

36  
29



# Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE QUIMICA

MEDICIONES FISICAS EMPLEANDO  
FUENTES RADIOACTIVAS PUNTUALES



TRABAJO ESCRITO

EXAMENS PROFESIONALES  
FAC. DE QUIMICA

Que para obtener el título de

QUIMICO FARMACEUTICO BIOLOGO

presenta

GALAN CARDENAS GRACIELA



FALLA DE ORIGEN

1989



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **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.

## INDICE

|   | PAG.   |
|---|--------|
| INTRODUCCION                                      | 3      |
| <br>CAPITULO I                                    | <br>4  |
| ESTRUCTURA DE LA MATERIA                          |        |
| 1.1 Estructura atómica                            | 4      |
| 1.2 Número másico                                 |        |
| 1.3 Número atómico                                | 5      |
| 1.4 Isótopos                                      |        |
| 1.5 Carta de núclidos                             | 6      |
| <br>CAPITULO II                                   | <br>8  |
| RADIATIVIDAD Y DECAIMIENTO RADIOACTIVO            |        |
| Introducción                                      | 8      |
| 2.1 Unidades de radiactividad                     | 9      |
| 2.2 Características de las radiaciones ionizantes | 10     |
| 2.3 Radiactividad natural y artificial            | 11     |
| 2.4 Máquinas para producir radiactividad          | 14     |
| 2.5 Decaimiento radiactivo                        | 17     |
| <br>CAPITULO III                                  | <br>20 |
| DETECCION Y MEDIDA DE LA RADIATIVIDAD             |        |
| 3.1 Interacción de la radiación con la materia    | 21     |
| 3.2 Detectores de ionización gaseosa              | 24     |
| 3.3 Detectores Geiger-Muller                      |        |
| 3.4 Detectores por centelleo                      | 25     |

|  | PAG. |
|--|------|
| 3.5 Detectores por semiconducción                          | 27   |
| <br>   |      |
| CAPITULO IV  | 34   |
| MEDICIONES FISICAS EMPLEANDO RADIOISOTOPOS                 |      |
| Introducción   |      |
| 4.1 Fuentes abiertas y selladas                            | 36   |
| 4.2 Preparación de fuentes puntuales                       | 40   |
| 4.3 Mediciones físicas con radioisótopos                   | 43   |
| a) Detección de fugas                                      |      |
| b) Detección de obstrucciones                              | 44   |
| c) Detección de cambio de densidades                       | 45   |
| d) Higiene industrial                                      |      |
| e) Mediciones de volúmenes                                 | 46   |
| f) Mediciones de espesores                                 | 47   |
| g) Medición de niveles                                     | 48   |
| h) Radiografías o gammagrafías industriales                | 49   |
| <br>   |      |
| CAPITULO V   | 51   |
| PARTE EXPERIMENTAL   |      |
| 5.1 Medición de volúmenes y espesores usando radioisótopos |      |
| 5.2 Detección de cambio de densidades                      | 56   |
| <br>   |      |
| CONCLUSIONES   | 61   |
| <br>   |      |
| BIBLIOGRAFIA   | 70   |

## INTRODUCCION

Muchos procesos físicos, químicos y biológicos pueden ser detectados o evaluados con núclidos inertes o radiactivos. La ventaja de emplear un elemento radiactivo o radioisótopo, además de las propiedades físicas y químicas inherentes a él, es la propiedad de emitir radiaciones.

Las radiaciones emitidas de los radionúclidos pueden ser de diferentes tipos, partículas o radiación electromagnética con magnitudes de energía muy variable y es posible su utilización en mediciones físicas.

En el presente trabajo se describen propiedades, interacción y detección de las radiaciones y su aplicación en mediciones físicas.

## CAPITULO I

### ESTRUCTURA DE LA MATERIA

#### 1.1 Estructura atómica.

El desarrollo moderno ha demostrado que los átomos, no son sólidos, ni objetos indivisibles como los filósofos griegos creían, pero están constituidos de pequeñas partículas. Estas partículas son llamadas: protones, neutrones y electrones.

El protón ( $p$ ) tiene una carga eléctrica positiva de magnitud de una unidad en la escala nuclear y una masa aproximadamente de una unidad de masa atómica (u.m.a.).

El electrón ( $e^-$ ) tiene una carga eléctrica negativa de la misma magnitud como la carga positiva del protón. Este tiene una masa de  $1/1840$  u.m.a., la cual para muchos propósitos es insignificante en comparación con la masa total del átomo.

El neutrón ( $n$ ) es frecuentemente considerado como una combinación de un protón y un electrón, no tiene carga, considerando la masa del electrón, tiene una masa aproximadamente de una unidad de masa atómica.

Los neutrones y protones de un átomo forman la parte central o núcleo, alrededor del cual los electrones giran en varias órbitas. Cada átomo normalmente tiene el mismo número de protones y electrones. Esto significa que la carga total positiva en el núcleo, es igual a la carga total negativa de los electrones atómicos.

#### 1.2 Número másico.

La masa de un átomo es determinada por el número de protones y

neutrones. La suma del número de protones más el número de neutrones es llamada número másico y está representado por la sigla A

$A = \text{número de protones} + \text{número de neutrones.}$

Si un átomo particular tiene 47 protones y 60 neutrones, por ejemplo: su número de masa es de 107 ( $\text{Ag}^{107}_{47}$ ).

### 1.3 Número atómico.

El número de protones en un átomo es llamado número atómico y está representado por la sigla Z. Es el número atómico, es decir la carga del núcleo lo que está relacionado con la identidad de un elemento. Para identificar un átomo de un elemento, o el elemento mismo, es suficiente con especificar el número atómico.

$Z = \text{número de protones.}$

Existen elementos con número atómico muy alto, los cuales han sido producidos artificialmente en años recientes. Todos ellos son inestables, solamente pueden ser producidos bajo condiciones especiales.

### 1.4 Isótopos

Todos los átomos de un elemento particular contienen el mismo número de protones, pero con diferente número de neutrones. Esto significa que un elemento puede tener varios tipos de átomos, los cuales son llamados isótopos del elemento. Es importante notar que todos los isótopos de un elemento dado son químicamente idénticos, entonces las propiedades químicas es

tán determinadas por el número atómico del elemento.

Muchos elementos aparecen naturalmente como una mezcla de isótopos y otros isótopos pueden ser producidos por bombardeo de un isótopo natural con partículas nucleares, por ejemplo neutrones en un reactor nuclear. Estos isótopos producidos artificialmente son inestables y eventualmente de sintetizables, con la emisión de una partícula secundaria o de un rayo gamma

Además en algunos elementos ligeros, el número de neutrones es mayor al número de protones en un átomo. La diferencia es mayor cuando  $Z$  aumenta.

### 1.5 Carta de núclidos.

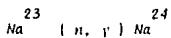
Existe gran cantidad de información respecto al comportamiento del núcleo estable e inestable. Esta información nos permite conocer y encontrar de inmediato las características de cualquier núcleo. A esta compilación se le conoce como carta de núclidos. En esta carta cada núclido ocupa un cuadro con su respectiva información, como su número atómico, masa atómica, energía etc. Los elementos radiactivos naturales y artificiales son diferenciados por el uso de distintos colores y sombreados en el cuadro.

Para isótopos radiactivos se pueden ver en la carta, la vida media, el modo o maneras de decaimiento y la energía de las partículas emitidas o rayos gamma. El número atómico  $Z$  está cerca del número de neutrones  $A - Z$ , todos los núclidos en la misma línea horizontal, tienen el mismo número atómico, en cambio todos los núclidos con el mismo número de masa están en línea diagonal a  $45^\circ$  hacia arriba a la izquierda y arriba a la derecha. Muchas cartas de núclidos contienen información adicional, la cual ha sido omitida para mostrar la carta con mucha claridad.

La carta de núclidos puede ser usada para obtener rápida infor-



mación sobre los productos de varias reacciones nucleares, por ejemplo:  
una reacción ( n,  $\gamma$  ) de  $\text{Na}^{23}$ .



El  $\text{Na}^{24}$  decae con T1/2 de 15.0 h. , emitiendo partículas  $\beta^-$  con energía igual a 1.39 MeV. y rayos gamma de energía igual a 2.75 MeV. y 1.37 MeV. El núcleo resultante del decaimiento  $\beta^-$  del  $\text{Na}^{24}$  es el  $\text{Mg}^{24}$ , que es estable.

La carta de núclidos es una fuente extremadamente valuable de información sobre las propiedades de ambos núclidos, estables e inestables.

## CAPITULO II

### RADIOACTIVIDAD Y DECAIMIENTO RADIOACTIVO

#### Introducción

La materia es radiactiva cuando los núcleos atómicos emiten partículas subnucleares, o radiación electromagnética característica, sin masa, ni carga, teniendo lugar un intercambio de energía al mismo tiempo.

El proceso de degradación por el cual los núcleos emiten partículas o rayos, perdiendo masa o pura energía y convirtiéndose en algún otro elemento en el primer caso o el mismo elemento en otro estado de energía en el segundo, es conocido como decaimiento radiactivo. Este es un proceso espontáneo y al azar, independientemente de factores externos. La probabilidad de que un núcleo radiactivo particular emita partículas o rayos en la unidad de tiempo adoptada, es independiente del estado químico de los átomos o de sus condiciones físicas.

Las radiaciones emitidas por el núcleo atómico son de 4 especies principales:

1) Las partículas  $\alpha$ , que consisten de 2 neutrones asociados con 2 protones. Pueden ser consideradas como núcleos de átomos de helio. Tienen una masa de 4 u. m. a. { unidad de masa atómica } y 2 cargas positivas.

2) Partículas  $\beta$ , consisten de electrones de gran velocidad, los cuales se originan en el núcleo. Estos electrones nucleares tienen propiedades idénticas a las de los electrones atómicos, esto es tienen una masa de  $1/1840$  u.m.a., con una carga negativa. Otro tipo de radiación beta, fué descubierta por C. D. Anderson en 1932. Esta radiación consiste de partículas de la misma masa que el electrón pero con una carga positiva llamadas

positrones, que tienen menos importancia que los de carga negativa, aunque desde el punto de vista radiológico, el conocimiento de los positrones es necesario tomarlos en cuenta, para el entendimiento de los mecanismos del decaimiento radiactivo. La radiación beta es asignada como  $\beta^-$  (negatrones) o  $\beta^+$  (positrones).

Para el uso diario la radiación beta, normalmente se refiere al tipo beta  $\beta^-$ .

3) Los neutrones son partículas sin carga, teniendo una masa aproximadamente de 1 u.m.a.. Por tanto, los núcleos perdiendo neutrones no cambian su número atómico pero su número de masa disminuye una unidad por cada neutrón emitido.

4) Los rayos  $\gamma$  son radiaciones electromagnéticas, similares a los rayos X, la luz u ondas de radio, pero con mucho menor longitud de onda y en consecuencia mucho mayor energía. Los rayos  $\gamma$ , al igual que los rayos X tienen energías bien definidas ya que son producidos por la transición entre niveles de energía del átomo, pero mientras los rayos  $\gamma$  son emitidos por el núcleo, los rayos X resultan de las transiciones de energía de los electrones fuera del núcleo u orbitales. Los rayos  $\gamma$  son a menudo llamados fotones, cuando se consideran como paquetes de energía con valor constante emitidos por un núcleo radiactivo al decaer.

## 2.1 Unidades de radiactividad

La unidad de radiactividad es el Curie, que se define como cualquier cantidad de material radiactivo que sufre  $3.7 \times 10^{10}$  desintegraciones por segundo (dps) o  $2.22 \times 10^{12}$  desintegraciones por minuto (dpm), las cuales equivalen aproximadamente a la velocidad de decaimiento de 1 g. de radio. Se abrevia por las iniciales Ci y sus fracciones más usadas son

el mCi (milicurio) ( $1 \times 10^{-3}$ ) y el  $\mu$ Ci (microcurio) ( $1 \times 10^{-6}$ ).

Existe otra unidad, mucho menos usada, el Rutherford, que se abrevia rd y se define; como la cantidad de cualquier material radiactivo que rinde  $10^6$  desintegraciones por segundo. O sea que  $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^4 \text{ rd}$  y  $1 \text{ rd} = 2.7 \times 10^{-5} \text{ Ci}$ .

En los últimos años, ha sido creada otra unidad para medir la radiactividad, el Becquerel, que se abrevia Bq y se define; como la cantidad de cualquier material radiactivo que sufre 1 desintegración por segundo. En consecuencia,  $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$  y  $1 \text{ Bq} = 2.7 \times 10^{-11} \text{ Ci}$ .

## 2.2 Características de las radiaciones ionizantes.

El término radiación nuclear es comúnmente usado para describir una amplia variedad de emisiones asociadas a transformaciones nucleares: con aceleradores de partículas y con fuentes cósmicas. Pero por la naturaleza de su interacción con la materia es más correcto llamarlas radiaciones ionizantes. Estas emisiones son en sí partículas atómicas y subatómicas con cierta energía cinética o radiaciones electromagnéticas de determinada energía. Para detectar estas radiaciones se aprovecha algún efecto por el cual la radiación ceda su energía al material detector, por lo que es necesario entender los fenómenos de la interacción de la radiación con la materia.

Las radiaciones ionizantes pueden ser clasificadas de acuerdo con la naturaleza de su interacción con la materia, de la siguiente manera:

|           |                     |                            |
|-----------|---------------------|----------------------------|
|           | Partículas cargadas | Electrones rápidos         |
| Radiación |                     | Partículas cargadas        |
| ionizante | Radiación sin carga | Radiación electromagnética |
|           |                     | Neutrones                  |

Los electrones rápidos incluyen partículas beta (positivas y negativas) emitidas en decaimiento radiactivo, así como los electrones energéticos producidos en otros procesos.

Partículas cargadas pesadas son aquellas cuya masa es igual o mayor que una unidad de masa atómica, tales como los productos de fisión, los protones, las partículas alfa o los productos de muchas reacciones nucleares.

La radiación electromagnética de interés incluye los rayos X emitidos por las capas electrónicas internas de los átomos y los rayos gamma los cuales se originan por transiciones dentro del núcleo mismo.

Los neutrones son generados por varios procesos nucleares y son clasificados en neutrones lentos y neutrones rápidos de acuerdo con su energía cinética.

### 2.3 Radiactividad natural y artificial.

E. Rutherford, y F. Soddy, en 1902, observando sales de torio, al precipitarlas, y después al separar un residuo el cual era un material altamente radiactivo al que llamaron torio equis, Thx, y en cambio la solución que quedaba y que contenía todo el torio, tenía muy poca actividad. Después de varios días, notaron que el torio Thx ( $Ra^{224}$  con una vida media de 3.64 d) iba perdiendo su actividad, mientras que el torio que había servido para obtener el Thx, la iba recuperando.

Concluyeron Rutherford y Soddy que el crecimiento y el decaimiento radiactivos, eran eventos simultáneos.

Como resultado del estudio de los elementos radiactivos naturales, se encontró que con la excepción de unos cuantos núclidos radiactivos de elementos ligeros (K-40, U-235, Rb-87) y otros formados por la acción de

La radiación cósmica en la atmósfera (C-14 entre ellos), cada núcleo radiactivo era miembro de una de tres familias o series radiactivas que se extienden hasta gran parte del sistema periódico. Todos los elementos encontrados en fuentes naturales y con número atómico mayor a 83 (bismuto) son radiactivos y pertenecen a cadenas de decaimientos sucesivos constituyendo las series radiactivas.

Las tres familias fueron llamadas respectivamente:

Serie del uranio o familia  $4n + 2$

Como miembro padre el U-238, con vida media de  $4.5 \times 10^9$  años y como miembro último el Pb-206 estable.

Serie del actinio-uranio o familia  $4 + 3$

Como miembro padre  $^{235}\text{AcU}$  y vida media de  $7 \times 10^8$  y como miembro final el Pb-207 estable.

Serie del torio o familia  $4n$

Como miembro padre el Th-232 con vida media de  $1.39 \times 10^{10}$  años y como miembro final el Pb-208 estable.

Serie extinta o familia  $4n + 1$

Serie del plutonio-neptunio ( $^{241}\text{Pu-Np}^{237}$ ) como miembro o elemento final estable del Bi-209.

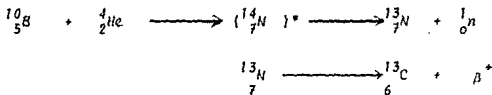
La explicación de la existencia o no de esta última familia es la siguiente:

La vida media del Np-237 es del orden de  $2.2 \times 10^6$  años y se supone que el Np-237 se formó al mismo tiempo que la tierra, han pasado muchas vidas de este tiempo suficiente para que se haya extinguido y ya no sea posible su detección. Sin embargo, se conocen los miembros de origen radiogénico y la existencia del Bi-209 estable.

### Radiactividad artificial.

La radiactividad artificial fue descubierta por los científicos Curie- Joliot, mientras estudiaban el efecto de las partículas alfa sobre núclidos de elementos ligeros.

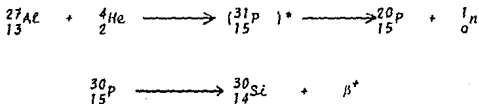
Cuando elementos como el boro, magnesio y aluminio fueron bombardeados con partículas alfa del polonio, se produjeron protones o neutrones, tal como se esperaba de las reacciones nucleares alfa - protón y alfa - neutrón. Además de esas partículas fueron observados los electrones positivos o positrones ( $\beta^+$ ) en una reacción del tipo siguiente:



Cuando se irradió un blanco de aluminio con partículas alfa y se disolvió en ácido clorhídrico, se liberó un gas conocido como fosfina,  $\text{Ph}_3$ , mientras que el aluminio remanente permanecía en solución.

Posteriormente la solución fue evaporada a sequedad y en el residuo se probó actividad de  $\beta^+$  y no fue encontrada, en cambio, el gas  $\text{Ph}_3$  sí tenía la actividad del  $\beta^+$

La reacción nuclear fue la siguiente:



En la que un blanco de Al-27, se irradió con partículas alfa y después se disolvió en ácido clorhídrico y se formó P-30 y éste por decaimiento radiactivo ( $T_{1/2} = 2.5$  minutos) emitiendo  $\beta^+$  pasó a Si-30.

Todas estas pruebas confirmaron la primera evidencia química definitiva de la transformación de un elemento en otro, al identificar químicamente al núcleo producto: además de la determinación de partículas que fueron detectadas en una cámara de nube y por la deflexión en un campo magnético.

Elementos con  $Z$  mayor de 92 todos son artificiales radiactivos

#### 2.4 Maquinas para producir radiación.

##### Aceleradores de partículas.

La terminología empleada para describir los varios tipos de aceleradores, es análoga a la que se utiliza en los irradiadores con fuente radiactiva. Las radiaciones primarias en estas máquinas de irradiación son electrones acelerados de alta energía. Otros tipos de aceleradores de partículas, no son tan comúnmente usados.

En los irradiadores de electrones, el haz de partículas cargadas emergiendo del acelerador, puede utilizarse directamente para el tratamiento del producto, o ser convertido en rayos X (también llamados Bremsstrahlung) al chocar en un blanco de conversión. Los electrones son frenados en un absorbedor de alto número atómico y la energía cinética de la desaceleración de los electrones, emerge en forma de Bremsstrahlung del convertidor.

Dos tipos básicos de aceleradores son comúnmente usados:

El tipo de corriente continua (como el acelerador Van de Graff) y el tipo de haz pulsado (como un acelerador lineal). En ambos, la distribu



ción de dosis lateral perpendicular a la dirección del movimiento del producto, se logra con mayor uniformidad mediante el control electromagnético del haz, formando un haz escudriñador. Con haz escudriñador, la frecuencia escudriñadora y la velocidad de transporte deben coordinarse para asegurar que todo el producto sea irradiado adecuadamente.

Por la misma razón, cuando se utiliza un acelerador de haz pulsado, deben considerarse los parámetros (grado de repetición del pulsado, frecuencia de escudriñamiento y velocidad del transportador). Estas consideraciones también se aplican si el haz electrónico es convertido en Bremsstrahlung.

#### Acelerador tipo estacionario.

El único ejemplo bien definido de acelerador tipo estacionario es un irradiador de rayos X cuyo ánodo consiste en una vasija, dentro de la cual se coloca el producto y se irradia por Bremsstrahlung en todas direcciones simultáneamente. Después de completar la irradiación, el producto es removido y se coloca un nuevo lote.

#### Irradiador de paso múltiple. Dirección simple

En este irradiador, el producto se mueve a través del haz electrónico en dirección perpendicular a la de éste. El efecto del movimiento en este tipo de irradiadores es el mismo que en los irradiadores de fuente radiactiva, o sea, abatir la distribución de dosis lateral en el producto en la dirección del movimiento. La distribución de dosis lateral en dirección perpendicular al movimiento se abate aplicando una sobreposición del haz y/o usando platos dispersores.

#### Irradiadores con fuentes de radionúclido.

##### Irradiadores estacionarios

Un tipo de irradiador de gran volumen es el irradiador estacio

nario. En este sistema hay dos paquetes en la cámara de irradiación en cualquier tiempo, uno a cada lado de la fuente en placa. Se completan dos lados de irradiación, trasladando el paquete desde una posición con la cara A hacia la fuente (después de haber permanecido un determinado intervalo de tiempo), a otra posición con la cara B frente a la fuente (durante el mismo intervalo de tiempo). Por último, el paquete sale de la cámara de irradiación.

Las variaciones de dosis lateral son reducidas al grado mínimo por una superposición de la fuente, o por un aumento en la actividad de la fuente.

#### Reactores nucleares.

Un reactor nuclear es una máquina en la cual la fisión nuclear puede ser autosostenida en una reacción en cadena controlable. Incluye un material fisiónable o combustible, un material moderador (a menos que sea del tipo de reactor rápido) y generalmente incluye un reflector para conservar los neutrones que escapan del sistema y está provisto de un equipo de eliminación de calor (refrigerante) y de instrumentos de medición y control.

De acuerdo con las propiedades del sistema en donde se efectúa la reacción en cadena, una clasificación de los reactores según sus características principales podría ser:

- 1) Por el tipo de combustible empleado
  - a) Reactores de uranio natural
  - b) Reactores de uranio enriquecido
  - c) Reactores de plutonio
- 2) Por el conjunto combustible
  - a) Heterogéneo

- b) Homogéneo
- 3) Por el tipo moderador
  - a) Grafito
  - b) Agua natural agua "ligera" ( $H_2O$ )
  - c) Agua pesada  $D_2O$
  - d) Berilio u óxido de berilio
- 4) Por el tipo de refrigerante
  - a) Aire u otro gas
  - b) Agua u otro líquido
  - c) Metal fundido
- 5) Por su finalidad
  - a) Instrumento de investigación
  - b) Para producción de material fisiónable o de cría
  - c) Producción de energía

## 2.5 Decaimiento radiactivo

La emisión de radiaciones por las sustancias radiactivas es so lo un aspecto del proceso de desintegración radiactiva. El otro aspecto de dicho proceso involucra el cambio o transmisión de los núcleos de la sustancia al emitir radiaciones. Obviamente ambos aspectos son manifestaciones de un mismo fenómeno, y por lo tanto, el uno determina al otro.

El decaimiento de un isótopo radiactivo es espontáneo en la naturaleza y es imposible predecir cuando un átomo particular se desintegrará. El resultado del incierto comportamiento de cualquier átomo es que la ley de decaimiento radiactivo es exponencial en la naturaleza.

Una sustancia radiactiva con  $N$  átomos en un instante dado  $t$ , contiene un determinado número de átomos,  $dN$  que se desintegran en un inter

valo de tiempo, es decir ....

- 1)  $\frac{dN}{dt} = -\lambda N$  - En donde  $\lambda$  es la constante de desintegración o decaimiento radiactivo.  
- El signo (-) se debe a que se trata de una disminución de átomos con el tiempo.
- 2)  $-\frac{dN}{dt} / N = \lambda$  - Probabilidad de desintegración por unidad de tiempo.
- 3)  $\frac{dN}{N} = -\lambda dt$  - Integrando  $\ln N = -\lambda t + K$   
Si  $t = 0$ ,  $N = N_0$  y  $\ln N_0 = K$   
 $\therefore \ln N = -\lambda t + \ln N_0$

Por las propiedades de los logaritmos, se tiene que...

- 4)  $\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$  O bien  $\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$
- 5) O bien  $N = N_0 \times e^{-\lambda t}$

- En donde  $N_0 = N^{\circ}$  de átomos iniciales.

$N = N^{\circ}$  de átomos después del tiempo  $t$ .

Definiendo la actividad como el número de núcleos decayendo por unidad de tiempo tenemos:

$$6) \quad A = A_0 \times e^{-\lambda t}$$

De la ecuación número 6) se deduce que si  $t$  es la vida media radiactiva,  $T_{1/2}$ , es decir el periodo de semidesintegración o tiempo necesario para que la actividad de un radioelemento decaiga a la mitad, o lo que es lo mismo, cuando  $A = A_0 / 2$ ,  $2A = A_0$  que equivale también a que .....

$$\frac{A}{A_0} = e^{-\lambda t} \quad - \text{Eliminado la exponencial en } \frac{A}{A_0} = \ln 2$$

$$\ln 2 = -\lambda t_{1/2} \quad - \text{Como } \ln 2 = 0.693 : \quad 0.693 = -\lambda t_{1/2}$$

Despejando  $\lambda$

$$7) \lambda = \frac{0.693}{t_{1/2}} ; \quad t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}$$

$$8) \lambda \times t_{1/2} = 0.693$$

## CAPITULO III

### DETECCION Y MEDIDA DE LA RADIOACTIVIDAD

#### Introducción

El desarrollo del estudio de los radioisótopos ha sido posible con el paralelo desarrollo de la electrónica, la cual ha ido 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 realiza 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 solo a través de esta detección radiactiva pueden llegarse a establecerse sus características y ser usados en aplicaciones científicas o industriales.

Los diferentes detectores de radiactividad están basados en los tres 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.

### 3.1 Interacción de la radiación con la materia.

#### Partículas alfa y beta.

Las partículas alfa y beta pierden energía principalmente a través de interacciones por electrones atómicos en el medio absorbido. La energía transferida a los electrones les causa excitación para pasar a un nivel más alto o se separan enteramente del átomo padre (ionización). Otro efecto importante es que cuando las partículas cargadas son bajadas muy rápidamente de nivel, emiten energía en forma de rayos X. Esto es conocido como Bremsstrahlung, y solamente de importancia práctica la radiación beta.

#### Radiaciones gamma y rayos X.

Los rayos X y las radiaciones gamma interactúan con la materia a través de una variedad de mecanismos. Los tres más importantes son: efecto fotoeléctrico, efecto Compton y la producción de pares.

En el efecto fotoeléctrico toda la energía de un rayo X o fotón gamma es transferido a un electrón atómico, el cual es expulsado del átomo padre. El fotón es en este caso completamente absorbido. Por otro lado el Compton dispersado ocurre, cuando únicamente una parte de la energía del fotón es transferida a un electrón atómico, el fotón es por consiguiente dispersado con una energía reducida. En el cerrado campo eléctrico existe una partícula cargada, generalmente un núcleo, un fotón energético gamma puede ser convertido a un par electrónico o positrón. Esta es la producción de pares y de 2 partículas que comparten la energía disponible. Las tres interacciones resultan de la energía de un fotón siendo transferidas a electrones atómicos los cuales subsecuentemente pierden energía.

### Neutrones

Los neutrones no tienen carga y no pueden causar ionización directamente. Como con la radiación gamma, los neutrones transfieren su energía a partículas cargadas. Al añadir un neutrón puede ser capturado por un núcleo resultando una emisión gamma.

Poder de penetración de las radiaciones nucleares.

La partícula alfa es una partícula masiva y viaja relativa y lentamente a través de la materia. Esto permite que tenga gran oportunidad de interacción con los átomos a lo largo de su trayectoria y dará algo de ésta, durante cada una de estas interacciones. Como consecuencia la partícula alfa pierde su energía rápidamente y solo viaja una corta distancia en medio denso.

La partícula beta es mucho más pequeña que la partícula alfa y viaja mucho más rápidamente, por lo que sufren muy pocas interacciones por unidad de trayectoria y dan su energía más lentamente que las partículas alfa. Esto significa que las partículas beta viajan más lejos en un medio denso que las alfa.

La radiación gamma pierde su energía principalmente por interacciones con electrones atómicos. Estos viajan a muy grandes distancias en un medio denso y es muy difícil su absorción completa.

Los neutrones dan su energía a través de una variedad de interacciones. La importancia relativa de cuales son muy dependientes de la energía del neutrón. Por esta razón es común dividir los neutrones en tres grupos de energía :

Rápidos, intermedios y térmicos.



|           |             |          |      |
|-----------|-------------|----------|------|
|           | Rápidos     | 0.5 - 10 | Mev. |
| Neutrones | Intermedios | 1 - 500  | KeV. |
|           | Térmicos    | 0.025    | ev.  |

Los neutrones son muy penetrantes y viajan grandes distancias en un medio denso.

#### PROPIEDADES DE LA RADIACION

| Radionúclido<br>Elemento | Energía<br>MeV. | Masa<br>u.m.a<br>(aprox) | Carga<br>signo | Velocidad en<br>el vacío<br>Km/seg. | Alcance en un medio<br>aire agua mat |
|--------------------------|-----------------|--------------------------|----------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| $\alpha$                 | 2.9             | 4                        | +2             | 20,000                              | 2 - 8cm. 20 - 100 $\mu$ empí<br>rico |
| $\beta$                  | 0 - 3           | 0.0006                   | -1             | 290,000                             | 0.10 cm. 0 - 1 mm. "                 |
| $\gamma$                 | 0.01-10         | 0                        | 0              | $\sim$ 300,000                      | $\sim$ 100 m. $\sim$ 10 m. expo      |
| n                        | 0 - 14          | 1                        | 0              | $\sim$ 2                            | $\sim$ 100 m. $\sim$ 1 m. "          |

### 3.2 Detectores de ionización gaseosa.

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 alfa. Estos detectores tienen la ventaja de ser simples y seguros, y el primer detector de radiactividad construido en 1908 por Rutherford y Geiger fue 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.

### 3.3 Detectores Geiger-Müller.

La naturaleza de los pulsos producidos por un detector Geiger-Müller es similar a aquellos obtenidos en un detector proporcional (muy pequeños), pero de una mayor amplitud, como resultado de que las avalanchas iónicas originadas por la radiación y el voltaje aplicados son mucho más grandes. La escala del tiempo en los eventos producidos es también similar, aunque los detectores Geiger están limitados a manejar menor número de cuentas por unidad de tiempo debido a que el intervalo necesario para producir pulsos consecutivos (tiempo de resolución) es mayor en los detectores Geiger que en los proporcionales. El gas usado es generalmente una mezcla de 96 % de helio y 4 % de butano. El diseño detallado de los detectores depende casi enteramente del propósito para el cual vayan a ser utilizados. Los

detectores Geiger-Muller son muy simples y permiten una gran flexibilidad en su diseño. Son casi la primera elección cuando se trata de la detección de partículas beta<sup>-</sup>, siendo su característica principal el gran tamaño de los pulsos producidos (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 mayor amplificación externa para ser detectados, reduciendo la complejidad y costo del equipo electrónico anexo.

### 3.4 Detectores por centelleo.

Los detectores de centelleo difieren en su principio de los contadores basados en la recolección de iones. Resultan ser una moderna versión del espintariscopio, uno de los primeros instrumentos de detección, usado por Sir William Crookes en 1903, consistente en una caja con una pantalla de ZnS en un extremo y una lente en el otro, a través de la cual la pantalla podía ser vista en detalle. Si una aguja llevando material radiactivo (un emisor alfa en este caso) se movía en el interior de la caja, las partículas causaban un número diferente de centelleos en la pantalla de ZnS, según la distancia a que la aguja se encontraba de ella. Obtener las cuentas por observación visual era lento y tedioso, pero aún así una buena parte del trabajo fundamental sobre radiactividad, tal como la determinación del rango o alcance de las partículas alfa, fue realizado usando tipos similares de equipo.

Existe un número de sustancias que pueden usarse para la detección de las radiaciones nucleares, mediante el centelleo producido por procesos de excitación. Las sustancias capaces de absorber energía y emitirla en la forma de fotones de luz son llamados fósforos. Así, el ZnS fue uno de

Los primeros usados, pero han sido descubiertos algunos otros que al ser excitados emiten una cierta fracción de la energía total absorbida en forma de luz azul correspondiente a una longitud de onda aproximadamente de 3  $\mu$ .

La base fundamental de este tipo de medición es que el número de fotones producidos es proporcional a la energía total disipada por la radiación en el interior del fósforo, siendo la detección de estos fotones la que proporciona un pulso o señal electrónica. En esta forma, aunque es posible detectar por medios visuales centelleos de luz originados por un número de fotones producidos a su vez por la radiación nuclear. Este método de detección radiactiva no fué altamente desarrollado sino hasta el perfeccionamiento del tubo fotomultiplicador, capaz de convertir los destellos de luz en pulsos amplificados de corriente.

En un detector de centelleo tienen lugar los siguientes eventos:

- 1) La radiación nuclear es absorbida en el centellador con la subsecuente emisión de fotones de luz.
- 2) Estos fotones deben ser transmitidos con un razonable rendimiento al fotocátodo.
- 3) La absorción de fotones de luz en el fotocátodo deben resultar en la emisión de electrones.
- 4) Los pasos sucesivos del tubo fotomultiplicador, deben multiplicar suficientemente el número de electrones para proporcionar un pulso a la salida lo bastante grande para ser manejado en forma adecuada por el amplificador y el resto del sistema electrónico, a fin de poder relacionar número de pulsos o cuentas con desintegraciones por unidad de tiempo, según la eficiencia del sistema.

### 3.5 Detectores por semiconducción.

Una variedad cada vez más usada de detectores de radiación, hace uso de materiales sólidos que presentan una muy pobre conductividad eléctrica, siendo llamados detectores semiconductores, o con una denominación un tanto impropia detectores de estado sólido. Su funcionamiento está basado en el principio explicado a continuación.

Las estructuras cristalinas de elementos como silicio o germanio con 4 electrones de valencia, son muy homogéneas, porque todos los electrones son usados en la formación de enlaces químicos, y en consecuencia su capacidad de transportar corriente muy reducida. Pero si átomos tales como los de fósforo, con 5 electrones de valencia, son introducidos como impureza en un cristal de germanio o silicio, 4 de estos electrones serán utilizados para formar parte de enlaces químicos y el quinto de entre ellos quedará sin lugar en la red cristalina, rompiendo su regularidad. En esta forma, cristales de germanio o silicio conteniendo trazas de fósforo son llamados tipo N, ya que presentan electrones en exceso con relación a un cristal puro. Del mismo modo, si átomos de boro con 3 electrones de valencia son introducidos en un cristal puro de igual naturaleza, quedará un hueco en cada lugar donde hace falta un electrón, siendo llamado entonces el tipo P, porque presenta un faltante de electrones que le impide conservar la homogeneidad de la estructura cristalina. El fósforo y el boro usados como impurezas son llamados donantes y receptores, por su capacidad de dar y recibir electrones. Si ahora un material del tipo N se pone en contacto con uno del tipo P, se habrá establecido un potencial entre ellos y en la zona de unión de los electrones sobrantes del donante ocuparán los sitios vacíos del receptor, creando una estructura homogénea no conductora. Cuando un voltaje externo es aplicado a través de esta zona será incrementado el espesor de

La capa no conductora, misma que al ser atravesada por una radiación ionizante formará pares de iones, esto es, electrones libres y huecos en la estructura cristalina. Los electrones liberados emigran de inmediato hacia el polo positivo, fluyendo un pulso de corriente en un tiempo del orden de  $10^{-8}$  segundos. La forma de transmisión de electrones a partir de la zona de unión consiste en un movimiento en sentido contrario de electrones y huecos en átomos contiguos, lo que permite que su recolección y consecuente formación del pulso sea tan rápida, a diferencia de lo que sucede en la ionización gaseosa donde resulta necesario el desplazamiento físico de los iones a través de una distancia dada.

Los detectores semiconductores son especialmente útiles para medición de partículas cargadas. Las ventajas de este tipo de detector son: alta velocidad de conteo, respuesta linealmente proporcional a la energía depositada en la capa vacía y bajo voltaje de operación.

Elección del equipo de detección radiactiva.

Para cualquier 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 contar una especie particular de radiaciones debe ser hecha muy cuidadosamente, a fin de poder aprovechar esta particular propiedad de la materia como una 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, compren-

didadas en la detección son mucho más importantes y así por ejemplo, no es posible detectar partículas beta<sup>-</sup> de baja energía emitidas por Ca-45, C-14, Ni-63 o H-3 en un detector Geiger-Müller para muestras líquidas, debido a que las radiaciones cuentan con 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 fácil manejo, su precio y 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 en pulsos producidos.

#### Detectores de partículas alfa.

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| Centelleo                          | -Usando un fósforo de ZnS activado con Ag.   |
| Detectores semiconductores         | -Para análisis de energía de las partículas alfa.  |
| Detectores proporcionales de flujo | -La resolución de los espectros de energía obtenida es mayor en los semiconductores  |
| Detectores Geiger-Müller           | -Con ventanas muy delgadas, cuando no se requiere análisis de energía y la detección de partículas sea posible a pesar de lo reducido de su trayectoria. |

### Detectores de partículas beta<sup>-</sup>

a) Partícula beta<sup>-</sup> hasta 0.1 MeV.

Geiger-Müller

-Con ventana delgada

b) Partículas beta<sup>-</sup> mayores 0.5 MeV.

Geiger-Müller

-Para muestras líquidas

c) Partículas beta<sup>-</sup> de baja energía.

-Detectores de flujo sin ventana, proporcionales ó G-M para muestras sólidas.

-Detectores de flujo sin ventana, proporcionales ó G-M para muestras gaseosas.

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

### Detección de rayos gamma.

Centelleo

-Usando un cristal de NaI activado con TL.

Detectores semiconductores de GeLi ó SiLi

-Para diferentes valores de energías próximas. Costo alto, dificultades de conservación, se requieren cristales que utilizan gases licuados y menor eficiencia.

Geiger-Müller

-Con 1 % de eficiencia, como monitor de rayos gamma.



### Detección y medición de neutrones.

Como los neutrones no producen directamente ionización, las técnicas convencionales de detección con cámaras de ionización no son aplicables. Sin embargo, si el neutrón interactúa con el núcleo atómico para producir directamente radiación ionizante, entonces puede medirse el efecto de la radiación secundaria. Como la cantidad de radiación secundaria dependerá del número de neutrones presentes (además de la disponibilidad de núcleos para interactuar). Una medición de la radiación secundaria que puede considerarse como una medición neutrónica.

Como los efectos biológicos de los neutrones son, en función de su energía es conveniente establecer las diferentes clases de neutrones:

| CLASIFICACION DE LOS NEUTRONES | ENERGIA                            |
|--------------------------------|------------------------------------|
| Térmicos (lentos)              | 0.025 ev. a 0.5 ev. temp ambiente. |
| Intermedios (resonancia)       | 0.5 ev. a 10 KeV.                  |
| Rápidos                        | 10 KeV. a 10 MeV.                  |
| Relativísticos (alta energía)  | 10 MeV. o más.                     |

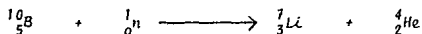
Conversión de flujo neutrónico de dosis.

No solamente es necesario conocer la clasificación de los neutrones sino que también es importante saber como convertir el flujo de neutrones. ( $n/cm^2/seg.$  a razón de dosis mrem/h.)

| CLASE DE NEUTRONES<br>(por su energía) | DETECTOR TIPO        | FLUJO NEUTRONICO IGUAL  |                         |
|--|----------------------|-------------------------|-------------------------|
|  |                      | A                       | 1mrem/h.                |
| Térmicos                               | Tubo desnudo $F_3B$  | 250                     | n/cm <sup>2</sup> .seg. |
| Intermedios                            | Tubo moderado $F_3B$ | 100                     | "                       |
| Rápidos                                | Rudolf               | 6                       | "                       |
| Todas energías                         | Rem-meter            | Lectura directa en rem. |                         |

Los neutrones lentos pueden medirse llenando una cámara de conteo con un gas que contenga  $^{10}_5B$  (el  $F_3B$ ). Cuando una cámara se expone a los neutrones lentos, la partícula alfa resultante produce ionización en la cámara y los iones se colectan en los electrodos de ésta.

Para neutrones con energías mayores, la reacción con boro no es muy efectiva. Sin embargo la dispersión elástica con los núcleos de  $H_2$  se efectúa fácilmente. Los neutrones pierden parte de su energía cuando chocan elásticamente con núcleos de  $H_2$ , una o varias colisiones reducen su energía a un nivel en el cual pueden interaccionar con el boro. Por lo tanto si se rodea una cámara llena de boro con una capa de material hidrogenado (o que contenga hidrógeno), los neutrones rápidos serán frenados lo suficiente para producir la reacción siguiente:



Se tienen dificultades técnicas en un sistema de medición de es

te tipo a menos que la dispersión de los neutrones se efectúe afuera de la cámara. La colisión elástica se usa en los reactores nucleares con el fin de reducir los altos niveles de energía de los neutrones liberados durante la fisión térmica en la que existe una mayor probabilidad de producir fisión.

*Detección de neutrones con un Rem-meter.*

Un Rem-meter usa un tubo de  $F_3B$  que tiene un moderador de neutrones esférico alrededor del tubo con  $F_3B$ , disperso en el moderador tiene  $Cd-113$ , que tiene la propiedad de absorber neutrones lentos. Ajustando el tamaño del moderador esférico y la cantidad de  $Cd$  presente, es posible construir un detector de neutrones que pueda indicar directamente rem/h. para cualquier nivel de energía de neutrones. Este aparato simplifica grandemente la medición de la exposición a neutrones.

## CAPITULO IV

### MEDICIONES FISICAS EMPLEANDO RADIOISOTOPOS

#### Introducción.

Desde el descubrimiento de la radiactividad artificial, y de modo especial, durante los últimos veinte años, ha tomado un incremento extraordinario en todo el mundo el uso de los radioisótopos, multiplicándose constantemente las aplicaciones de los mismos en los más diversos campos.

En una gran cantidad de trabajos los radioisótopos son prácticamente imprescindibles, y en multitud de procesos permiten alcanzar una precisión, a la vez que una economía, muy superior a la conseguida mediante métodos convencionales.

El uso de los isótopos está basado en la interacción de la radiación con la materia y de su comportamiento en esta, pudiendo establecerse tres grupos bien diferenciados.

#### a) La acción de la materia sobre las radiaciones.

Al penetrar las radiaciones en la materia experimentan efectos de dispersión, absorción, reducción de energía, etc. y midiendo la radiación transmitida podemos determinar las características del material con el que las radiaciones han interactuado.

Como ejemplo de este grupo, mencionaremos: la gammagrafía, medida de espesores, la medida de densidades, de niveles etc.

#### b) La acción de las radiaciones sobre la materia.

Las radiaciones originan en los materiales sobre lo que inciden fenómenos como la ionización, excitación, cambio molecular, destrucción de microorganismos etc.

como ejemplo de este grupo en la industria tenemos, la eliminación de la electricidad estática, la ionización en tubos de descarga, la construcción de pararrayos, los anemómetros etc.

c) Trazadores.

La utilización de los isótopos radiactivos como trazadores se basa en mezclarlos o incorporarlos a una determinada sustancia y seguir su comportamiento en ella detectando las radiaciones que emiten. Las aplicaciones de los radioisótopos como trazadores son: entre otras, el transporte de fluidos, medida de desgaste de piezas, técnicas analíticas etc.

En la agricultura se utilizan para la eliminación de insectos y plagas de campo. Para la creación de nuevas variedades de plantas.

En arqueología, la determinación de la edad de materiales orgánicos (madera, restos fósiles) es un problema que puede ser estudiado gracias a la existencia natural en estas materias de sustancias radiactivas, tales como el C-14, que es absorbido por todos los materiales carbonados, mientras permanecen vivos o participan en el ciclo dinámico del carbono.

En conservación de monumentos donde se requiere el conocimiento de su estructura interna. Esto se logra con la gammagrafía usando fuentes de  $\text{Ir}^{192}$  o de  $\text{Co}^{60}$ .

En hidrología se pueden localizar fugas de embalses, la medida la densidad de terrenos, información sobre la impermeabilidad y porosidad del mismo.

En la construcción, la determinación de la densidad de suelos, control de homogeneidad de mezclas etc.

En química, para analizar trazas de un elemento en una sustancia, para lo cual ésta se somete a irradiación, de manera que se formen ra

dionúclidos emisores gamma del elemento que se desea determinar.

Para obtener la cantidad del elemento presente en la substancia irradiada, se mide la actividad del radionúclido obtenido, la cual es proporcional a dicha cantidad.

Este método sirve para determinar trazas de elementos en cualquier clase de productos y su aplicación se ha extendido a la mayoría de las ramas industriales.

Esta es solo una parte de las múltiples aplicaciones que pueden tener la radioisótopos en los más variados campos técnicos y científicos.

#### 4.1 Fuentes abiertas y selladas.

La aplicación de técnicas nucleares a la industria, aprovecha la propiedad de la radiación gamma y beta de atravesar paredes, para proporcionar valiosa información de lo ocurrido en el interior de un equipo, que bien podría ser un reactor químico, una columna de absorción, un mezclador, una torre de destilación, un alto horno etc.

Según la forma en que se usa el material radiactivo se tienen técnicas nucleares que utilizan:

1) Fuentes selladas

2) Fuentes abiertas

##### 1) Fuentes selladas.

Se llaman así porque el material radiactivo se usa encerrado en cápsulas herméticas, de modo que solo saldrá radiación, pero la substancia radiactiva no.

El uso más importante de los radioisótopos como fuentes selladas es para medir : a) densidades, b) niveles y c) espesores. Aprovechando la radiación beta o gamma, según el caso.

FUENTES RADIACTIVAS COMUNMENTE EMPLEADAS EN MEDIDORES INDUSTRIALES

( Fuentes selladas )

| ISOTOPO                         | T1/2      | TIPO DE<br>DECAIMIENTO | RADIACIONES<br>EMITIDAS   | PRINCIPAL MODO DE<br>PRODUCCION   |
|---------------------------------|-----------|------------------------|---|---|
| <sup>27</sup> Co <sup>60</sup>  | 5.26 años | beta <sup>-</sup>      | β <sup>-</sup> 1.48 máx(0.12%)<br>0.314 máx(99%)<br>γ 1.173 máx(100%)<br>1.332 máx(100%)    | Co <sup>59</sup> ( n, γ ) Co <sup>60</sup><br>Co <sup>59</sup> + n → Co <sup>60</sup> + γ |
| <sup>36</sup> Kr <sup>85</sup>  | 10.7 años | beta <sup>-</sup>      | β <sup>-</sup> 0.67 máx<br>γ 0.514 máx(0.41%)   | Kr <sup>84</sup> ( n, γ ) Kr <sup>85</sup>  |
| <sup>38</sup> Sr <sup>90</sup>  | 28 años   | beta <sup>-</sup>      | β <sup>-</sup> 0.546 máx<br>β <sup>-</sup> 2.27 máx del<br>hijo γ <sup>90</sup>             | Producto de fisión  |
| <sup>55</sup> Cs <sup>137</sup> | 30.2 años | beta <sup>-</sup>      | β <sup>-</sup> 1.176 máx(7%)<br>0.514 máx<br>γ 0.662 máx(85%)<br>del hijo Ba <sup>137</sup> | Producto de fisión  |
| <sup>95</sup> Am <sup>241</sup> | 458 años  | alfa                   | α 5.49 máx(85%)<br>5.44 máx(13%)<br>gamma γ 0.060 máx(36%)                                  | hijo del Pu <sup>241</sup>  |

Fuente: Radiological Health Handbook Vs. Department of Health Education and Welfare. Public Health Service. Edition January 1970. 37

## 2) Fuentes abiertas.

Una fuente abierta es un material radiactivo que se introduce a un recipiente donde habrá que mezclarse con las sustancias del proceso.

Los trazadores radiactivos son fuentes abiertas que se usan en cantidades mínimas y proporcionan información fiel del comportamiento del proceso.

Las características principales que ha de cubrir un radiotrazador son:

- a) Comportarse físicamente igual que la sustancia que se va ha estudiar.
- b) Si hay reacción química, el trazador se debe comportar químicamente igual a la sustancia en estudio.
- c) Ser emisor gamma para poder detectarlo fácilmente desde el interior.
- d) Ser de vida media corta para que la radiactividad desaparezca en poco tiempo.
- e) Otros (disponibilidad, bajo costo etc.)

Básicamente la técnica con radiotrazadores consiste en lo siguiente:

- a) Se selecciona el trazador.
  - b) Se inyecta a la entrada del equipo en estudio.
  - c) Se detecta a la salida.
  - d) Se analiza la forma de salida.
- a) La selección del trazador se hace considerando las características ya mencionadas.
- b) La inyección puede ser instantánea (impulso tipo delta de Dirac) o continua (impulso de escalón). En el primer caso se introduce todo el material radiactivo en unos cuantos segundos, en el segundo, se debe dosifi-



car de manera que el gasto de inyección permanezca constante durante todo el tiempo que dure la detección. La respuesta obtenida en función del tipo de impulso introducido.

c) La detección da una distribución de tiempo de residencia del trazador entre el punto de inyección y el de detección y la forma de la gráfica proporciona información valiosa con respecto al comportamiento interno del fluido delatando por ejemplo, la existencia de zonas muertas o canalizaciones.

d) Al analizar la información se cuantifican parámetros con el tiempo de residencia real, que permite evaluar el funcionamiento del equipo comparado con las condiciones de diseño, pudiendo tomar medidas correctivas: variar la forma del recipiente, cambiar el tipo de agitador, colocar mamparas etc. mejorando así el mezclado dentro del equipo.

#### Beneficios

El uso de la técnica con radiotrazadores permite entre otras cosas:

sas:

- Determinar el modelo más adecuado al comportamiento del fluido en un recipiente.
- Evaluar los parámetros modelo.
- Conocer la distribución de tiempo de residencia, el tiempo mínimo de residencia, el tiempo de salida de concentración máxima y el tiempo promedio de residencia.
- Medir con precisión el gasto en una tubería.
- Conocer la eficiencia de mezclado de polvos o líquidos muy viscosos
- Evaluar el desgaste del refractario en hornos.
- Localizar una tubería oculta
- Medir con precisión el gasto de ríos, canales o tuberías en donde no

- se conoce el área de la sección transversal (Hay incrustación).
- Medir un volumen irregular (por dilución isotópica).
  - Determinar fugas en cambiadores de calor etc.

#### 4.2 Preparación de fuentes puntuales.

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 gamma, es deseable siempre minimizar la cantidad de sólidos en una muestra, la solución radiactiva es transferida a la plancheta en volúmenes lo más reducido posible 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 extendida regular y uniformemente puede ser agregada a la solución que se evapora una pequeña cantidad de alguna substancia que abata la tensión superficial, tal como cloroformo o tetraetilén glicol.

Una vez seca la plancheta puede ser cubierta con papel celofán delgado o película de plástico con objeto de evitar contaminaciones, a menos

que se trate de un emisor de partículas alfa o beta<sup>-</sup> 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, sobre todo si se cuenta con una solución en un disco de papel poroso (como papel filtro) y secarlo con rayos infrarrojos. También puede hacerse uso de la electrolisis, que permite un depósito de electrolitos sobre discos de metal en capas uniformes y muy delgadas del todo adecuadas como fuentes radiactivas.

Una muestra, es un cuerpo tridimensional, sin embargo si es suficientemente pequeña comparada con la ventana de un tubo contador, podemos considerarla como un punto y nos referimos a ella como muestra puntiforme, la cual emitirá radiaciones en todas direcciones. Como la precisión de un conteo aumenta con el número de cuentas, es claro que al contar una muestra puntiforme, la precisión se aumenta acercando la muestra a la ventana del contador.

Preparación de una muestra puntiforme.

- 1) En un portaobjeto se marca un punto con lápiz graso
- 2) En ese punto se deposita una gota de sustancia radiactiva, en solución, procurando que no se extienda.
- 3) Se seca a la lámpara infrarroja.
- 4) Se tapa con cinta Scotch.

Existen varios factores que influyen en la detección radiactiva, entre ellos se encuentran: Factor de autoabsorción, factores geométricos y factor de absorción externa.

### Factor de autoabsorción.

Cuando el espesor de una muestra radiactiva emisora alfa o beta es incrementado, la actividad crece hasta un máximo en que permanece constante, alcanzado cuando las partículas de las capas interiores son todas absorbidas antes de llegar a la superficie. Si se trata de emisores alfa o 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 los cuales ninguna de las partículas emitidas por las capas interiores llegan al detector, y entonces la rapidez de las cuentas es proporcional a la actividad por unidad de masa. Esto puede realizarse usando una 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 cuando se trata de partículas alfa y beta.

### Factores geométricos.

Las radiaciones son emitidas por una fuente radiactiva en todas direcciones. Con objeto de lograr que la eficiencia en su detección sea lo 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 rela-

ción entre la actividad de las fuentes radiactivas no puede ser determinada en forma reproducible, especialmente si presentan otras anomalías como las 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 fuentes puntiformes.

Factores de absorción externa.

Otro importante factor en 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 el caso de muestras líquidas, particularmente cuando 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.

#### 4.3 Mediciones físicas con radioisótopos.

##### a) Detección de fugas.

Las técnicas usando radioisótopos para la detección de fugas de material en industrias muy variadas, han probado ser indispensables en algunos casos y muy ventajosos en otros, de acuerdo a las condiciones particulares de cada problema, sobretodo cuando se trata de tuberías ocultas o que alcanzan grandes longitudes. En esta forma, las industrias química, petrolera, de la construcción y otras, han utilizado radioisótopos de vida media

conta para la localización de fugas en sus instalaciones. A manera de ejemplo, el tipo de respuesta de un detector a la fuga de material marcado en una tubería subterránea puede observarse en el cuadro siguiente:

| DISTANCIA DEL DETECTOR A UN PUNTO SOBRE LA TUBERIA SUBTERRANEA | RESPUESTA DEL DETECTOR |
|--|------------------------|
| 50 (cm.)   | 5.8 %                  |
| 38   | 17.7                   |
| 25   | 46.7                   |
| 20   | 57.8                   |
| 13   | 82.0                   |
| 5  | 99.8                   |
| 0  | 100.0                  |

b) Detección de obstrucciones.

Al marcar un isótopo y añadirlo a un fluido, e ir detectando en el ducto su transportación, y al llegar a una obstrucción, se detiene el monitoreo (detección) de la actividad y así se localiza la obstrucción y se mapea la figura de ésta. De la misma manera son detectables las fugas de fluidos, marcando el fluido con un radiotrazador y añadiéndolo a diferentes intervalos de tiempo.

Cuando se manejan fluidos corrosivos, tóxicos o bajo gran presión generalmente resulta muy complicado el uso de medidores de flujo. En

cambio, la utilización de material marcado facilita el procedimiento y permite obtener los resultados a distancia, por medio de señales electrónicas que pueden accionar válvulas y bombas, para regular el gasto de fluidos en forma automática.

#### C) Detección del cambio de densidades.

En los estudios de aguas subterráneas tiene gran interés conocer la densidad de las capas profundas del terreno, ya que ello proporciona valiosa información sobre la permeabilidad y porosidad del mismo.

Se basa esta aplicación en la dispersión que sufre la radiación gamma en la tierra por el efecto Compton. Debido a este fenómeno, los rayos gamma pierden parte de su energía y cambian de dirección. Después de una o varias dispersiones dichos rayos alcanzan el detector. Tanto el número de fotones dispersados como la atenuación de éstos es función de la densidad del medio. El número de rayos que llegan al detector suele disminuir con dicha densidad. En la práctica se utilizan sondas que se introducen en una perforación realizada en el terreno. Estas sondas disponen de una fuente radiactiva y de un detector, estando separados ambos por una pieza de plomo, que impide que los rayos gamma emitidos por aquella puedan alcanzar directamente al detector. A este llegan, finalmente fotones dispersados.

#### d) Higiene Industrial.

En industrias para procesos con movimiento de rollos, bandas, láminas, telas y plásticos etc., por ejemplo en la industria textil, del papel, laminación, impresoras con rodillos en movimiento continuo etc., se elimina la electricidad estática con emisores alfa o beta.

Como alarma automática en la detección de humo o vapores producido de un incendio o combustión. Al pasar éstos, entre un detector y una fuente radiactiva, se altera la velocidad de conteo y se acciona un sistema de alarma contra incendio.

Para hacer mediciones de la efectividad de ventilación, usando una cámara de ionización y un gas con un trazador radiactivo de vida media corta.

En la evaluación de sustancias detergentes o de limpieza para cualquier superficie. Usando un trazador radiactivo y un detector apropiado.

#### e) Medición de volúmenes.

Cuando se trata de medir volumen de líquidos almacenados en grandes tanques, cualquier error en la apreciación del nivel del material dentro del recipiente, conduce a medidas de volumen que difieren del real por grandes cantidades. Por ello, existen varios métodos de usar fuentes radiactivas como indicadores de niveles que proporcionan datos consistentes y con error mínimo.

Esta determinación se lleva a cabo por el método de dilución isotópica, el cual se aplica a muestras difíciles de separar total o cuantitativa de uno de los componentes. Consiste en agregar a la mezcla una pequeña cantidad del mismo compuesto que va a determinarse, en estado de alta pureza química y marcado con un radioisótopo. La actividad específica (cpm/g. ó cpm/ml.) debe haber sido medida con precisión. Después que la sustancia marcada ha alcanzado su completa difusión en el mismo compuesto o elemento inerte cuya cantidad queremos determinar, se lleva a cabo su separación de la muestra, por un procedimiento elegido según el criterio de obtener una fracción con la mayor pureza posible. La sustancia recuperada se pesa o se



mide su actividad específica es medida entonces en iguales condiciones que al hacerlo con la sustancia marcada, antes de agregarla a la muestra. Es muy importante que la eficiencia en ambas mediciones de actividad específica sea la misma, por lo que la primera de ellas se realiza con una cantidad de material marcado tan pequeña como sea posible, a fin de obtener un número de cuentas por unidad de tiempo comparable al que se va a obtener, una vez que una cantidad mayor del mismo se haya difundido en la totalidad del material inerte presente en la muestra. En esta forma, la corrección por tiempo de resolución es la misma en ambas detecciones, y por otra parte puede usarse material radiactivo de muy alta actividad específica que permita una gran dilución.

#### f) Medición de espesores.

Para medir espesores se utilizan dos métodos:

- 1) el de transmisión
- 2) el de reflexión o retrodispersión

1) Está basado en la absorción, por parte del objeto cuyo espesor desea medirse, de las radiaciones beta o gamma. El objeto se sitúa entre la fuente radiactiva y un detector. En función de la absorción que sufren las radiaciones, al atravesar los objetos, pueden calcularse los espesores.

2) Hay casos en los que el detector y la fuente radiactiva han de situarse en un mismo lado del objeto, como por ejemplo, si se desea medir el espesor de una película o recubrimiento fijado sobre un material de soporte de espesor conocido. En estos casos se aplica la reflexión o retrodispersión de las partículas beta al incidir sobre la materia.

De acuerdo al espesor a medir se emplean radiaciones beta o gamma dependiendo de la actividad de la fuente, del poder de absorción del ma-

terial de la precisión deseada. En la práctica se utilizan entre otros los siguientes isótopos:

Pm-147, Tl-204, Sr-90, Ru-106, Ba-133, Ce-144, Cs-137 y Ni-63.

Las ventajas del método son que puede ser usado para medir con precisión y continuamente el espesor de grandes cantidades de material muy delgado, aún cuando se tenga acceso a solo un lado del mismo, como papel, cartón, hojalata etc. También puede ser usado para medir el espesor de recubrimientos metálicos, pinturas y plásticos, por medio de la retrodispersión

g) Medición de niveles.

Los isótopos radiactivos también tiene gran importancia en la medida de niveles, superando ventajosamente a los métodos convencionales basados en el empleo de flotadores. Los procedimientos son muy variados y vienen caracterizados por las posiciones en que se colocan la fuente radiactiva y el detector.

La radiación gamma proveniente de una fuente radiactiva a través de un tanque, hacia un detector colocado al frente, en el plano que se desea verificar un determinado nivel. A medida que el nivel del material almacenado se eleva, pasa a través de ese plano, se reduce la intensidad de la radiación en el detector. Si la información proporcionada por el detector se procesa de forma tal que obtenga un nivel de corriente directa (proporcional a la radiación presente en el detector y por lo tanto al nivel del material almacenado) en esta señal se pueden activar alarmas, energizar dispositivos o controlar ciertos circuitos.

Un medidor de nivel generalmente consta de tres partes: una unidad detectora, una de control y una fuente radiactiva emisora de radiación gamma que se encuentra alojada en un contenedor blindado.

La fuente radiactiva generalmente empleada es de Cs-137 o de Co

-60, los cuales emiten radiación gamma. La intensidad de la fuente radiactiva está determinada por la distancia entre ella y el detector, aunque también por la densidad y el grosor de la pared del tanque y por el material contenido en él.

Este método no solamente encuentra aplicación práctica para la medida de niveles de líquidos, también se hace uso de él, en el llenado de botellas de gas, en el envasado de cualquier tipo de producto, para indicar el nivel de carga en altos hornos y naturalmente, en todos aquellos casos en que se precise determinar con exactitud un nivel o niveles.

#### h) Radiografías o gammagrafías industriales.

La sensibilidad de una película fotográfica a las radiaciones nucleares, especialmente a las partículas beta<sup>-</sup>, las convierte en un instrumento de suma utilidad para obtener imágenes de objetos en los cuales un material radiactivo se ha distribuido interiormente. Así, cuando el objeto se pone en contacto con película de rayos X o alguna lo suficientemente sensible y durante el tiempo adecuado, se obtiene un negativo ennegrecido en los sitios donde se ha acumulado el material radiactivo en el objeto. La imagen resultante es llamada una radiografía o autoradiografía, o sea una radiografía producida por radiaciones que provienen del mismo objeto, mostrando el trazo de la distribución de la radiactividad.

La autoradiografía ha sido utilizada en el estudio de las estructuras de aleaciones metálicas. Si uno de los componentes es radiactivo, puede obtenerse una imagen de como ha quedado distribuido en la aleación y cuando la película en esta imagen se coloca en la superficie pulida del metal para su examen microscópico, es posible observar la estructura de uno o varios componentes tal como se encuentran en el interior de la pieza metálica.

ca. En mayor escala, la autoradiografía ha sido usada para estudiar condiciones en enfriamiento de aluminio, acero y otros metales, conociendo la forma y posición de la interfase entre metal líquido y sólido, lo que se logra agregando una impureza radiactiva al metal fundido cayendo sobre una porción ya solidificada, impureza que puede ser detectada por medio de una autoradiografía, una vez que los lingotes se han enfriado.

La autoradiografía ha encontrado también amplias aplicaciones en la bioquímica y en la medicina, donde pueden obtenerse imágenes de órganos y aún de tejidos que hayan fijado material radiactivo si se utilizan emulsiones especiales de grano fino. Como un ejemplo, es posible comprobar la eficiencia de diversos materiales empleados en la tapadura de caries dentales, si piezas tapadas y luego extraídas son colocadas por 72 horas dentro de una solución conteniendo algunos microcurios de Ca-45.

La esterilización de objetos de laboratorio-desechables, como cajas petri, pipetas, tubos de ensayo etc., también es ya una aplicación industrial en crecimiento rápido.

La rápida razón de crecimiento actual, asegura que la esterilización gamma capturará una porción tan alta como el 80 % que podría alcanzarse en el período final de los años ochentas.

## CAPITULO V

### PARTE EXPERIMENTAL

#### 5.1 MEDICION DE VOLUMENES Y ESPESORES USANDO RADIOISOTOPOS

##### Objetivos.

Medición de volúmenes de líquidos con radioisótopos.

Medición de espesores de líquidos con radioisótopos.

##### Fuente radiactiva.

Cs-137  $T_{1/2} = 30.2$  años, emisor beta, gamma.

##### Equipo.

Detector de centelleo Eberline Modelo MS-2

Probeta de 100 mL.

Pipeta volumétrica de 10 mL.

Bulbo de succión.

Regla, papel semilogarítmico.

##### Procedimiento:

- Encender el equipo. Ajustar el voltaje. Establecer las condiciones de operación que indique el instructor. Dejar calentar 5 minutos.
- Hacer tres mediciones de cpm del fondo ambiental,  $f$ , y calcular el promedio.
- Colocar la fuente radiactiva en la base de la probeta vacía. Tomar tres mediciones de cpm de la intensidad,  $I_0$ , y calcular el promedio.

- d) Agregar, cuidadosamente medidos 10 ml. de agua en la probeta y tomar la lectura de cpm.
- e) Repetir el paso anterior con 20, 30 ..... 100 ml. de agua.
- f) Medir la altura del nivel del líquido (espesor en cm.) para los volúmenes de 10 - 100 ml.
- g) Sobre papel semilogarítmico, dibujar una gráfica de cpm - f Vs. el volumen y otra gráfica de cpm - f Vs. espesor.
- h) Determinar el % de error relativo para volúmenes con los volúmenes de 40 y 70 ml. con la ayuda de la ecuación:

$$\% \text{ de error relativo} = \frac{\text{volumen real} - \text{volumen medido}}{\text{volumen real}} \times 100$$

- i) Determinar el % de error relativo para los espesores correspondientes a 7.36 y 12.88 cm. con la ayuda de la ecuación:

$$\% \text{ de error relativo} = \frac{\text{espesor real} - \text{espesor medido}}{\text{espesor real}} \times 100$$

Resultados

| cpm - $\delta$ | Distancia (cm.) | Volumen (ml.) |
|----------------|-----------------|---------------|
| 11162          | 2.0             | 10            |
| 9731           | 3.9             | 20            |
| 8801           | 5.8             | 30            |
| 7828           | 7.6             | 40            |
| 6575           | 9.4             | 50            |
| 5952           | 11.3            | 60            |
| 5309           | 13.1            | 70            |
| 4812           | 14.9            | 80            |
| 4115           | 16.8            | 90            |
| 3910           | 18.7            | 100           |

Calculos:

Lectura de la fuente = 13,299.6 cpm

$$\frac{I_0}{2} = \frac{13,299.6}{2} = 6,614.8$$

Error relativo para volumen:

$$\% \text{ error} = \frac{\text{volumen real} - \text{volumen medido}}{\text{volumen real}} \times 100$$

Para 40 ml. de volumen:

$$\% \text{ error relativo} = \frac{40 \text{ ml.} - 41 \text{ ml.}}{40 \text{ ml.}} \times 100 = -2.5 \%$$

Para 70 ml. de volumen.

$$\% \text{ error relativo} = \frac{70 \text{ ml.} - 73.5 \text{ ml.}}{70 \text{ ml.}} \times 100 = -5.0 \%$$

Error relativo para espesores.

$$\% \text{ error} = \frac{\text{espesor real} - \text{espesor medido}}{\text{espesor real}} \times 100$$

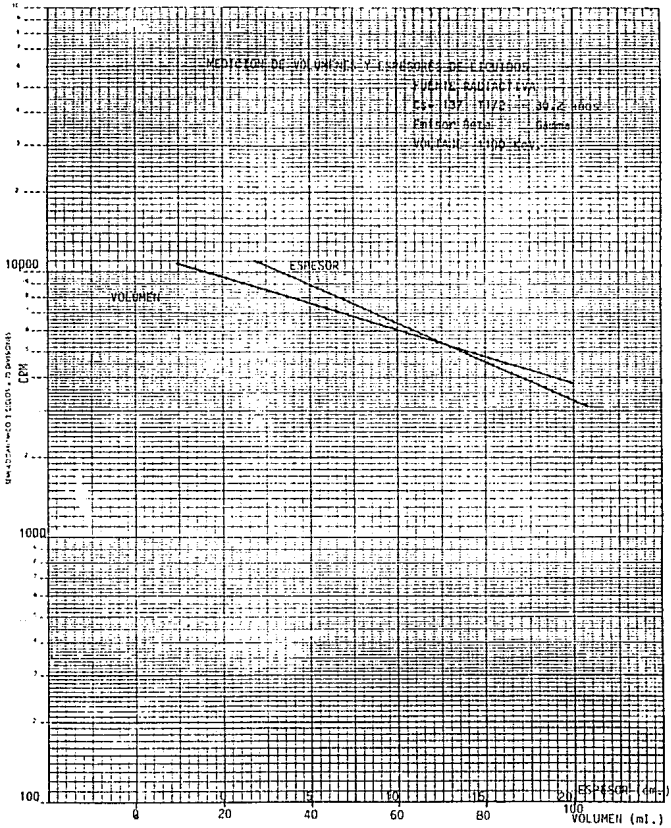
Para 7.36 cm. de espesor.

$$\% \text{ error relativo} = \frac{7.35 \text{ cm.} - 7.5 \text{ cm.}}{7.36 \text{ cm.}} \times 100 = -1.9 \%$$

Para 12.88 cm. de espesor.

$$\% \text{ error} = \frac{12.88 \text{ cm.} - 12.98}{12.88 \text{ cm.}} \times 100 = -0.7 \%$$





## 5.2 DETECCIÓN DEL CAMBIO DE DENSIDADES CON UN EMISOR BETA, GAMMA

### Objetivo.

Detectar cambio de densidades ( $\text{g/cm}^3$ ) de productos sólidos empacados en un recipiente cilíndrico no transparente.

### Fuente radiactiva.

Co-57  $T_{1/2} = 270$  días.

### Equipo.

Escalador de conteo. Detector de centelleo. Castillo de lucita, probeta de 200 ml. forrada con papel milimétrico empacada con dos ó mas productos sólidos de densidad variable, con uno de ellos, cuando menos, de alta densidad (20 ml. de postas de plomo o tachuelas, rondana de papel filtro, 40 ml. de detergente en polvo, rondana de papel filtro, 20 ml. de postas de plomo, rondana de papel filtro, 40 ml. de café soluble en polvo o detergente en polvo, rondana de papel filtro, 20 ml. de postas de plomo, rondana de papel filtro, 40 ml. de café soluble en polvo o detergente en polvo, rondana de papel filtro y tapón de hule). Regla, papel milimétrico.

### Procedimiento.

- a) Encender el equipo. Dejar calentar 5 minutos . Establecer las condiciones de operación.
- b) Obtener promedio de 3 lecturas de cpm de fondo,  $f$  , ambiental.
- c) Colocar la fuente radiactiva frente al detector y entre ambos, sobre el soporte de lucita, la probeta empacada y forrada, de tal manera que pueda ser deslizada horizontalmente.

- e) Hacer conteos de un minuto cada vez, e ir deslizando la probeta sobre el soporte en intervalos de distancia horizontal de 1 cm. y obtener las cpm para cada distancia medida, hasta llegar al tapón de hule.
- f) Construir una gráfica en papel milimétrico de cpm Vs. distancia horizontal en cm.
- g) Identificar la separación de capas de los materiales empleados.
- h) Quitar el forro de papel milimétrico de la probeta y comparar la separación real de capas de los materiales empleados.

Resultados :

| Distancia ( cm.) | cpm   | cpm- $\delta$ |
|------------------|-------|---------------|
| 1                | 1093  | 412           |
| 2                | 890   | 209           |
| 3                | 917   | 236           |
| 4                | 3358  | 2677          |
| 5                | 11791 | 11110         |
| 6                | 11214 | 10533         |
| 7                | 10883 | 10202         |
| 8                | 6111  | 5430          |
| 9                | 2568  | 1887          |
| 10               | 9701  | 9020          |
| 11               | 33285 | 32604         |
| 12               | 34400 | 33719         |
| 13               | 33557 | 32876         |
| 14               | 10866 | 10185         |
| 15               | 2338  | 1657          |
| 16               | 5236  | 4555          |
| 17               | 10907 | 10226         |
| 18               | 11113 | 10432         |
| 19               | 10589 | 9908          |
| 20               | 4169  | 3488          |
| 21               | 970   | 289           |
| 22               | 952   | 271           |
| 23               | 968   | 287           |
| 24               | 5586  | 4905          |
| 25               | 35632 | 34951         |
| 26               | 37267 | 36586         |
| 27               | 39788 | 39107         |

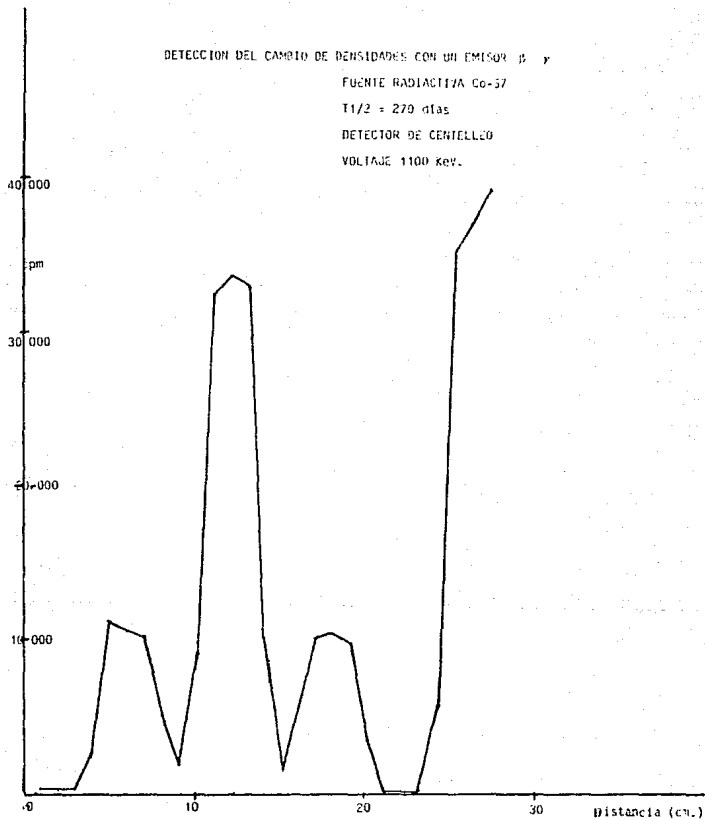
DETECCION DEL CAMBIO DE DENSIDADES CON UN EMISOR  $\beta$   $\gamma$

FUENTE RADIATIVA Co-57

T1/2 = 270 días

DETECTOR DE CENTELLEO

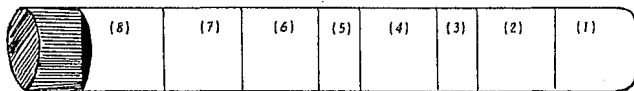
VOLTAJE 1100 KeV.



La separación de capas se determinó como sigue:

| Nº de muestras | Material     | Distancia (cm.) |
|----------------|--------------|-----------------|
| (1)            | plomo        | 4               |
| (2)            | arena fina   | 4               |
| (3)            | tachuelas    | 2               |
| (4)            | jabón        | 4               |
| (5)            | tachuelas    | 2               |
| (6)            | arena gruesa | 4               |
| (7)            | plomo        | 4               |
| (8)            | jabón        | 4               |

Diagrama de la probeta mostrando el espesor entre cada substancia



Distancia [cm.]

## CONCLUSIONES

De acuerdo al trabajo realizado podemos concluir que el estudio de los radioisótopos tiene y tendrá un gran futuro, puesto que los avances científicos cada vez encuentran infinidad de usos para éstos. Su utilización para medir, analizar y procesar en muchos campos ha permitido el conocimiento de su interacción con la materia y su comportamiento en ésta y ha logrado que los radioisótopos sean familiares sobre todo en la industria, gracias a su propiedad de ser detectables, aún cuando se encuentran en cantidades muy pequeñas.

Sus aplicaciones en las mediciones físicas los han hecho impresionantes y en muchos procesos se ha logrado llegar a una precisión, exactitud y economía que ha desplazado a los métodos convencionales.

Así su uso en otros campos como la Medicina, Agricultura, Arqueología etc. también ofrece grandes perspectivas para un mayor avance.

## ANEXO I

### APLICACION DE LA ESTADISTICA A LA MEDIDA DE LA RADIACTIVIDAD

En la práctica al realizar un serie de mediciones o conteos de una misma cantidad, se encuentra en general que los valores obtenidos sucesivamente son diferentes entre sí. Entonces se plantea el problema de dar una interpretación de las diferencias entre dichos valores y correspondientemente expresar el resultado de tales mediciones de una manera significativa.

Para empezar debemos reconocer que siempre existen limitaciones en el control de las condiciones en que se llevan a cabo las mediciones, en la precisión de los aparatos de medida, y también en la apreciación por parte del experimentador que realiza las medidas. Estas limitaciones son principalmente responsables de las diferencias o errores en los valores obtenidos. En este sentido reconocemos entonces que tales diferencias o errores siempre estarán presentes y no pudiendo eliminarlos por completo lo más que podemos hacer es tratar de reducirlos al mínimo y también hacer una estimación de sus magnitudes.

En una situación óptima se puede tener un control muy bueno sobre las condiciones en que se realizan las mediciones y el operador trabajará con máximo cuidado de modo que los errores son reducidos al mínimo, aplicando inclusive correcciones por posibles cambios en esas condiciones y por apreciación personal: en tal caso y para ciertas cantidades las diferencias entre los valores medidos están determinados esencialmente por la precisión de los aparatos de medida. Por otra parte, existenciertas cantidades cuya naturaleza intrínseca es tal que, aún en el caso de la situación óptima des



crita, presentan fluctuaciones estadísticas independientemente de la precisión de los instrumentos de medición.

El decaimiento radiactivo como proceso al azar.

Si se tiene un núcleo radiactivo, su desintegración es un proceso al azar, es decir, no podemos predecir cuando ocurrirá: puede ocurrir en el futuro inmediato o en un futuro muy lejano. Cuando existe un gran número de núcleos radiactivos de la misma especie, tampoco podemos predecir cuando ocurrirá la desintegración de uno de ellos: sin embargo, usando una hipótesis estadística muy simple podemos predecir cuantos de ellos se desintegrarán por unidad de tiempo, es decir la rapidez de desintegración o actividad de la muestra correspondiente, para cualquier instante. Este es el contenido de la ley de decaimiento exponencial.

Los resultados de la detección radiactiva tienen necesariamente una significación estadística, habiendo siempre un margen de desviación o error con respecto al valor más probable. De esta manera la estadística es utilizada en la estimación de errores debidos a la naturaleza al azar del decaimiento radiactivo.

Interpretación de datos.

Quando una muestra radiactiva es contada en una hora, el número de cuentas se divide entre 60, el resultado en cuentas por minuto es el promedio de valores obtenidos 60 veces en un 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 solo 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, se deben de tomar en cuenta la vida media de

Los radioisótopos, la actividad de las muestras y las condiciones impuestas por el tipo de trabajo que se lleve a cabo.

Si de una misma muestra se llevan a cabo un gran número de mediciones radiactivas por minuto, y los datos 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. Esta gráfica es llamada Histograma, la cual nos permite ver el intervalo de valores dentro del cual los datos obtenidos han salido con mayor frecuencia. Las cuentas por minuto promedio estarán en el intervalo que comprende un mayor número de lecturas. Esto significa que la medición de la radiactividad realizada en cualquier minuto dado es más probable que se ubique con las lecturas en el centro del Histograma. Así, los valores de ordenada en el diagrama nos están representando la frecuencia con la cual los valores de abscisa son detenidos de hecho. Esta frecuencia es una medida de la probabilidad de ocurrencia de los eventos considerados.

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. Sin embargo, debido a que resulta más sencilla de manejar desde el punto de vista de cálculo matemático, en mediciones radiactivas se utiliza la llamada ley de distribución normal o también llamada aproximación de Gauss.

Desviación de las cuentas promedio.

De acuerdo a la ley estadística de distribución normal de resultados, son igualmente probables desviaciones en sentido positivo o negativo del valor promedio calculado en un gran número de mediciones, y la ocurrencia de grandes desviaciones de las cuentas promedio (designadas por  $\bar{X}$ ) es me

nos probable que aquella de pequeñas desviaciones. Esto corresponde con la curva normal de distribución, en forma de campana donde el valor que presenta una mayor probabilidad de ser obtenido, corresponde con el promedio aritmético y se 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 la desviaciones del valor promedio de los cuadrados de las desviaciones del valor promedio  $\bar{X}$ , y puede ser demostrado que variancia y  $\bar{X}$  son iguales. La desviación estandar es la raíz cuadrada de la variancia que debe resultar igual a la raíz cuadrada de las cuentas promedio  $\bar{X}$ , y se identifica a la desviación estandar por la letra griega  $\sigma$ . En la medida que el valor de  $\bar{X}$  aumenta,  $\sigma$  crece también, pero su valor como porcentaje de  $\bar{X}$  disminuye. Si se realiza un gran número de mediciones, la fracción de ellas teniendo una desviación estándar estará representada en la curva entre los valores de ordenada correspondientes a los de la 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 número de veces relativamente pequeño que no permite una correcta distribución estadística. Sin embargo sabemos que en una medida hecha existen 68.3 % de probabilidades de que difiera del valor promedio por  $\sigma$  o menos. Hay 95.5 % de probabilidades de que difiera por lo menos  $2\sigma$  o menos y 99.7 % de que lo haga por  $3\sigma$  o menos.

La raíz cuadrada de un número entero suficientemente grande, es un valor que podemos considerar pequeño en relación al número de modo que

que tanto como  $\sqrt{X}$  resulta pequeño al compararlo con  $\bar{X}$ , será menor el error al suponer que  $\sigma = \sqrt{X}$  en vez de  $\sigma = \sqrt{\bar{X}}$ . Teniendo en cuenta que la raíz cuadrada de un número como fracción de este es menor mientras el número sea mayor, podemos evaluar el error cometido al suponer que las cuentas promedio estarán dentro del intervalo  $X \pm \sqrt{X}$ , como el porcentaje del valor  $X$  obtenido en una sola determinación.

| Cuentas obtenidas<br>$X$ | Desviación estándar<br>$\sqrt{X}$ | % de error<br>(68.3% de confiabilidad) |
|--------------------------|-----------------------------------|--|
| 100                      | 10                                | 10                                     |
| 1000                     | 31.6                              | 3.2                                    |
| 10000                    | 100                               | 1                                      |
| 100000                   | 316                               | 0.32                                   |
| 1000000                  | 1000                              | 0.1                                    |

De modo que si obtenemos 10 000 cuentas no importa en cuanto de detección radiactiva, tendremos un error del 1 % o menor al suponer a nuestras cuentas y su desviación como el intervalo dentro del cual caería el valor promedio obtenido al hacer un gran número de mediciones con aproximadamente una probabilidad en tres de este porcentaje de error sea excedido. En la misma forma, existe el 90 % de probabilidades de que el valor de las cuentas promedio esté comprendido dentro de los límites  $X \pm 1.64\sqrt{X}$  ó  $\frac{X}{t} \pm \frac{\sqrt{X}}{t}$  donde  $t$  es el tiempo para alcanzar un número de cuentas igual a  $X$ , que mientras más grande sea, proporcionará un menor porcentaje de error al suponer a las cuentas promedio dentro de estos límites.

Por tanto, es posible seleccionar un número de cuentas para co-

noer el porcentaje de error al suponerlas como el valor promedio, de un grado de confiabilidad también posible de elegir.

Para muestras de baja actividad, la corrección por fondo cobra entonces la máxima importancia. Si C son las cuentas de la muestra más el fondo y F son las cuentas de fondo solamente, expresadas ambas por unidad de tiempo, las cuentas corregidas por el fondo y su desviación pueden ser escritas:

$$C - F \pm \left( \frac{C}{t_c} + \frac{F}{t_f} \right) 1/2$$

donde  $t_c$  y  $t_f$  son los tiempos en los cuales fueron detectados la muestra y el fondo respectivamente.

El porcentaje de error o desviación estándar relativa sería igual a:

$$\frac{\left( \frac{C}{t_c} + \frac{F}{t_f} \right) 1/2 \times 100}{C - F}$$

porcentaje que se usa como una medida del error estadístico, cuya reducción es el principal problema en la detección de bajas actividades, o sea aquellas actividades comparables al fondo.

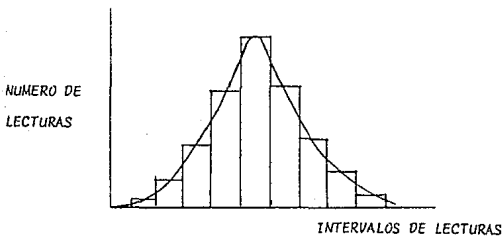
Dos conclusiones deben de tomarse en cuenta, cuando se trata de interpretar las cuentas por unidad de tiempo obtenidas en la detección radiactiva:

- 1) La desviación estándar es igual a la raíz cuadrada de las cuentas promedio de un gran número de determinaciones. Pero debido a que  $\sqrt{X}$  es tanto más pequeño comparado con X, cuando X sea mayor, podemos suponer que las cuentas promedio estarán dentro de los límites

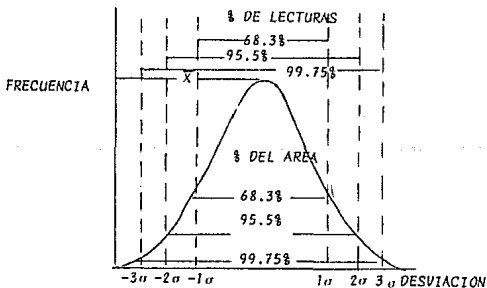
$X \pm \sqrt{X}$  con aproximadamente 1 posibilidad en 3 de que estos límites de error sean excedidos.

- 2) Aún cuando estos límites de error sean excedidos, el error como porcentaje de  $X$  será tanto más pequeño cuando  $X$  sea mayor. Así las cuentas obtenidas deben ser tan grandes como resulte practicable para lograr cuentas por unidad de tiempo tan cercanas aun valor promedio como sea posible. En la práctica, 10000 cuentas son adecuadas, para introducir un error de 1 % en relación al valor promedio

### HISTOGRAMA



### CURVA NORMAL DE DISTRIBUCION



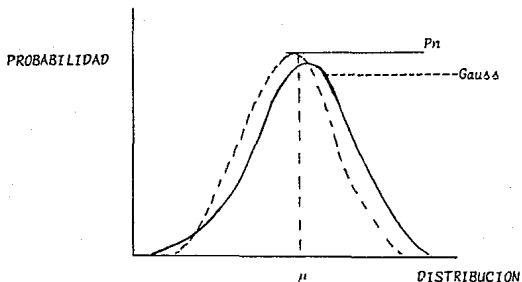
# ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

Distribución de Poisson .

Esta distribución se refiere a la probabilidad de ocurrencias de procesos al azar cuando el número de pruebas es muy grande y la probabilidad de ocurrencia del proceso de interés en una prueba es muy pequeña.

$$\text{Probabilidad } P_n = \frac{\mu^n \times e^{-\mu}}{n!} \quad \begin{array}{l} \mu = \text{promedio} \\ n! = \text{probabilidad factorial} \end{array}$$

La curva en general es asimétrica con respecto al valor promedio pero tiende a hacerse simétrica y análoga a la curva de Gauss, cuando el número de pruebas es muy grande y también es grande el promedio.



## BIBLIOGRAFIA

- 1) Navarrete, T.M. y Cabrera, M.L. *Introducción al Estudio de los Radioisótopos*. Ediciones del Sector Eléctrico CFE Libro N° 10. México, D.F. 1979.
- 2) Choppin, G.R. and Rydberg, J. *Nuclear Chemistry. Theory and Applications*. Pergamon Press, 1980.
- 3) Charlton, J.S. *Radioisotope Techniques for Problem solving in Industrial Process Plants*. Leonard Hill. London, 1986.
- 4) Ley Koo, Eugenio. *Tesis Radioisótopos: Teoría y Experimentación*. Universidad Autónoma de Puebla. Puebla Pue, 1959.
- 5) Martin, Alan and Harbison, Samuel, A. *An Introduction to Radiation Protection*. Second Edition Chapman and Hall a Halsted Press Book. John Wiley & Sons. New York.
- 6) Stein, J. *Isótopos Radiactivos*. Editorial Alhambra. Primera Edición 1973
- 7) Cabrera, M.L. *Curso del Diplomado de Actualización a Profundidad en Seguridad Radiológica*. Facultad de Química. UNAM, 1988.
- 8) Robin, P. Gardner, Ralph, L. Ely Jr. *Radioisotope Measurement Applications in Engineering*. U.S.A.E. Reinhold Publishing Corporation. 1967.
- 9) Wilson, B.J. Gamboa, J.M. *Manual de Radioquímica*. Editorial Alhambra 1974.