltio.

En los dos casos el detector Geiger no se encuentra en condiciones adecuadas.

3.3 Tiempo de resolución.

Un tubo Geiger permanece inactivo por algún tiempo después de haber generado un pulso, hasta estar en posibilidad de generar el siguiente. El tiempo necesario (usualmente del orden de cientos de microsegundos), para contar dos radiaciones sucesivas, se conoce como tiempo de resolución.

Ya que el decaimiento radiactivo es un proceso al azar y no distribuido de manera regular en el tiempo, aún a relativamente pequeños números de cuentas por minuto, un cierto porcentaje de eventos de decaimiento ocurrirá dentro del tiempo de resolución del sistema usado para detectarlos. Si el nivel radiactivo de una muestra es alto, y por consiguiente rinde un considerable número de cuentas por minuto, entonces aumenta el porcentaje de radiaciones emitidas dentro del tiempo de resolución. Para establecer las cuentas que se hubieran obtenido si no existiera el tiempo de resolución es necesario conocer la corrección que debe ser hecha a causa de esta pérdida.

Si t representa el tiempo de resolución, m las cuentas por minuto observadas en el sistema de detección, y n las cuentas por minuto que se obtendrían si no hubiera tiempo de resolución, se tendrá que para m cuentas registradas en un minuto, habrá un tiempo igual a mt en que no fueron producidos pulsos, siendo el verdadero tiempo de detección no un minuto sino $1-mt$. Como las cuentas son directamente proporcionales al tiempo en que fueron obtenidas se tendrá que $n/m = 1/1-mt$ o sea $n = m/1-mt$

Existen varios métodos para calcular el tiempo de resolución de un detector, pero uno muy sencillo consiste en el uso de 2 muestras radiactivas con actividades distintas, pero aproximadas a 15,000 ó 20,000 cpm. El método se desarrolla como sigue:

1. Contar la muestra A para obtener m_1 cuentas por minuto.
2. Con la muestra A en idéntica posición, agregar la muestra B y contar para obtener m_2 cuentas por minuto.
3. Dejar la muestra B en igual posición, quitar la muestra A y contar para obtener m_3 cuentas por minuto.
4. Retirar las muestras y contar el fondo M_0 en cuentas por minuto.

Dando la siguiente ecuación:

$$t = \frac{m_1 + m_2 - m_3 - M_0}{2(m_1 - M_0)(m_2 - M_0)} = \text{min}$$

Cuando se sustituyen los valores conocidos de m_1 , m_2 y m_3 , t_r , M_0 puede ser calculado. Un valor común para tiempo de resolución en contadores Geiger es 400 microsegundos, habiéndose hecho tablas de correcciones para varios valores de cuentas por minuto, basadas en este tiempo de resolución. A diferencia de la corrección por cuentas debidas al fondo, que tiene mayor importancia mientras la actividad detectada se aproxime más al nivel de la radiación ambiental, la corrección por tiempo de resolución es mucho más significativa para elevadas actividades y consecuente alto valor de cuentas por unidad de tiempo.

3.4 Voltaje óptimo de operación en un detector de centelleo.

El criterio general para determinar el voltaje de óptimo de operación en detectores que no son Geiger-Müller, es escoger aquel voltaje para el cual la diferencia entre las cuentas debidas a la actividad de la muestra y a la radiación de fondo sea mayor. En detectores de centelleo, es necesario trazar una gráfica de los correspondientes valores de voltaje, contra el cuadrado de la diferencia de las lecturas para la muestra radiactiva y el fondo dividido entre el fondo. El máximo de la curva obtenida indicará el óptimo voltaje de operación.

3.5 Voltaje de operación en un detector proporcional.

Si en un detector proporcional se trazan gráficas de las cuentas debidas a una muestra radiactiva y al fondo, para valores del discriminador de pulsos de 5 y 20 voltios por ejemplo, poca experiencia será necesaria para seleccionar el óptimo voltaje de operación en aquellas regiones de las curvas en las cuales la diferencia entre las cuentas por la detección de la muestra radiactiva y el fondo sea mayor. Igual que en los detectores de centelleo la gráfica del voltaje contra el cuadrado de la diferencia de las lecturas para la muestra radiactiva y el fondo, dividido entre el fondo, tendrá un máximo en el lugar correspondiente al óptimo voltaje de operación. Habiendo seleccionado el voltaje de operación, debe trazarse una gráfica de voltaje del discriminador contra cuentas obtenidas, obteniéndose los mejores valores del discriminador para las condiciones de detección, en la zona donde la pendiente de la casi recta obtenida sea menor.

3.6 Preparación de muestras radiactivas.

Evaporar una solución directamente sobre un pequeño disco metálico o plancheta es uno de los métodos más simples de preparación de muestras radiactivas sólidas. Como con la excepción de emisores alfa es deseable siempre minimizar la cantidad de sólidos en una muestra, la solución radiactiva es transferida a la plancheta en

volúmenes lo más reducidos posibles, esto es, de 0.5 ml o menores. Existen planchetas de aluminio, acero inoxidable, latón y cobre, con y sin un pequeño borde, aunque debido a que se facilita su manipulación, son más usuales aquellas con borde. Para volúmenes ligeramente mayores pueden ser usados vidrios de reloj de 25 mm o cualquier otro contenedor plano, susceptible de fácil descontaminación si se desea usarlo de nuevo, en cuyo caso es necesario verificar cuidadosamente la no existencia de actividad residual. Para pequeños precipitados, es posible disolverlos para transferirlos con mayor facilidad a una plancheta y evaporar el solvente. La práctica usual consiste en realizar la evaporación bajo una lámpara de rayos infrarrojos, para evitar en lo posible que la muestra salpique y contamine los alrededores al alcanzar su punto de ebullición. Con este fin, la distancia entre la lámpara y la muestra debe ser suficiente para prevenir que hierva (de 10 a 20 cm).

Además, con objeto de asegurar una muestra extendida regular y uniformemente, puede ser agregada a la solución que se evapora una pequeña cantidad de alguna sustancia que abata la tensión superficial, tal como cloroformo o tetra-etilglicol. Una vez seca, la plancheta puede ser cubierta con papel celofan delgado (a menudo se usa una cinta adhesiva transparente) o

película de plástico, con objeto de evitar contaminaciones, a menos que se trate de un emisor de partículas alfa ó beta débiles, en cuyo caso es deseable eliminar la absorción de las radiaciones en esta pequeña capa de materia.

Otro procedimiento para preparar una muestra radiactiva sólida, sobretudo si se cuenta con una solución de alta actividad específica, consiste en adsorber la solución en un disco de papel poroso (como papel filtro, por ejemplo) y secarlo con rayos infrarrojos.

También puede hacerse uso de la electrodeposición, que permite un depósito de electrolitos sobre discos de metal en capas uniformes y muy delgadas, del todo adecuadas como fuentes radiactivas.

(9)

3.7 Autoabsorción.

Cuando el espesor de una muestra radiactiva emisora de partículas alfa ó beta es incrementado, la actividad crece hasta un máximo en donde permanece constante, alcanzado cuando las partículas de las capas inferiores son todas absorbidas antes de llegar a la superficie.

Este espesor es conocido como espesor infinito.

Si se trata de emisores alfa ó beta de baja energía, una fuente radiactiva debe ser extremadamente delgada, para eliminar errores

en la detección debidos a la autoabsorción de las radiaciones.

Muestras extremadamente delgadas son muy difíciles de obtener y su actividad resulta menor que si fueran más gruesas, de modo que estos posibles errores son eliminados usando métodos comparativos que implican igual espesor para una serie de fuentes radiactivas, o mejor usando muestras con espesor infinito, en las cuales ninguna de las partículas emitidas por las capas inferiores llega al detector, y entonces la rapidez de las cuentas es proporcional a la actividad específica, o sea a la actividad por unidad de masa. Esto puede realizarse usando un área constante, con espesor infinito, en un tipo de planchetas con dimensiones bien definidas. La autoabsorción es un factor muy importante a tener en cuenta en la detección radiactiva, sobretodo cuando se trata de partículas alfa ó beta.

3.8 Factores geométricos.

Las radiaciones son emitidas por una fuente radiactiva en todas direcciones. Con el objeto de lograr que la eficiencia en su detección sea la mayor posible, la posición de la muestra y el detector debe ser tal que un óptimo ángulo sólido sea limitado por ambos. Para comparación de muestras, el ángulo con el cual las radiaciones penetran al detector debe ser exactamente el mismo en cada conjunto de determinaciones. De otra manera, la relación entre actividad de

las fuentes radiactivas no puede ser determinada en forma reproducible, especialmente si presentan otras anomalías como la de no ser suficientemente planas y en consecuencia tener distinta autoabsorción en cada sector de su área. Es muy importante considerar que la geometría óptima se consigue con muestras muy pequeñas, aproximándose tanto como sea posible a las fuentes puntuales.

3.9. Factores de absorción externa

Otro importante factor de la detección radiactiva, es la absorción de las radiaciones por la materia existente entre la fuente y el detector. De este modo, es necesario tener en cuenta la absorción por el aire y la ventana del detector, o por la pared del contenedor en caso de muestras líquidas, particularmente cuando las partículas alfa o beta de baja energía van a ser contadas.

Para muestras sólidas, la distancia entre la muestra y la ventana del detector debe ser obviamente la misma en cada conjunto de determinaciones, a fin de conservar invariable el ángulo sólido y la absorción externa.

3.10 Magnitud de Dosis de Exposición.

Los instrumentos para medir la magnitud de dosis de exposición a la radiación descritos anteriormente, miden la radiación X o gamma. Como la radiación con partículas es mucho menos penetrante, no puede pasar través de las paredes de la mayoría de los aparatos, con excepción de aquellos diseñados con una ventana delgada. Tales detectores generalmente tienen un obturador, que puede abrirse para admitir partículas. Si el obturador que cubre la ventana del detector se abre, entrará la radiación gamma junto con las partículas. Las mediciones que se hacen con el obturador abierto y cerrado, permiten contar la cantidad o la intensidad de radiación por partículas. También los dosímetros de película tienen aberturas en la placa y filtros para admitir la radiación beta. Los instrumentos deben tener límites adecuados para medir las magnitud de dosis de exposición. Los contadores Geiger son instrumentos generalmente de bajo nivel y leen solamente alrededor de 50 miliroentgen/hora (mr/h) Los instrumentos del tipo de cámara de ionización miden altos niveles de radiación. Los tipos más comunes de tales aparatos leen hasta 500 R/h; los contadores Geiger tienen la tendencia a saturarse en un campo de alta radiación. Esto significa que la aguja sobre la carátula no se moverá arriba del cero.

Ordinariamente los detectores Geiger, muestran una pequeña lectura arriba del cero, debida a la radiación de fondo.

Las personas que usan este tipo de instrumentos, deben ser muy cuidadosos de no aceptar un contador Geiger que indique cero como significado de que no hay radiación presente. Las cámaras de ionización para el monitoreo de las superficies, no se saturan. Si se usan en un campo de radiación cuya intensidad sea mayor de los límites del instrumento, la aguja se moverá más allá de los límites superiores de la escala de lecturas.

3.11. Magnitud de Razon de Dosis de Exposición.

Instrumentos para medir la magnitud de una razon de dosis de exposición, se refieren a la medición inmediata de la razón de dosis o la intensidad de radiación.

Un trabajador puede saber que un área tiene radiación, pero no puede conocer la intensidad de la radiación. Un medidor de superficie le dirá la razón de dosis.

Excepto para técnicas con películas fotográficas y para unos cuantos métodos especiales, todos los equipos para detectar radiación se basan en la ionización producida por ésta en un gas. Cuando una partícula de alta velocidad o un fotón entra a un gas, puede actuar sobre un átomo o molécula con una fuerza suficiente para sacar un electrón y formar un par iónico de partículas

cargadas. Cada partícula cargada, va acompañada de un campo eléctrico que se mueve con la partícula.

Algunas de las características importantes en los monitores de superficie deberán ser consideradas al seleccionar un instrumento.

Estas características se resumen en la forma siguiente:

- a). - Los instrumentos deben detectar la radiación deseada.
- b). - Los monitores de superficie deben cubrir un límite adecuado de razones de dosis de radiación.
- c). - Los aparatos deben ser estables y retener la calibración.
- d). - Los aparatos deberán tener una constante de tiempo aceptable.

Es deseable una constante de tiempo corta; sin embargo, no debe ser tal, que las fluctuaciones de la aguja impidan efectuar las mediciones.

- e). - Las pilas que utiliza deben ser del tipo comercial.
- f). - Deberá tener un servicio de mantenimiento, reparación y calibración.

3.12. Monitores de Superficie para Razón de Dosis tipo G.M.

Como los G.M. detectan partículas ionizantes, sin que importe el grado de ionización que producen y como todas las unidades de razón de exposición se definen en términos de grado de ionización, no pueden calibrarse como medidores de razones de exposición, a menos que se conozca la identidad de la partícula o

rayos ionizantes. Sin embargo, una persona capacitada aprenderá pronto la relación aproximada entre las lecturas en el G.M. y la razón de dosis medida en diferentes fuentes radiactivas.

Una lectura de radiación gamma de alrededor de 4000 c. p. m. equivale a un miliroentgen/h: para radiación beta de productos de fisión, lecturas entre 1000 y 3000 c. p. m. equivalen a 1 millirad/h. Aunque no deberán usarse estas relaciones aproximadas, para establecer límites de tiempos de exposición, su conocimiento puede ser de mucha utilidad a personas con experiencia, para hacer una evaluación rápida de las condiciones de trabajo.

CAPITULO IV

EQUIPOS EMPLEADOS EN SEGURIDAD RADIOLOGICA

El desarrollo del estudio de los radioisótopos ha sido posible con el paralelo desarrollo de la electrónica, la cual ha sido produciendo cada vez más perfectos instrumentos para detectar la radiactividad. Estos instrumentos proporcionan con variada eficiencia datos acerca del número de núcleos decayendo por unidad de tiempo en una muestra radiactiva y de la energía de las radiaciones absorbidas por el detector. Para ello es necesario que el tipo de detector sea escogido de acuerdo a las características de la radiación y su uso se realice en forma apropiada.

El conocimiento de las técnicas adecuadas para detectar las radiaciones y obtener una buena medida de su número por unidad de tiempo y de su energía, constituye un punto principal en el estudio de los radioisótopos, porque sólo a través de esta detección pueden llegar a establecerse sus características y ser usados en aplicaciones científicas o industriales.

Los diferentes detectores de radiactividad están basados en los 3 principios siguientes:

- a) La recolección de iones producidos cuando las radiaciones atraviesan un gas.

b) La transformación en pulsos de electricidad de la fosforescencia producida cuando las radiaciones son absorbidas por materiales especiales.

c) El comportamiento de materiales semiconductores de corriente al ser atravesados por radiaciones.

La elección del equipo de detección radiactiva, tipo de estudio o aplicación utilizando radioisótopos que vaya a llevarse a cabo, el punto más importante en la planeación del trabajo consiste; en decidir que equipo de detección es el más adecuado, ya que en todos los casos es necesario obtener un reflejo correcto y reproducible de la radiactividad. Naturalmente, la elección del equipo adecuado para detectar y constar una especie particular de radiaciones debe ser hecha muy cuidadosamente, a fin de poder aprovechar esta particular propiedad de la materia como un guía o trazador en la investigación científica, o para realizar algún propósito en el campo industrial. La forma física de la muestra radiactiva puede ser un factor para decidir si se emplea un detector útil para fuentes sólidas, líquidas o gaseosas. Pero las energías comprendidas en la detección son mucho más importantes y así por ejemplo, no es posible detectar partículas β^- de baja energía emitidas por el ^{45}Ca , ^{14}C , ^{63}Ni ó ^3H en un detector Geiger para muestras líquidas, debido a que estas radiaciones no cuentan

con la energía suficiente para atravesar la pared del contenedor. Además la autoabsorción es muy considerable y por tanto debe ser escogido un tipo diferente de detector.

Con objeto de tener una idea acerca de la índole del equipo necesario, se requiere información tan detallada como sea posible sobre la naturaleza de la radiación y los niveles probables de radiactividad a detectar. En muchos casos resulta posible escoger entre dos o más tipos de detectores, determinando entonces la selección su diferente eficiencia, su facilidad de manejo, su precio o su disponibilidad. Indiscutiblemente, el Geiger-Müller es el equipo de detección más sencillo y barato, por lo cual se emplea tanto como lo permite la naturaleza y energía de la radiación, cuando no es necesario realizar ninguna discriminación o clasificación de los pulsos producidos.

4.1.1 Detección de partículas α . Para contar partículas α , la primera opción es un sistema de centelleo, usando un fósforo de ZnS activado con Ag, que admite un considerable intervalo de valores en la rapidez de desintegración, con la ventaja de no requerir una gran ganancia en la amplificación de los pulsos producidos. En esta forma la actividad de partículas α puede ser medida en la presencia de una cantidad 10^4 veces mayor de partículas β , sin interferencia significativa.

Los detectores semiconductores resultan muy útiles, particularmente para llevar a cabo análisis de energía de las partículas α . No obstante su precio, este tipo de detectores se ha convertido en casi insustituible para obtener espectros de energía de partículas que presentan alta ionización específica.

Otra alternativa muy conveniente resultan los detectores proporcionales de flujo, usando gas P, (90% de metano o propano y 10% de argón) en los cuales la eficiencia en la detección es mayor, aún cuando la resolución de los espectros de energía obtenidos sea menor que en los semiconductores.

Pueden ser usados detectores Geiger Müller con ventanas muy delgadas, cuando no se requieren análisis de energía y la detección de las partículas sea posible a pesar de lo reducido de su trayectoria.

4.1.2 Detección de partículas β^- . Para partículas β^- con energías máximas arriba de 0.1 MeV, generalmente son usados Geiger Müller con ventana delgada. Para energías máximas encima de 0.5 MeV es posible utilizar el Geiger de muestras líquidas. Para la detección con máxima eficiencia de partículas β^- de baja energía, existen 3 elecciones posibles:

1. - Detectores de flujo sin ventana, proporcionales o Geiger, para muestras sólidas.

2.- Detectores de flujo sin ventana, proporcionales o Geiger, para muestras gaseosas.

3.- Detectores de centelleo líquido, usando un fósforo interno, para soluciones.

Los detectores de flujo sin ventana, con la muestra en una plancheta dentro del detector, igual que para la detección de partículas α , pueden ser usados a voltaje de operación mayor que para éstas, debido a la mayor amplificación gaseosa requerida. Al tratarse de partículas β débiles emitidas por muestras sólidas, la autoabsorción será considerable y por tanto la eficiencia no muy alta.

La detección de muestras gaseosas es utilizada cuando se tienen bajas actividades de emisores β débiles. Por ejemplo, materia orgánica marcada con ^{14}C puede ser quemada y el $^{14}\text{CO}_2$ desprendido será detectado cuando se introduzca a un detector de flujo, junto con el gas P o Q, para ser contado en la región proporcional o Geiger. El equipo necesario para la combustión y manejo de gas es caro y de difícil manejo, razón por la cual este método se justifica sólo cuando es realmente necesaria una eficiencia óptima en la detección.

4.1.3 Detección de rayos γ . El sistema más apropiado para la detección de rayos γ es el de centelleo, usando un cristal de NaI

activado con Tl. El tamaño del cristal es proporcional a su eficiencia, aún cuando mientras mayor aumente la radiación de fondo detectada, lo que resulta un inconveniente que puede resolverse en parte mediante blindaje. También, si se trata de cristales como el modelo de pozo donde la muestra es introducida de manera que el fósforo la rodee, la eficiencia puede ser aumentada hasta 50%. Cuando se trata de detectar emisores γ a muy bajas actividades, como por ejemplo ^{131}I en leche común, son utilizados recipientes de plástico con un espacio anular, en los cuales litros de muestra son detectados por un cristal relativamente grande de 3 x 3 pulgadas. Aun cuando espectros de energía γ son obtenidos utilizando cristales de NaI (Tl) acoplados a analizadores de pulsos multicanales, los detectores semiconductores de Ge-Li o Si-Li son cada vez más utilizados con este fin, debido a su mayor capacidad para diferenciar valores de energía muy próximos. Sin embargo, estos detectores, estos detectores no han desplazado a los de centelleo, debido a su costo más alto, dificultades de conservación al requerir criostatos que utilizan gases licuados y sobretodo menor eficiencia. Aun cuando los detectores Geiger generalmente no pueden detectar rayos γ con una eficiencia mayor a 1%, siguen utilizándose si la

actividad es suficientemente alta para obtener una adecuada rapidez de cuentas. En particular, y debido a su versatilidad y bajo costo, este tipo de detector sigue siendo el más común cuando se trata de utilizarlo como monitor de radiación γ , sin excluir a las partículas α y β .

4.1.4 Técnicas especiales de detección. Para materiales con baja radiactividad, tales como aquellos que contienen radioisótopos ambientales, o para obtener separadamente la detección de partículas y radiaciones emitidas por un mismo radioisótopo, o cuando interesa aumentar la eficiencia en la detección a casi 100%, técnicas especiales de detección radiactiva han sido ampliamente desarrolladas. A continuación serán consideradas algunas de ellas.

4.1.5 Detección en coincidencia. Este método para detectar el 100% de las desintegraciones sufridas por una muestra radiactiva, consiste en detectar a la vez las partículas β en un detector y los rayos γ en otro, cuando tenemos isótopos tales como ^{60}Co ó ^{198}Au , que decaen emitiendo ambos tipos de radiaciones. En estos casos, es posible colocar la muestra entre un detector β (como un contador Geiger de ventana) y un detector γ (que puede ser igualmente un Geiger pero con pared de cobre o plomo o mejor un detector de centelleo, para no detectar las partículas β). Los pulsos producidos por ambas unidades son alimentados a un módulo de coincidencia, el cual transmite las señales recibidas a un

escalador ϕ y a otro δ , y también expide una señal a un tercer escalador de coincidencia, sólo cuando recibe pulsos simultáneos de los detectores ϕ y δ . De este modo, si la eficiencia del contador es E_1 (no importa cuales sean los factores que la modifican, como ángulo sólido o absorción en la ventana) y la eficiencia del contador es E_2 (no importa cuales sean los factores que la modifican, como ángulo sólido o absorción en la ventana) y la eficiencia del contador δ es E_2 , y llamamos N a la rapidez de desintegración, tendremos:

$$\text{Cuentas } \phi = n_{\phi} = E_1 \times N$$

$$\text{Cuentas } \delta = n_{\delta} = E_2 \times N$$

$$\text{Cuentas en coincidencia} = n_c = E_1 \times E_2 \times N$$

de donde:

$$\frac{n_{\phi} \times n_{\delta}}{n_c} = N \text{ (rapidez de desintegración)}$$

Resulta necesario aplicar un número de correcciones como las siguientes:

- 1.- Radiación de fondo en ambas unidades.
- 2.- Contribución δ al detector ϕ .
- 3.- Tiempo de resolución en ambos detectores.
- 4.- Corrección por coincidencias accidentales.

4.1.6 Detección en anticoincidencia. En algunos casos resulta

necesario medir muy bajos niveles de radiactividad que se aproximan al fondo, como cuando se trata de detectar actividades provenientes de radioisótopos ambientales tales como el ^{40}K , que forma el 0.0118% de este elemento presente en la naturaleza, o bien el ^{14}C , del cual existe aproximadamente un átomo por cada 10^{11} átomos del carbono formando parte de los seres vivos. Para este fin, se requiere un detector que reúna las dos condiciones siguientes:

- a) Capacidad para reducir al mínimo posible las cuentas debidas a la radiación de fondo.
- b) Máxima eficiencia posible en la detección de las radiaciones provenientes de la muestra.

Para establecer la primera condición, un blindaje de 5 cm. de plomo rodeando al detector, reduce normalmente las cuentas debidas al fondo hasta 1/3 del valor obtenido sin blindaje. Se consigue una ligera reducción adicional usando 10 a 12 cm. de plomo, más allá de lo cual no se obtiene reducción alguna. Pero si además del plomo se cuenta con un anillo de detectores Geiger rodeando al detector central (Geiger o proporcional) de modo que la radiación de fondo active al menos una de las unidades formando el anillo, al mismo tiempo que produce una señal en el detector central, y si ambos sistemas están conectados a un módulo de anticoincidencia, que pasará una señal al escalador sólo cuando reciba un pulso aislado del detector central, tendremos que las cuentas debidas al fondo

son reducidas hasta aproximadamente 1/10 de su valor original. El sistema ha sido mejorado, usando sólo un detector en forma adecuada para rodear a otro, de manera que cualquier radiación proveniente del exterior active simultáneamente a ambos, cuyas señales son recibidas por el módulo de anticoincidencia, que en el caso de señales simultáneas no las transmite al escalador anexo.

La segunda condición, o sea la máxima eficiencia en la detección de la muestra, realizada por el contador que se encuentra en el centro, se consigue poniendo la fuente dentro del detector, para evitar pérdidas por absorción o ángulo sólido, o bien incinerando la muestra e introduciendo al detector el CO_2 obtenido junto con el gas ionizable, en el caso del ^{14}C .

El método de anticoincidencia nos permite pues, hacer mediciones de niveles de radiactividad cercanos al fondo, producidos usualmente por radioisótopos difundidos en la naturaleza.

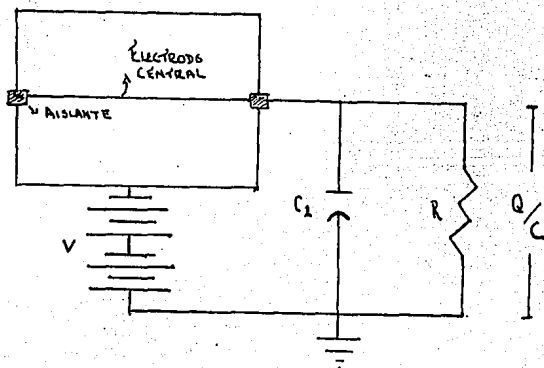
4.2 Tipos de detectores en instrumentación nuclear. Dentro de la instrumentación nuclear los tipos de detectores se pueden clasificar de la siguiente manera:

- 1.- Detectores Gaseosos.
- 2.- Detectores de Centelleo
- 3.- Detectores de Estado Sólido o Detectores Semiconductores.
- 4.- Detectores de Monitoreo de Aire
- 5.- Otros tipos de Detectores.

4.2.1 Detectores Gaseosos. Los tipos más antiguos de detectores de radiación nuclear son la cámara de ionización, el contador proporcional y el tubo de Geiger Müller. Cada uno de estos sistemas emplean una cámara llena de gas. La figura 1 consiste en una cámara llena de gas con un electrodo central bien aislado de las paredes de la cámara.

Una diferencia de potencial V , se aplica entre la pared y el electrodo central, a través de la resistencia R y derivada por el capacitor C_2

Fig. 1 DIAGRAMA ESQUEMATICO DE LA OPERACION POR PULSOS DE UNA CAMARA DE GAS



4.2.2 Cámaras de ionización. Los detectores que operan en la región donde el voltaje resulta insuficiente para causar amplificación gaseosa son conocidos como cámaras de ionización. Generalmente se utilizan para detectar partículas que producen una gran ionización específica, tales como las partículas α . Estos detectores tienen la ventaja de ser simples y seguros, y el primer detector de radiactividad construido en 1908 por Rutherford y Geiger fué de este tipo. No obstante, tienen la desventaja de proporcionar pulsos de muy pequeño voltaje, y por tanto requieren una gran amplificación externa para hacer posible una operación del tipo de cuentas por unidad de tiempo, usándose más bien la medida de la carga acumulada en los electrodos usualmente en forma de platos paralelos, como un medio para determinar niveles de radiactividad, de manera que su utilización más frecuente resulta ser la de dosímetros y monitores.

4.2.3 Detectores proporcionales. En los detectores proporcionales, el sistema de platos paralelos de las cámaras de ionización para realizar las funciones de electrodos es reemplazado por un cilindro, cuya pared actúa como cátodo, y un delgado alambre central o una pequeña esfera en el centro del mismo que funciona como ánodo. Con esta disposición se evita que los electrones iniciales liberados entre los electrodos cause avalanchas cuyo tamaño estaría determinado por su punto de formación, ya que la

intensidad del campo eléctrico en la mayor parte del volumen gaseoso es tal que asegura una rápida recolección de los iones formados, pero sin dar lugar a amplificación gaseosa. Sólo en una región restringida cerca del ánodo, la intensidad de campo alcanza valores que originan avalanchas. En esta forma, prácticamente todos los electrones originales pasan por la región multiplicadora y cada uno causa una avalancha de igual magnitud, dentro de variaciones estadísticas normales. Los detectores proporcionales son comúnmente operados a presión atmosférica usando una cámara a través de la cual fluye el gas ionizable compuesto por una mezcla de 90% de argón y 10% de metano (llamado gas P). Una característica muy significativa es que este tipo de detectores de flujo de gas, permite colocar las muestras radiactivas dentro de la cámara, de modo que las radiaciones no tienen que atravesar ninguna capa de material antes de llegar al gas, lo que permite un aumento considerable de eficiencia al detectar partículas α y β . Así, los detectores proporcionales de flujo sin ventana representan probablemente el instrumento de detección radiactiva más versátil de que se dispone, aunque tengan la desventaja de su costo, ya que al resultar muy pequeños los pulsos producidos, es siempre necesario utilizar un amplificador y casi siempre un preamplificador para conseguir pulsos de un tamaño adecuado que permita su registro por un escalador anexo, o su selección por un

analizador de pulsos antes de llegar al escalador. Por tanto, es usual que un contador o sistema proporcional de detección radiactiva incluya junto al detector un módulo con una fuente de poder que cuente con un control de voltaje muy preciso, un módulo de amplificación, un analizador de altura de pulsos a fin de hacer posible los análisis de energía de la radiación, y un escalador que registre el número de pulsos que reciba por unidad de tiempo.

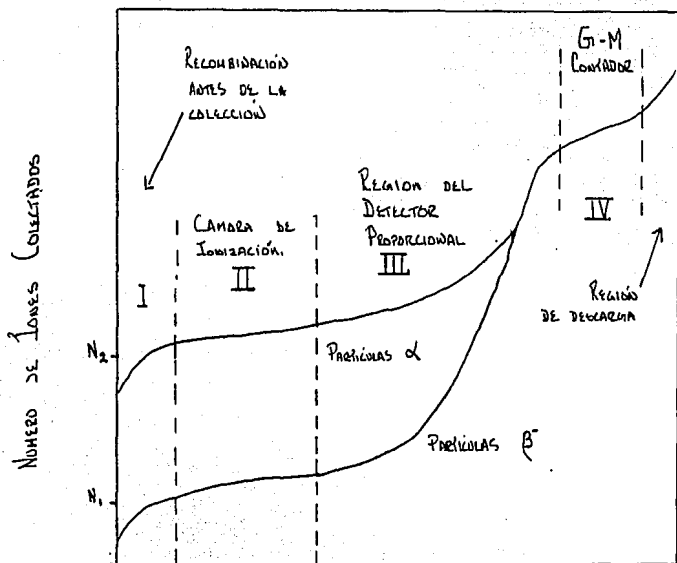
4.2.4 Detectores Geiger-Müller. La naturaleza de los pulsos producidos por un detector Geiger-Müller es similar a la de aquéllos obtenidos en un detector proporcional, pero de una mayor amplitud, como resultado de que las avalanchas iónicas originadas por la radiación y el voltaje aplicados son muchos más grandes. La escala de tiempo en los eventos producidos es también similar, aunque los detectores Geiger estén limitados a manejar menor número de cuentas por unidad de tiempo, debido a que el intervalo necesario para producir 2 pulsos consecutivos (llamado tiempo de resolución) es mayor en los detectores Geiger que en los proporcionales. De la misma manera, los electrodos en los detectores Geiger están formados por la parte de un cilindro que contiene un alambre a lo largo de su eje central, el cual actúa como ánodo. El gas usado es generalmente una mezcla de 96% de helio y 4% de butano (llamado gas Q) o bien algún otro gas noble o una mezcla de ellos, más un pequeño porcentaje de otro gas menos

ionizable llamado de atenuación. El diseño detallado de los detectores Geiger depende casi enteramente de propósito para el cual vayan a ser utilizados. Existen también en modelo de flujo sin ventana, de mayor eficiencia, sobre todo para la detección de partículas α y β^- de baja energía, aún cuando el gran tamaño uniforme de los pulsos producidos no permita realizar análisis de energía de la radiación como en el caso de los detectores proporcionales. Sin embargo, el tipo de tubo sellado con ventana es el más común. El espesor del metal con el cual el tubo está fabricado es usualmente de 1 ó 2 μln , mientras la ventana por donde debe penetrar la radiación puede ser de aleación de aluminio (espesor másico igual a 7 mg/cm^2), mica (1.5 a 2.5 mg/cm^2), una burbuja de vidrio delgada (80.5 a 1 MG/CM^2) o película "mylar" con espesor másico menor a 0.5 mg/cm^2 .

El tipo de tubo sellado es usado normalmente para muestras sólidas y el espesor de la ventana debe ser escogido cuidadosamente según la energía máxima de las partículas β^- que se desean contar. Para la cuenta de radiaciones provenientes de líquidos radiactivos, el detector forma de un tubo de vidrio, con un ánodo central y un alambre en espiral actuando como cátodo, rodeados por un tubo de mayor diámetro que deja un espacio anular para verter un volumen determinado del líquido radiactivo. Para la detección de gases radiactivos, se utilizan modelos de flujo que permiten el ingreso

de la muestra que se va a contar mezclada con el gas ionizable. Los detectores Geiger Müller son muy simples y permiten una gran flexibilidad en su diseño. Son casi siempre la primera elección cuando se trata de la detección de partículas α , siendo su característica principal el gran tamaño de los pulsos producidos (de unidades de voltio, comparados con décimos de voltio en los detectores proporcionales y décimos de milivoltio en las cámaras de ionización), los cuales requieren mucha menor amplificación externa para ser detectados, reduciendo considerablemente la complejidad y costo del equipo electrónico anexo.

Figura de curvas de altura de pulso contra voltaje aplicado para ilustrar las regiones de operación de las cámaras de ionización, proporcionales y Geiger - Muller.



4.2.5. Tiempo Muerto.

Al tiempo que pasa entre la llegada de la partícula hasta que el detector es capaz de producir un nuevo pulso se le llama tiempo muerto, t_m . Al tiempo que transcurre, hasta que el sistema puede dar pulsos que sobrepasan el umbral U , esto es detectable se le llama tiempo muerto del sistema contador y al tiempo que pasa hasta que el sistema es capaz de dar un pulso del tamaño normal se le llama tiempo de recuperación t_r .

Existe la probabilidad de que una partícula llegue al detector mientras transcurre el tiempo muerto del sistema contador y como esta no será contada, debe hacer una corrección por el tiempo muerto en la siguiente forma:

$$R = R_o / (1 - R_o t_m)$$

Donde:

R = es el conteo real

R_o = es el conteo dado por el detector.

t_m = es el tiempo muerto del detector.

4.3. Detectores de Centelleo.

Cuando una partícula cargada o rayo X o gamma atraviesan ciertas sustancias luminiscentes, pierden energía al interactuar con los átomos del detector dando lugar a la emisión de luz visible o ultravioleta. Esta luz puede alcanzar el cátodo de la fotocelda

suficientemente sensible resultando un pulso eléctrico como respuesta de la llegada de cada partícula o fotón. El conjunto constituye el detector de centelleo.

El detector de centelleo consta de dos partes fundamentales:

- a) La sustancia luminiscente.
- b) La fotocelda (tubo fotomultiplicador)

Este dispositivo se utiliza sobre todo en la medida de la energía de radiaciones gamma, donde las cámaras de ionización y los contadores proporcionales no resultan adecuados por la poca densidad de masa gaseosa empleada en la detección.

4.4. Tiempo de respuesta.

Generalmente la partícula cargada atraviesa el cristal de centelleo en un tiempo muy corto, del orden del 10^{-10} segundos, dejando átomos o moléculas excitadas en su trayectoria, de las cuales al desexcitarse emitirán fotones. Esta desexcitación no se realizará instantáneamente en todos los átomos o moléculas, sino que la intensidad total luminosa emitida tras el paso de la partícula decae en forma exponencial, dada por:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-t/\tau}$$

Donde I_0 es la intensidad luminosa alcanzada tras el paso de la partícula, I es la intensidad luminosa al tiempo t y τ es la

constante de tiempo que es una propiedad importante del material centellador. t' esta generalmente comprendida entre algunos nanosegundos y unos pocos microsegundos.

4.5 Fotomultiplicadores.

Un tubo fotomultiplicador es en esencia una celda fotoeléctrica de extraordinaria sensibilidad, provista fundamentalmente de un fotocátodo que desprende electrones bajo la acción de la luz y una serie de electrodos llamados dinodos, contra los que van chocando sucesivamente los electrones desprendidos del fotocátodo, después de ser acelerados por una diferencia de potencial conveniente; todo ello encerrado en un tubo de alto vacío.

Una característica indeseable de los fotomultiplicadores y que limita su sensibilidad la constituyen los llamados pulsos parásitos que se producen aun estando el fotomultiplicador en completa oscuridad y aislado de toda radiación. Otra contribución al ruido, es la del fondo natural del lugar donde se encuentra el detector de centelleo, aunque esta contribución generalmente es más pequeña que la emisión termoelectrica. Se maneja una serie de artificios para reducir el ruido, todos estos tienen importancia cuando se requiere analizar una fuente de baja actividad, o sea que tiene poca probabilidad de interacción de la partícula que se desea detectar.

Cuando se desea detectar un radionúclido específico, por ejemplo para análisis cuantitativo de rutina, en que solo interesa un radioisótopo en particular de una muestra de matriz repetitiva, se puede optimizar el voltaje de operación del conjunto centellador-fotomultiplicador por medio del experimento mostrado en la siguiente figura:

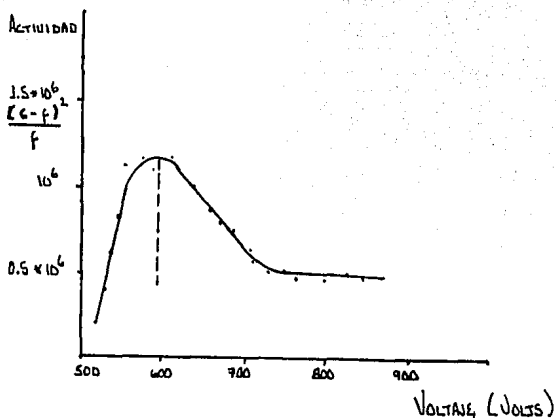


Figura : Criterio de máxima relación $(c - f)^2 / f$ donde c =conteo
 f =fondo, para determinar el voltaje óptimo de operación.
 Detector de centelleo (NaI) Berthold de 3.8 cm * 3.8 cm
 y fuente de Co-60

Por último, debe señalarse que los campos magnéticos exteriores, al desviar las trayectorias de los electrones ejercen una fuerza desfavorable en el comportamiento de los fotomultiplicadores siendo éste el fenómeno aplicable sobre todo, entre el fotocátodo y el primer dinodo.

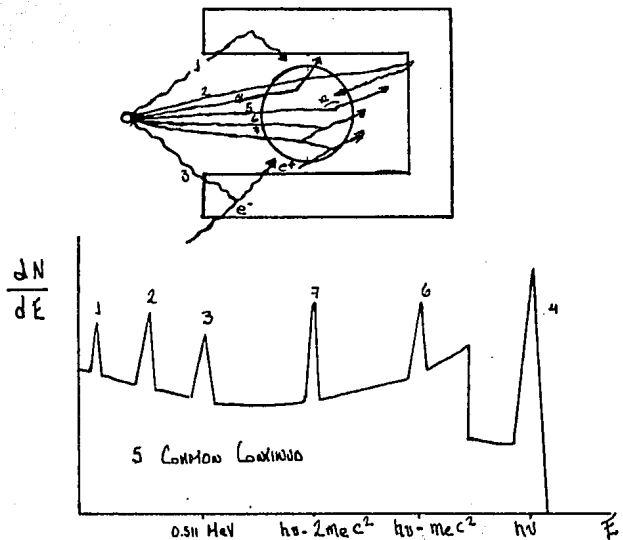
Para contrarrestar esto generalmente, se blindo el fotomultiplicador con una capa delgada de metal- μ , que tiene alta permeabilidad magnética.

4.8. Espectroscopía gamma.

Los mecanismos de interacción de radiación ionizante con el material del detector y con los materiales cercanos al detector producen la forma del espectro.

Para la radiación gamma se puede tener, como ya se dijo, tres tipos de interacciones predominantes que son: efecto fotoeléctrico, dispersión Compton y producción de pares, el efecto de todos ellos sobre el detector y sus alrededores se ejemplifica en la siguiente figura:

Figura: Principales tipos de interacción de los rayos gamma con el detector y sus alrededores (generalmente blindaje). Efecto la forma de espectro por cada una de las interacciones: (1) absorción fotoeléctrica del blindaje y emisión de rayos X característicos. (2) retrodispersión, (3) producción de pares de blindaje, (4) efecto fotoeléctrico, (5) Compton continuo (6) escape simple, (7) escape doble, (8) efecto Compton que se produce más de una vez con un mismo rayo gamma.



4.7. Detectores de Estado Sólido o Detectores Semiconductores.

Una de las mayores limitaciones de los detectores de centelleo es su relativa pobre resolución de energías. La cadena de eventos que tiene lugar en la conversión de la energía de la radiación incidente en luz y en el pulso eléctrico subsecuentemente, envuelve muchos pasos ineficientes, con lo que la energía requerida para producir un "acarreador de información" (un fotoelectrón) es del orden de 1000 eV y el número de acarreadores de información creados por una radiación gamma, beta o alfa típica es de sólo unos cuantos miles y de unas decenas o centenas de rayos X.

Por ésto la fluctuación estadística para detectores de centelleo resulta ser muy grande, con lo que se tiene una baja resolución. Este efecto es crítico en la detección de rayos X, para éstos, la resolución de los centelladores es demasiado pobre, menor aún que la de los detectores proporcionales. Esta es la razón por la que la fluorescencia de los rayos X, hasta principios de los años 60's no se había podido desarrollar.

La única forma de reducir el límite de resolución dado por la fluctuación estadística, es aumentar el número de acarreadores de información por pulso. Esto se logra con el uso de materiales semiconductores en la detección de la radiación.

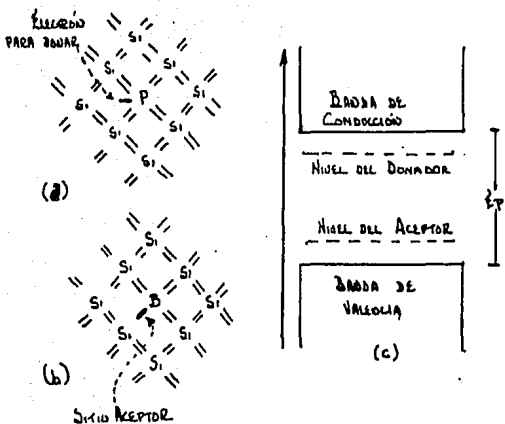
Los detectores de diodo semiconductor, llamados comunmente "De estado sólido", dan la mejor resolución de energías hasta hoy obtenida. Los acarreadores de información básica son los pares electrón-hueco creados en el material semiconductor, a lo largo de la trayectoria de la partícula o de la radiación electromagnética. El par electrón-hueco, es análogo en su función al par iónico creado en los detectores de cámara gaseosa.

4.8 Semiconductores

Dentro de la red cristalina, los electrones se comportan de acuerdo a su energía cinética. La banda (intervalo de energía) de valencia corresponde aquellos electrones que estan enlazando dos sitios específicos de la red cristalina. Como lo ilustra la siguiente figura.

Figura: Representación de una red cristalina con átomos tetravalentes de Si.

- (a). Con un agregado donador de electrones.
- (b). Con un agregado aceptor de electrones.
- (c). Representación de las bandas de energía y niveles del donador y aceptor.



La banda con mayor energía de conducción, representa a los electrones que son libres de viajar a través del cristal. La banda prohibida, que se encuentra entre los dos anteriores, da el rango de las energías que los electrones no pueden poseer de forma estable, cualquier electrón que alcance por excitación térmica o interacción con radiación ionizante una energía dentro de esta banda, perderá energía espontáneamente y caerá en la banda de valencia.

Cuando el ancho de la banda prohibida E_p , es muy pequeño, cercano a cero eV, se dice que el material es conductor. Si el ancho de esta banda es muy grande, mayor que 5 eV, se dice que el material es un aislante y si este ancho es intermedio, alrededor de 1 eV, se dice que el material es semiconductor.

4.9 Monitores de aire

Los instrumentos para el monitoreo de gases o partículas radiactivas en el aire deben ser muy sensibles por que la cantidad de actividad por ser detectada o medida es generalmente baja. La clase de equipo empleado dependerá de la energía, del tipo y vida media de radiación por ser detectada, si está en forma de gas o en partícula y cuando deba hacerse muestreo o monitoreo.

El muestreo y monitoreo de aire son ambos efectuados con el fin de determinar la presencia y cantidad de material radiactivo en el aire. Un muestreador de aire colecta el aire (para muestreo de gases radiactivos) o hace pasar el aire a través de un filtro (para muestreo de partículas radiactivas). En cada caso, la muestra es separada para el análisis posterior. Un monitor de aire, analiza el aire al mismo tiempo que es colectado.

El muestreo de aire se efectua en las circunstancias siguientes: Cuando la probabilidad de contaminación es baja; cuando hay un alto nivel de radiación de fondo o cuando hay una excesiva contaminación que prohíbe el monitoreo y cuando las condiciones en los alrededores (ejemplo, atmósferas potencialmente explosivas) no permiten el uso del equipo de monitoreo.

La ventaja de un sistema muestreador de aire es que la muestra puede ser tomada en un área de baja radiación de fondo que puede

ser evaluada o almacenada por el decaimiento natural de la radiactividad.

El muestreador de aire de propósitos generales consiste de un colector (filtro o sorbente), soporte colector, accesorios para medir flujo y removedor del aire. La mayor parte de los sistemas tiene la ventaja de ser pequeño y portátil.

El monitoreo del aire se efectúa cuando se desean inmediatamente los resultados del muestreo; cuando se requiere de un monitor de tiempo real para indicar la necesidad de una inmediata evacuación del área para monitoreo de liberaciones al medio ambiente (como en el monitoreo de chimeneas); y para medir dosis de inmersión de liberaciones gaseosas. Un sistema para monitoreo de aire es básicamente el mismo que un sistema muestreador de aire excepto que cerca del medio colector (papel filtro o cámara de muestreo) se coloca un contador apropiado u otro sistema de evaluación.

La ventaja de un sistema de monitoreo de aire en su continua e inmediata indicación a niveles de actividad.

4.10. Otros instrumentos

Además de los instrumentos indicadores de muestreadores de aire y monitores de aire pueden emplearse instrumentos en propósitos especiales. Esos instrumentos incluyen monitores de área remota y monitores de aire continuo.

Monitores de área remota. RAMS, por las siglas en inglés,

generalmente son detectores GM o cámaras de ionización, usadas para exposiciones directas a radiaciones gamma. Estos monitores están en posición fija y permanente y tienen alarma audible o visual o ambas. Esos monitores comúnmente tienen una alarma de condiciones variables en tal forma que los niveles de alerta pueden ser modificados, así como pueden tener un registrador continuo de datos para que quede un historial de la información de los niveles de radiación y para las condiciones radiológicas puedan ser seguidas y evaluadas.

Monitores continuos de aire CAMS, por las siglas en inglés, son similares en su función a las anteriores, pero siempre monitorean las concentraciones radiactivas en el aire en forma continua.

Este equipo de instrumentos puede fijarse en un sitio con líneas de muestreo hacia el instrumentos desde el área que se desea o puede ser semiportátil y puede ser movido hacia el área que deba ser sujeta a monitoreo.

Dependiendo del tipo de radiación que va a ser medida y de si está en forma de gas o de partículas, los CAMS pueden usar detectores GM, proporcionales de gas, semiconductores o cámaras de ionización. La unidad completa CAM incluye un removedor de aire, control de flujo de aire, la electrónica adecuada para el detector que va a emplearse, una alarma y generalmente un registrador.

CAPITULO V

APLICACIONES DE LA ESTADISTICA A LA MEDIDA DE LA RADIOACTIVIDAD.

5.1. Generalidades.

El decaimiento radiactivo es un proceso totalmente al azar. Esto es, el instante en el cual un núcleo va a decaer es independiente del decaimiento de otros núcleos, y sólo puede ser precisado en términos de probabilidad. Por tanto, los resultados de la detección radiactiva tienen necesariamente una significación estadística, y el número de desintegraciones que con mayor probabilidad puede ocurrir en un tiempo dado se establece de acuerdo a reglas de estadística, habiendo siempre un margen de desviación o error con respecto al valor más probable. O sea que en toda medición radiactiva no obtenemos un número de cuentas exacto e invariable en iguales períodos de tiempo, sino que solamente resulta posible establecer una rapidez de cuenta promedio que viene a ser un adecuado reflejo del nivel de radiactividad medido. De esta manera, la estadística es utilizada en la estimación de errores debido a la naturaleza al azar del decaimiento radiactivo proporcionando al mismo tiempo los medios de reducirlo al mínimo.

5.2 Interpretación de resultados. Si una muestra radiactiva es contada por una hora y el número de cuentas registrado se divide entre 60, el resultado en cuentas por minuto es el promedio de valores obtenidos 60 veces en 1 minuto de desintegración. Este resultado es más probable que corresponda con el número de desintegraciones en un minuto dado que si hubiéramos tomado las cuentas sólo en un minuto particular. De modo que las cuentas por unidad de tiempo deben ser un promedio seguro y bien establecido, para lo cual es necesario obtenerlas durante el período más largo posible, pero tomando en cuenta las condiciones impuestas por el tipo de trabajo que se lleve a cabo, la vida media de los radioisótopos y la actividad de las muestras. De otra manera, las cuentas obtenidas por unidad de tiempo siempre pueden ser resultados relativamente lejanos de las cuentas promedio.

Si son realizadas un gran número de mediciones radiactivas por minuto en una misma muestra, y los resultados se agrupan dentro de intervalos de valores relativamente pequeños, es posible trazar una gráfica de estos intervalos contra el número de lecturas que ha caído en cada uno de ellos. Una gráfica de este tipo nos permite ver el intervalo de valores dentro del cual las cuentas obtenidas han salido con mayor frecuencia y es llamada un histograma (fig. 1).

La curva trazada en el histograma se denomina curva de distribución

normal y a partir de ella han sido formuladas varias leyes de distribución de resultados. No obstante, debido a que resulta más sencilla de manejar desde el punto de vista del cálculo matemático, en mediciones radiactivas se utiliza la llamada ley de distribución normal, conocida también como aproximación de Gauss.

5.3 Desviación de las cuentas promedio. Según la ley estadística de distribución normal de resultado, son igualmente probables desviaciones en sentido positivo o negativo del valor promedio calculando en un gran número de mediciones, y la ocurrencia de grandes desviaciones de las cuentas promedio (designadas por \bar{X}) es menos probable que aquéllas de pequeñas desviaciones. Esto corresponde con la curva normal de probabilidad de ser obtenido corresponde con el promedio aritmético y encuentra precisamente en el centro de la gráfica. El ancho de la curva normal de distribución es expresado como variancia, de la cual depende el área bajo la curva. La variancia es el promedio de los cuadrados de las desviaciones del valor promedio \bar{X} , e identificaremos a la desviación estándar por la letra griega σ . En la medida que el valor de \bar{X} aumenta, σ crece también, pero su valor como un porcentaje de \bar{X} disminuye. Si se realiza un gran número de mediciones, la fracción de ellas teniendo una desviación menor a la desviación estándar estará representada en la curva

entre los valores de ordenada correspondientes a los de abscisa, $x - \sigma$ y $x + \sigma$.

Esta área es una fracción igual a 0.683 del área total de la curva. Por tanto, 68.3% de un gran número de medidas estarán comprendidas dentro del intervalo de valores $x \pm \sigma$ y 31.7% de lecturas caerá fuera de este intervalo.

En la práctica, una muestra radiactiva es contada solamente una vez, o un número de veces relativamente pequeño que no permite una correcta distribución estadística. Sin embargo, sabemos que en cada medida hecha, existen 68.3% de probabilidades de que difiera por 2σ o menos y 99.75% de que lo haga por 3σ o menos (Fig. 2).

Ahora bien, al usar radioisótopos, es muy frecuente la necesidad de sumar, restar, multiplicar o dividir el resultado de nuestras detecciones.

En estos casos, cada uno de los números representando las cuentas obtenidas en un tiempo dado de detección radiactiva tienen su propio error estadístico. Al realizar con ellos operaciones aritméticas, los resultados tendrán también su error estadístico, para calcular el cual es necesario seguir las siguientes reglas:

- a) La desviación estándar de la suma o diferencia de 2 números, es igual a la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las desviaciones estándar de los números.

Es decir, la desviación estándar de una suma o diferencia $(\bar{X} \pm Y)$ es igual a $(X + Y)^{1/2}$. El porcentaje de error

estadístico o desviación estándar relativa será igual a

$$\frac{(X + Y)^{\frac{1}{2}}}{X + Y} \times 100 = \%$$

b) La desviación estándar del producto o cociente de 2 números, según el caso, multiplicando por la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las desviaciones estándar relativas de los números. Es decir, la desviación estándar de un producto XY es igual a:

$$XY \left(\frac{X}{X^2} + \frac{Y}{Y^2} \right)^{\frac{1}{2}} = XY \left(\frac{1}{X} + \frac{1}{Y} \right)^{\frac{1}{2}}. \text{ La desviación estándar de}$$

$$\text{un cociente es igual a: } \frac{X}{Y} \left(\frac{X}{X^2} + \frac{Y}{Y^2} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{X}{Y} \left(\frac{1}{X} + \frac{1}{Y} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

El porcentaje de error estadístico o desviación estándar relativa será igual en ambos casos a: $\left(\frac{X}{X^2} + \frac{Y}{Y^2} \right)^{\frac{1}{2}} \times 100 = \left(\frac{1}{X} + \frac{1}{Y} \right)^{\frac{1}{2}} \times 100 = \%$

Para terminar estas consideraciones sobre la aplicación de las reglas de la estadística al fenómeno de la radiactividad, podemos establecer las 2 conclusiones más simples que deben ser tomadas en cuenta cuando se trata de interpretar las cuentas por unidad de tiempo obtenidas en la detección radiactiva:

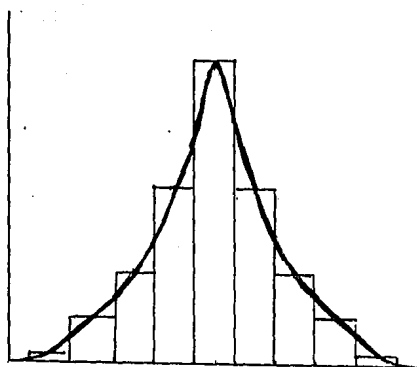
a) La desviación estándar es igual a la raíz cuadrada de las cuentas promedio de un gran número de determinaciones.

Pero, debido a que X es tanto más pequeño comparando con X,

cuando X sea mayor, podemos suponer que las cuentas promedio estarán dentro de los límites $X \pm \sqrt{X}$, con aproximadamente una posibilidad en 3 de que estos límites de error sean excedidos.

- b) Aún cuando estos límites de error sean excedidos, el error como porcentaje de X será tanto más pequeño cuanto X sea mayor. Así, las cuentas obtenidas deben ser tan grandes como resulte prácticas (en tiempos de detección relativamente largos y con la única restricción de la vida media del radioisótopo cuya radiactividad se mide) para lograr cuentas por unidad de tiempo tan cercanas a un mayor promedio como sea posible. En la práctica, 10,000 cuentas se consideran adecuadas, para introducir un error de 1% en relación al valor promedio, que en los casos más desafortunados pudiera extenderse a 2%, 3% ó 4%.

NUMERO DE
LECTURAS



INTERVALOS DE LAS LECTURAS

FIG. 1 HISTOGRAMA

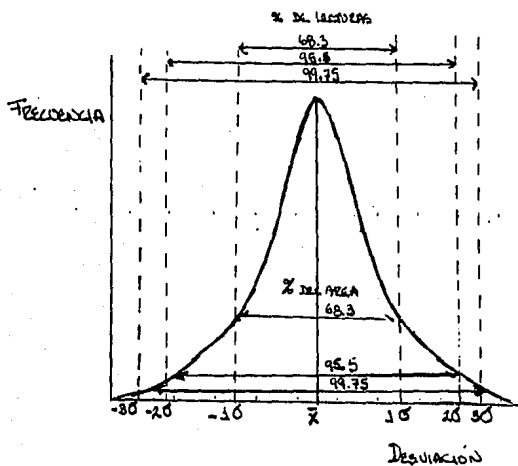


FIG. 2 CURVA NORMAL DE DISTRIBUCIÓN R. 8

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

El hombre con sus sentidos, no es capaz de detectar la radiación proveniente de materiales radiactivos. Por lo que resulta que la radiación puede dañar seriamente al hombre como a los seres vivientes.

Así que definimos a la radiación como la dispersión de energía radiante en forma de ondas o partículas y la radiactividad como la propiedad de que poseen algunos materiales de emitir espontáneamente partículas alfa, beta o rayos gamma.

Por lo que el hombre se ve en la necesidad de utilizar algunos instrumentos los cuales sean capaces de poder detectar a este tipo de energía ionizante.

Lo esencial para una operación segura y mantenimiento de una planta nuclear es un programa de protección contra la radiación.

Los elementos que componen un programa de Seguridad Radiológica para la protección del personal son los siguientes: El control de la exposición, los programas del monitoreo, entrenamiento, registro de información y auditoría. El éxito de los programas depende de la participación de todos los individuos y no solo del personal de Seguridad Radiológica.

Las radiaciones interaccionan directamente con la materia, por lo que estas pierden su energía y acaban por ser absorbidas en , lo que da como resultado diversos eventos, como un ejemplo sería la ionización con los átomos que la constituyen según el tipo de radiación y la cantidad de energía disipada, lo que hace factible la detección de este tipo de energía ionizante. Esta interacción de la energía ionizante con la materia da como resultado una serie de clasificaciones que dependen del nivel del átomo con que se interacciona así como de la energía propia de cada radiación.

a. - Interacción Electrónica:

El nivel de interacción es con los electrones orbitales y puede clasificarse como excitación e ionización.

b. - Interacción Nuclear :

El nivel de interacción es a un núcleo blanco para dar como resultado un núcleo compuesto.

c. - Interacción de Partículas Cargadas:

El nivel de interacción es las partículas alfa hacia los átomos.

d. - Interacción de Electrones Rápidos:

El nivel de interacción es de electrones rápidos (Beta) hacia los electrones de los orbitales.

e. - Interacciones de las Radiaciones Electromagnéticas:

Aquí interaccionan los rayos gamma y se llevan a cabo 3 tipos de fenómenos los cuales son muy importantes en la detección de energía ionizante.

1. - Efecto Fotoeléctrico

2. - Efecto Compton

3. - Producción de Pares

f. - Interacción de Neutrones:

Aquí los neutrones no tienen carga al igual que los rayos gamma y no interaccionan con la materia a través de fuerzas coulombianas.

Debido a la diferente naturaleza de interacción de la radiación con la materia se ha mencionado que ésta tiende a difundirse por varios mecanismos y estas son en forma de Ionización, Excitación,

Fuerzas coulombianas, Mecanismo de Bremsstrahlung, Efecto Fotoeléctrico, Efecto Compton, Producción de Pares, Dispersión Elástica, Dispersión Inelástica, Captura Simple, Emisión de Partículas Cargadas, Fisión.

Toda esta naturaleza de interacción da como resultado, una emisión de energía que si ésta es absorbida por un detector adecuado podrá ser transformada en pulsos de corriente, formación de pares iónicos, excitación de materiales, reacciones químicas etc.

Dando como resultado equipo de detección para radiación ionizante los cuales pueden ser utilizados como una gran herramienta en el estudio de las propiedades radiactivas de algunos materiales ya que estos pueden afectar la salud del hombre o de los seres orgánicos o aprovechar esta energía para fines benéficos.

Debido al gran auge por conocer este tipo de energía, se han desarrollado técnicas de detección y medición, ya que es de primordial importancia manejar datos que sean representativos del nivel de energía ionizante que se desea evaluar con un propósito dado.

El término detección generalmente incluye únicamente una determinación de la presencia de la radiación mientras que la medición incluye a la detección y alguna medición de la magnitud de la radiación presente.

Dentro de las técnicas de detección se manejan los siguientes principios que son fundamentales como lo son la radiación de fondo, voltaje de operación de un detector G.M, tiempo de resolución, voltaje de operación de un detector de centelleo, voltaje de operación de un detector proporcional, preparación de muestras radiactivas, autoabsorción, factores geométricos, factores de absorción externa etc.

Así como en las técnicas de medición se manejan la magnitud de

dosis de exposición, magnitud de razón de dosis de exposición, todos estos factores dan como resultado que la detección y medición sea confiable.

Otra herramienta de gran ayuda es la de los grandes avances que se tienen en la instrumentación moderna, que realizando arreglos de diferentes configuraciones nos sirven para diferentes propósitos. En instrumentos electrónicos los cuales son las bases de equipos de detección de radiación ionizante; en este tipo de equipo es posible decir en general que todos los instrumentos constan de una parte de circuitos analógicos y otra parte de circuitos digitales.

Dentro de la gama de detectores que se utilizan dentro de la instrumentación nuclear, podemos tomar en cuenta a los siguientes que se pueden clasificar de la siguiente manera:

- 1.- Detectores Gaseosos
- 2.- Detectores de Centelleo
- 3.- Detectores de Estado Sólido
- 4.- Detectores de Monitoreo de Aire
- 5.- Detectores de Otros Tipos

Cada uno de ellos cuenta con sus características y limitaciones de uso dependiendo del tipo y la energía ionizante que se pretenda detectar o medir.

Es muy importante recalcar que cada tipo de detector, dentro de las detecciones de energía ionizante es un proceso al azar ya que en

el instante que un núcleo va a decaer es independiente de otros núcleos; entonces hablaremos en términos de probabilidad por lo que la detección radiactiva tiene una significación estadística dando una ayuda a la estimación de errores determinados e indeterminados debido a la naturaleza al azar del decaimiento radiactivo.

Dando como resultado el valor más real posible de radiación ionizante que se este detectando.

El poder desarrollar y trabajar este tipo dará al hombre una gran herramienta en la Seguridad Radiológica en particular y general.

BIBLIOGRAFIA

- 1.-CURSOS DEL "DIPLOMADO DE ACTUALIZACION A PROFUNDIDAD EN SEGURIDAD RADIOLOGICA" MODULOS I , II , III , IV Y V
FACULTAD DE QUIMICA U. N. A. M. 1992.
- 2.-KNOLL, GLENN F. RADIATION DETECTION AND MEASUREMENT.
JOHN WILEY AND SONS. MICHIGAN 1979.
- 3.-TANARRO S. A. INSTRUMENTACION NUCLEAR.
JUNTA DE ENERGIA NUCLEAR. JEN/MADRIL 1970.
- 4.-NAVARRETE T. M. Y CABRERA M. L. INTRODUCCION AL ESTUDIO DE LOS RADIOISOTOPOS: EDICIONES DEL SECTOR ELECTRICO, CFE.
VOL 10 MEXICO, D. F. 1979.
- 5.-KIEFER H AND MAUSHART R. RADIATION PROTECTION MEASUREMENT,
PERGAMON PRESS. OXFORD 1972.
- 6.-OSTLE B. ESTADISTICA APLICADA. LINUSA WILEY 1975.
- 7.-PRICE J. WILLIAM. NUCLEAR RADIATION DETECTION.
MC. GRAW - HILL, NEW YORK 1974.
- 8.-EUGENE L. GRANT AND RICHARD S. LEAVENWORTH.
CONTROL ESTADISTICO DE CALIDAD.
CECSA. MEXICO, D. F. 1988.
- 9.-EICHOLT, G. G. AND POSTON, W. J.
PRINCIPLES OF NUCLEAR RADIATION DETECTION.
ANN ARBOR SCIENCE MICHIGAN 1979

10. -CHOPPIN G. R. AND RYDBERG J.
NUCLEAR CHEMISTRY, THEORY AND APPLICATIONS.
PERGAMON PRESS 1980.
11. -STANLEY WOLF.
GUIA PARA MEDICIONES ELECTRONICAS Y PRACTICAS DE LABORATORIO.
PRENTICE-HALL HISPANOAMERICANA, S. A. 1980.
12. -JUAN MANUEL BRAVO SANCHEZ.
IMPLEMENTACION DE UN LABORATORIO DE INSTRUMENTACION NUCLEAR.
TESIS DE INGENIERO QUIMICO. FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN. U. N. A. M. 1983
13. -MANM W. B. AND GARFINKEL S. B.
RADIOACTIVITY AND ITS MEASUREMENT.
VAN NOSTRAND 1979.
14. -KRUGERS J.
INSTRUMENTATION IN APPLIED NUCLEAR CHEMISTRY.
PLENUM PRESS 1973.
15. -ATTILA VERTES, ISTRAM KISS
NUCLEAR CHEMISTRY
ELSEVIER 1987