



43
zej
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

DETECCION DE FALLAS USANDO
GAMMAGRAFIA LONGITUDINAL ELECTRONICA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

FISICO

PRESENTA

BEATRIZ SANCHEZ PEREZ

FALLA DE ORIGEN

México, D.F.

octubre de 1992



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.

INTRODUCCION

Este trabajo tiene como objetivo fundamental el desarrollo de un sistema que emplea la radiación gamma para detectar fallas estructurales en equipos y materiales que se utilizan en la industria, como son: torres de destilación, columnas de un edificio, postes, torres, tubos, etc. Para llevarlo a cabo se ha considerado pertinente dividirlo en los siguientes temas:

1) Conocimiento actual sobre radiación nuclear. Se hace una reseña histórica sobre los descubrimientos científicos más importantes a partir de la radiactividad. Se hace énfasis en el estudio de los procesos de interacción de la radiación con la materia, y las técnicas e instrumentos relacionados con la detección de la citada radiación. Se analiza el fenómeno de la interacción de fotones con energías de 60 keV a 1.4 MeV, con diversos átomos y moléculas. Se pretende definir un marco teórico y metodológico en el que los fenómenos físicos y las propiedades de la materia que inciden en la gammagrafía longitudinal electrónica queden establecidos.

2) Se reseñan los resultados obtenidos de una búsqueda bibliográfica y de una investigación experimental, orientados a obtener una relación matemática entre la densidad y la atenuación de la radiación a través de la materia. Además, para lograr una visión global fué necesario estudiar algunos tópicos de la Física Atómica y Molecular, en particular los que relacionan la densidad electrónica con la densidad de los materiales. La relación obtenida requiere como variables: el coeficiente de absorción, la composición química del material y la energía de la radiación empleada.

Durante la experimentación se hizo necesario modificar algunos parámetros para comprobar la validez de la relación matemática empleada.

3) Utilizando la relación previamente expuesta se determina la densidad del material como función de la atenuación de la intensidad de la radiación medida como la parte del espectro correspondiente al efecto fotoeléctrico del detector de NaI(Tl). Además, a partir del coeficiente de atenuación se obtienen los coeficientes de atenuación lineal y de atenuación másico.

4) Para cumplir el objetivo fundamental antes mencionado, se exponen los requerimientos teórico-experimentales del diseño y se describe el equipo construido para realizar en forma práctica la Gammagrafía Longitudinal Electrónica en objetos de dimensiones industriales.

5) Se utilizó el equipo construido y la metodología desarrollada para la detección de fallas en diversos tipos de estructuras metálicas o de concreto. Finalmente, a manera de evaluación del equipo y de los criterios de interpretación de resultados se aplicó el método desarrollado en los puntos 3) y 4) a un caso típico como es el estudio de una columna de concreto, del edificio de Investigación Básica de Procesos (IBP) del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) y se reconstruyó dicha columna a partir de las mediciones obtenidas.

CONTENIDO

1 ANTECEDENTES	1
2 RADIATIVIDAD	11
2.1 RADIACION ALFA	11
2.2 RADIACION BETA	19
2.3 RADIACION GAMMA	25
3 INTERACCION DE LA RADIACION GAMMA CON LA MATERIA ...	28
3.1 EFECTO FOTOELECTRICO	28
3.2 EFECTO COMPTON	32
3.3 PRODUCCION DE PARES	35
4 ATENUACION DE LA RADIACION	38
4.1 ATENUACION DE LA RADIACION ALFA	38
4.2 ATENUACION DE LA RADIACION BETA	41
4.3 ATENUACION DE LOS RAYOS X	43
4.4 ATENUACION DE LA RADIACION GAMMA	45
4.5 BLINDAJES	50
5 OBTENCION DE LA DENSIDAD POR MEDIO DE LA RADIACION GAMMA	53
5.1 MARCO TEORICO	53
5.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL	59
5.3 CONCLUSIONES	64
6 USO DE LA PROPIEDAD DE ATENUACION PARA REALIZAR GAMMAGRAFIA LONGITUDINAL ELECTRONICA	66
6.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE GAMMAGRAFIA LONGITUDINAL ELECTRONICA	68
6.2 DESCRIPCION DE LOS INSTRUMENTOS UTILIZADOS EN EL EQUIPO	70
6.3 APLICACIONES	74
6.3.1 GAMMAGRAFIA DE UNA COLUMNA DE CONCRETO	75
6.3.1.1 RESULTADOS Y ANALISIS DE DATOS	78
6.4 CONCLUSIONES	92
7 CONCLUSIONES	94

INDICE DE TABLAS

TABLA 5.1 Datos usando una probeta de sección circular	60
TABLA 5.2 Datos usando una probeta de sección rectangular	61
TABLA 5.3 Comparación de los valores experimentales y teóricos	66
TABLA 6.1 Comparación de la longitud real y la medida en las gráficas	89

ANTECEDENTES

En el presente capítulo se describirán los descubrimientos e investigaciones realizadas sobre la radiación ionizante de alta energía; a este tipo particular de radiación se le ha dado el nombre de radiactividad. El concepto y la palabra de radiactividad fueron creados por Marie Curie, en 1898, para identificar los efectos externos de la transformación del núcleo de los átomos de ciertos elementos.

Es importante señalar tres descubrimientos logrados en los años que cerraron el siglo XIX y que tuvieron un efecto profundo sobre el progreso y el pensamiento científicos de la primera mitad del siglo XX. Estos descubrimientos fueron: los rayos X, por Roentgen en 1895; la radiactividad, por Becquerel en 1896, y la postulación de la naturaleza corpuscular de los rayos catódicos, por J.J. Thomson en 1897. En 1900 Planck introdujo el concepto fundamental del cuanto, a fin de explicar la distribución espectral de la radiación del cuerpo negro -denominada catástrofe ultravioleta- dado que la teoría clásica electromagnética no era capaz de describirla.

El descubrimiento de la radiactividad fue consecuencia directa de los rayos X o rayos Roentgen. Estos se producen en un tubo de descarga por la acción de los rayos catódicos que inciden en las paredes de vidrio del tubo. Así, los rayos X iban acompañados de fuerte luminiscencia del vidrio por lo que se especuló muchísimo sobre si esta luminiscencia o fosforescencia estaba asociada a la producción de rayos X. La sola posibilidad de que fuera así condujo a una intensa

búsqueda de substancias emisoras de Rayos X, que se vuelven fluorescentes o fosforescentes al incidir en ellas la luz solar.

Después del descubrimiento de los rayos X la atención de los físicos fue atraída por las radiaciones capaces de atravesar cuerpos opacos a la luz. Poincaré y Becquerel propusieron la hipótesis siguiente: La producción de rayos X es inseparable de la luminiscencia. Por lo que se proponen investigar si la luz fosforescente, emitida por los cristales, estaba acompañada de rayos X.

Henri Becquerel [11] había estudiado ya substancias fosforescentes, tales como el uranio y sus sales, las que expuestas a la luz solar y puestas después en la obscuridad, se volvían luminosas, emitiendo lentamente una parte de la energía que habían absorbido. Becquerel deseaba encontrar una relación entre la producción de rayos X y la fosforescencia visible. En su intento por comprobar su hipótesis encontró nuevas propiedades del uranio y sus sales. Por ejemplo, observó que al contacto con substancias activas, el aire se convertía en conductor eléctrico. Esta propiedad -ionización de los gases- permitió posteriormente determinar el grado de actividad de la substancia; el hecho les alentó a proseguir con sus experimentos para demostrar la identidad de los rayos de uranio y de los rayos Roentgen.

En la reunión de la Academia de Ciencias del 24 de febrero de 1896, Becquerel presentó una nota en la que anunciaba haber realizado experimentos con un cristal de sulfato doble de uranio y potasio, en forma de una delgada corteza transparente. En estos experimentos había tomado una placa fotográfica envuelta en papel negro, de un grueso tal que la exposición al sol durante un día no velaba la placa. Posteriormente colocó la sal fluorescente por fuera del

papel negro y expuso todo ello a la luz solar durante varias horas. Al revelar la placa apareció en ella, en negro, la silueta del cristal fluorescente. Además, al interponer una moneda o una placa de metal, en la cual se había recortado una figura entre el cristal y la placa, también aparecía su contorno en la placa. Becquerel interpuso una fina lámina de vidrio entre la sal fluorescente y la placa envuelta con papel negro, con el fin de excluir la posibilidad de alguna acción química de los vapores que pudieran producirse por calentamiento de la sal, como efecto de la radiación solar.

En la reunión de la Academia celebrada una semana después, Becquerel informó sobre un importantísimo progreso. El jueves y viernes anteriores había preparado experimentos análogos a los que había descrito al comienzo de esa semana. Pero, el sol apareció sólo de manera intermitente (normal en esa época del año) y por ello Becquerel había guardado en un cajón las placas fotográficas en su envoltura de papel, dejando sobre ésta las capitas cristalinas de la sal de uranio. Como el sol no salió en los días que siguieron, reveló las placas esperando hallar imágenes muy débiles. Por el contrario: las siluetas aparecieron con gran intensidad. Becquerel había descubierto que el efecto sobre la placa fotográfica era independiente del fenómeno de fluorescencia, señalando que este fenómeno puede percibirse transcurrida apenas una centésima de segundo. En esta comunicación hizo referencia a las radiaciones activas, sentando así las bases del término radiactividad usado por Marie Curie. Posteriormente informó que el propio uranio y todos los compuestos de éste que había examinado exhibían la misma propiedad, fueran fluorescentes o no.

Luego entonces, ¿Cuáles son las características principales que permiten distinguir en su totalidad los compuestos radiactivos de los no radiactivos?. Sabemos que los efectos eléctrico y fotográfico no los distinguen. Pero volvamos a fines del siglo pasado, donde encontramos que los primeros experimentos de Becquerel mostraron que el uranio metálico era más activo que sus compuestos. Esta conclusión la obtuvo cuando colocó uno y otros sobre la misma área, aproximadamente y además encontró que las radiaciones se debilitan al interponer láminas finas de aluminio, cobre y otros metales (posteriormente denominados absorbentes) entre la fuente de radiación y la placa fotográfica. La actividad, medida por métodos eléctricos, aumentaba con respecto a la cantidad de uranio en los elementos estudiados. Estos resultados son similares para el torio, cualesquiera que sean las cantidades expuestas. Los átomos de uranio y torio son detectables por los efectos descritos. Otro elemento emisor: el fósforo, difiere de los elementos radiactivos, pues el aire no se ioniza al contacto con sus compuestos. Actualmente se sabe que la actividad fosforescente del fósforo es consecuencia de su oxidación al ponerse en contacto con el aire.

Otra de las características de la actividad de los compuestos radiactivos es la de ser un fenómeno espontáneo y, en consecuencia, no es afectado por los diferentes agentes físicos conocidos (temperatura, presión, etc.).

Dos años después (1898), Picrrc y Marie Curie deciden estudiar el fenómeno que Becquerel había descubierto recientemente. Instalados en un viejo laboratorio (sin los aparatos necesarios), Marie Curie examina los diferentes elementos y los compuestos del uranio y encuentra que el torio posee también la propiedad de ionizar el aire.

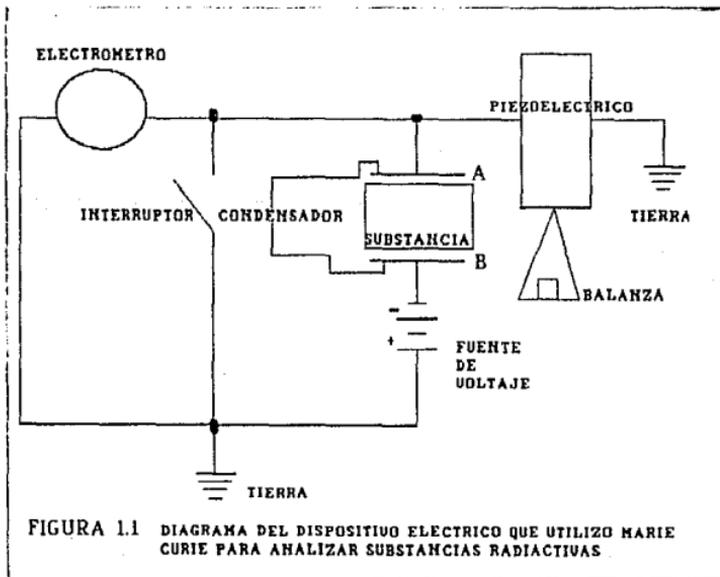
Con ayuda del método de medida eléctrica en conjunción con el fenómeno de piezoelectricidad, Marie Curie (11) dirigió su atención a la posible existencia de otros elementos radiactivos. El aparato con el cual examinó un gran número de substancias consistía, esencialmente, de un capacitor de placas paralelas con un diámetro de 8 cm y una separación de 3 cm. La placa inferior se conectó al polo negativo de una fuente de potencial, el polo positivo de la fuente se conectó a tierra; sobre la primera placa se colocaba una capa de polvo de la substancia ensayo, los espesores de esta capa fluctuaban entre 0.25 y 6 mm. La placa superior se conecta a un par de placas de un electrómetro de cuadrante y a un electrodo de un cristal piezoeléctrico de cuarzo (fig.1.1).

El instrumento antes descrito funciona como se expone a continuación:

Se coloca una substancia en el instrumento, si ésta es radiactiva ioniza el aire que circunda las placas del capacitor, la diferencia de potencial a la que está sujeto el capacitor produce una corriente en sus terminales (del orden de 10^{-11} A). Las placas del electrómetro, por efecto de esta corriente, adquieren un potencial eléctrico que es detectado por el galvanómetro (la aguja se desvía). Para compensar la desviación y llevar nuevamente la aguja a cero se colocan pesas sobre el cristal piezoeléctrico, quien genera un potencial contrario al de la corriente (por ionización). La masa agregada en un tiempo dado está en relación directa con la radiactividad de la substancia.

Con el fin de determinar si otros elementos exhibían el mismo fenómeno de radiactividad, hallado en el uranio, Marie Curie examinó con el equipo ya descrito, muchísimos compuestos químicos y gran número de minerales. Como

resultado de estos experimentos encontró que el torio era el único elemento que poseía una radiactividad del mismo grado que la del uranio (resultado al cual había llegado independientemente G.G. Smith (8), quien lo publicó unas semanas antes). Además Marie Curie mostró que la radiactividad de los compuestos de uranio y torio era proporcional a las cantidades de estos elementos en dichos compuestos y que era independiente de su estado físico o de su composición química. Llegó finalmente a la importante conclusión: La radiactividad es un fenómeno atómico.



El estudio de los dos elementos radiactivos, torio y uranio, conducirían a Marie Curie al descubrimiento del radio. Marie Curie halló que algunos minerales, en especial la pechblenda, la calcolita, la autunita y la carnotita presentaban actividades distintas. Concluyó que estaban relacionadas con el contenido de uranio y torio. Sin embargo, el hecho sorprendente fue que estos minerales eran más radiactivos que el propio uranio puro. Las medidas con estos minerales daban las siguientes corrientes (en unidades de 10^{-11} amperios): Uranio, 2.3; pechblenda (de diversas localidades), 1.6 a 8.3; calcolita, 5.2; autunita, 2.7 y carnotita, 6.2.

Si la radiactividad era un fenómeno atómico. ¿Cómo era posible que minerales que contenían uranio y torio fueran más radiactivos que el uranio puro? Para despejar esta incógnita, Marie Curie [10] preparó cristales de calcolita artificial -que es un fosfato doble de cobre y uranio- conocido también como tobernita. Esta calcolita artificial exhibió una radiactividad normal conforme a su composición; esto es, dos y medio veces menor que la del uranio. Después de analizar las sustancias, Marie Curie llegó a la conclusión de que estos minerales debían contener otro elemento radiactivo, más activo que el propio uranio.

Pierre y Marie Curie [10] se impusieron la tarea de aislar este elemento hipotético, del cual no se conocía otra propiedad más que su radiactividad. Sus métodos sólo pudieron basarse en los de la química, complementados por la observación de la radiactividad. Esta investigación fue el inicio y la primera aplicación de las técnicas denominadas radioquímica. De este modo, al medir la radiactividad del

compuesto y posteriormente de sus componentes químicos, se pueden seguir las sustancias radiactivas a través de todas las etapas del proceso de separación.

Por medio de este procedimiento se descubrieron dos nuevos elementos radiactivos, uno era químicamente similar al bismuto -por lo que al emplear un método de separación química, se separaba con él- el otro era químicamente similar al bario y por lo tanto, también se separaba con éste. Al primero lo llamaron polonio (en honor de Polonia, país natal de Marie Curie), al segundo, que habían descubierto en colaboración con G. Bemont, le dieron el nombre de radio. En la publicación donde informan del descubrimiento del radio comentan que, cuando colocaban polonio o radio cerca de una sal luminiscente ésta se volvía fluorescente.

Las cantidades obtenidas de estas dos sustancias radiactivas eran muy pequeñas. Aun así, con sus aparatos de medición -que para entonces poseían ya una alta sensibilidad- pudieron percibir la presencia de sus emisiones.

Para caracterizar algún elemento químico, los físicos cuentan con un método simple y muy sensible: El análisis espectral del elemento. El espectro está compuesto por las radiaciones monocromáticas emitidas por el elemento activo al ser excitado por medio de calor o descargas eléctricas.

Para estas fechas se había establecido el catálogo de longitudes de onda, en el espectro visible, correspondientes a todos los elementos conocidos. Demarcay -especialista del análisis espectral- examinó las sustancias radiactivas a solicitud de Pierre y Marie Curie. Demarcay encontró, cerca

del espectro perteneciente al bario, una longitud de onda nueva. Esta longitud de onda señalaba la presencia de un elemento aún no identificado, se trataba del radio.

Quedaba por aislar y determinar el peso atómico del radio, pero para esto era necesario trabajar sobre una cantidad apreciable de material en estado puro. La empresa era difícil, pues para obtener algunos decigramos de radio había que tratar dos toneladas de uranio.

La masa atómica del radio en las primeras mediciones resultó alrededor de 226, la actividad encontrada fue superior a los 6 órdenes de magnitud respecto a la del uranio.

El radio en el estado puro no fue obtenido sino años más tarde por Marie Curie y Debierne.

Un año después Debierne detecta la presencia de otro elemento radiactivo en la pechblenda, al que llama actinium y cuya actividad era comparable a la del radio.

¡El impulso estaba dado! Los investigadores contaban ya con un método que había probado su eficacia, en consecuencia la lista de los elementos radiactivos se enriqueció.

Al mismo tiempo que se investigaba para identificar los nuevos radioelementos en los minerales naturales de uranio y torio y precisar los procedimientos químicos más propios para la obtención de los elementos radiactivos ya conocidos, los físicos estudiaban el complejo problema de las radiaciones emitidas.

Se conocía la existencia de partículas pesadas que no podían ser deflectadas por medio de un campo magnético

débil. Rutherford, en 1903, usando un campo magnético poderoso logró desviar estas partículas, observando que éstas eran de carga positiva y similares al átomo de helio.

Se sabía que la propagación de los rayos X no era alterada por la acción de un campo magnético. No obstante, la experiencia sobre los rayos emitidos por una substancia radiactiva, colocada entre los polos de un electroimán, mostró que una parte de los rayos sí eran desviados. Se observó la mancha luminosa que provocó sobre una pantalla fluorescente. Se encontró que el haz se deflectó más en una dirección determinada cuando el campo era estable. La deflexión no era simple, el sentido de la desviación aseguraba la presencia de radiación de partículas rápidas con carga eléctrica negativa. La forma de la mancha mostraba que, si se suponían idénticas las partículas cargadas, su velocidad variaba entre grandes límites.

Röntgen examinó el poder penetrante de los rayos X interponiendo, entre la fuente y la pantalla fluorescente, cuerpos determinados con espesores mayores cada vez, hasta que finalmente llegaba a desaparecer la fluorescencia; por lo cual, se llegó a encontrar que el espesor del cuerpo estaba en relación con el poder absorbente del material.

Sin embargo, a pesar de los avances logrados, en el caso de la radiactividad el fenómeno es aún más complejo de lo que se suponía. La emisión del radio contiene un tercer tipo de radiación que sólo es atenuada por espesores aún mayores a los experimentados. Estas tres clases de radiación con poder penetrante se encuentran en la mayoría de las substancias radiactivas. Rutherford designó estas tres categorías de radiación con las letras griegas: alfa, beta y gamma (en orden ascendente de poder penetrante).

RADIATIVIDAD

La radiación corpuscular y electromagnética procedente de núcleos, ya se trate de la radiación alfa, beta o gamma, entra en interacción con la materia comunicando energía a los átomos y con ello produce el ascenso de electrones extranucleares a niveles de energía más altos dentro del átomo (excitación), o despoja al átomo de un electrón (ionización). Finalmente, toda la energía cedida en los casos de ionización es disipada en excitación atómica o molecular.

2.1 RADIACION ALFA.

La radiación alfa es la que más fácilmente frenan los sólidos, por ejemplo, una hoja de papel es suficiente para impedir su propagación.

Para identificar la radiación alfa se realizó lo siguiente, con una muestra de radio, se hizo pasar un haz colimado por un campo electromagnético perpendicular a la dirección del haz, se observa que una cierta porción del haz no se desviaba de su trayectoria original. Esta porción del haz que no es afectada fue originalmente llamada radiación alfa.

En un experimento para profundizar sobre la naturaleza de la radiación alfa, P. Villard hizo pasar la radiación a través de varias placas fotográficas y aunque gran parte de la radiación fue absorbida por la primera capa, existía una fracción que penetraba por completo en las demás placas,

activando la emulsión y trazando una trayectoria, ya que para entonces no se conocía aún la existencia de la radiación gamma.

Rutherford y Marie Curie estudiaron también la absorción de la radiación alfa en materiales en estado gaseoso, para lo cual usaron hojas de aluminio extremadamente delgadas a las que midieron la conductividad eléctrica que la radiación alfa provocaba en el aire después de atravesar el metal.

La radiación del polonio presenta la particularidad de contener, en forma predominante, radiación alfa. Esta produce -como las otras radiaciones- fosforescencia en ciertas sustancias. Si se coloca una pantalla fluorescente junto a este elemento y se aleja paulatinamente del elemento radiactivo, observaremos que su luminosidad disminuye y desaparece bruscamente cuando se encuentra aproximadamente a 4 cm de él.

La distancia que viaja la radiación alfa varía con la naturaleza del gas absorbente y también con la presión, es decir, con la mayor o menor densidad de moléculas del gas.

De estas experiencias se dedujo que el poder absorbente aumenta con el espesor del material que tiene que atravesar la radiación alfa. Marie Curie, por lo tanto, llegó a pensar que se encontraba en presencia de partículas, dado que la radiación alfa pierde progresivamente su energía.

Bragg continuó las investigaciones sobre las características de absorción de la radiación alfa en los gases. Midió la ionización resultante en las nubes de gas de baja densidad al paso del haz. En un experimento este gas estaba delimitado por dos conductores que podían moverse conjuntamente, acercándolos o alejándolos de la fuente, el

conductor inferior es una reja que permite el paso del haz, el otro conductor es similar a un electroscopio, es decir, captura los iones producidos cuando se manifiesta entre ellos una diferencia de potencial.

En la fig.2.1 se representa gráficamente el resultado del experimento hecho con polonio en aire a presión normal. Se puede observar que la curva de comportamiento (corriente-distancia) manifiesta que la ionización aumenta con la distancia, hasta llegar a un máximo a partir del cual la corriente disminuye rápidamente.

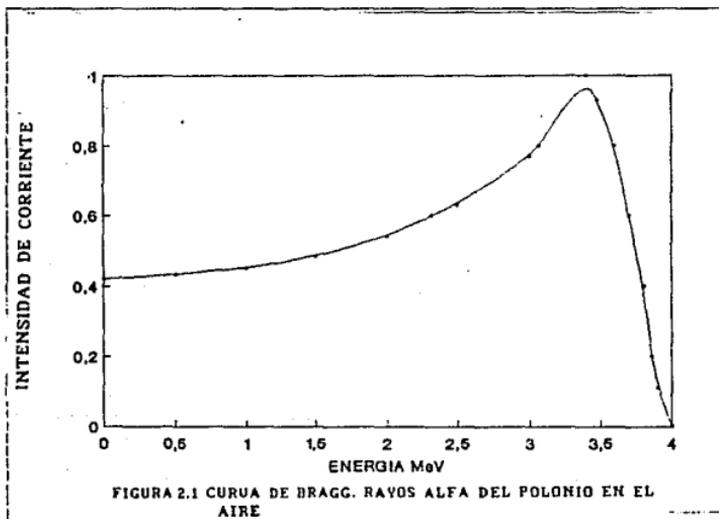
Utilizando radio en lugar de polonio se encuentra que la curva experimental presenta muchos máximos, lo que muestra la complejidad del haz emitido. Se sabe que éste contiene cuatro grupos de rayos de trayectorias diferentes, cuyos efectos se superponen y a los que se debe la complejidad referida.

A fines de 1902 los investigadores conocían ya algunas propiedades de la radiación alfa. Entre otras, se había comprobado que se propagan en línea recta, sin embargo no obtuvieron resultados apreciables al pretender variar su trayectoria por medios magnéticos, porque los campos magnéticos que usaban eran poco intensos.

En 1903 Rutherford [4] realiza un experimento con el fin de determinar la naturaleza eléctrica de la radiación alfa. Para llevarlo a cabo utiliza un campo magnético poderoso y una fuente intensa de radio. Explicado brevemente, el experimento es como sigue: un haz colimado penetraba a una cámara de ionización, en donde los iones formados eran capturados. Como la cámara tiene poca longitud algunos iones

reencuentran las paredes de ésta y ahí son absorbidos. Cuando la corriente pasa por el electroimán es observada en un electroscopio que está conectado a la cámara.

Con este experimento Rutherford concluyó que la radiación alfa son partículas con carga eléctrica positiva, y determinó la razón carga a masa (e/m).



Estos dos resultados: 1) la radiación alfa son partículas cargadas positivamente y 2) la razón e/m , fueron de una importancia capital para la comprensión de los fenómenos radiactivos. A partir de éstos llegó a encontrar que la radiación alfa transporta electricidad positiva a una velocidad de aproximadamente 20,000 km/s, velocidad análoga

a la del haz colimado. El valor de c/m , 6300 unidades electromagnéticas (UEM)/gramo, era bastante conocido. Es posible determinar por la comparación de los valores encontrados de e/m , de elementos conocidos, los tipos de átomos ionizados que constituyen la radiación alfa; desde luego esta conclusión no era satisfactoria. Se calculó, dada la precisión en las mediciones que en estos tiempos se tenía que la radiación alfa se encontraba entre el hidrógeno y el helio.

La duda fue despejada por los experimentos de Ramsay y Soddy, quienes encontraron las líneas características del helio en el espectro del gas liberado por una solución de sal de radio.

Posteriormente Debierne encuentra que el actinio y el polonio producen helio.

La evidencia encontrada por diversos investigadores hacía más probable que la radiación alfa fueran iones de helio con dos cargas positivas. Rutherford es quien comprueba que realmente es así.

A partir de entonces se pudo dar una explicación de la emisión de radiación alfa por los radioelementos: Son iones de helio con dos cargas positivas, que escapan con velocidades del orden de 20,000 km/s.

Se comprende entonces por qué la penetración de las partículas alfa en un gas determinado aumenta cuando la presión o el número de moléculas por unidad de volumen disminuye. Así pues, los inevitables choques dan como resultado la ionización de las moléculas del gas. Se pueden comparar los mencionados choques entre iones positivos y moléculas, con los existentes entre electrones y átomos. Una

pequeña parte de la energía de traslación de los rayos alfa se pierde en las colisiones, lo que libera electrones. Los electrones así expulsados tienen una escasa energía. La energía perdida está en relación con la naturaleza de las moléculas o de los átomos con que chocan, quienes, sin embargo, generalmente mantienen ligados sus electrones orbitales.

Las trayectorias de la radiación alfa dentro de un campo electromagnético dado, varían de un elemento emisor a otro, esto significa que las velocidades de expulsión de iones de helio difieren de un elemento a otro.

Podemos afirmar, apoyados en lo antes expuesto, que la radiación alfa está compuesta por iones de helio en movimiento; si se efectúa el siguiente experimento se pueden observar las trayectorias de Brouillard de los iones mencionados: se coloca una fuente radiactiva en una cámara de Wilson. Consecuentemente existirá una interacción entre la radiación alfa y las moléculas encerradas en la cámara, por lo que se harán visibles las trayectorias de Brouillard. Estas trayectorias son, en efecto, las trayectorias de las partículas alfa.

Actualmente, y gracias al progreso de las técnicas de aceleradores de altas energías, es posible producir artificialmente átomos de helio con dos cargas positivas (heliones). Los heliones acelerados en el campo eléctrico producido por 1 MV adquieren la energía suficiente para recorrer en el aire una distancia de 1 cm. Los efectos de estos iones de helio creados artificialmente son, en todo caso, semejantes a los producidos por las partículas alfa.

Crookes [10] había observado la fosforescencia intensa que provoca la radiación alfa en el sulfuro de zinc. Al observar Crookes la superficie luminiscente con una lupa apreció un conjunto de puntos brillantes que aparecían y desaparecían rápidamente, observó también que su distribución variaba de un instante a otro, dando la superficie un aspecto estrellado. La aparición de cada punto (brillante) corresponde al choque de una partícula alfa con la superficie. Crookes construyó, apoyado en estos resultados, un aparato que llamó spintariscopeo. La fuente de partículas alfa se obtenía sumergiendo el extremo de una aguja en una solución de sal de radio. Al reducir la substancia emitente los centellos se hacían menos frecuentes. A muy bajas concentraciones la frecuencia de llegada de los heliones es mínima, a tal grado que se puede distinguir el arribo de una sola partícula.

Rutherford y Geiger utilizaron otro procedimiento para detectar partículas alfa en un gas. Se efectuó de la siguiente manera: se tiene un filamento conductor aislado, colocado longitudinalmente dentro de un recipiente cilíndrico metálico. Se evacúa el gas, creando un vacío de pocos centímetros de mercurio. Se aplica una diferencia de potencial de algunos milivolts entre el cilindro y el filamento. En estas condiciones se observa que cuando una partícula alfa penetra en el cilindro a través de una pequeña ventana, produce iones al chocar con las moléculas del gas encerrado en el recipiente. En consecuencia, la ionización se amplifica en forma considerable; de hecho, los iones formados por la acción del campo eléctrico adquieren suficiente velocidad para servir como agente ionizante, por lo que las cantidades de carga eléctrica recolectada por los electrodos son incomparablemente más grandes que la producida por la partícula alfa. Así, es posible medir la por

medio de un electrómetro o utilizando un amplificador de audio, hacerse audible en una bocina. De una u otra maneras se pueden observar los arribos individuales y sucesivos de la radiación alfa, y aun contarlos.

2.2 RADIACION BETA.

La porción del haz de una fuente radiactiva que se defleca fuertemente por un campo magnético, perpendicular al haz, es llamada radiación beta. Se observa que son partículas cargadas negativamente y se identifican como electrones emitidos con una velocidad muy alta por el núcleo de los átomos de la fuente; son muy parecidos a los rayos catódicos de un tubo de descarga y su energía es mayor que la observada en los rayos catódicos.

Existen tres tipos de transformación beta: 1) emisión de un electrón, 2) emisión de un positrón y 3) captura de un electrón (EC).

Cuando un núcleo tiene un exceso relativo de neutrones existe una conversión de un neutrón a un protón, a este proceso se le llama emisión de un electrón, que se representa por:



De donde

n = neutrón

p = protón

β^- = electrón

$\bar{\nu}$ = antineutrino

Cuando un núcleo tiene un exceso relativo de protones existe una conversión de un protón a un neutrón, a este proceso se le llama emisión de un positrón.



De donde

β^+ = positrón

ν = neutrino

Captura de electrón.



La carga electrónica asociada a la partícula beta se observa por medio de un electrómetro. Cuando la partícula beta es emitida por el núcleo, la carga positiva de éste se incrementa, es decir, se incrementa el número atómico.

La radiación beta es más penetrante que la radiación alfa, esto es, las partículas alfa más energéticas son completamente absorbidas en unos centímetros de aire, mientras que, las partículas beta describen trayectorias de varios metros y pueden atravesar láminas de aluminio de varios centímetros de espesor. El número total de partículas beta en el haz, así como su energía, decrecen progresivamente al pasar a través de varias placas sucesivas.

La disminución en la energía de la partícula beta se debe a la producción de iones a lo largo de la trayectoria. El número de iones por centímetro aumenta conforme disminuye la velocidad o la energía cinética de la partícula beta. Por ejemplo, para electrones con energías de 2 McV se observan 25 pares por centímetro, 200 pares por centímetro para electrones con energías de 40 keV (el potencial de ionización del oxígeno y nitrógeno es de 14 kV). La ionización secundaria genera un gran número de iones secundarios por centímetro, la cual puede ser mayor que la

generada por los iones primarios, además, parte de la energía de ionización secundaria puede excitar moléculas y átomos.

Sin embargo existe un efecto que fué difícil de explicar: las partículas beta tienen un espectro continuo de energías, hasta un valor máximo característico de cada radionúclido.

Se han efectuado medidas directas del número total de electrones emitidos y se observa que está en equilibrio radiactivo con sustancias emisoras de alfas cuyas emisiones pueden ser contadas. La ecuación

$${}^{210}\text{Bi} \rightarrow {}^{210}\text{Po} + \beta^- + \bar{\nu} + \alpha \quad 2.5$$

muestra que invariablemente una partícula beta es emitida por cada átomo transformado.

La diferencia de energía entre el átomo padre y el átomo producto es la misma para todo núcleo. Si todos los núcleos de Bi-210 son idénticos y todos los núcleos productos (Polonio) son idénticos, las leyes de conservación requieren que en la transformación del Bi-210 se emitan partículas beta con la misma energía. Observándose que esta energía, corresponde al máximo de energía del espectro continuo de las partículas beta liberada del núcleo.

La distribución continua de energía observada es difícil de explicar. Bajo la hipótesis que únicamente los estados de energía que caracterizan al núcleo son discretos, sin embargo, existen dos posibilidades permisibles en la distribución continua, la primera es abandonar la ley de conservación de la energía en este proceso. Otra hipótesis propone que una parte de la energía liberada por la transición de un estado definitivo (i.e. un estado estable)

de energía del núcleo, es portada por la partícula beta y el resto por algún tipo de radiación desconocida. Para satisfacer esta hipótesis, Pauli, en 1931, postuló que la emisión de una partícula beta es acompañada por una partícula neutra. Esta partícula, llamada neutrino, cuyas propiedades se seleccionan de tal forma que la emisión beta ocurra sin violar las leyes de conservación (energía, carga, masa, momento, etc). El neutrino fue postulado inicialmente como partícula neutra y masa cero.

El neutrino debe tener carga cero debido a que la carga se conserva en la transformación beta. El balance de energía-masa es exacto en la transformación beta, por consecuencia, los neutrinos que acompañan a las partículas beta deben tener una masa en reposo de aproximadamente del 1% de la masa del electrón, aunque probabilísticamente es igual a cero.

Posteriormente se observó que la masa inercial del neutrino influye en la forma del espectro propio de las partículas beta en la vecindad de la energía máxima. Se observó también que la teoría y el experimento coinciden en que el neutrino tiene masa en reposo igual a cero.

Para que se cumplan las otras leyes de conservación se requiere que: en la transformación beta los núcleos padre y producto tengan el mismo número másico, la misma estadística y el momento angular nuclear difiera únicamente por un múltiplo de \hbar . Como el electrón beta tiene un spin $\hbar/2$ y una estadística de Fermi-Dirac, el neutrino debe cumplir la estadística Fermi-Dirac y tener un espín intrínseco de $\hbar/2$.

Para toda partícula elemental, excepto para el neutrino, los datos obtenidos experimentalmente son adecuados para el nacimiento y muerte de la partícula, es decir, durante la

producción e interacción de la partícula con la materia. El nacimiento y existencia de los neutrinos es observado en la captura del electrón de retrocesos de radiación beta. Han existido algunos obstáculos en la detección de las interacciones de los neutrinos con la materia.

La única interacción que puede ser esperada es la captura inversa del electrón. En este proceso el neutrino puede ser capturado por un protón o neutrón nuclear y un electrón o positrón puede ser emitido, cumpliendo con las leyes de la conservación de la carga, la masa, la energía, el spin y la estadística. El proceso de captura inversa del electrón se escribe de la siguiente manera:



Si existe una diferencia entre neutrino y antineutrino entonces la ecuación 2.2 representa la captura del antineutrino y la ecuación 2.3 la captura del neutrino.

En 1932, después del descubrimiento del neutrón se aclaró que por las características conocidas de la transformación beta, se trata esencialmente de un proceso interno del núcleo en el que un neutrón se transformó en un protón. En 1934 Fermi utilizó la hipótesis de Pauli del neutrino, para encontrar el tiempo de vida y la forma del espectro de los emisores β^- , a este hecho se le considera un éxito de la Teoría Cuántica. Como consecuencia del descubrimiento de la radiactividad artificial se llega a la existencia de emisores positivos. El espectro β^+ es correctamente descrito por la formulación original de Fermi para la transformación β^+ , dado que la carga nuclear Z del

producto desintegrado se toma como negativo ($-Z$) para la transformación β^+ , mientras que para el decaimiento β^- se toma como positivo.

El electrón y el positrón de la transformación β pueden ser representados como la transformación de un nucleón en el núcleo. Se expresa como:

$$p \rightarrow n + \beta^+ + \nu \quad 2.2$$

$$n \rightarrow p + \beta^- + \bar{\nu} \quad 2.1$$

En donde β^- es el electrón, β^+ el positrón en la teoría del electrón de Dirac. La diferencia entre neutrino y antineutrino es significativa en el caso de doble transformación β .

2.3 RADIACION GAMMA

La radiación gamma está constituida por ondas electromagnéticas de idéntica naturaleza que la de los rayos X; éstos difieren en que el origen de la radiación gamma proviene del núcleo del átomo y los rayos X del cambio de nivel de los electrones orbitales.

Rutherford usó un campo magnético poderoso y encontró que una porción de la radiación era absorbida y ligeramente desviada. El experimento hizo patente que la radiación consiste de un flujo de partículas con carga positiva (radiación alfa), permaneciendo fija otra porción sin desviar. A esta parte de la radiación emitida se le llamó radiación gamma.

La longitud de onda de la radiación gamma fue determinada aplicando técnicas de los rayos X, empleadas con el mismo fin. La radiación con longitud de onda λ será reflejada por un cristal a un ángulo de incidencia θ , si la distancia interplanar d del cristal satisface la ley de Bragg:

$$\lambda = 2d \sin \theta$$

Para verificar la naturaleza ondulatoria de la radiación gamma se usó este método, con energías del orden de 100 keV. Como para energías mayores la longitud de onda de la radiación gamma se hace muy pequeña y no satisface la ley de Bragg, entonces es estudiada por medio de su absorción en elementos específicos, tales como el plomo u observando el comportamiento de los electrones ionizados o liberados de los átomos producidos por la radiación gamma en los campos eléctrico y magnético.

La radiación gamma se origina en el núcleo excitado de átomos de uranio, radio y polonio. Es la manifestación de la diferencia de energías entre el estado inicial de excitación y un estado de menor energía, que puede o no ser el estado base. Entre el estado inicial y el estado base existen varios niveles posibles de energía. En tal caso la transición original puede ser seguida por una o más emisiones gamma adicionales, en rápida sucesión, hasta que el núcleo, finalmente, queda en el estado base. El paquete de radiación gamma, emitido como consecuencia de una transición, se llama fotón.

En 1901, Planck, para explicar la forma de la curva de distribución de la energía radiante de un cuerpo negro, introdujo el concepto de atomicidad de la energía en los procesos de absorción y emisión. En 1905 Einstein explicó el fenómeno fotoeléctrico; se encuentra que la energía W del fotón que hace impacto con un átomo, desaloja un electrón y cede toda su energía cinética. La ecuación es:

$$W = h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + P$$

En donde:

- h = constante universal de Planck
- ν = frecuencia del fotón
- m = masa del electrón liberado
- v = velocidad del electrón liberado
- P = energía de arranque del electrón al átomo

Esta relación fue verificada experimentalmente 7 años después, es decir, en 1912.

En 1906 Einstein formuló más ampliamente la noción corpuscular de la luz, estableciendo que: "Cualquier cantidad de energía -sin importar su forma- representa una masa, la cual es igual a su misma energía dividida por c^2 ; en donde c es la velocidad de la luz y la cantidad de energía en movimiento representa el momentum". Aplicó el término fotón a un tren de onda o paquete de radiación electromagnética en movimiento, de energía W igual a:

$$W = h \frac{c}{\lambda} = h\nu = mc^2$$

y momentum:

$$\frac{W}{c} = \frac{h}{\lambda} = \frac{(h\nu)}{c} = mc$$

La noción corpuscular de la radiación electromagnética fue confirmada por los experimentos de A.H. Compton; por lo que desde entonces se conoce como "efecto Compton".

INTERACCION DE LA RADIACION

GAMMA CON LA MATERIA

La radiación gamma puede perder toda su energía creando pares electrón-positrón. Las interacciones de las partículas alfa y beta se estudian mejor en los gases, en tanto que, los métodos de estudio de las interacciones de la radiación electromagnética se basan en sólidos con número atómico grande como yodo o germanio. Se puede hacer que los fotones de baja energía entren en interacción con los gases nobles más pesados, a su vez, los rayos gamma de alta energía provocan la emisión de fotoelectrones de láminas metálicas y causan también efectos observables debidos a fotoelectrones, electrones de rebote y pares de electrones en un cristal, por ejemplo, de yoduro de sodio.

La disminución de la intensidad de la radiación gamma al pasar a través de la materia será explicado por medio de tres efectos de interacción entre la radiación y la materia, efectos que a su vez son los más importantes para energías entre 10 keV y 5 MeV; estos son: El EFECTO FOTOELECTRICO, El EFECTO COMPTON y la PRODUCCION DE PARES.

3.1 EFECTO FOTOELECTRICO

Al hacer pasar la radiación gamma a través de un gas éste se convierte en conductor eléctrico. Esto significa que los iones producidos por la radiación gamma son electrones liberados de las órbitas de los átomos del gas. Los átomos permanecen corto tiempo como iones positivos porque capturan otros electrones. Se llama fotoelectrón al electrón que cede

toda su energía a la radiación gamma (fig.3.1). El balance de energía aplicado al caso fotoelectrón fue propuesto primero por Einstein. La energía del fotón incidente es:

$$h\nu = P + \frac{1}{2}mv^2 \quad 3.1$$

Como la radiación gamma es muy energética, es decir, su energía es mucho mayor que la energía de amarre (P) del electrón con el átomo, la energía cinética del electrón liberado es comparable a la del fotón.

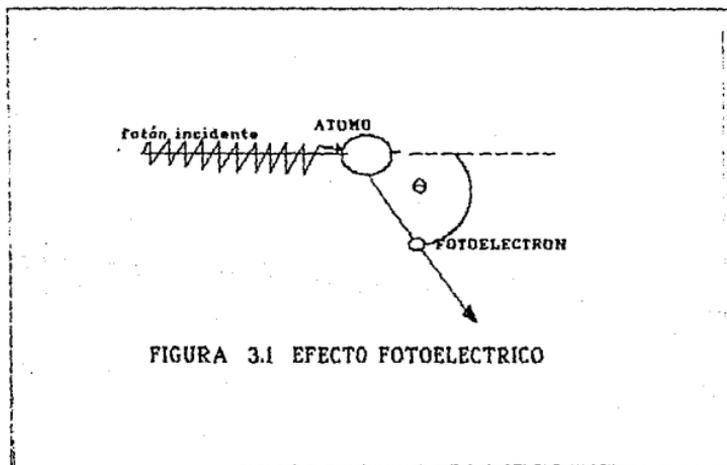


FIGURA 3.1 EFECTO FOTOELECTRICO

El poder de absorción para la radiación gamma de energía dada, aumenta rápidamente con el número atómico del

absorbedor. Para elementos pesados y emisiones de baja energía, el efecto fotoeléctrico contribuirá en mayor medida a la absorción.

Durante el estudio de la absorción de la radiación gamma para energías de 0.5 MeV- en un elemento ligero, Sauter [4,6] desarrolló una expresión teórica para el coeficiente de absorción fotoeléctrico atómico τ_{ph} . Relacionando el número atómico (Z), la energía de amarre (P) y la constante C con valor aproximado de $23 \cdot 10^{-40}$ se tiene que:

$$\tau_{ph} = \frac{(CZ^5)^2}{P} \quad 3.2$$

Sauter por medio de un desarrollo empírico logró extenderla a elementos pesados y altas energías

Heitler [4,6] concluyó que para los casos en donde se usa plomo como absorbedor y se radia con fotones de alta energía, el coeficiente de absorción fotoeléctrico es 2.2 veces el valor obtenido de la ecuación anterior.

El momentum de un fotón de energía $h\nu$ es igual a $\frac{(h\nu)}{c}$. Analizando las siguientes ecuaciones de conservación cuando la energía de amarre es cero se tienen las siguientes relaciones:

Para la energía:

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 \quad 3.3$$

y para el momentum:

$$\frac{(h\nu)}{c} = mv \quad 3.4$$

Si se divide la ecuación 3.1 entre la 3.2 se obtiene $v=2c$ lo cual, lleva a un absurdo en la teoría de la relatividad especial. De aquí que el efecto fotoeléctrico sólo ocurra con electrones orbitales, es decir, cuando la energía de amarré es mayor a cero.

Para determinar la energía de la radiación gamma por medio del efecto fotoeléctrico se han realizado algunos experimentos exitosos utilizando una cámara de Wilson. A manera de ejemplo se menciona uno de ellos: dentro de la cámara se coloca una hoja delgada de plomo. Se aplica un campo magnético poderoso y al bombardearla con rayos gamma los fotoelectrones liberados (de la placa) describen trayectorias circulares.

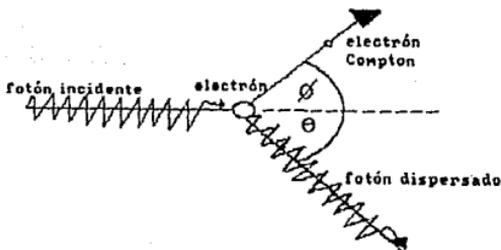


FIGURA 3.2 EFECTO COMPTON

3.2 EFECTO COMPTON

En 1922 A.H. Compton llevó a cabo un experimento muy importante. Compton mostró más allá de toda duda e independientemente del efecto fotoeléctrico que los fotones deben ser considerados como corpúsculos que presentan masa y momentum, de igual manera que lo hacen las partículas ordinarias, probando experimentalmente la propuesta de Einstein en 1906.

El efecto Compton describe la colisión entre un fotón (con longitud de onda λ o frecuencia ν y velocidad c) y un electrón orbital o libre. El electrón adquiere una velocidad v con ángulo ϕ respecto a la dirección del fotón. El fotón incidente cede energía, resultando un nuevo fotón de menor energía y frecuencia ν' que es lanzado en una dirección θ respecto del fotón original (fig.3.2).

Utilizando la teoría de la relatividad donde el momentum y la energía para el electrón se definen como:

$$m = m_0(1 - \beta^2)^{-1/2} \quad 3.5$$

$$p = m_0 v(1 - \beta^2)^{-1/2} \quad 3.6$$

$$E = mc^2 = m_0 c^2 \quad 3.7$$

En donde:

m_0 = masa inercial

m = masa en movimiento

p = momentum

E = energía

β = razón de la velocidad del electrón con respecto a la velocidad de la luz

para el fotón se tienen expresiones similares, que a continuación se transcriben:

$$m_{\text{rel}} = \frac{(h\nu)}{c^2} \quad 3.8$$

$$p_{\text{rel}} = \frac{(h\nu)}{c} \quad 3.9$$

$$E_{\text{rel}} = (h\nu) \quad 3.10$$

$$p_{\text{rel}} = \frac{(h\nu')}{c} \quad 3.11$$

$$E_{\text{rel}} = (h\nu') \quad 3.12$$

Aplicando las leyes de conservación de la energía y del momentum en las direcciones paralela y perpendicular al fotón incidente (fig. 3.2), se obtienen las tres ecuaciones independientes siguientes:

Energía:

$$h\nu = h\nu' + mc^2 - m_0c^2 \quad 3.13$$

Momentum:

paralelo a la dirección del fotón incidente

$$h\frac{v}{c} = m_0v(1-\beta^2)^{-1/2} \cos\phi + h\frac{v'}{c}(\cos\theta) \quad 3.14$$

perpendicular a la dirección del fotón incidente

$$m_0v(1-\beta^2)^{-1/2} \sin\phi = h\frac{v'}{c} \sin\theta \quad 3.15$$

Cork [4] propone una solución clásica de estas ecuaciones que es de particular interés en la espectroscopía de rayos X, dando el cambio en la longitud de onda en la dispersión como:

$$\lambda' - \lambda = 0.024(1 - \cos\theta) \quad 3.16$$

$$\Delta\lambda = 0.048250\pi^2 \left(\frac{\theta}{2}\right) \quad 3.17$$

Es evidente que el cambio de longitud de onda para un ángulo dado es independiente de la energía incidente. En la dirección hacia adelante ($\theta = 0$) no hay disminución en la energía del fotón.

Para cada fotón dispersado en un ángulo θ hay una partícula de retroceso en un ángulo $-\phi$ (para un fotón dispersado en dirección contraria $-\theta$ el electrón de Compton irá en dirección $-\phi$) Así:

$$\lambda = \frac{hc}{W} \quad 3.18$$

y

$$\lambda' = h \frac{c}{W'} \quad 3.19$$

en donde W y W' son las energías del fotón antes y después de la dispersión, efectuando la diferencia entre λ' y λ para $\theta = 180$ se encuentra que:

$$\lambda' - \lambda = hc \left(\frac{1}{W'} - \frac{1}{W} \right) = 0.0482 \quad 3.20$$

tal que

$$W' = \frac{W}{(1 - 0.9W)}$$

3.21

En esta ecuación W está expresada en MeV.

La energía de la radiación gamma se encuentra observando la trayectoria del electrón Compton en la misma dirección del haz original (en una cámara de Wilson). Para este propósito se emplean hojas de aluminio o carbón y únicamente son seleccionadas las trayectorias que están dentro de un ángulo sólido pequeño.

3.3 PRODUCCION DE PARES

En 1932, después de hacerse varias mediciones de coeficientes de absorción de la radiación gamma de alta energía, en elementos como: aluminio, cobre y plomo, se encontró un coeficiente de absorción diferente al de los efectos Compton y fotoeléctrico. Este se explicó como una desconocida contribución del núcleo.

A este tercer tipo de interacción que se analizará y que tiene lugar en la incidencia de fotones, con energías mayores que 1.02 MeV, se conoce como producción de pares; el fotón es completamente absorbido en la vecindad de un núcleo y en su lugar aparece un par positrón-electrón (fig.3.3), su energía total es:

$$h\nu = (T' + m_0c^2) + (T + m_0c^2) \quad 3.22$$

T' y T son, la energías cinéticas del electrón y del positrón respectivamente y $m_0c^2 = 0.51$ MeV (energía correspondiente a la masa en reposo del electrón). El fenómeno ocurre únicamente en el campo de las partículas cargadas.

En 1934, Dirac delinea la Teoría relativista del electrón, que da una descripción exacta del fenómeno de la producción de pares. El desarrollo se hizo considerando estados ordinarios de energía positiva, siguiendo la noción de existencia de estados de energía negativa. En esta Teoría se considera a los positrones como huecos y no como cascadas de electrones con estado de energía negativa. De hecho, el electrón se crea en un estado de energía positiva, y llega a ser observable.

El hueco en la región de energía negativa también es observable y tiene las mismas propiedades del electrón, excepto que su carga es positiva. La energía total del hueco y el electrón es igual a la energía del fotón incidente $h\nu$.

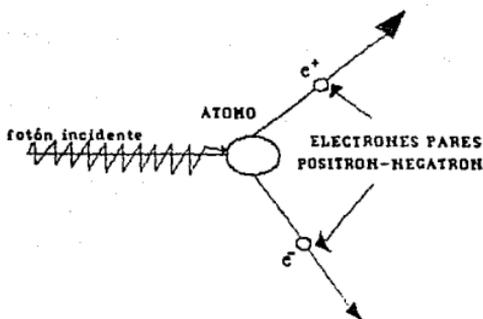


FIGURA 3.3 PRODUCCION DE PARES

La producción de pares está íntimamente relacionada con el fenómeno Bremsstrahlung (ver apéndice A). En este fenómeno el electrón sufre una transición entre dos estados, ambos de energía positiva y como resultado un fotón es emitido en lugar de ser absorbido.

Matemáticamente las teorías de los dos fenómenos son idénticos y usualmente se tratan conjuntamente. Los resultados numéricos muestran gran similitud en ambos fenómenos. Por ejemplo, la sección transversal para ambos fenómenos puede ser del orden de $(Z^2/137)(e^2/m_0c^2)^2$.

Bethe y Heitler [4] obtuvieron una solución general de la mecánica cuántica usando ondas planas para ambos electrones. Las condiciones de la primera aproximación de Born $Z/137\beta \ll 1$ es asumida para mantener ambas partículas unidas. Consecuentemente, la teoría de Bethe y Heitler es errónea cuando cada electrón tiene un descenso de energía (generalmente también resultan de ella secciones transversales muy grandes).

Para un quantum incidente de muy alta energía la distribución angular del positrón y electrón es principalmente hacia adelante. El ángulo promedio entre el quantum y los electrones creados es del orden de m_0c^2/T , para $T \gg m_0c^2$ las energías son del orden de $2m_0c^2$ para los fotones incidentes, la distribución angular es complicada y la dirección hacia adelante es menos marcada.

ATENUACION DE LA RADIACION

Un factor importante que se aplicará en éste y en los capítulos posteriores es la atenuación de la radiación. Es importante tener en cuenta este tema por varias razones. Primera, la atenuación de la radiación es necesaria para el diseño de blindajes para protección del personal y minimizar la radiación de fondo. Segunda, se usa para determinar la penetración de la radiación en el detector. Tercera, los cálculos de la atenuación son necesarios para el uso apropiado de los radioisótopos (en estos se incluyen la densidad y el espesor).

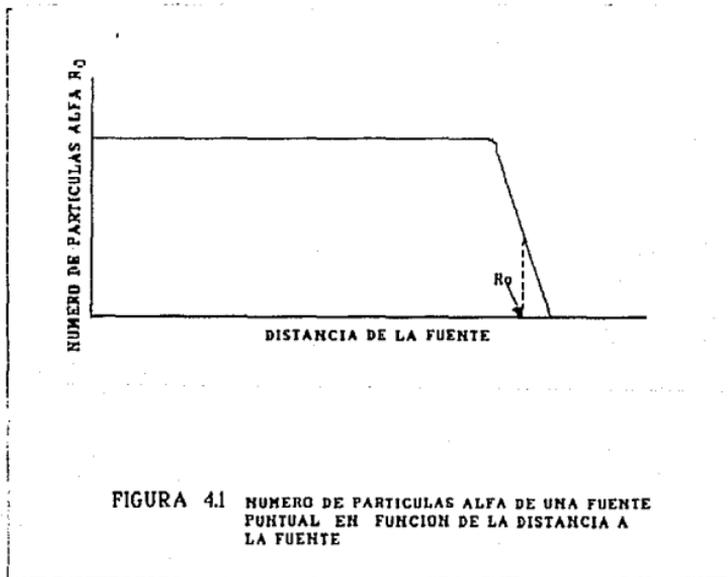
La atenuación es el fenómeno que ocurre cuando la intensidad de la radiación I_0 muestra un descenso recíproco a una función exponencial al valor de I (intensidad final de la radiación) después que la energía ha penetrado una distancia x en el material. La probabilidad de que un fotón atraviese una cantidad dada de material es igual al producto de las probabilidades de cada tipo de interacción de partículas, i.e., la probabilidad de cada tipo de interacción es independiente de las otras interacciones.

4.1 ATENUACION DE LA RADIACION ALFA

Para determinar la penetración de la radiación alfa en los detectores, y para algunas aplicaciones, es importante contar con información sobre la atenuación de la radiación alfa.

La figura 4.1 representa el número de partículas alfa de una fuente puntual que penetra un material con cierto espesor. A la pequeña diferencia en el alcance final de

alfas, que está entre 3 y 4 %, se le ha llamado desorden y es causado por las fluctuaciones estadísticas en el número de colisiones y la baja de energía por colisión. La distancia R_0 corresponde al máximo de la curva diferencial y es llamada alcance medio de las partículas alfa.



Se han realizado muchos trabajos para determinar el alcance medio de las partículas alfa en aire bajo condiciones estandar (15°C y 760 mmHg).

ATENUACION DE RAYOS ALFA

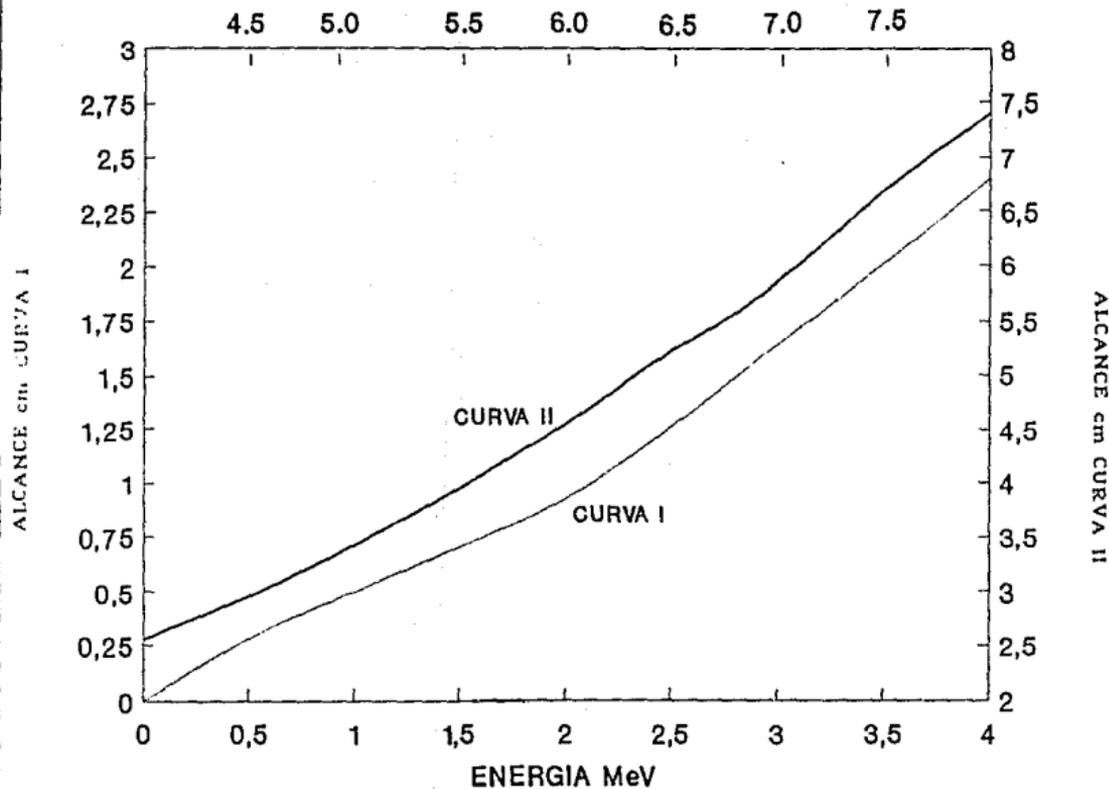


FIGURA 4.2 ALCANCE-ENERGIA DE LAS PARTICULAS ALFA EN AIRE

En la figura 4.2 se muestran las curvas de energía del alcance de las partículas alfa en aire. En donde las curvas I y II varían en las condiciones de temperatura y presión.

Para calcular el alcance de partículas alfa en un material diferente al aire se utiliza la ley de Bragg, que establece que el alcance en mg/cm^2 es proporcional a $A^{1/2}$, en donde A es el número de masa del absorbedor. Otra relación usada es $A^{1/2} = 0.56R$, en donde R es el alcance de las partículas alfa expresado en centímetros, para cualquier energía.

4.2 ATENUACION DE LA RADIACION BETA

Son importantes las reglas que gobiernan la atenuación de la radiación beta para poder calcular la respuesta del detector y para ciertas aplicaciones. La radiación beta es más penetrante que la alfa, sin embargo, es fácil de frenar con vidrio, lucita o una hoja de metal. Es preferible un material de número atómico bajo para minimizar la generación de bremsstrahlung.

Los electrones emitidos del núcleo en el decaimiento radiactivo son conocidos como beta-menos o simplemente como partícula beta. Los rayos de electrones energéticos pueden ser producidos por aceleradores de partículas. Las interacciones de positrones y electrones pueden ser discutidas conjuntamente porque son muy similares. El positrón será emitido en el proceso de decaimiento radiactivo, a estas partículas también se les llama beta-más.

Para el intervalo de 0.5 a 6 MeV se utiliza una relación empírica [2,3], por medio de la cual se obtienen valores aproximados del coeficiente de atenuación másico μ_a (cm^2/gr).

$$\mu_m = \frac{1\gamma}{E_m^{1.14}}$$

4.1

En donde E_m es la energía máxima de los emisores beta

La relación 4.2 no considera la contribución del fenómeno bremsstrahlung. Sin embargo puede determinarse la disminución de la energía por bremsstrahlung. El valor de baja energía por bremsstrahlung [3], como función de la energía y tipo de absorbedor está dado por la ecuación:

$$(dE/dx)_{ms} = Z^2 * E * N \quad 4.2$$

En donde:

$(dE/dx)_{ms}$ = valor de la energía debida al fenómeno bremsstrahlung

Z = número atómico del absorbedor

N = densidad atómica

E = energía del electron en MeV.

La razón de las escasas colisiones está dada por:

$$(dE/dx)_{ms} / (dE/dx)_c = E * Z / 800 \quad 4.3$$

$(dE/dx)_c$ es el valor de la energía debido a las colisiones.

Como se puede observar en ambas ecuaciones, la fracción de baja energía de bremsstrahlung es marcadamente dependiente del número atómico del absorbedor y de la energía de la partícula beta incidente. Se considera Bremsstrahlung como radiación de azar y los riesgos son mayores para partículas beta de alta energía o en casos donde se utilizan materiales con Z grande como absorbedores.

El alcance de las partículas beta a través de un absorbedor se estudia con la determinación de curvas de absorción. La figura 4.3 ilustra curvas de absorción para haces colimados de electrones monocenergéticos y de partículas beta con energía de distribución continua. La curva de absorción para electrones monocenergéticos es encontrado ser una porción lineal, esta porción es extrapolada a cero, el punto encontrado es el alcance y es característico de la energía de las partículas. Para el espectro continuo de electrones el alcance resulta ser indeterminado. Sin embargo existen algunos métodos para calcular el valor del alcance, por ejemplo el método de comparación de Feather.

4.3 ATENUACION DE LOS RAYOS X

La atenuación de rayos X sigue la misma ley exponencial de atenuación dada por la ec. 4.3. Sin embargo, hay discontinuidades en el coeficiente de atenuación para ondas de rayos X relativamente grandes (del orden de 100 keV), cuando las energías del fotón corresponden a las energías de los electrones orbitales de los átomos del absorbedor. La discusión anterior indica cuando un elemento es un absorbedor pobre para las características propias de los rayos X.

Los rayos $x\text{-}\kappa$. (los rayos $x\text{-}\kappa$. son también llamados línea espectral κ .) de un elemento corresponde a la energía de transición del electrón entre las capas K y L. La energía de amarre de los electrones disminuye cuando decrece Z; entonces los rayos $x\text{-}\kappa$. de un elemento Z tienen una energía cercana a la que necesita para lanzar un electrón de la capa K de algún elemento de baja Z (ejem. Z-1). Para los elementos Z-1 la atenuación de rayos X es casi completa, mientras que es casi nula por los Z+1. Estos dos tipos de

ATENUACION DE RADIACION BETA

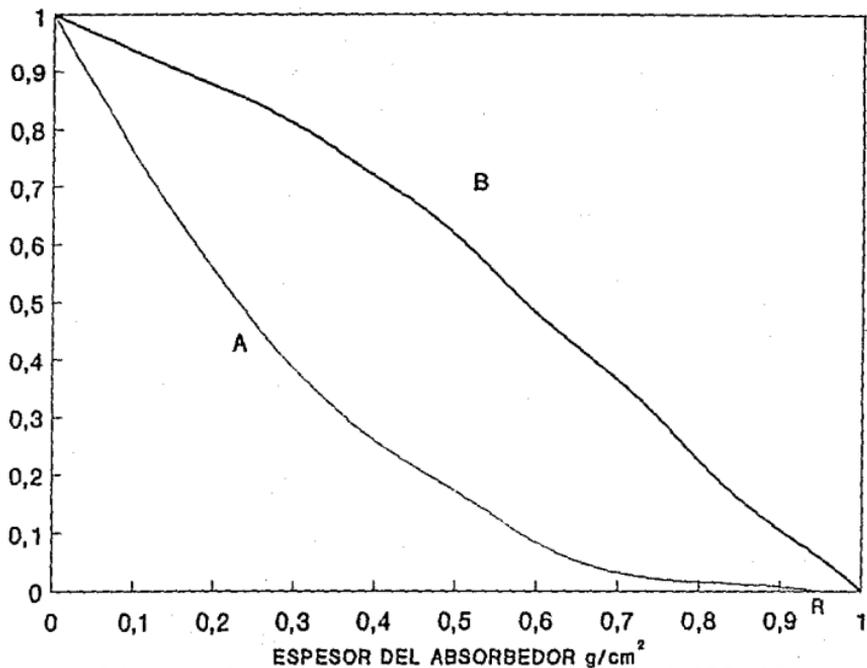


FIGURA 4.3 CURVAS DE ABSORCION PARA ELECTRONES MONOENERGETICOS (A) Y PARA PARTICULAS BETA (B)

absorbedores tienen coeficientes de atenuación muy diferentes para rayos X particulares, el más absorbente es llamado absorbedor crítico (i.e. $Z-1$).

Entender la atenuación crítica es muy importante en el diseño de blindajes e instrumentos que utilizan rayos X, y también para identificar los emisores de rayos X.

4.4 ATENUACION DE LA RADIACION GAMMA

La interacción de radiación gamma en la materia es estudiada por medio de la transmisión de ésta a través de un material (plomo, aluminio, concreto, etc.). Las tres interacciones más importantes en cuanto a atenuación de radiación gamma se refiere son: el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la producción de pares.

En el efecto fotoeléctrico un fotón interactúa con el átomo. Un electrón orbital atómico (generalmente de las capas K o L) [2,3] recibe toda la energía del fotón. El electrón orbital es lanzado con una energía $h\nu$ (energía del fotón) menos la energía de amarre de éste, la interacción es mayor con los electrones fuertemente ligados.

El coeficiente de atenuación para el efecto fotoeléctrico es:

$$\tau = \frac{\text{const} \cdot Z^4}{(h\nu)^{2.5}} \quad 4.4$$

En donde

h = constante de Planck

ν = frecuencia de la radiación gamma

τ = coeficiente de atenuación fotoeléctrico

La atenuación del efecto fotoeléctrico ocurre para bajas energías (rayos X o gamma) y para absorbedores con Z grande. La probabilidad de atenuación fotoeléctrica tiene discontinuidades iguales a la energía de amarre de las capas κ ., L, etc.

En la interacción fotoeléctrica toda la energía de la radiación gamma se transfiere al fotoelectrón.

La segunda interacción importante de la radiación gamma con la materia es el efecto Compton.- Consiste de una colisión elástica entre la radiación gamma y un electrón, en ésta una parte de la energía es donada al electrón (llamado electrón Compton), al mismo tiempo que de la colisión se dispersa radiación gamma con una energía $h\nu'$.

El efecto Compton puede ser dividido en dos partes. La primera es el efecto de atenuación Compton (σ_c) y la segunda es el efecto de dispersión o de cambio de dirección de la radiación gamma (σ_s).

El coeficiente de atenuación total Compton es:

$$\sigma = N^* Z \sigma_c \quad 4.5$$

como

$$\sigma = \sigma_c + \sigma_s \quad 4.6$$

Los coeficientes de atenuación y dispersión Compton son:

$$\sigma_c = N^* Z_c \sigma_c \quad 4.7$$

$$\sigma_s = N^* Z_s \sigma_s \quad 4.8$$

En donde:

$N \cdot Z =$ número de electrones/cm³

$\sigma =$ Probabilidad de que ocurra una colisión

$\sigma_s =$ Dispersión de la radiación electromagnética

$\mu =$ Atenuación real de la radiación electromagnética

La interacción Compton es el fenómeno predominante en la región de energía de 0.6 a 2.5 MeV. La sección transversal total Compton es aproximadamente proporcional a nZ (el número de átomos y el número atómico del absorbedor). Para energías mayores a 0.5 MeV es también proporcional a $1/E$.

La tercera interacción importante de la radiación gamma con la materia es la producción de pares. En la teoría de la producción de pares, el fotón es completamente absorbido en la vecindad de un núcleo y en su lugar aparece un par positrón-electrón, este proceso ocurre en la región del campo coulombiano nuclear, un mínimo de energía de $2m_0c^2$ (1.02 MeV) se ha requerido. La sección transversal aumenta lentamente conforme la energía aumenta a aproximadamente 4 MeV y llega a ser proporcional al logaritmo de la energía ($\log E$).

La producción de pares es poco importante para elementos con Z baja y es siempre seguida por la aniquilación del positrón. La atenuación de radiación gamma por el fenómeno de producción de pares esta siempre asociada a radiación gamma mayor a 1.02 MeV.

El coeficiente de atenuación lineal k para producción de pares es simplemente:

$$k = \mu + \mu_{pp} \cdot N$$

4.9

en donde

N = número de átomos por cm^3

k = valor numérico

Por lo tanto, la suma de los coeficientes de atenuación es igual al coeficiente de atenuación total:

$$\mu_T = \tau + k + \sigma_c + \sigma_s \quad 4.10$$

En donde

μ_T = coeficiente de atenuación total

τ = coeficiente de atenuación fotoeléctrico

k = coeficiente de atenuación de producción de pares

σ_c = coeficiente de atenuación Compton

σ_s = coeficiente de dispersión Compton

Este coeficiente de atenuación total (también llamado coeficiente de atenuación lineal total) se conoce por medio de la atenuación de la radiación a través de un absorbedor. Los coeficientes de atenuación se determinan por medio de las ecuaciones exponenciales siguientes:

$$I = I_0 e^{-\mu_T t} \quad 4.11$$

$$I = I_0 e^{-(\mu_T/\rho)t} \quad 4.12$$

$$I = I_0 e^{-\mu_m \rho t} \quad 4.13$$

En donde

I = intensidad de la radiación con absorbedor

I_0 = intensidad de la radiación sin absorbedor

t = espesor del absorbedor

μ_T = coeficiente de atenuación lineal total

ρ = densidad

μ_m = coeficiente de atenuación másico

El uso de estas ecuaciones y sus coeficientes produce valores de atenuación de la radiación que son usadas en las aplicaciones de cálculo de la densidad. Sin embargo, estas ecuaciones no permiten calcular el blindaje necesario para una atenuación dada.

Fano [3] desarrolló un factor que llamó "atenuación principal del haz" o coeficiente de reforzamiento (factor build-up). El uso de este factor proporciona un método para cálculo de blindajes que considera correctamente la dispersión que ocurre en realidad.

El método Fano toma la cantidad dispersada y las ecuaciones 4.11 a 4.13 son corregidas por el coeficiente de reforzamiento, lo que da por resultado que la atenuación observada en el paso de la radiación a través de un blindaje esté determinada por la ecuación:

$$I = I_0 B u^{-nu} \quad 4.14$$

B es el coeficiente de reforzamiento, el cual da la medida de la respuesta total del instrumento entre la respuesta del instrumento debida únicamente a las gammas primarias no dispersadas.

$$I = I_0 B u^{-nu} \quad 4.15$$

Fano [3] estima el error del coeficiente de reforzamiento para el plomo e hierro en aproximadamente 5 %, excepto para blindajes gruesos donde éste puede ser mayor al 15 %. Para el espectro de baja energía el límite de error es de aproximadamente 10 % para penetración media y de 25 % a 30 % para alta penetración. Usando la técnica de cálculo del coeficiente de reforzamiento se puede realmente determinar la transmisión relativa de radiación (I/I_0) a través de un blindaje conocido.

4.5 BLINDAJES

Los blindajes para la protección radiológica son usualmente diseñados para reducir los niveles de radiación, fuera del blindaje, a un nivel de aproximadamente 1/10 del máximo permisible basado en exposiciones continuas (8 hrs/día). Los blindajes usados para reducir y estabilizar la radiación de fondo en los detectores son diseñados para reducir los niveles de radiación a un valor aproximado de 1/100 del requerido por las consideraciones de seguridad radiológica.

El diseñador, antes de decidir si se usará un blindaje, debe demostrar que ha considerado la posibilidad de manipular alejadamente el material por medio de instrumentos u otros artefactos y también haber tenido en cuenta la cantidad de veces que el usuario estará expuesto a la radiación.

Si la operación que se realizará es la de mover una muestra de un contenedor y colocarla en otro recipiente, entonces el blindaje debe ser de tal forma que permita un tiempo corto de exposición (desde unos pocos segundos hasta un par de minutos) para un campo relativamente alto (varios R/hr) antes de construir un gran blindaje.

El manejo a distancia, por medio de tenazas, pipetas y otros instrumentos, son deseables para maximizar la distancia entre la fuente y el operador y estar expuesto a la mínima dosis (aprovechando la ley del inverso al cuadrado). El concepto ALARA (As Low As Reasonable Achievable) hace énfasis en la regla de nunca manipular directamente y sin blindajes fuentes emisoras -beta o gamma-mayores a varios millicuries.

Se pueden construir dos tipos de blindaje, el permanente y el temporal. Si se construye un blindaje temporal este debe hacerse de loseta de concreto pesado, de plomo, de hierro o un contenedor lleno de agua o de tierra. Ahora, si el blindaje es permanente como el que se usa en las áreas de almacenaje de isótopos el concreto es el material adecuado y el menos caro. El concreto debe ser cuidadosamente colado para evitar huecos o grietas. Es deseable una inspección radiológica de la pared completa para determinar la seguridad de ésta. La pared completa debe ser protegida con algún tipo de barniz, químicamente resistente, liso, libre de agujeros, para simplificar la purificación.

Deben ser aplicadas las reglas basadas en NBS handbook 54, como norma en los diseños y almacenaje para fuentes pequeñas.

Las reglas básicas que establece el citado manual son:

1.- Cuando las fuentes y sus aplicadores no se usan o no se están trasladando deben permanecer encerrados en un material adecuado de paredes gruesas, para garantizar la seguridad del personal.

2.- Las fuentes deben ser protegidas de modo que no se muevan sin autorización.

3.- Para evitar la exposición del personal al transferir las fuentes el blindaje de protección debe ser seguro .

4.- El blindaje debe construirse de tal forma que minimice, tanto como sea posible, la exposición del personal que maneja las fuentes. Se consideran como factores importantes: a) La distribución de las fuentes, b) El tiempo

requerido por el personal para mover y regresar las fuentes al blindaje, c) Blindajes para subdividir cantidades de material radiactivo.

5.- Deben tomarse medidas precautorias para atenuar la radiación dispersada. No es suficiente colocar las fuentes poderosas detrás de una barrera, ya que por muy gruesa que ésta sea la radiación dispersada alrededor de la barrera puede representar un peligro.

6.- Deben construirse compartimientos separados para lograr un manejo seguro del contenido y con indicaciones claras en el exterior que permitan su identificación inmediata.

7.- El blindaje del compartimiento individual y el recinto total debe ser de tal forma que una persona frente al recinto reciba una ínfima fracción de la dosis permitida.

Los puntos anteriores están dirigidos a las fuentes emisoras de gammas y betas (que producen un apreciable bremsstrahlung). Con fuentes emisoras de alfas no se requiere blindaje, excepto que la radiación asociada produzca una dosis peligrosa.

El blindaje de protección para emisores alfa normalmente es un material simple ya que las partículas alfa son frenadas, tal como se dijo antes, por una capa delgada de material. El principal peligro al que se está expuesto es la ingestión de los emisores alfa, más que a la exposición externa.

Para los usuarios de radioisotopos la radiación gamma y la radiación beta, debido al fenómeno Bremsstrahlung son el principal problema en el diseño de blindajes.

OBTENCION DE LA DENSIDAD POR MEDIO DE LA RADIACION GAMMA

En este capítulo se determina la densidad de los materiales utilizando la propiedad de atenuación de la radiación gamma. Se efectúan diversas aplicaciones del método en el intervalo de energías (80 keV a 1.5 MeV) a escala industrial. Se exponen las modificaciones de algunas componentes utilizadas en los instrumentos para lograr mediciones confiables. Para determinar el coeficiente de atenuación másico y la densidad se utilizaron fuentes radiactivas de Cs-137 y Ba-133. Finalmente se comparan los resultados experimentales obtenidos, con los teóricos.

5.1 MARCO TEORICO

Los rayos X y la radiación gamma tienen la propiedad de penetrar todo tipo de materiales. Los factores principales relacionados con esta propiedad son: el espesor, la densidad, la composición química del material y, desde luego, la energía de la radiación.

Los mecanismos de atenuación de la radiación gamma más importantes son: el efecto fotoeléctrico, la dispersión Compton y la producción de pares; en los dos primeros existe interacción con los electrones orbitales y el último ocurre en la vecindad del núcleo y para altas energías. Cada uno de estos mecanismos se refleja en forma diferente sobre la atenuación total. En general, a bajas energías (80 a 400 keV) el efecto fotoeléctrico es el contribuyente predominante. En el intervalo de energías de 400 a 1200 keV la dispersión Compton es el factor dominante. A energías

INTERACCION DE RAYOS GAMMA

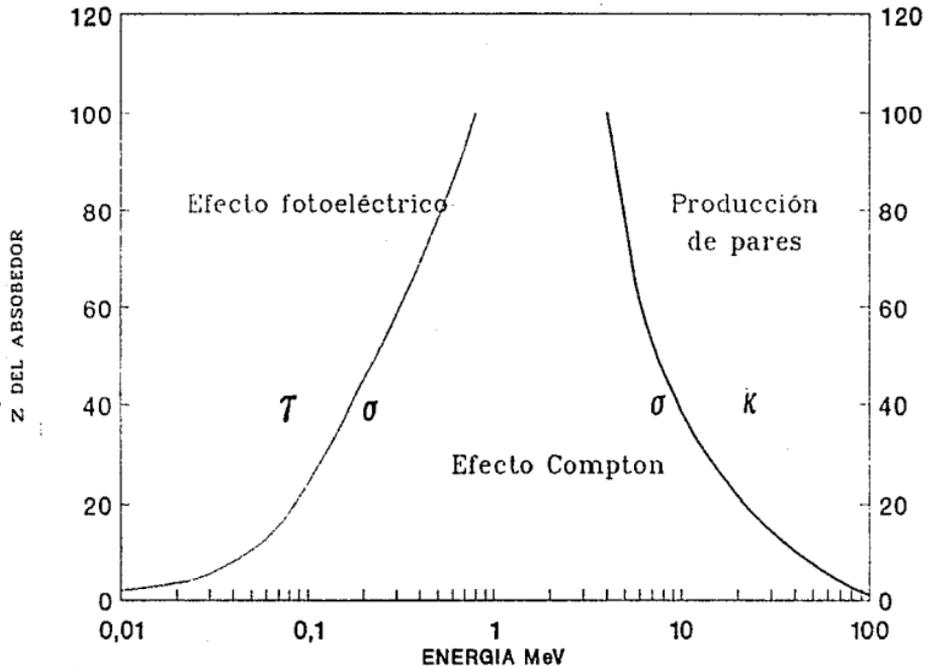


FIGURA 5.1 IMPORTANCIA RELATIVA DE LAS PRINCIPALES INTERACCIONES DE LA RADIACION GAMMA

mayores de 2000 keV la producción de pares es el mecanismo de atenuación dominante. La figura 5.1 muestra la importancia relativa de los tres principales tipos de interacción de la radiación gamma. Las líneas muestran los valores de Z y λ_V para los cuales los dos efectos vecinos contribuyen en forma igual. Las figuras 5.2 y 5.3 muestran los coeficientes de atenuación másico del aluminio y del yoduro de sodio. En la figura 5.4 se muestran los coeficientes de atenuación másico para diferentes materiales.

El coeficiente de atenuación másico es proporcional al total de las secciones eficaces de las interacciones del fotón por átomo, es decir a la suma de las secciones eficaces para todos los procesos de dispersión y atenuación. Esta relación es:

$$\frac{\mu_{total} \left(\frac{1}{cm} \right)}{\rho \left(\frac{g}{cm^3} \right)} = \mu_m \left(\frac{cm^2}{g} \right) \quad 5.1$$

En donde:

μ_m = coeficiente de atenuación másico

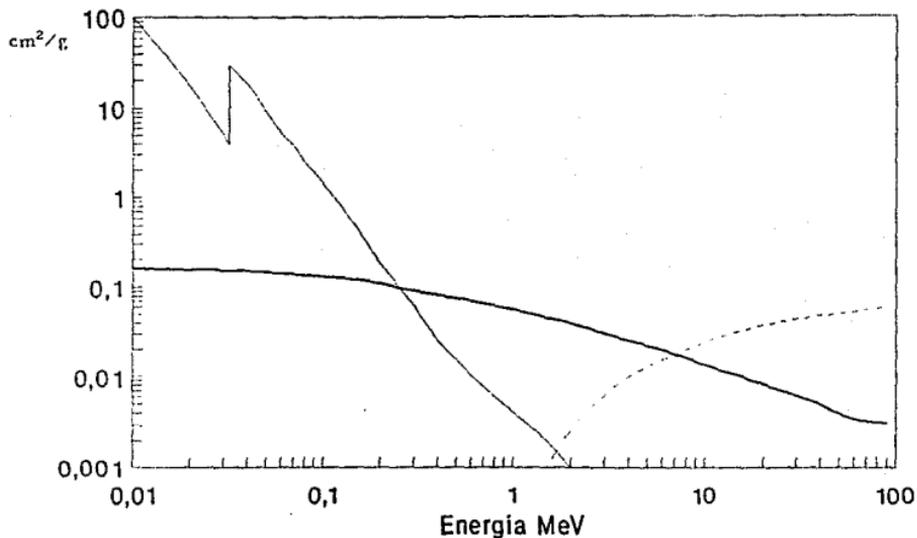
ρ = densidad del material

μ_{total} = coeficiente de atenuación total

Si el material absorbente es un compuesto químico o una mezcla su coeficiente másico de atenuación (μ_m) puede ser determinado por la suma de los coeficientes (μ_{mi}) de los elementos constitutivos de acuerdo con la porción de peso:

$$\mu_m = \sum_{i=1}^n w_i (\mu_{mi}) \quad 5.2$$

COEFICIENTE DE ATENUACION MASICO YODURO DE SODIO



— fotoeléctrico — efecto Compton --- prod. de pares

FIGURA 5.2 DIFERENTES COEFICIENTES DE ATENUACION MASICOS
PARA EL Na(Tl)

COEFICIENTE DE ATENUACION MASICO ALUMINIO

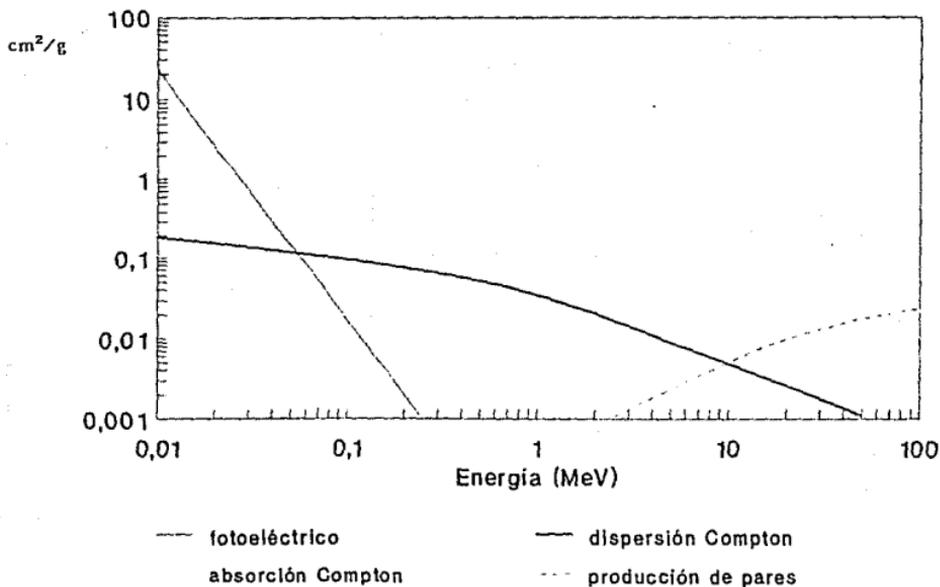
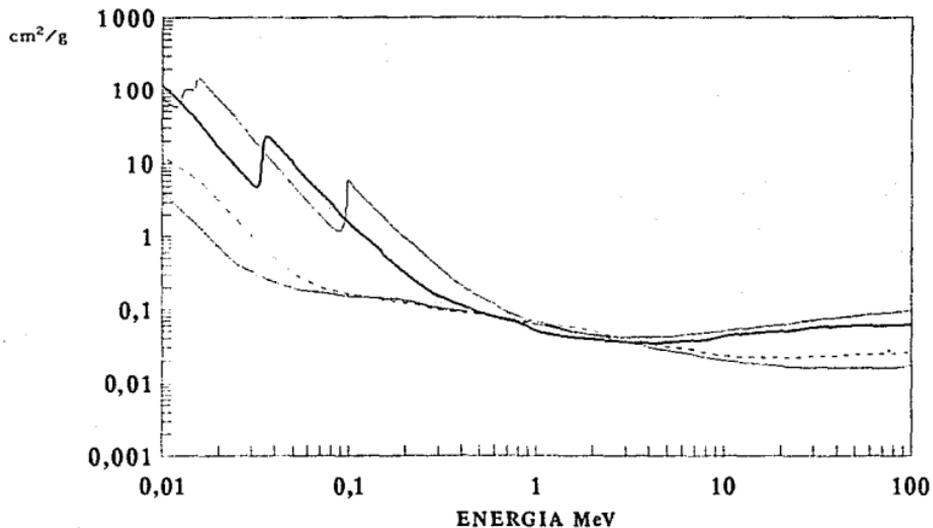


FIGURA 5.3 DIFERENTES COEFICIENTES DE ATENUACION MASICOS PARA EL AL.

COEFICIENTES DE ATENUACION MASICOS PARA DIFERENTES MATERIALES



— AIRE AGUA --- ALUMINIO — PLOMO — NaI

FIGURA 6.4 CURVAS DE LOS COEFICIENTES DE ATENUACION
MASICO PARA DIFERENTES MATERIALES

En donde w_i es la proporción en peso del i -ésimo constituyente.

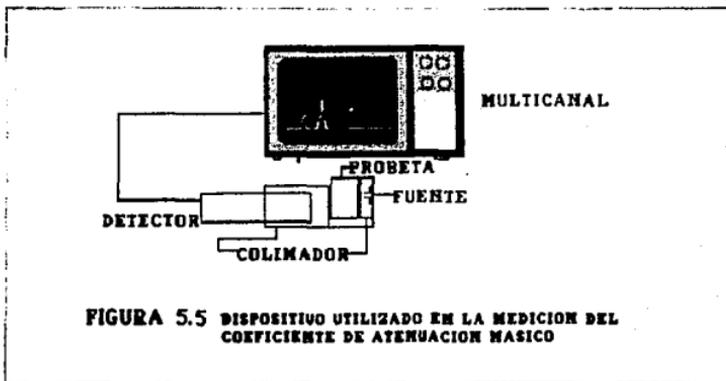


FIGURA 5.5 DISPOSITIVO UTILIZADO EN LA MEDICION DEL COEFICIENTE DE ATENUACION MASICO

5.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

El arreglo experimental para la medición de la radiación transmitida consistió de lo siguiente:

Un detector de centelleo de yoduro de sodio activado con trazas de talio, NaI(Tl) , un tubo fotomultiplicador y preamplificador, un multicanal con 4096 canales con amplificador, una fuente radiactiva (de 37,000 Bq) y una fuente de alto voltaje. El cristal del detector se colocó dentro de un colimador de plomo, a 8 cm de éste se colocó un colimador y una fuente radiactiva (fig.5.5).

A continuación, como contenedor del material se instaló entre la fuente y el detector una probeta cilíndrica (con diámetro interno de 1.1 cm) con sustancias conocidas (N-Heptano, Acetona, Agua bidestilada). Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.1.

	FONDO C/P	PROBETA	HEPTANO NORMAL	ACETONA	AGUA
$\rho \left(\frac{g}{cm^3} \right)$			0.6838	0.7857	1.0
Cs-137 (662 keV)					
I	1967	1993	1766	1812	1841
\bar{X}	218.6	199.3	176.4	181.2	186.1
I	3368	3162	3006	3166	2932
\bar{X}	336.8	316.2	300.6	316.6	293.2

$\rho \left(\frac{g}{cm^3} \right)$ = densidad de las sustancias

I = intensidad de la radiación

\bar{X} = valor promedio

TABLA 5.1 Datos usando una probeta de sección circular

	PONDO C/F	PRO- BETA	HEPTANO NORMAL	ACETONA	AGUA
$\rho \left(\frac{g}{cm^3} \right)$			0.6838	0.7857	1.0
Ba-133 (80 keV)					
I	11789	8505	5685	5325	4099
μ			0.171±0.026	0.198±0.028	0.309±0.034
*			0.145, 0.195	0.170, 0.226	0.275, 0.343
Ba-133 (356 keV)					
I	11875	11270	9804	9588	8957
μ			0.059±0.016	0.068±0.017	0.10±0.02
*			0.043, 0.075	0.051, 0.085	0.08, 0.12
Cs-137 (662 keV)					
I	21774	20542	17561	17475	16907
μ			0.066±0.016	0.068±0.016	0.082±0.018
*			0.050, 0.082	0.052, 0.084	0.064, 0.100

$\rho \left(\frac{g}{cm^3} \right)$ = densidad de las sustancias

I = intensidad de la radiación

μ = coeficiente de atenuación lineal

* = intervalo de confianza

TABLA 5.2 Datos usando una probeta de sección rectangular

Se observó que con el arreglo mencionado eran muy grandes e inaceptables las fluctuaciones en la medición de la radiación transmitida. Se estudiaron las posibles causas de esta fluctuación y se llegó a la conclusión de que eran causadas por la variación del espesor del líquido contenido en la probeta cilíndrica. Se construyó una probeta de sección rectangular (con medidas internas de 2.54 x 2.7 cm) que resolvió tanto el problema de la variación en el espesor como la geometría de incidencia.

Se programó el multicanal para capturar la información cada minuto, seleccionando los principales picos de energía. Para Cs-137 el pico de energía fue de 0.662 MeV y para el Ba-133 los picos de energía utilizados fueron 0.080 MeV y 0.356 MeV. Como ya se mencionó, estos picos permiten determinar el coeficiente de atenuación del material estudiado. La tabla 5.2 muestra los resultados obtenidos.

Con los resultados de la tabla mencionada se calculó para cada substancia el promedio aritmético de los datos, se sustituyó en la ecuación (5.1) y se obtuvo el coeficiente de atenuación lineal total.

Finalmente, se calculó el coeficiente de atenuación másico y se comparó con el valor teórico. El valor teórico del coeficiente de atenuación másico se calculó con la ecuación (5.6). A continuación damos un ejemplo del cálculo para el coeficiente de atenuación másico del agua (para Cs-137 con una energía de 0.662). El coeficiente de atenuación másico (consultado en tablas [12]) es: para el Hidrógeno 0.1538 y para el Oxígeno 0.0777. Se hizo como sigue:

$$\frac{\mu}{\rho}(H_2O) = \frac{2 \times 1.00797}{18.00153} \times 0.1538 + \frac{15.9944}{18.00153} \times 0.0777$$

$$\frac{\mu}{\rho}(H_2O) = 0.01771 + 0.06900$$

$$\frac{\mu}{\rho}(H_2O) = 0.08672$$

El mismo procedimiento se siguió para cada radioisótopo especificado. La tabla 5.3 muestra tanto el valor teórico como el experimental. En ésta se puede observar la cercanía que hay entre ambos valores por lo que podemos concluir que el experimento satisface el objetivo previamente establecido.

Se hizo un análisis del error para el coeficiente de atenuación lineal obteniéndose la relación 5.3 y para el coeficiente de atenuación másico se obtuvo la relación 5.4. Las relaciones mencionadas se obtuvieron derivando parcialmente las ecuaciones 4.11 y la 5.1.

$$\sigma_{\mu}^2 = \frac{1}{(I \times x)^2} \times \sigma_I^2 + \frac{1}{(I_0 \times x)^2} \times \sigma_{I_0}^2 + \frac{1}{x^4} \times \left(\ln \frac{I}{I_0} \right)^2 \times \sigma_x^2 \quad 5.3$$

De donde

σ_{μ}^2 = error del coeficiente de atenuación lineal

I = intensidad de la radiación con absorbedor

I_0 = intensidad de la radiación sin absorbedor

x = diámetro dc. la probeta

σ_I^2 = error de la intensidad de la radiación con absorbedor = I

$\sigma_{I_0}^2$ = error de la intensidad de la radiación sin absorbedor = I_0

σ_x^2 = error de la distancia

$$\sigma_{\mu}^2 m^2 = \frac{1}{\rho^2} \times \sigma_{\mu}^2 + \frac{\mu^2}{\rho^4} \times \sigma_{\rho}^2 \quad 5.4$$

De donde

σ_{ρ}^2

ρ = densidad del material

σ_{μ}^2 = error del coeficiente de atenuación lineal

σ_{ρ}^2 = error de la densidad

5.3 CONCLUSIONES

Se observó que la geometría del recipiente contenedor es importante, esto es debido a que la variación del espesor influye en las mediciones de la intensidad de la radiación incidente.

El cálculo del coeficiente de atenuación másico se realizó de dos maneras:

a) Experimentalmente, en donde se considera el error implícito en el cálculo del coeficiente de atenuación másico.

b) Usando una relación formal. Se calculó el coeficiente de atenuación másico utilizando el valor del coeficiente de atenuación másico para cada componente de las sustancias analizadas.

Comparando ambos resultados se observó que el intervalo de valores experimentales contiene al valor derivado, de ahí se concluyó que el experimento satisface el objetivo establecido.

	VALORES EXPERIMENTALES			VALORES TEORICOS		
	Cs-137 662 keV	Ba-133 356 keV	Ba-133 80 keV	Cs-137 662 keV	Ba-133 356 keV	Ba-133 80 keV
AGUA	0.082±0.009 0.073, 0.091	0.097±0.012 0.085, 0.109	0.2575±0.0248 0.2327, 0.2823	0.086	0.112	0.184
ACETONA	0.086±0.022 0.064, 0.108	0.086±0.030 0.056, 0.116	0.1837±0.0595 0.1743, 0.2933	0.086	0.111	0.178
HEPTANO	0.096±0.025	0.086±0.034	0.264±0.068	0.090	0.117	0.185
NORMAL	0.071, 0.121	0.052, 0.120	0.196, 0.332			

TABLA 5.3 Comparación de los valores experimentales y teóricos

USO DE LA PROPIEDAD DE ATENUACION PARA REALIZAR

GAMMAGRAFIA LONGITUDINAL ELECTRONICA

Los instrumentos que emplean material radiactivo son ahora muy utilizados en casi todas las ramas de la industria.

El diseño apropiado de un instrumento que emplea radioisótopos depende de encontrar la energía y el tipo de radiación, así como del detector y el registrador electrónico adecuados.

Este capítulo describirá el diseño, construcción y aplicación de un sistema para realizar Gammagrafía Longitudinal Electrónica.

En algunos casos es difícil analizar y detectar fallas o fracturas en los equipos y estructuras usadas en plantas industriales, fábricas o edificios. Sin embargo, por medio del sistema ya mencionado se detectan los cambios de densidad o espesor de los materiales sin importar el tamaño y colocación de los objetos.

A continuación se hará una explicación de lo que es la Gammagrafía Longitudinal Electrónica.

La Gammagrafía Longitudinal Electrónica es el registro de la intensidad de los rayos gamma que atraviesan transversalmente un cuerpo al ir desplazando el detector y la fuente a lo largo del objeto estudiado. Para llevar a cabo la Gammagrafía Longitudinal Electrónica se utiliza una fuente de rayos gamma, un detector de centelleo, un

registrador electrónico (en nuestro caso un multicanal) y un sistema mecánico que mueve en forma simultánea a la fuente y el detector. El cuerpo en estudio se coloca entre la fuente y el detector y se mueven a lo largo de una dirección específica (ver figura 6.1); de esta manera se obtiene la densidad, el espesor y sus variaciones, en función de la dirección seleccionada y determinar si existen en el cuerpo bajo estudio defectos o cambios en su composición.

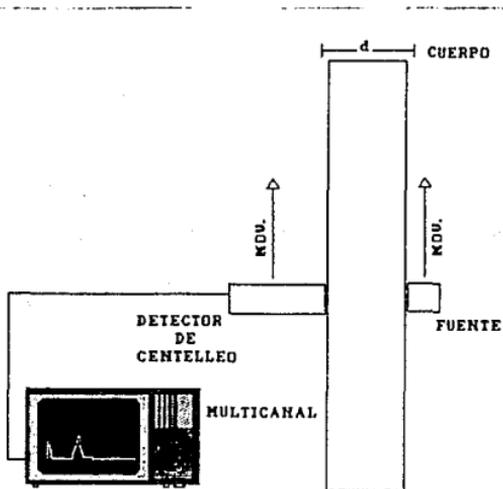


FIGURA 6.1 DISPOSITIVO PARA REALIZAR GAMMAGRAFIA LONGITUDINAL ELECTRONICA

Existe una técnica alternativa para obtener la densidad y sus cambios a lo largo de un cuerpo. El principio y el mecanismo utilizados son semejantes a los empleados en la gammagrafia, pero no utiliza radiación gamma sino rayos X y aunque teóricamente es satisfactoria presenta mayores riesgos y dificultades técnicas (comparado con la gammagrafia) que lo hacen inaplicable en el estudio de estructuras. Las principales dificultades para su manejo se deben al peso, volumen y alto voltaje.

6.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE GAMMAGRAFIA LONGITUDINAL ELECTRONICA

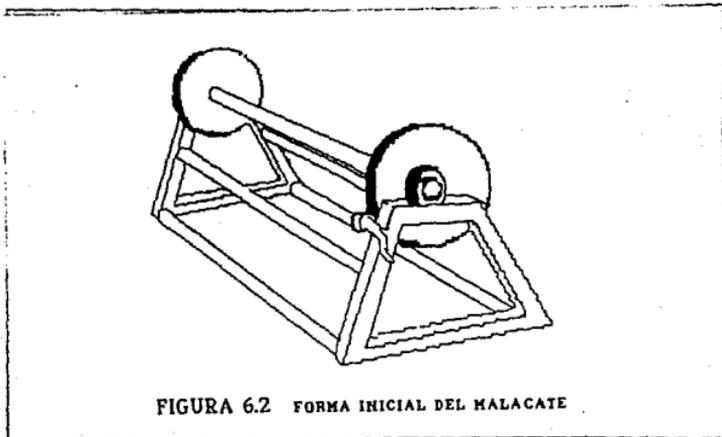
El principal obstáculo para diseñar un sistema eficiente en el que se puedan detectar los cambios de densidad o espesor es, como anteriormente se dijo, la dificultad o la imposibilidad de transportar o mover los objetos, estructuras o edificios, de sus lugares debido a su gran tamaño, a que están en funcionamiento o simplemente porque forman parte de una estructura mayor. Por el contrario, si llevamos nuestro equipo al lugar en estudio se utiliza la ventaja que nos da el manejo y la posibilidad de transporte de instrumentos especializados y materiales radiactivos.

Como ya se mencionó, es preciso mover simultáneamente una fuente radiactiva y un detector para analizar la estructura atómica del objeto en estudio, la manera en que se va a realizar es utilizando el siguiente dispositivo:

Con un malacate (montacargas) se mueve el ensamble detector-fuente radiactiva. En los primeros ensayos se movía en forma manual el dispositivo (fig.6.2), pero al no contar con un mecanismo regulador se tenían fluctuaciones

inaceptables en su velocidad. En busca de un mejor control se le acondicionó al malacate un motor eléctrico de corriente alterna (fig. 6.3).

Como la velocidad de los motores comerciales es demasiado grande para nuestros fines se le adicionaron: un variador de velocidad (puede reducir la velocidad hasta 100 revoluciones por minuto) y un sistema de 4 engranes (fig.6.4) que redujó aún más la velocidad, lográndose 2 revoluciones por minuto en el cilindro (malacate). Con impulsar estas modificaciones (fig. 6.5) fue posible obtener la velocidad óptima de translación de la fuente y el detector.



El detector que se utiliza en este trabajo es un detector de centelleo, este se coloca en un porta-detector que permite moverlo con el equipo descrito y se conecta a un multicanal que registra las variaciones en la atenuación de la radiación. La fuente que se usa es de cesio-137 colocada dentro de un portafuente de plomo.

6.2 DESCRIPCION DE LOS INSTRUMENTOS UTILIZADOS EN EL EQUIPO

En esta sección se describen las principales características del equipo integrante del sistema de Gammaografía Longitudinal Electrónica.

Multicanal (Canberra serie 35 plus).- Consiste de un controlador maestro y cinco secciones: memoria, display, procesador de señal, interfase operador/MCA, y entrada/salida de datos. El controlador es un microprocesador que ejecuta las instrucciones por medio de un programa permanente en la memoria. Cuenta con 4096 canales. Puede ser utilizado como analizador de altura de pulsos (PHA) o multiescalador (MCS). Utilizándolo como PHA se registra el número de eventos vs energía. En cambio, si se utiliza como MCS registra el número de eventos vs tiempo. El multicanal incluye un amplificador (configurado por el operador) y un monocanal que permite seleccionar el intervalo de energías observables.

Fuente de Alto Voltaje (Tennelec TC 952).- Tiene un intervalo de 0 a 2000 volts, con polaridad positiva o negativa.

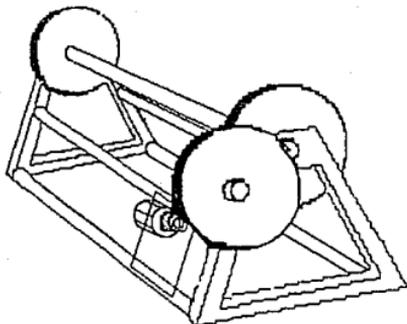


FIGURA 63 MALACATE CON MOTOR

Malacate (Montacargas).-Es un instrumento diseñado para subir o bajar simultáneamente el detector y la fuente radiactiva. Consta de: un cilindro de 1 m de largo, con diámetro de 10 cm, uno de sus extremos tiene acoplado un engrane de 17.8 cm de diámetro y tiene una palanca con un engrane de 2.8 cm de diámetro. Se le adaptó el siguiente equipo:

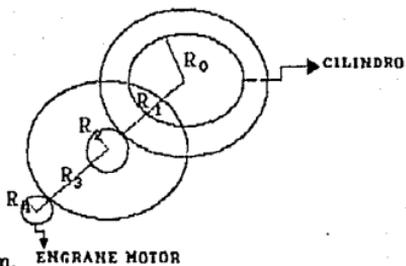
a) Motor trifásico (marca IEM).- Es un motor de corriente alterna, tiene una potencia de 1 HP, velocidad angular de 1718 rpm, trabaja con voltaje de 220/440 V y a una corriente de 11.85/3.5 A, es a prueba de explosiones.

b) Variador de velocidad (marca Magnetck).- Es un aparato que permite variar la velocidad del motor, consta de un circuito controlador que usa 5 tipos de constantes para seleccionar funciones y características del variador: 1) Frecuencia de referencia en el panel de memoria, 2) Sistema de constantes, 3) Panel de operación, 4) Control de constantes y 5) Display. Hace que el motor se mueva también en reversa, reduce la velocidad del motor hasta 100 rpm.

c) Sistema de Engranajes.- Permiten reducir la velocidad del sistema hasta 2 rpm. Se utilizó un juego de 4 engranes. Los radios (fig.6.4) son como sigue: El engrane que va a la flecha del motor es de 2 cm; el siguiente de 18 cm, conectado con una cadena al primero, este hace mover a un engrane de 2.8 cm y éste, a su vez, mueve el engrane que va en el malacate de 17.8 cm. La reducción es de 57.214 veces la velocidad del motor.

d) Sistema de Poleas.- En éstas se coloca el cable. Se construyeron con un balero en el centro para reducir la fricción; se fijan a ambos lados de la columna en estudio, dos arriba y dos abajo (cuatro en total).

Detector de centelleo.- Es un detector de yoduro de sodio activado con talio, $\text{NaI}(\text{tl})$, de 5 cm x 5 cm de diámetro que detecta radiación gamma y rayos X. Consta de un cristal (que es la parte sensible), un fotomultiplicador y un preamplificador que se conecta al multicanal. El tubo fotomultiplicador y el preamplificador producen por cada cuenta una señal eléctrica proporcional a la energía de la radiación que es captada por el multicanal que lo registra en el canal correspondiente y lo muestra en forma de espectro.



- $R_0 = 5.0 \text{ cm.}$
 $R_1 = 17.8 \text{ cm.}$
 $R_2 = 2.8 \text{ cm.}$
 $R_3 = 18.0 \text{ cm.}$
 $R_4 = 2.0 \text{ cm.}$

FIGURA 6.4 RELACION DE ENGRANES

Fuente Radiactiva.- Es un radioisótopo con el cual se radia el objeto bajo estudio. Es una fuente de Cesio-137 de 1 mCi blindada en un porta-fuente.

Contenedor y Porta-Fuente.- Es un cilindro de plomo de 18 cm de largo y un diámetro de 15 cm (fig.6.6) con una estructura externa de acero. Al centro de este tiene un contenedor para colocar la fuente radiactiva.

6.3 APLICACIONES

Existen muchas aplicaciones de la Gammagrafía Longitudinal Electrónica como son: el estudio de torres de destilación, columnas de un edificio, postes, torres, tubería, etc.

Por medio del equipo descrito en la sección anterior se realizó un estudio en una columna de concreto. El procedimiento y el análisis serán desarrollados a continuación

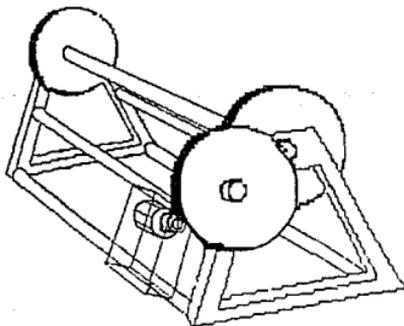


FIGURA 6.5 FORMA FINAL DEL MALACATE

6.3.1 Gammagrafia de una columna de concreto

El estudio se realizó sobre una columna de concreto con una altura de 10 m y un ancho de 0.50 m; la columna forma parte de la estructura del edificio de Investigación Básica de Procesos (IBP) en el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP). El objetivo es analizar el cambio de densidad que existe en ésta.

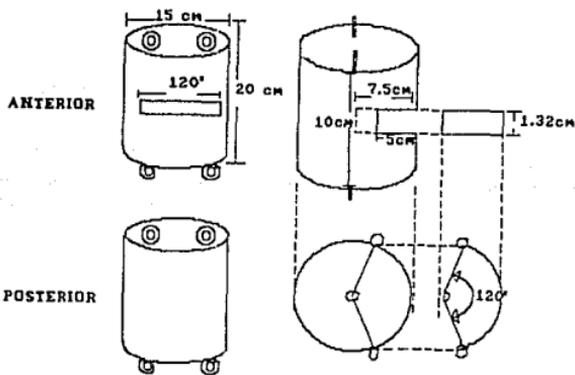


FIGURA 6.6 CONTENEDOR Y PORTA-FUENTE

El arreglo experimental es el siguiente: se coloca una fuente radiactiva en un lado de la columna y el detector en

el otro lado. El porta-fuente y el detector son colgados a un sistema de poleas por medio de un cable de acero de 1/8" de diámetro.

El barrido (fig.6.1) se hace moviendo simultáneamente la fuente y el detector, estando alineados el cristal del detector con el haz emitido por la fuente; es importante cuidar que el cristal y el haz estén alineados ya que de lo contrario los valores de densidad obtenidos no serían verdaderos.

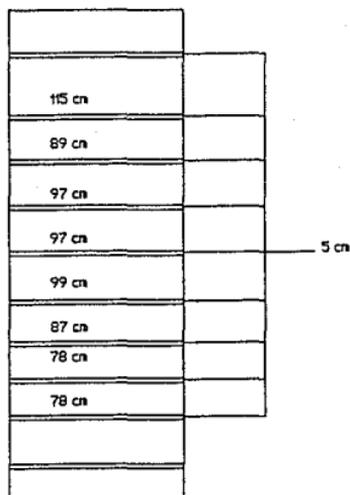


FIGURA 6.7 DIVISIONES DE LA COLUMNA DE CONCRETO

La radiación no sólo penetra las paredes de la columna sino también los componentes de ésta. La fuente que se usa es de Cs-137 y está blindada con un portafuente de plomo. Al detector se le blindó la parte externa del cristal con una placa de plomo de 1.5 mm de espesor de tal forma que sólo queda una ventana de aproximadamente 5 x 5 cm. La razón de blindar el detector es ayudar a discriminar las lecturas de baja intensidad respecto a la radiación de fondo.

La columna tiene una estructura metálica que la divide en 9 particiones (fig.6.7). Las divisiones son placas de hierro de 5 cm de ancho. Sobre estas placas se colocaron 3 placas de plomo de 1.5 mm de espesor. Cabe señalar que las particiones no son equidistantes.

La finalidad de colocar las placas de plomo en cada división es hacer más evidentes las divisiones, debido a que la columna no es homogénea en su densidad, que también se puede observar en las gráficas 6.1, 6.2A, 6.2B, 6.3A, 6.3B, 6.4A, 6.4B de los datos obtenidos, es decir, no sólo hay un cambio de densidad debido a las placas sino que también existe diferente densidad a lo largo de la columna.

Se realizaron varias mediciones de la columna con diferentes velocidades de desplazamiento, el multicanal se calibró para registrar la energía (662 keV) correspondiente al Cs-137.

El multicanal fue programado primero para tomar datos cada dos segundos, el equipo funcionó primero a 4 rpm en movimiento ascendente y posteriormente en descenso. La siguiente medición se realizó con una frecuencia de 4.5 rpm y cada 3 segundos para el movimiento de ascenso y descenso.

Finalmente, la última medición se hizo cada segundo a una frecuencia de 4 rpm, también en movimiento de ascenso y descenso.

6.3.1.1 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS

La forma en que se analizan los resultados obtenidos es:

- 1) Se grafican los datos obtenidos de dos formas: cuentas vs tiempo y densidad vs distancia.

Utilizando un programa en lenguaje PASCAL se grafican los datos obtenidos en cada una de las pruebas. Se obtienen dos tipos de gráficas; el primer caso es número de cuentas vs tiempo, que son resultado de graficar los datos directos del multicanal; el segundo caso es densidad vs distancia, que son resultado del modelo propuesto. En este modelo, la densidad es proporcional al logaritmo natural del cociente de las intensidades por el espesor (constante), es decir;

$$\rho \propto \frac{1}{x} * \ln \frac{I}{I_0}$$

- 2) Se encuentra la velocidad en cada división de la columna.

Para calcular la velocidad se midió la longitud de la columna y el tiempo que tarda en ascender o descender y se obtuvo la velocidad para cada división (ver las operaciones realizadas).

- 3) Se relaciona la densidad obtenida en las gráficas del movimiento del equipo de gammagrafía con los datos empíricos.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

D = distancia total
 tiemT = tiempo total
 d = distancia de cada partición
 V = velocidad total
 C = número de canales en cada partición.
 distT := 820 s := 1T
 tiemT := 350 cm := 1L

d :=
 15
 5
 115
 5
 89
 5
 97
 5
 97
 5
 99
 5
 87
 5
 78
 5
 78
 5
 20

i := 0 ..18

$$D := \sum_i d_i$$

D = 820

$$V := \left[\frac{D}{\text{tiemT}} \right] \quad V = 2.343 \quad C := \frac{d}{V} \cdot \frac{1}{2}$$

d
 -
 v =
 6.402
 2.134
 49.085
 2.134
 37.988
 2.134
 41.402
 2.134
 41.402
 2.134
 42.256
 2.134
 37.134
 2.134
 33.293
 2.134
 33.293
 2.134
 8.537

C =
 3.201
 1.067
 24.543
 1.067
 18.994
 1.067
 20.701
 1.067
 20.701
 1.067
 21.128
 1.067
 18.567
 1.067
 16.646
 1.067
 16.646
 1.067
 4.268

$$CT := \sum_i C_i$$

CT = 175

D = distancia total
 tiemT = tiempo total
 d = distancia de cada partición
 V = velocidad total
 C = número de canales en cada partición
 distT := 820 s := 1T

tiemT := 396 cm := 1L

d :=

15
5
115
5
89
5
97
5
97
5
99
5
87
5
78
5
78
5
20

i := 0 ..18

$$D := \sum_i d_i$$

D = 820

$$V := \left[\frac{D}{\text{tiemT}} \right]$$

V = 2.071

$$C := \frac{d \cdot 1}{V \cdot 2}$$

d - v =

7.244
2.415
55.537
2.415
42.98
2.415
46.844
2.415
46.844
2.415
47.81
2.415
42.015
2.415
37.668
2.415
37.668
2.415
9.659

C =

3.622
1.207
27.768
1.207
21.49
1.207
23.422
1.207
23.422
1.207
23.905
1.207
21.007
1.207
18.834
1.207
18.834
1.207
4.829

$$CT := \sum_i C_i$$

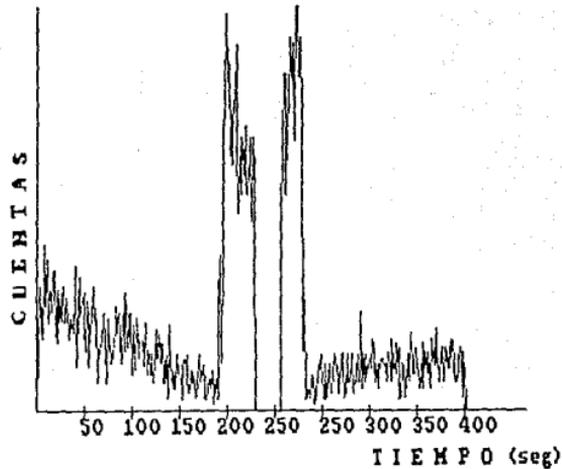
CT = 198

Como paso inicial de las gráficas y los datos empíricos se hace la comparación de la variación de la densidad a lo largo de la columna. Estos se muestran en las gráficas 6.1, 6.2A, 6.3B y 6.4B. En esta comparación se puede apreciar que la columna no es homogénea y que la parte superior es menos densa.

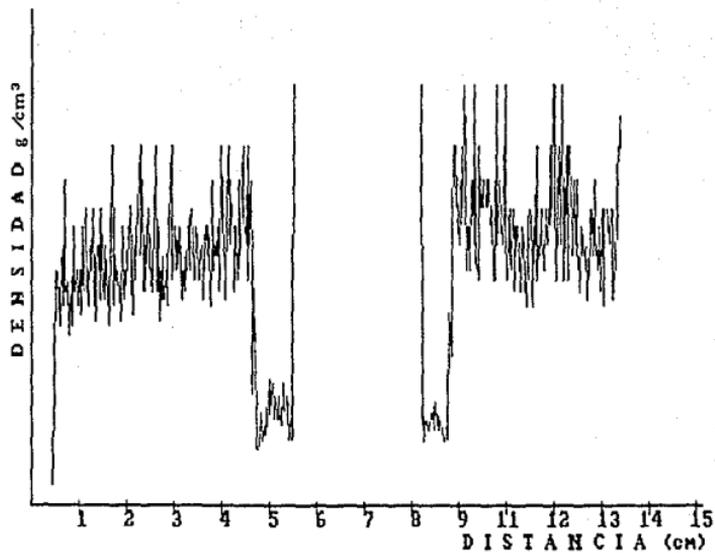
Se dividieron las gráficas 6.2A y 6.2B en dos zonas A y B figura 6.8 y 6.9, respectivamente, y la zona A en tres subzonas A₁, A₂ y A₃. En la subzona A₁ no existen grandes cambios, la densidad no es muy variable a excepción de 4 picos muy pronunciados que representan las placas de plomo colocadas en los lugares ya señalados. En la subzona A₂, como en la subzona anterior, no se aprecian muchos cambios en la densidad. La zona A₃ es la más densa de todas ya que en la gráfica se aprecia un marcado aumento en la curva y el número de picos altos aumenta; es muy probable que esta subzona tenga más material de hierro. En la zona B el cambio de densidad se hace más evidente ya que en esta división se observa un marcado descenso en la densidad.

Se investigó la razón y se encontró que el tercer piso del edificio fue construido posteriormente cambiando el diseño. En esta parte se usaron vigas de acero, cubiertas con una simulación de concreto que mantuvo el aspecto de la arquitectura anterior.

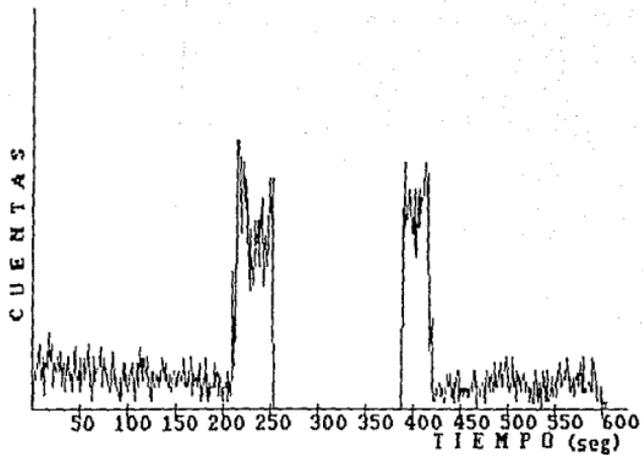
Finalmente, con las gráficas de densidad vs distancia se reconstruyó la columna. En esta reconstrucción (figuras 6.8 y 6.9) se puede verificar que la columna no es homogénea. En la tabla 6.1 se lleva a cabo la comparación de las distancias reales y las obtenidas de estas gráficas.



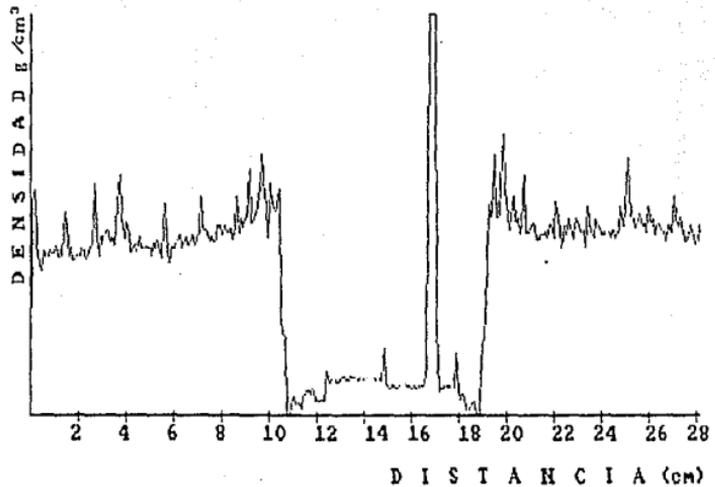
GRAFICA 6.3A GAMMAGRAFIA DE LA COLUMNA
4 RPM MUESTREO CADA 2 s



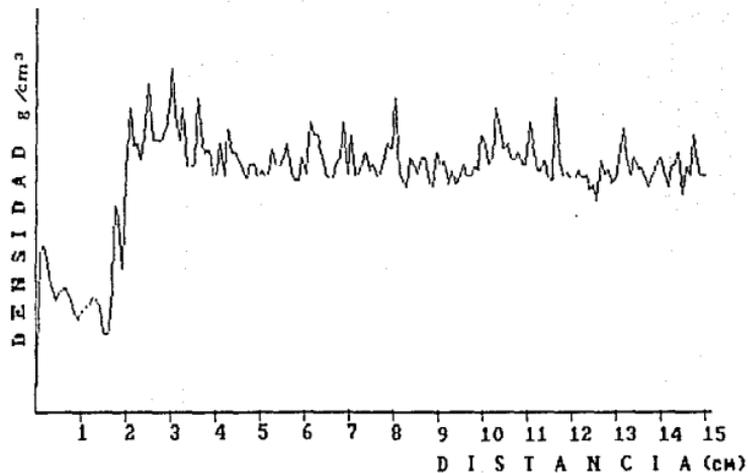
GRAFICA 6.4B Gammagrafia de la columna 4 RPM
Muestreo cada 1 s



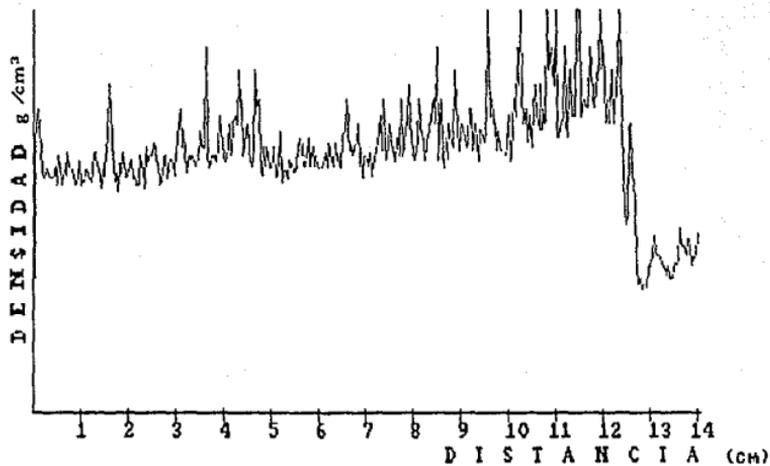
GRAFICA 6.4A Gammagrafia de la columna 4 RPM
Muestreo cada 1 s



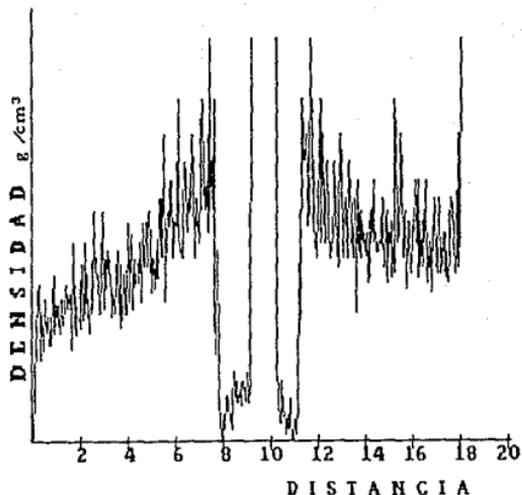
GRAFICA 6.1 GAMMACRAFIA DE LA COLUMNA 4 RPM
MUESTREO CADA 2 s



GRAFICA 6.2B BARRIDO DE LA COLUMNA DE BAJADA
4.5 RPM MUESTREO CADA 3 S



GRAFICA 6.2A BARRIDO DE LA COLUMNA DE SUBIDA
4.5 RPM MUESTREO CADA 2 s



GRAFICA 6.3B GAMMAGRAFIA DE LA COLUMNA 4 RPM
MUESTREO CADA 2 s

LONGITUD REAL	LONGITUD RELATIVA	LONGITUD MEDIDA (1 s/c) SUBIDA		LONGITUD MEDIDA (2 s/c) BAJADA	
m	mm	m	mm	m	mm
1.20	23.12	1.09	21.0	1.19	23.0
0.94	18.11	0.98	19.0	0.98	18.5
1.02	19.65	1.02	19.8	1.01	19.5
1.02	19.0	1.09	21.0	1.00	20.1
1.04	20.03	1.11	21.5	1.00	21.0
0.92	17.72	0.89	17.1	0.93	18.0
0.83	16.0	0.83	16.0	0.83	16.0
0.83	16.0	0.82	15.8	0.79	15.0
0.26	3.85	0.17	3.2	0.19	3.7
0.20	3.89	0.18	3.5	0.18	3.6

TABLA 6.1 Comparación de la longitud real y la medida en las gráficas

Para comparar la longitud real con la medida en las gráficas se transformó la longitud de metros a milímetro, conociendo que la longitud real total es de 8.2 m y la medida es de 158 mm, se utilizó la siguiente relación:

$$\frac{B20}{r} = \frac{158}{x}$$

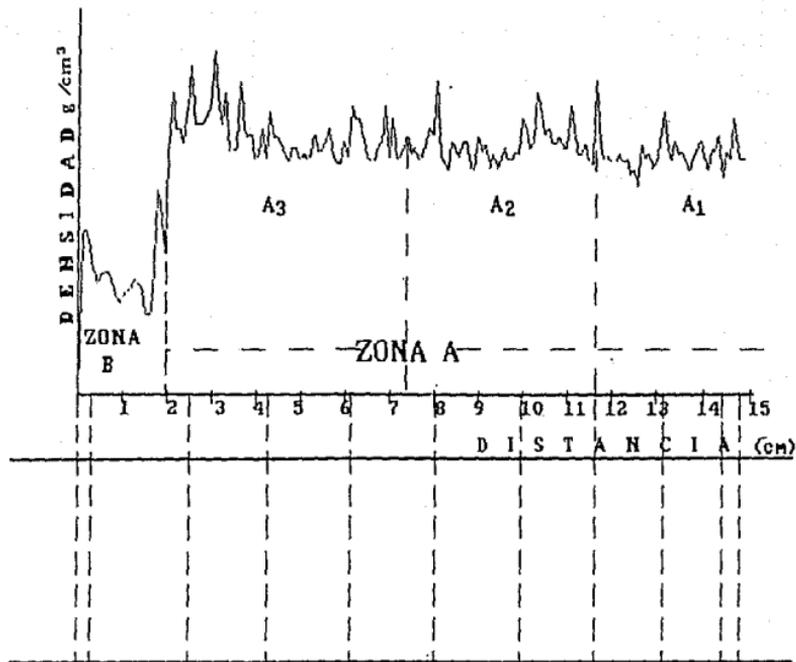


FIGURA 6.9 RECONSTRUCCION DE LA COLUMNA DE CONCRETO BARRIDO DE BAJADA

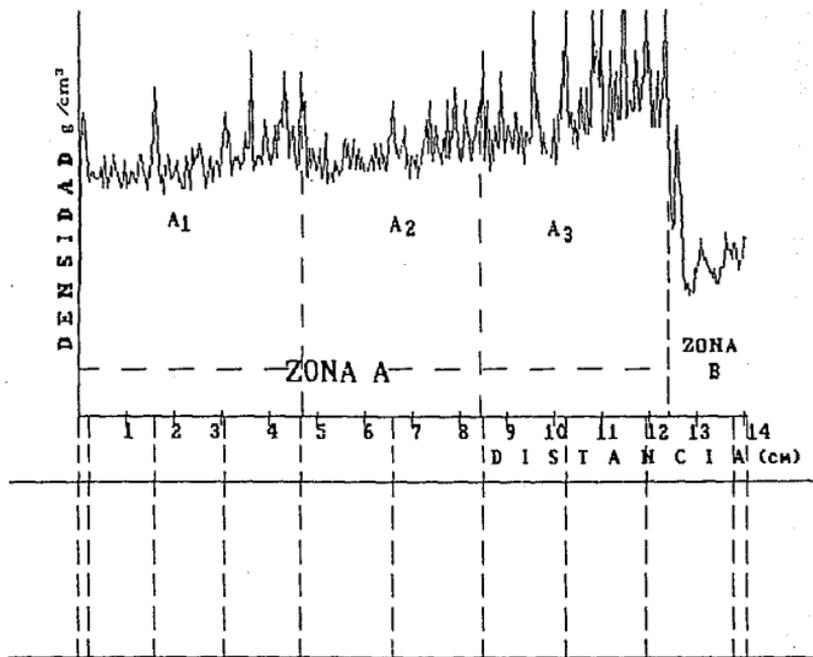


FIGURA 6.8 RECONSTRUCCION DE LA COLUMNA DE CONCRETO
BARRIDO DE SUBIDA

De donde

Longitud total = 820 cm

Longitud real = r cm

Longitud medida = 158 mm

6.4 CONCLUSIONES

Se diseñaron y construyeron las partes de un sistema para realizar Gammagrafia Longitudinal Electrónica utilizando instrumentos propios para radiología e instrumentos electrónicos y mecánicos. La velocidad que se logró fue 94.2 cm/min (para 2 rpm en el cilindro del malacate), la cual permitió que se pudiera realizar un estudio detallado de una columna de concreto que forma parte del edificio de Investigación Básica de Procesos (IBP) del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP).

Se utilizó un programa en lenguaje PASCAL para obtener gráficas de los datos obtenidos en cada una de las pruebas. Se obtuvieron dos tipos de gráficas el primer caso es número de cuentas vs tiempo, que son resultado de graficar los datos directos del multicanal; el segundo caso es densidad vs distancia, que son resultado del modelo propuesto.

Las gráficas del segundo caso (fig. 6.8 y 6.9) se analizaron de la siguiente manera:

Como primer paso, se compararon las variaciones de la densidad a lo largo de la columna, dando como resultado que la columna no es homogénea ya que la variación se hace más evidente cuando se divide la gráfica en dos partes A y B. Además, la primera parte fue subdividida en tres subsecciones y cada subsección muestra diferente densidad. La subsección que tiene mayor densidad es la A₃, las

subsecciones A_1 y A_2 son muy similares. La sección B es la que muestra un descenso exagerado en la densidad, debido a la forma particular en que se construyó esta parte.

Finalmente se hizo la ubicación de las marcas de plomo obstáculos y se comparan las distancias reales con las observadas con el método propuesto y se verificó que la velocidad no es homogénea.

CONCLUSIONES

De acuerdo con el planteamiento inicial de desarrollar un sistema que emplea radiación gamma para detectar fallas estructurales en equipos y materiales que se utilizan en la industria, se llevo a cabo el siguiente orden:

1) Se hizo un estudio sobre interacción de la radiación con la materia y sobre atenuación de la radiación en la materia que sirvió como base para realizar los siguientes pasos.

2) Se realizó un estudio de la atenuación de la radiación en diferentes sustancias. Para llevar a cabo este se construyó una probeta cuadrada que proporcionó una distancia de incidencia constante y que permitió encontrar el coeficiente de atenuación lineal de la radiación y el másico (tablas 5.2 y 5.3).

Se observó que la geometría del recipiente contenedor es importante debido a que la variación del espesor influye en las mediciones de la intensidad de la radiación incidente. Se hizo un análisis del error por medio de las relaciones 5.3 y 5.4 y de esa manera se encontró el intervalo de confianza que contiene al valor calculado teóricamente.

3) Se diseñaron y construyeron las componentes que constituyen un equipo para realizar Gammagrafía Longitudinal Electrónica utilizando instrumentos propios para radiología e instrumentos electrónicos y mecánicos. La velocidad de movimiento que se logró fue de 2 rpm la cual permitió que se pudiera realizar un estudio detallado de un objeto.

4) Se realizó la prueba del equipo en una columna de concreto y se obtuvo la variación de la densidad a lo largo de ésta. Se calculó la velocidad de ascenso y descenso para cada división de la columna.

Con lo que, finalmente, se consiguió el objetivo de esta tesis:

Diseñar un instrumento para detectar fallas estructurales en materiales de construcción, soporte o conducción de fluidos.

A manera de evaluación y caracterización de nuestro instrumento se trató de reconstruir la columna analizada (fig.6.8 y 6.9), es decir, de llevar a cabo un proceso de síntesis a partir de las gráficas y datos obtenidos.

Se conocen los materiales y su distribución en la citada columna por lo que es posible afirmar que el sistema va bien encaminado, empero, faltan aún algunos puntos por afinar. Uno de ellos (y quizás fundamental) es la falta de rigidez en el acoplamiento del conjunto fuente-detector. Sin embargo, una variación en la distancia fuente-detector de 1 cm, implica que el error en la medición sería de $\pm 2\%$, otro no menos importante es la imposibilidad de conservarlos a la misma distancia de la columna durante su trayectoria.

Este instrumento tiene ciertas limitaciones ya que sólo puede emplearse con objetos a gran escala como se mencionó al principio de este trabajo, es decir, no se puede utilizar en objetos pequeños como una hoja de papel o un lápiz, tampoco funcionaría en una columna de concreto de tres metros de espesor, ya que la radiación gamma no penetra. Las aplicaciones que se van a realizar son: el estudio de reactores (con diámetros desde 0.5 m hasta 4 m) con

recubrimiento térmico para conocer si la densidad que existe entre la substancia empleada para acelerar o disminuir la reacción y el vapor son las adecuadas; torres de destilación (con diámetros desde 0.5 m hasta 5 m) en estas se estudiara si los platos estan caidos o desplazados de su lugar; estudiar el desgaste, fractura o falla que existe en las tuberias, etc.

Como primera prueba se utilizó unicamente un detector de radiación pero se adaptarán aproximadamente cinco detectores al sistema, con lo que, la información será más completa y se tendrá diferentes perfiles del objeto a estudio.

La uniformidad en la velocidad lineal, la igualdad entre la velocidad en el ascenso y el descenso, la perpendicularidad de la radiación respecto a la columna son otras interrogantes a las que se dará también un nuevo tratamiento e ir descartando fuentes de error.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- EVANS, Robley D., THE ATOMIC NUCLEUS, USA., Ed. MAC GRAW-HILL BOOK COMPANY, 1955.
- 2.- PRICE, William J., NUCLEAR RADIATION DETECTION, 2a. ed., USA, Ed. MAC GRAW-HILL BOOK COMPANY, 1964.
- 3.- KOHL, J., ZENTER, René D., RADIOISOTOPE APLICATIONS ENGINEERING, USA, Ed. D. VAN NOSTRAND COMPANY INC. 1961.
- 4.- CORK, James M., RADIOACTIVITY AND NUCLEAR PHYSICS, USA, Ed. D.VAN NOSTRAND COMPANY INC.
- 5.- OVERMAN, Ralph T., CLARK H.M., RADIOISOTOPE TECHNIQUE, USA, Ed. MC GRAW-HILL BOOK COMPANY INC. 1960.
- 6.- TURNER, James E., ATOMS, RADIATION AND RADIATION PROTECTION, USA, Ed. PERGAMON PRESS, 1986.
- 7.- BURCHAM, W.E., NUCLEAR PHYSICS, USA, Ed. MC. GRAW-HILL 1963.
- 8.- CHASE Grafton D., RABINOWITZ Joshep L., PRINCIPLES OF RADIOISOTOPE METHODOLOGY 3A. ed. Ed. BURGESS, 1967.
- 9.- BESANÇON Robert M., THE ENCYCLOPEDIA OF PHYSICS, USA Ed REINHOLD PUBLISHING CORPORATION, 1966.
- 10.- DUPUY G., RADIATIVITÉ ET ENERGIE NUCLEAIRE (COLL. QUE SAIS JE?), FRANCE Ed. PRESSES UNIVERTAIRE DE FRANCE 11em ed. 1982.
- 11.- MANN Wilfrid B., RADIATIVIDAD Y SU MEDIDA, MEXICO, Ed. REVERTE MEXICANA, S.A., 1968.

12.- RADIOLOGICAL HEALTH: RADIOLOGICAL HEALTH HANDBOOK,
USA, Ed. U.S DEPARTMENT OF HEALTH EDUCATION AND WELFARE
ed.1970.

13.- EISBERG, R., RESNICK, R., FISICA CUANTICA, MEXICO, Ed
LIMUSA, 1979.

APENDICES

APENDICE A

BREMSSTRAHLUNG

El descubrimiento del espectro continuo de radiación X , o bremsstrahlung, que es resultado de la colisión inelástica de los electrones con el núcleo, fue el primer paso para el inicio de la nueva era de la Física. Roentgen en 1895 reportó estos misteriosos (para entonces) rayos, cuyas investigaciones llevaron al campo de la hoy conocida Física Moderna.

Se conocen dos métodos de producción de rayos X: 1) la línea espectral o espectro característico (radiación electromagnética) del átomo, 2) el espectro continuo o bremsstrahlung que está asociado con la deflexión de la trayectoria de partículas cargadas, por el campo de Coulomb del núcleo.

Al espectro continuo de radiación X se le llama frecuentemente bremsstrahlung, del alemán brems (frenar, es decir, desacelerar) y strahlung (radiación). El proceso bremsstrahlung ocurre no sólo en tubos de rayos X sino en cualquier parte en donde los electrones choquen con la materia, como los rayos cósmicos, en los cinturones de radiación de van Allen que circundan la tierra y en el frenamiento de electrones que emergen de los aceleradores o núcleos radiactivos.

El proceso de bremsstrahlung se puede considerar como un efecto fotoeléctrico inverso: en el efecto fotoeléctrico, se absorbe un fotón cuya energía e impulso son donados al electrón y al núcleo que retrocede; en el proceso de bremsstrahlung se crea un fotón cuya energía e impulso provienen de la colisión de un electrón y un núcleo. El proceso bremsstrahlung se trata de la creación de fotones en vez de su absorción o dispersión por la materia.

APENDICE B

DEFINICIONES Y UNIDADES UTILIZADAS EN MATERIA RADIATIVA

BEQUEREL.- Unidad del SI que se usa para medir la actividad de núclidos radiactivos. La actividad en bequerel de una muestra en un momento dado es el promedio de las desintegraciones por segundo de sus átomos en ese momento.

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1} = 2.7027 \times 10^{-11} \text{ Ci}$$

CONTAMINACION RADIATIVA.- Es el depósito de material radiactivo en cualquier lugar que pueda dañar personas, hacer a perder un experimento, o hacer inadecuados o inseguros para algún propósito productos o equipos. Es la presencia no requerida de material radiactivo. Muchas veces referido como contaminación.

CONTAMINACION RADIATIVA SUPERFICIAL.- La presencia de una sustancia radiactiva sobre una superficie en cantidades superiores a $4 \cdot 10^3 \text{ Bq m}^{-2}$ (10^{-5} Ci/cm^2) en el caso de emisiones beta y gamma, o $4 \cdot 10^3 \text{ Bq m}^{-2}$ (10^{-6} Ci/cm^2), en el caso de emisiones alfa, esta puede ser fija o removible.

CURIE.- Es la unidad que se emplea para medir la actividad de material radiactivo en el que se transforman $3.7 \cdot 10^{10}$ átomos por segundo.

$$1 \text{ Curie} = 1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bequerel}$$

DOSIS.- Es una forma general para denotar la cantidad absorbida de radiación o energía. Para propósitos especiales

debe ser clasificada adecuadamente (dosis absorbida, dosis acumulada,...). Si no está clasificada generalmente se refiere a dosis absorbida.

DOSIS ABSORBIDA.- La energía depositada por la radiación ionizante en la materia.

Técnicamente, la dosis absorbida, D , se define como el cociente de dE entre dm , donde dE es la energía promedio depositada por la radiación ionizante en una masa dm .

La unidad es el Gray (Gy) equivale a 1 joule/kg (anteriormente se usaba el rad)

DOSIS ACUMULADA.- Es la dosis total resultante por la repetición de exposiciones a la radiación ionizante.

DOSIS INICIAL O DE UMBRAL.- El valor de la dosis por debajo del cual se considera que un efecto determinista (no estocástico) no se manifestará.

DOSIS LETAL PERCENTIL.- Es la dosis de radiación requerida para llegar al punto final biológico de un porcentaje de los especímenes tratados. Usualmente se escribe junto con el porcentaje de la población que probablemente llegue a su fin biológico y el período en el cual se espera alcanzar dicho porcentaje. Se emplea el símbolo $DL_{x/y}$, donde x se refiere al porcentaje de la población y y al período de días, por ejemplo, $DL_{20/45}$ se refiere a la dosis letal que afecta al 20 por ciento de la población que recibió la dosis después de 45 días de la exposición.

DOSIS LETAL MEDIANA.- Es la dosis de radiación requerida para el 50% de la población llegue a su punto final biológico.

EQUIVALENTE DE DOSIS.- Con fines de protección radiológica se ha encontrado conveniente introducir una magnitud física que correlaciona la dosis absorbida con los efectos deletéreos más importantes de la exposición a la radiación, en particular en efectos estocásticos tardíos. El equivalente de dosis es la cantidad que resulta de la ecuación:

$$H = D Q N$$

donde D es la dosis absorbida en Gy, Q es el factor de calidad y N el producto de otros factores modificantes, que por ahora se considera igual a la unidad. El nombre especial SI para la unidad de equivalente de dosis es el Sievert (Sv) (cuando la dosis se da en red el equivalente de dosis queda en rem).

EQUIVALENTE DE DOSIS EFECTIVA (HE).- Se emplea para evaluar el posible daño a la salud debido a la irradiación total del cuerpo, se calcula como:

$$H_E = \sum_r W_r H_r$$

donde H_T es el equivalente de dosis para el tejido T y W_r es el factor de ponderación para ese tejido.

EXPOSICION.- Es el cociente de dQ entre dm ; donde dQ es el valor absoluto de la carga total de los iones de un signo

producidos en aire cuando todos los electrones, positivos y negativos liberados por fotones en una masa de aire dm son frenados completamente.

FACTOR DE CALIDAD.- Es el factor de transferencia de energía lineal por el cual se multiplica la dosis absorbida a fin de obtener (para fines de protección radiológica) una cantidad que exprese la efectividad de la dosis absorbida, en una escala común, para todos los tipos de radiación ionizante.

GRAY (Gy).- Unidad del SI de dosis absorbida de energía por unidad de masa, que resulta por el paso de radiación ionizante a través de un material. Un Gray es la dosis absorbida correspondiente a la energía de un joule por kilogramo de masa.

$$1 \text{ Gray} = 1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$$

INDICE DE EQUIVALENTE DE DOSIS.- En el caso de irradiación externa del cuerpo entero, se aplican los conceptos de:

INDICE SUPEREFICIAL DE EQUIVALENTE DE DOSIS: El índice superficial de equivalente de dosis $H_{r,s}$ en un punto, es el equivalente de dosis máximo dentro del volumen comprendido entre 0.07 mm y 1 cm, medidos a partir de la superficie de una esfera de 30 cm de diámetro centrada en ese punto y formada por material equivalente a tejido blando con una densidad de 1 g cm^{-3} .

INDICE PROFUNDO DE EQUIVALENTE DE DOSIS: El índice profundo de equivalente de dosis $H_{r,p}$ es el equivalente de dosis máximo dentro del núcleo de 28 cm de diámetro inscrito

en una esfera de 30 cm de diámetro centrada en ese punto y formada por material equivalente a tejido blando con una densidad de 1 g cm^{-3} .

LIMITE ANUAL DE INCORPORACION.- Es el límite secundario para la irradiación ocupacional interna y es el valor menor de la incorporación de un radionúclido determinado en un año por el hombre referencia, que se traduciría bien en un equivalente de dosis efectivo comprometido de 50 mSv (5 rem) o bien, en un equivalente de dosis comprometido en el cristalino de 150 mSv (15 rem) o en un equivalente de dosis comprometido en cualquier otro órgano o tejido de 500 mSv (50 rem).

LIMITES PRIMARIOS.- Se aplican al equivalente de dosis, que es la magnitud que cuantifica el posible efecto deletéreo para la salud.

LIMITES SECUNDARIOS.- Se usan cuando no se puede aplicar directamente el límite primario, por ejemplo, se aplican a la cantidad de un radionúclido incorporada al organismo.

LIMITES DERIVADOS.- Se relacionan con los límites primarios mediante un modelo definido, tal que si se satisfacen los límites derivados es casi seguro que se satisfacen los límites primarios.

LIMITES AUTORIZADOS.- Son los que establece la autoridad competente para cualquier magnitud y que en general son menores a los límites primarios o a los derivados.

LIMITES PARA PERSONAL OCUPACIONALMENTE EXPUESTO.- El límite equivalente de dosis efectivo anual para el personal ocupacionalmente expuesto es de 50 mSv (5 rem), para los

efectos estocásticos. Para los efectos no estocásticos el límite anual equivalente de dosis es de 500 mSv (50 rem), para los distintos órganos y tejidos, excepto para el cristalino, para el cual es de 150 mSv (15 rem).

LIMITES PARA EL PUBLICO.- El límite equivalente de dosis efectivo anual para individuos del público es 5 mSv (0.5 rem), para los efectos estocásticos. Para los efectos no estocásticos el límite equivalente de dosis anual es de 50 mSv (5 rem). Cuando los individuos del público pueden estar expuestos por períodos prolongados (muchos años) el valor medio anual del equivalente de dosis efectivo se procurará que sea de 1 mSv (0.1 rem).

PERMISIONARIO.- Persona física o moral que posee la titularidad de la autorización, permiso o licencia expedidas por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) para desarrollar una actividad autorizada por la misma.

PERSONAL OCUPACIONALMENTE EXPUESTO.- Aquel que en ejercicio y con motivo de su ocupación esta expuesto a radiación ionizante o a la incorporación de material radiactivo. Quedan excluidos los trabajadores que ocasionalmente en el curso de su trabajo puedan estar expuestos a este tipo de radiación, siempre que el equivalente de dosis anual que reciban no exceda el límite establecido para el público.

rad.- Es la unidad de dosis absorbida que se usó antes del SI para medir las dosis absorbida de radiación de 100 ergs por gramo de materia.

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ ergs/g} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ J/kg} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Gy}$$

rem.- Fué la unidad para medir el equivalente de dosis antes del SI. El equivalente de dosis en rems es igual a la dosis absorbida en rads multiplicada por el factor de calidad (Q), y el producto de otros factores modificantes que por ahora se consideran igual a la unidad.

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ rad} \cdot Q$$

ROENTGEN.- Cantidad de exposición a la radiación X o gamma, necesaria para que la emisión corpuscular asociada pueda producir una carga de una unidad electrostática, en iones de uno y otro signo por 0.001293 g de aire ($2.58 \cdot 10^{-4}$ C/kg). Fué la unidad previa al SI para medir la dosis de exposición de los rayos X o gamma.

$$1 \text{ r} = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg} = 1 \text{ esu/cm}^2 \text{ de aire a condiciones estándar}$$

$$1 \text{ C/kg} = 3876 \text{ r}$$

SIEVERT (Sv).- Es la unidad correspondiente a el equivalente de dosis de radiación (H) que se usa para propósitos de protección radiológica, en el SI. El equivalente de dosis, expresada en sieverts, es el producto de la dosis absorbida en grays (D) por el factor de calidad (Q) y por el producto de otros factores modificantes (N), que por el momento se considera igual a la unidad.

UNIDAD DE EXPOSICION (C/kg).- Es la cantidad de radiación X o gamma que produce, en un kilogramo de aire seco a condiciones estándar (0 oC y 760 mmHg), una cantidad de iones cuya carga total es un coulomb de cada signo.

$$1 \text{ C/kg} = 34 \text{ Gy}$$

$$1 \text{ C/kg} = 3876 \text{ r}$$

ZONA RESTRINGIDA.- Son aquellas en las que bajo condiciones normales de trabajo, los niveles de radiación de fuentes externas y/o contaminación de aire o superficie son tales, que la dosis equivalente total acumulada en un año podría exceder 1.5 rem (3/10 de los límites).

En estas zonas se utilizará un señalamiento con el símbolo internacional de radiaciones en color naranja sobre fondo blanco agregando en la parte superior la leyenda: "ZONA RESTRINGIDA" y en la inferior: "ACCESO CON AUTORIZACION". El límite de esta zona está indicado con franjas color naranja.

ZONAS CONTROLADAS.- Son aquellas en las que las exposiciones anuales no exceden 1.5 rem (3/10 de los límites) de dosis equivalente. Se utilizará un señalamiento con el símbolo internacional de las radiaciones en color azul marino sobre fondo blanco en la parte superior esta leyenda: "ZONA CONTROLADA" y en la inferior: "ACCESO REGLAMENTADO". El límite de la zona está indicado con franjas azul marino.

ZONAS NO CONTROLADAS.- Son aquellas en que solo existe la radiación natural o de fondo (del medio ambiente) y por ende no están controladas por la licencia.