



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN**

**PUESTA EN MARCHA Y OPERACIÓN DE UN
SISTEMA DE DETECCIÓN DE RADIACIÓN
NUCLEAR CON TUBO
GEIGER MULLER**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A:

ANGÉLICA RANGEL PIMENTEL

JOSÉ DE JESÚS SOLÍS PRUDENCIO

ASESOR: ING. FERNANDO PATLÁN CARDOSO

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO, DE MEX.

2005



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta 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.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis papás Cristina y Germán que gracias a sus consejos, su apoyo incondicional, su confianza, y su cariño he logrado una de mis más grandes metas: terminar mi carrera;

A mis profesores que me tuvieron como alumna en sus clases brindándome lo mejor de ellos: su gusto por la ingeniería.

A mis padres Rosa Bertha Prudencio Núñez y Nahum Solís Granillo, por haberme enseñado el camino correcto y brindarme todo su apoyo incondicionalmente, tanto económicamente como moral, sin esperar nada a cambio mas que la satisfacción y orgullo de tener un hijo que pudiera alcanzar sus metas en la vida.

A mis profesores y compañeros por darme esas lecciones tanto académicas como de vida ya que sin ellas no podría crecer como persona y ser día con día un mejor alumno así como un mejor ser humano.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares de México (ININ) por la facilitación del tubo geiger ya que éste es la base de este trabajo.

Al Ingeniero Fernando Patlán Cardoso por darnos la oportunidad de realizar este proyecto ya que sin su ayuda nos hubiera sido más difícil concluir con nuestra carrera.

INDICE

1. Introducción	1
2. Conceptos básicos de la medida y detección de la radiación nuclear	9
2.1. Estructura molecular y atómica	9
2.2. La radiación nuclear	14
2.3. Desintegración radiactiva	15
2.4. Interacción de la radiación con la materia	23
2.4.1. Excitación	25
2.4.2. Ionización	26
2.5. Detectores de la radiación nuclear	30
2.5.1. Principio básico de detección de la radiación nuclear	30
2.5.2. Tipos de detectores	31
2.5.3. Sistema de detección con detector Geiger Müller	53
3. Diseño experimental	60
3.1. Descripción del sistema a utilizar	60
3.1.1. Diseño de la fuente de alto voltaje	61
3.1.2. Sistema de detección	66
3.1.3. Sistema de medición	67
3.2. Sistema de detección completo	68
3.3. Pruebas del sistema de Detección	69
3.3.1. Verificación del funcionamiento de la fuente de alto voltaje	69
3.3.2. Verificación del funcionamiento del tubo Geiger	70
3.3.3. Verificación del funcionamiento del sistema de medición	70
3.3.4. Verificación del funcionamiento del sistema de detección completo	72
3.4. Calibración	73
• Conclusión	79
• Apéndice A₁	80
• Bibliografía	83

PRÓLOGO

Este trabajo gira alrededor de la puesta en marcha y operación de un sistema detector de radiación con un tubo geiger-müller, el cual es propiedad del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares de México. Este estudio servirá para seguir con la caracterización de dichos instrumentos los cuales son de uso continuo en diversas aplicaciones de conocimientos tales como la Medicina, la Ingeniería, la Agricultura y muchas otras.

Este trabajo presenta en una forma simplificada los conceptos básicos de la teoría de la radiactividad, desde la estructura atómica hasta los tipos de radiación y maneras de detectarla. Cabe señalar que no se trata de hacer un tratado en la materia sino de proporcionar los conocimientos básicos para la comprensión de aquel lector que no este familiarizado con el tema.

El trabajo se desarrollara de la siguiente manera:

En el capitulo 1 se describen los antecedentes necesarios así como la importancia de la energía nuclear y algunas de sus aplicaciones.

En el capitulo 2 se hace un resumen de los conceptos básicos para la medida y la detección de la radiación nuclear describiendo la estructura molecular, la radiación nuclear y los tipos de detectores mas importantes.

El capitulo 3 se muestra el diseño del detector que se realizo, describiendo cada uno de sus componentes, las pruebas necesarias, y la calibración del equipo.

Finalmente se exponen las conclusiones que se obtuvieron al finalizar la puesta en marcha del detector.

Objetivo:

- ♠ Poner en marcha un sistema de detección de la radiación nuclear con un detector gaseoso del tipo Geiger-Müller.

1. Introducción

Para poder hablar de radiación es necesario contar con los antecedentes necesarios para poder comprender mejor lo que esta representa. Por ello hemos hecho una investigación para así entender mejor el tema. En este trabajo hablaremos desde como esta formado un átomo, su estructura molecular y atómica, hasta como medir la radiación nuclear por medio de un detector. El detector Geiger Müller es un instrumento que nos permite detectar radiaciones nucleares las cuales no son visibles mediante los sentidos humanos. El objetivo de este proyecto, es poner en marcha un detector de radiación, el cual esta formado por un tubo geiger, una fuente de alto voltaje y su respectiva electrónica asociada

Se ha realizado un compendio de algunas de las aplicaciones de la radiactividad para comprender mejor la importancia de esta.

Vivimos en la era Atómica, un período de la historia que se inició en el año 1945 con las explosiones de las bombas nucleares construidas con fines bélicos. Esas explosiones, las fuerzas más poderosas que el hombre había desencadenado hasta aquella época, eran la respuesta que había intrigado a los hombres de ciencia y a los filósofos durante más de dos mil quinientos años, o sea el saber de qué y de qué modo está hecho el mundo.

Los primeros hombres que intentaron hallar la respuesta a dicha cuestión fueron los griegos, quienes se esforzaban por encontrar explicaciones lógicas a todos los misterios de la naturaleza. Algunos, llegaron a conclusiones extrañas.

Aproximadamente en el año 600, antes de la era cristiana, Tales de Mileto, un filósofo griego, aseveró que el agua o la humedad constituían la esencia vital de las cosa; cierta clase de agua para

los mares, otra, más sólida, para los objetos duros como las piedras, etc. Poco después, otro pensador griego anunció que la teoría de Tales era descabellada; era evidente que todos los objetos estaban formados de agua y aire.

Otro hombre sostuvo que la materia primaria o elemento era el aire, y otro más afirmó que se equivocaban, los objetos estaban integrados por fuego. La situación continuó así, y una teoría sucedía a otra.

Años después, un hombre llamado Demócrito se presentó con otra teoría distinta. Todo lo que existe, dijo Demócrito, la tierra, el cielo, los océanos, la vegetación y todos los seres vivientes, está integrado por pequeñísimas partículas, agrupadas compactamente como las abejas en una colmena. Demócrito llamó átomos a esas partículas, (palabra griega que significa “indivisible” o sea que no se puede separar). Esta teoría de las partículas, aparentemente absurda, fue atacada nada menos que por Aristóteles, el célebre filósofo, uno de los más grandes pensadores griegos que han existido. Desacreditó en forma tal la teoría de Demócrito, que tuvieron que transcurrir más de dos mil años antes de que los hombres de ciencia volvieran a tomarla en consideración.

Cuando lo hicieron, comprendieron que un solo detalle en la teoría de Demócrito era el que la había hecho apartarse de todas las extrañas teorías que la habían precedido. Hasta cierto punto, por lo menos, Demócrito tenía la razón.

Como sabemos, Demócrito había confundido los átomos con lo que ahora llamamos moléculas, pero iba en buen camino al afirmar que eran pequeñísimos. Actualmente, sabemos que las moléculas como los átomos son tan pequeños que es difícil

imaginarnos su tamaño, solo existen unas cuantas especies de átomos (mas de cien), pero con ellas se pueden obtener muchas clases de moléculas.

Para imaginar el tamaño de un átomo, observemos un grano de azúcar. A unos metros de distancia dicho trozo de azúcar no se puede apreciar. Sin embargo contiene millones de moléculas y cada una de ellas esta formada por muchos átomos. Pero existe algo mas pequeño que un átomo, se llama núcleo, y que esta situado al centro de cada átomo y este esta integrado por partículas aun mas diminutas llamadas protones y neutrones.

Se podría suponer que cuando algo es tan pequeño no tiene caso tomarlo en consideración, pero esto es erróneo. Cuando los protones y los neutrones del interior de un átomo son fisionados o fusionados es cuando se obtienen bombas nucleares y de hidrógeno, así como las plantas de generación eléctrica por medios nucleares.

Ya han transcurrido muchos años desde el amanecer de la Era Nuclear. La ciencia ha encontrado cómo construir bombas aún más potentes, pero de mayor importancia que ellas son las aplicaciones pacificas que se les han hallado al átomo y a su núcleo. La gente de todas partes del mundo confía en que los átomos nunca vuelvan a ser usados para la destrucción. Pero lo que sí es seguro, es que se aplicarán con fines constructivos. De hecho, los átomos ya se han puesto a trabajar para la industria.

La industria no es la única que emplea la energía nuclear. Ésta ha probado su gran importancia en la medicina, en la agricultura, en los transportes, en la minería y en todas y cada una de las demás actividades humanas.

Algunas de sus aplicaciones son conocidas. Las estaciones generadoras por medio de energía nuclear abastecen de electricidad a varias ciudades. La radiación nuclear se emplea para diagnosticar y descubrir algunas enfermedades y curar otras. Los motores nucleares impulsan a los barcos y, dentro de poco tiempo, harán lo mismo con los aeroplanos. Algún día el átomo podrá proporcionar calor a ciudades enteras, generar fuerza para las naves espaciales, derribar montañas, abrir canales y descubrir nuevos yacimientos de minerales. Quizá aun pueda utilizarse para mejorar las condiciones climáticas de la Tierra.

Pero dentro de cada uno de esos grandes proyectos hay probablemente cientos de aplicaciones menos conocidas de la energía nuclear. El reactor atómico nos permite hacer toda clase de elementos radiactivos y, en el comercio y en la industria, ha probado ser de gran utilidad en muchas formas asombrosas. He aquí unas cuantas de ellas:

En la industria petrolera, la cual envía constantemente grandes cantidades de petróleo crudo a través de millares de kilómetros de tubería, el átomo ha hecho posible que se haga circular, una después de otra y por la misma tubería, dos clases distintas de petróleo, para luego separarlas. En el otro extremo Se colocan “etiquetas” radiactivas entre los dos envíos, y un detector es el encargado de “avisar” cuándo termina de pasar la primera clase de petróleo y cuándo empieza a llegar la segunda.

Si los ingenieros de una fábrica desean saber el número de vueltas que da una polea giratoria, colocan un pedazo de material radiactivo sobre su orilla y un detector se encarga de registrar cada vez que el trozo radiactivo pasa por el mismo lugar.

La radiactividad protege a los trabajadores que laboran cerca de máquinas peligrosas. Un trozo de material radiactivo se coloca en una pulsera en la muñeca del trabajador. Cuando su mano se acerca a un lugar de peligro, la radiación hace sonar la alarma de un aparato instalado en la máquina.

Para medir el grosor del papel, el de la lámina, o el de muchos otros objetos, los fabricantes disparan haces radiactivos a través de los materiales y cuentan el número de rayos que salen por el otro lado. Cuando pasan demasiados rayos, significa que el material es muy delgado. Si sólo pasan unos cuantos, es que el material es grueso.

Cuando cierto material plástico que se emplea para forrar los conductores eléctricos se somete a la radiación, alcanza tal dureza, que resulta ser uno de los mejores aislantes.

Las roturas internas que llega a haber en las piezas metálicas de los aparatos pueden ser descubiertas por medio de la radiación (antiguamente se empleaban rayos X, pero la radiación atómica resultó ser mucho más económica).

La electricidad estática, del tipo que a veces brota al tocar la manija de la portezuela de un automóvil, puede ser muy peligrosa cuando hay sustancias explosivas cerca de ella. La energía atómica se puede aplicar para descargar esa electricidad y evitar así que cause daño.

La lista de las aplicaciones industriales del átomo y sus derivados es interminable. Además de lo que hemos mencionado, el átomo se emplea para construir los indicadores de velocidad de los aeroplanos, para fabricar mejores jabones y lápices labiales, cintas adhesivas más fuertes y vidrio mucho más duro. Se puede

usar aun para descubrir la presencia del humo en la atmósfera y para analizar un tronco de árbol y determinar el número de nudosidades internas que contenga.

En la medicina, el átomo tiene tantas aplicaciones como en la industria, pero quizá su importancia sea mayor. Alivia el dolor, contribuye a la técnica quirúrgica, proporciona ayuda a los médicos para diagnosticar el mal de sus pacientes. He aquí unos cuantos ejemplos del uso de la energía atómica en la medicina:

Para averiguar hasta qué partes del organismo llega un medicamento y si es que lo alivia, se agregan pequeñas dosis de sustancias radiactivas a las sustancias curativas, las cuales pueden ser rastreadas con un detector. Sustancias químicas similares se pueden agregar a la sangre para que los médicos puedan saber qué organismos y partes del cuerpo sufren de circulación defectuosa.

Las sustancias radiactivas son a menudo tan potentes, que pueden causar quemaduras. Algunas de éstas llegan a ser graves, pero también pueden ser benéficas, como cuando se emplean para destruir las células cancerosas que no pueden extirparse por medio de la cirugía. Mucha gente que ha padecido cáncer ha vivido más tiempo gracias a ese tratamiento.

Los medicamentos, los vendajes y otros productos químicos y médicos pueden ser esterilizados al someterlos a la acción de los rayos gamma los cuales destruyen las bacterias y los gérmenes portadores de las enfermedades.

Los insectos que atacan los cereales pueden ser combatidos por medio de la radiactividad, ahorrando en esta forma mucho dinero a los agricultores.

Los brotes tempraneros de las papas que las echan a perder pueden ser retardados si se les aplican dosis de radiación.

Para darnos cuenta de lo eficaz que han llegado a ser los fertilizantes (o sea, para saber hasta qué partes de la planta llegan), baste decir que los agrónomos los hacen radiactivos antes de esparcirlos por el suelo. Al crecer la planta, el fertilizante puede ser rastreado con un detector.

Las semillas de las plantas, después de que se les ha sometido a la radiactividad, pueden crecer en forma anómala una vez que se les ha plantado. Plantas grandes, torcidas, plantas pequeñas, plantas con muchos frutos, plantas sin ellos; todas ellas se han obtenido en esos experimentos. Algunas variedades pueden resultar mucho mejores que las plantas originales de donde provienen.

Los hábitos de los insectos devoradores de plantas pueden ser descubiertos haciendo radiactivos a unos cuantos de sus individuos, y luego, siguiéndolos con un detector para saber a dónde van y cómo viven. La información así obtenida puede utilizarse en la elaboración de mejores métodos con que combatirlos, y por supuesto, hay muchas aplicaciones de la energía atómica aparte de la industrial, agrícola y médica, que son casi de tanta importancia como el interés que despiertan. Por ejemplo, las bacterias que echan a perder los alimentos pueden ser destruidas mediante la radiación; los productos tratados por este medio pueden conservarse frescos durante muchos meses.

Los topógrafos pueden marcar los límites de un terreno con estacas previamente tratadas con sustancias radiactivas, para localizarlas más tarde con un detector.

La edad de los objetos extraídos por los arqueólogos se puede determinar midiendo la radiactividad de una clase de carbono que contienen. Ese carbono pierde su radiactividad a cierto ritmo que los científicos conocen, y lo cual les permite calcular la edad del objeto en cuestión.

En forma considerable o pequeña, el átomo ayuda a mejorar el medio en que vivimos. Los científicos nunca sabrán hasta dónde los llevará su curiosidad, al tratar de averiguar de qué modo está hecho el mundo. Los investigadores descubrieron un arma terrible, pero también marcaron los rumbos de una vida mejor.

2. Conceptos básicos de la medida y detección de la radiación nuclear.

Ya en el siglo V antes de Cristo, el griego Demócrito pensaba que si se dividía un trozo de cualquier sustancia en pedazos cada vez más pequeños, se llegaría finalmente a una porción última imposible de dividir nuevamente. A esta unidad la llamo átomo, que quiere decir indivisible.

El átomo es el elemento básico de la materia pero de ninguna manera es su componente elemental. Es un sistema más completo formado por muchas partículas más elementales que el, así que comenzaremos definiendo lo que es un átomo.

2.1. Estructura molecular y atómica

El átomo es la parte más pequeña en que puede dividirse un elemento sin perder sus propiedades químicas. Actualmente se han descubierto más de 116 elementos diferentes. Por lo tanto, si existen más de 116 elementos diferentes en nuestro planeta Tierra, podemos afirmar que hay más de 116 tipos diferentes de átomos conocidos hasta la fecha.

Constitución de un átomo:

Según Bohr el átomo esta formado por un núcleo central con masa y carga eléctrica positiva y a su alrededor giran electrones con carga eléctrica negativa; en términos muy simples el átomo es como un sistema solar en miniatura formado por un núcleo central (el sol) alrededor del cual giran electrones (los planetas). Los electrones giran con enormes velocidades cambiando continuamente de trayectoria de tal manera que forman como

una malla llamada capa o corteza del átomo quedando su núcleo en su interior tal como se aprecia en la figura siguiente.

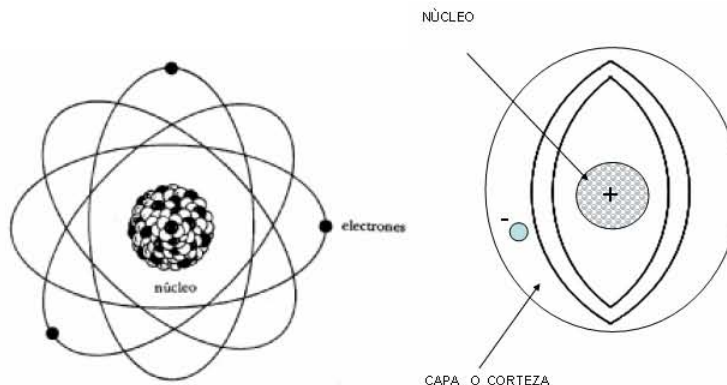


Figura 2.1 Constitución del átomo

Además de los electrones, en el átomo existen unas partículas con cargas eléctricas positivas que se llaman protones y que con las partículas neutras llamadas neutrones forman el núcleo de dicho átomo.

El número atómico es un número entero positivo que equivale al número total de protones existentes en el núcleo atómico. Es característico de cada elemento químico y representa una propiedad fundamental del átomo: su comportamiento químico.

Un núcleo correspondiente a un elemento determinado se identifica por el número de protones que tiene en su núcleo. Este número se le asigna con la letra "Z" y se le conoce como el número atómico. El número másico se asigna con la letra "A" y se le define como la suma de protones más el número de neutrones. Los protones y neutrones generalmente se conocen como nucleones debido a su presencia en el núcleo atómico.

De lo anterior se deduce que:

$$A = Z + N$$

Donde: N= número de neutrones en el núcleo.

Capas de electrones

Las orbitas electrónicas se disponen en una serie de capas que rodean al núcleo del átomo. Cada capa sólo puede contener un número determinado de electrones. Por ejemplo la capa primera, interior o capa K no puede contener mas de dos electrones, la segunda o capa L no mas de ocho, etc.,... (ver figura 2.2) según los elementos de que se trate (ver Tabla 2.1). La más importante es la exterior pues es el número de electrones de esta capa el que define la naturaleza química del elemento, A esta capa se le conoce como la banda de valencia.

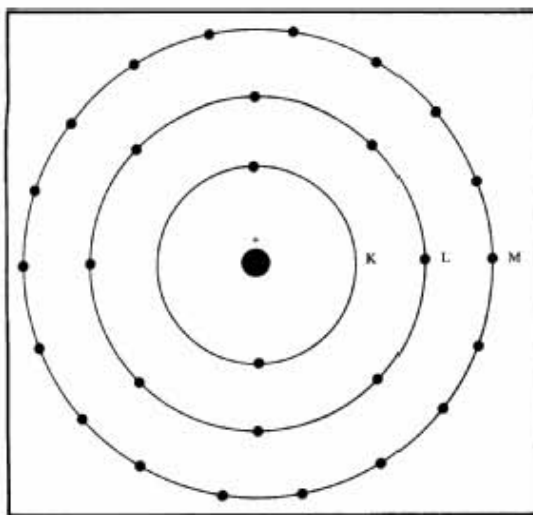


Figura 2.2. Estructura de las tres primeras capas electrónicas de los átomos.

Elemento	Z	Numero de electrones en capa K	Numero de electrones en capa L	Numero de electrones en capa M
H	1	1		
He	2	2		
Li	3	2	1	
Be	4	2	2	
B	5	2	3	
C	6	2	4	
N	7	2	5	
O	8	2	6	
F	9	2	7	
Ne	10	2	8	
Na	11	2	8	1
Mg	12	2	8	2
Al	13	2	8	3
Si	14	2	8	4

Tabla 2.1. Configuración de las capas electrónicas de algunos elementos

Un núcleo atómico suele representarse con su símbolo químico, su número másico y su número atómico. El número másico suele colocarse como superíndice antes del símbolo químico del elemento y el número atómico se coloca como subíndice atrás del símbolo químico del elemento en cuestión. Si por ejemplo, estamos hablando del elemento Potasio el cual tiene 19 protones y 21 neutrones en su núcleo, entonces estaríamos hablando de un elemento con número atómico 19 y número másico 40, de tal manera que su representación sería de la siguiente manera: $^{40}_{19}\text{K}$. Sin embargo, la forma más común de representar a un núcleo, es por su número másico. Esta representación se realiza colocando enfrente del símbolo químico del elemento el número másico de este, de tal manera que para el ejemplo anterior la

representación quedaría como sigue : K- 40; y se leería Potasio 40.

Hay algunos núcleos que, para el mismo número de protones, tienen distinto número de neutrones. Estos elementos presentan características químicas idénticas pero diferentes grados de estabilidad. Los átomos correspondientes a estos elementos se conocen con el nombre de "Isótopos" (Figura.2.3). Todos los elementos que se encuentran en la naturaleza con número atómico mayor de 83 son inestables.

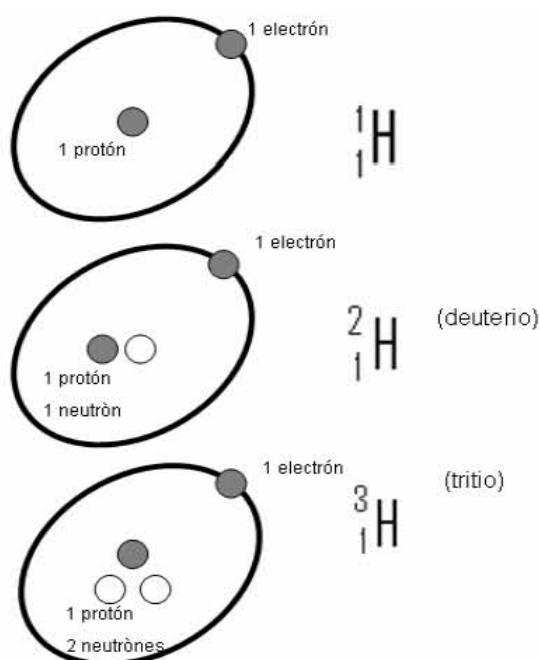


Figura 2.3 Los isótopos del hidrógeno.

En general, la inestabilidad de un núcleo se debe a un exceso de energía en el mismo. Esta energía se libera en forma de radiaciones. A la propiedad de emitir energía en forma de radiación al desintegrarse un núcleo, Maria Curie la llamó "Radiactividad". A todos los Isótopos inestables suele llamárseles "Radisótopos". Una gran variedad de Radisótopos ha sido creada por el hombre en aceleradores de partículas y en reactores nucleares.

2.2.- La radiación nuclear.

Un núcleo radiactivo al desintegrarse emite energía en forma de radiaciones; a esta radiación suele llamarse "Radiación Nuclear". La actividad radiactiva se denomina como el número de desintegraciones por unidad de tiempo. La radiación nuclear consta de partículas subatómicas y rayos Gamma.

Las partículas más comunes de la radiación nuclear son el neutrón, el protón, las partículas α , electrones ó partículas β y fragmentos de fisión. Además de estas partículas, la radiación nuclear se puede presentar en forma de energía electromagnética, la que se conoce comúnmente como radiación Gamma (γ).

Los tipos de radiación mas importantes son las partículas α y β (observadas por primera vez a fines del siglo pasado por H. Becquerel y Pierre y Maria Curie) así como los rayos gamma (γ).

Las partículas α son las menos penetrantes, las detienen unos pocos centímetros de aire o incluso una hoja de papel, son partículas cargadas y por lo tanto interaccionan con la materia a través de sus campos eléctricos, razón por la cual pierden su energía en delgadas capas de material. Se componen de dos protones y dos neutrones. De esta manera si un núcleo al desintegrarse emite una partícula α su número atómico disminuye dos unidades. Su masa es de cuatro veces la masa del átomo de hidrógeno, y por lo tanto se les identifica como átomos de helio que han perdido sus dos electrones orbitales, por lo consiguiente este núcleo se transforma en otro diferente el cual corresponde a un elemento químico distinto.

Las partículas β son más penetrantes que las anteriores, capaces de atravesar algunos milímetros de metales livianos. Han sido identificados como electrones que se desplazan a velocidades cercanas a la de la luz (300 mil kilómetros por segundo), por lo

tanto cuando un núcleo emite una partícula β su número atómico aumenta una unidad pero su número másico no se altera.

Los rayos γ (gamma) son mas penetrantes que las partículas α y β que se detienen al interponer en su camino unos centímetros de metal. Los rayos gamma (γ) logran atravesar placas metálicas gruesas y continuar con parte de su intensidad inicial. Los rayos gamma (γ) atraviesan grandes capas de material debido al número de electrones que le arranca a los átomos de la materia con la cual interaccionan. Se ha demostrado que la radiación gamma (γ) consiste de ondas electromagnéticas de gran energía. (Ver figura 2.4).

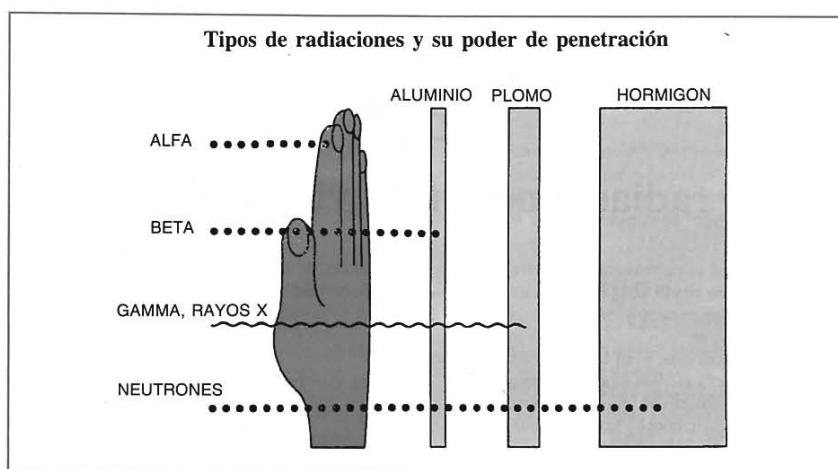


Figura 2.4 Tipos de radiaciones

2.3 Desintegración radiactiva

Los núcleos pueden transformarse unos en otros, o pasar de un estado energético a otro, mediante la emisión de radiaciones. Se dice entonces que los núcleos son radiactivos; el proceso que sufren se denomina decaimiento radiactivo o desintegración radiactiva. Esta transformación o decaimiento sucede de manera espontánea en cada núcleo, sin que pueda impedirse mediante ningún factor externo. Nótese, además, que cada decaimiento va

acompañado por la emisión de al menos un tipo de radiación; partícula o fotón. La energía que se lleva cada radiación es pérdida por el núcleo, siendo la fuerza nuclear el origen de esta energía y lo que da a las radiaciones sus dos características más útiles: poder penetrar materia y poder depositar su energía en ella.

No todos los núcleos de la naturaleza son radiactivos. El decaimiento nuclear sólo sucede cuando hay un exceso de masa-energía en el núcleo, la emisión le ayuda entonces a lograr una mayor estabilidad. Los decaimientos radiactivos de los diferentes núcleos se caracterizan por el tipo de emisión, su energía y la rapidez de decaimiento.

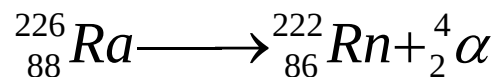
Tipos de decaimiento radiactivo

Sólo hay unas cuantas maneras en que los núcleos pueden decaer, si bien cada tipo de núcleo tiene su propio modo de decaimiento. A continuación describimos los más importantes.

a) Decaimiento alfa (α).

Un grupo importante de elementos pesados puede decaer emitiendo partículas alfa, que consisten de un agregado de dos protones y dos neutrones.

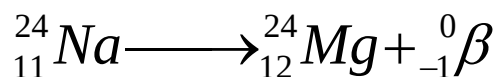
Estas partículas alfa son idénticas a núcleos de helio (${}^4\text{He}$), por lo que su carga es $+2e$ y su número de masa es 4. Cuando un núcleo emite una partícula alfa, pierde 2 unidades de carga y 4 de masa, transformándose en otro núcleo, como lo indica el siguiente ejemplo:



Nótese que los números atómicos y de masa deben sumar lo mismo antes y después de la emisión. Nótese también que hay una verdadera transmutación de elementos.

b) Decaimiento beta (β).

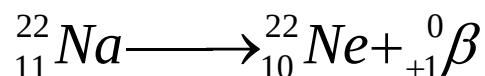
Hay dos tipos de decaimiento beta, el de la partícula negativa y el de la positiva. La partícula beta negativa que se emite es un electrón, con su correspondiente carga y masa, indistinguible de los electrones de las capas atómicas. En vista de que los núcleos no contienen electrones, la explicación de esta emisión es que un neutrón del núcleo se convierte en un protón y un electrón; el protón resultante permanece dentro del núcleo en virtud de la fuerza nuclear, y el electrón escapa como partícula beta. El número de masa del núcleo resultante es el mismo que el del núcleo original, pero su número atómico se ve aumentado en uno, conservándose así la carga. El siguiente caso es un ejemplo de decaimiento beta negativa.



Debe mencionarse que en todo decaimiento beta se emite también una nueva partícula, el neutrino. Esta partícula no tiene carga ni masa y, por lo tanto, no afecta el balance de la ecuación anterior. Por esa razón, y porque los neutrinos son muy inocuos, no se incluye en la ecuación. Sin embargo, se lleva parte de la energía

total disponible en el proceso, quedando la partícula beta con sólo una parte de ésta.

Algunos núcleos emiten partículas beta positivas (positrones), que tienen la misma masa que los electrones, y carga $+e$, o sea una carga electrónica pero positiva. Estas partículas son las antipartículas de los electrones. Se crean en el núcleo cuando un protón se convierte en un neutrón. El nuevo neutrón permanece en el núcleo y el positrón (junto con otro neutrino) es emitido. En consecuencia, el núcleo pierde una carga positiva, como lo indica el siguiente ejemplo:



c) Decaimiento gamma (γ).

Los rayos gamma son fotones, o sea paquetes de radiación electromagnética, como la luz visible, la ultravioleta, la infrarroja, los rayos X, las microondas y las ondas de radio. No tienen masa ni carga, y solamente constituyen energía emitida en forma de onda. En consecuencia, cuando un núcleo emite un rayo gamma, se mantiene como el mismo núcleo, pero en un estado de menor energía.

Se ha observado que todos los procesos radiactivos no importando el tipo de desintegración de la que se trate siguen una ley exponencial. Dicha ley esta definida por la siguiente expresión, la cual es la ley de decaimiento radiactivo:

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

Donde:

N = Número de núcleos radiactivos que quedan después de un tiempo t .

N_0 = Número inicial de núcleos inestables ó radiactivos.

λ = Constante de decaimiento. La constante de decaimiento es una característica de cada radisótopo, se expresa en seg^{-1} (ó en la inversa de cualquier otra unidad de tiempo).

Una representación grafica de la ecuación de decaimiento puede verse en la figura 2.5, en esta figura puede verse el comportamiento de la desintegración radiactiva en función del tiempo.

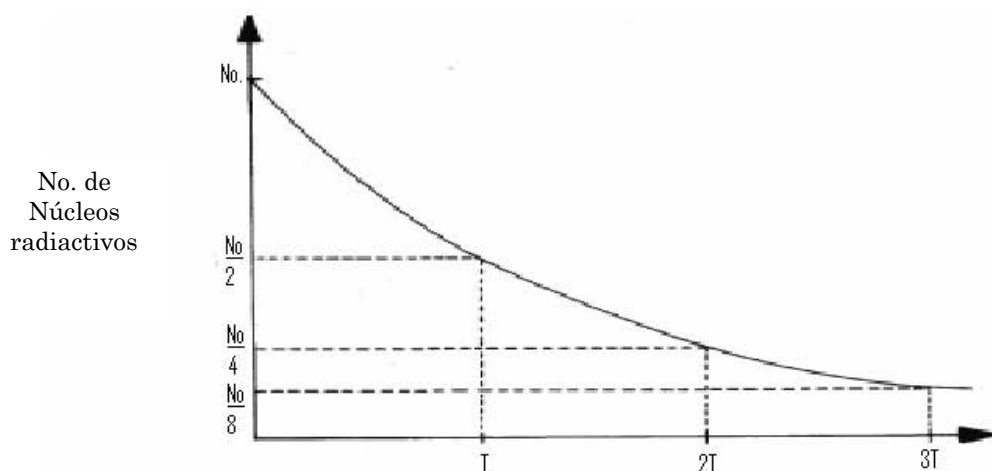


Figura 2.5 Ley de decaimiento radiactivo.

Otra de las características de un radisótopo es su vida media. La vida media de un Isótopo radiactivo (designada con la letra " T ") se define como el tiempo en el cual el número de núcleos radiactivos disminuye a la mitad de los que había al comienzo. De esta manera, si inicialmente tenemos N_0 núcleos radiactivos; después de un tiempo " T " tenemos $N_0/2$ núcleos radiactivos;" después de

un tiempo " $2T$ " tenemos $N_0/4$ núcleos radiactivos y así sucesivamente

Si hacemos

$$N = \frac{1}{2} N_0 \quad \text{y} \quad t = T \quad .$$

Y lo sustituimos en la ley del decaimiento radiactivo tenemos:

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda T}$$

Entonces:

$$e^{-\lambda T} = \frac{1}{2}$$

Aplicando logaritmos en ambos lados, tenemos:

$$\ln(e^{-\lambda T}) = \ln(1/2)$$

Ó

$$-\lambda T = \ln(1/2)$$

Esto implica que:

$$\lambda T = \ln 2$$

Por lo tanto:

$$T = \frac{(\ln 2)}{\lambda} \cong \frac{0.693}{\lambda}$$

Las vidas medias van desde un gran número de años hasta unos cuantos segundos como se indica en la Tabla 2.2.

Isótopo	Vida Media
²⁰⁴ Pb	1.4 X 10 ¹⁷ años
²³² Th	1.41 X 10 ¹⁰ años
⁸⁷ Rb	4.7 x 10 ⁹ años
²³⁸ U	4.51 x 10 ⁹ años
⁴⁰ K	1.3 x 10 ⁹ años
²³⁵ U	7.13 x 10 ⁸ años
¹⁴ C	5730 años
²²⁶ Ra	1600 años
¹³⁷ Cs	30 años
⁹⁰ Sr	28.8 años
³ H (tritio)	12.26 años
⁶⁰ Co	5.24 años
²¹⁰ Po	138.4 días
³² P	14.3 días
¹³¹ I	8.05 días
²²² Rn	3.825 días
n (neutron)	12 minutos
¹⁰ C	19.4 segundos
²⁶ Na	1 segundo
⁵ Li	10 ⁻²¹ de segundo

Tabla 2.2. Algunos radisótopos importantes y sus vidas medias
 Por cada vida media que pasa, la actividad se reduce a la mitad.
 Después de una vida media, la actividad es No/2.

Por medio de la ley de decaimiento radiactivo podemos encontrar la rapidez con la que los núcleos se desintegran. Derivando con respecto al tiempo en ambos lados de la ecuación.

$$\frac{dN}{dt} = \frac{d(N_0 e^{-\lambda t})}{dt}$$

Tenemos que:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

Pero como:

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

Entonces:

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

Esto indica que la tasa de desintegración dN/dt es proporcional al número de núcleos presentes, es decir N disminuye siempre en la misma proporción dada por la constante λ . Al valor absoluto $|dN/dt|$ se le conoce como la actividad de la sustancia, dicha actividad se expresa en becquerels o curies. El becquerel se define como la actividad de una sustancia la cual se desintegra un núcleo por segundo. Mientras que el curie corresponde a 3.7×10^{10} desintegraciones por segundo. El milicurie (mCi) y el microcurie μCi son submúltiplos convenientes de la unidad mas grande. En forma arbitraria decimos que la actividad de una muestra radiactiva es “baja” si esta entre un μCi y un mCi, que es “intermedia” si esta comprendida entre 1 mCi y cien mCi y “alta” si es superior a cien mCi. La actividad especifica de un

material se expresa en Curies por gramo o milicuries por miligramo. La actividad del radio puro es de aproximadamente un Ci/g. La del P-32 es de aproximadamente 50 μCi / g.

2.4.- Interacción de la radiación con la materia

Todos los empleos de la radiación están basados en cualquiera de las dos siguientes propiedades: penetración de la materia y depósito de energía.

Las radiografías, por ejemplo, son posibles gracias a que los rayos X penetran de manera distinta a los diferentes materiales. Por su lado, en la radioterapia se busca depositar energía en los tejidos malignos para eliminarlos. Lo que le sucede a la radiación al pasar por la materia es, por tanto, de primordial interés en varios campos. Además, la presencia misma de la radiación en general no es evidente si no se cuenta con detectores especiales, cuya función es hacernos notar los efectos que la radiación les induce.

Si los orígenes de las radiaciones son atómicos o nucleares, también es de esperarse que sus efectos se inicien a nivel atómico o nuclear.

Imaginemos a nivel microscópico que una de las radiaciones que hemos descrito penetra en un material. Lo que esta radiación encuentra a su paso son electrones y núcleos atómicos, pero en general mucho más electrones que núcleos (por cada núcleo hay Z electrones). Por lo tanto, en términos generales las interacciones con los electrones serán mucho más abundantes que con los otros núcleos. Los efectos más comunes son la ionización y la excitación atómica del material (los cuales se describirán mas adelante); menos numerosos son los cambios

estructurales. A final de cuentas, el depósito de energía en el material da lugar a una elevación de temperatura.

La energía promedio necesaria para producir ionización en un elemento depende de su número atómico. En los elementos ligeros es del orden de decenas de electrónvolts (unidad que se definirá mas adelante), para aire se acepta el valor de 34 electronvolt. Aunque no toda la energía se va a ionizar, esto significa que una sola radiación de energía de varios MeV es capaz de producir un total de unos 100 000 pares ión-electrón en aire. La forma detallada en que se produce esta ionización es distinta para cada tipo de radiación y su energía. Conviene separar los tipos de radiación en cuatro grupos según su interacción con la materia: 1) las partículas pesadas cargadas positivamente, que incluyen partículas alfa, protones e iones pesados energéticos; 2) las partículas ligeras cargadas, como electrones, betas y positrones; 3) las radiaciones electromagnéticas, incluyendo rayos X y gamma; 4) los neutrones. La figura 2.6 esquematiza los rasgos principales de estos procesos.

La forma de interaccionar la radiación con la materia varia de acuerdo al tipo de radiación de la que se trate, esto es, las partículas cargadas como las α 's y β 's protones etc.; interaccionan de manera distinta a como lo hacen las radiaciones sin carga (Rayos X, rayos gamma y neutrones). Ver figura 2.6

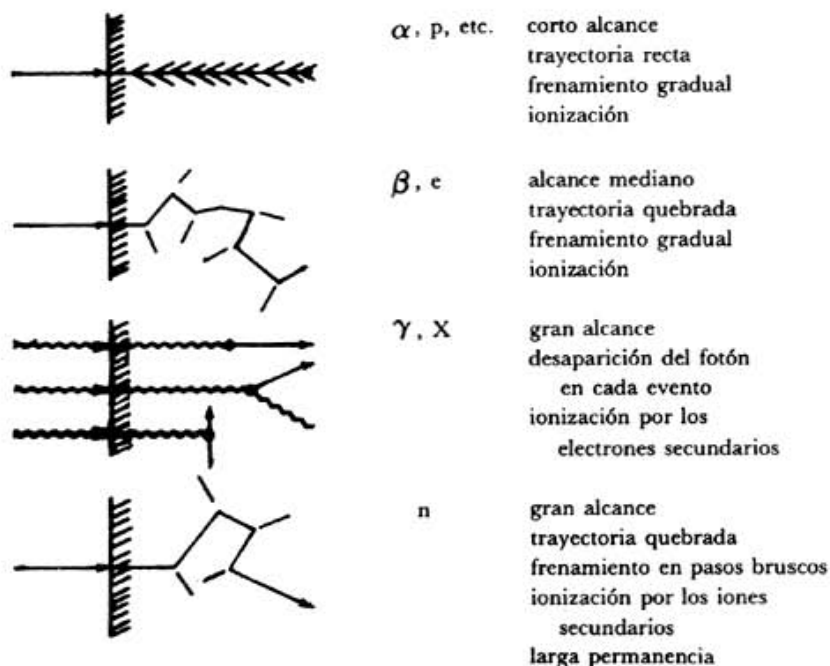


Figura 2.6. Resumen de cómo los distintos tipos de radiación interaccionan con la materia.

2.4.1. Excitación.

Cuando a un átomo se le proporciona una cierta cantidad de energía, puede ocurrir que uno o varios de sus electrones cambien a un nivel de energía más alto. Este fenómeno es conocido como excitación.

Se considera que una partícula cargada es "pesada" si su masa es mayor que la del electrón, es decir, son pesados los protones, las partículas alfa, etc. La figura 2.7 muestra de modo simplificado como interaccionan estas partículas con la materia. En este caso se encuentra atravesando un medio cualquiera que podría ser aire, agua, cualquier gas, hueso, tejido muscular, etc. El medio está representado por dos de sus átomos, y se pueden

notar algunos de los efectos del paso del protón. Cuando la partícula cargada (ion) penetra con cierta velocidad en el medio, poco a poco va perdiendo su energía inicial ya que interacciona con los electrones orbitales de los átomos del medio. La interacción es eléctrica, pues tanto el ion como el electrón están cargados. No es necesario que se toquen para que cada uno sienta la fuerza causada por el otro por que la interacción eléctrica es “a distancia“. La energía que va perdiendo el ión la van ganando los electrones. Una parte de la energía se ocupa en el proceso de excitación (figura. 2.7a) por medio del cual el electrón se cambia de la orbita que normalmente ocupa.

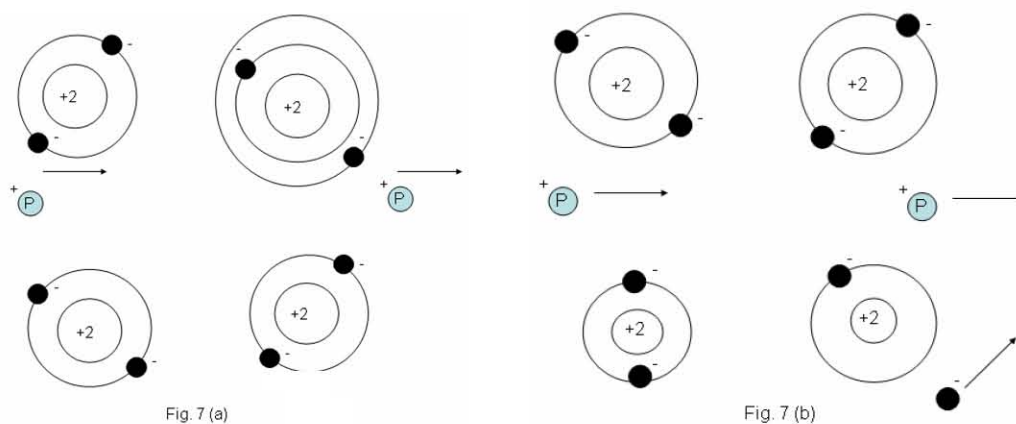


Figura 2.7 El paso de una partícula cargada por entre los átomos que forman un medio puede resultar en fenómenos de excitación (a) o de ionización (b). La comparación de las situaciones “antes” y “después” del paso del ión revela las consecuencias de la interacción

2.4.2. Ionización

Ahora bien si a este átomo se le aplica una energía mayor entonces uno o varios de sus electrones logran romper las ligaduras que tienen con el átomo y convertirse en electrones

libres. Este proceso es denominado como el fenómeno de ionización, en el cual el átomo original se convierte en un ión positivo y el electrón expulsado es un electrón libre. Esto es, la otra parte de la energía se utiliza en la ionización de los átomos del medio (Figura.2.7b) es decir, en arrancarles algunos de sus electrones orbitales.

La ionización puede tener lugar en cualquiera de las capas atómicas denominándose ionización K, L, M, etc. Cuando sucede una ionización de capa interna queda un espacio vacante en dicha capa, el átomo tiene la tendencia entonces a llenar esta vacancia con un electrón de una capa externa. Al suceder esto, hay una emisión de radiación electromagnética (luz visible, rayos ultravioleta, fotón o rayos X como se muestra en la figura siguiente)

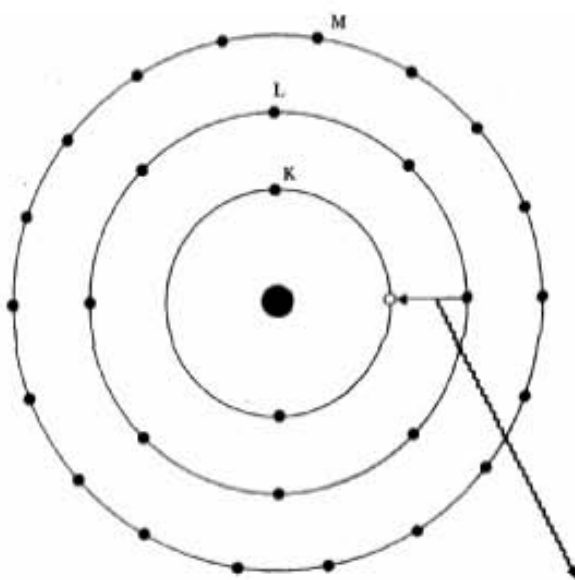


Figura. 2.8. Si sucede una ionización en la capa K, un electrón de la capa L llena la vacancia, emitiéndose un fotón.

Cada vez que se produce una ionización o una excitación ocurre una transferencia de energía de la partícula incidente al medio y del medio hacia la partícula.

Sabiendo que la ionización es la acción de separar completamente a un electrón del resto del átomo; se requiere de energía. La unidad de energía que se usa en estos casos es el electrónvolt (eV), que es la energía cinética que adquiere un electrón al atravesar por una diferencia de voltaje de 1 volt.

Los rayos X y gamma, al no tener carga, no pueden ser frenados lentamente por ionización al atravesar un material. Sufren otros fenómenos que al final los hacen desaparecer, transfiriendo su energía por tres diferentes métodos a los electrones del material. Estos electrones energéticos secundarios son luego frenados, según ya se describió, ionizando el material a su paso.

En consecuencia, los fotones de rayos X y gamma, dependiendo de su energía, pueden atravesar varios centímetros de materia, o cientos de metros de aire, sin sufrir ningún proceso ni afectar la materia que cruzan. Luego sufren uno de los tres efectos y depositan allí gran parte de su energía.

Los tres mecanismos de interacción de los rayos X y Gamma con la materia son: el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la producción de pares.

Estos efectos se describen en forma gráfica en la figura 2.9.

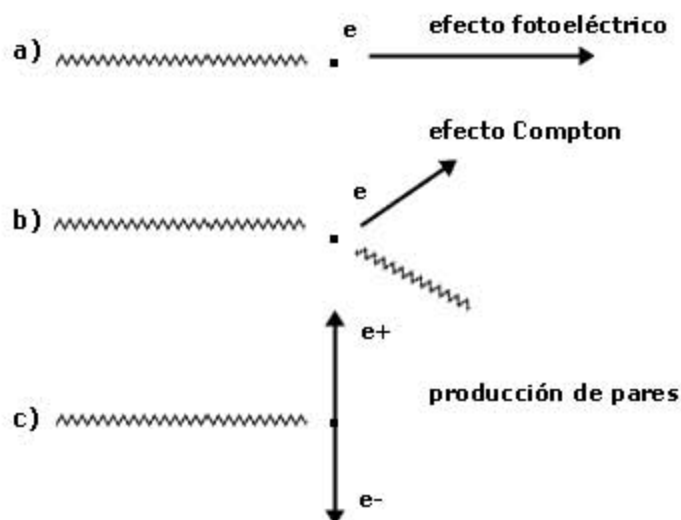


Figura 2.9. Las tres maneras principales en que los rayos X y los rayos γ interactúan con la materia. En los tres casos se producen electrones energéticos.

a) El efecto fotoeléctrico consiste en que el fotón se encuentra con un electrón del material y le transfiere toda su energía, desapareciendo el fotón original. El electrón secundario adquiere toda la energía del fotón en forma de energía cinética, y es suficiente para desligarlo de su átomo y convertirlo en proyectil. Se frena éste por ionización y excitación del material.

b) En el efecto Compton el fotón choca con un electrón como si fuera un choque entre dos esferas elásticas. El electrón secundario adquiere sólo parte de la energía del fotón, y el resto se la lleva otro fotón de menor energía y desviado.

c) Cuando un fotón energético se acerca al campo eléctrico intenso de un núcleo puede suceder la producción de pares. En

este caso el fotón se transforma en un par electrón-positrón. Como la suma de las masas del par es 1.02 MeV, no puede suceder si la energía del fotón es menor que esta cantidad. Si la energía del fotón original es mayor que 1.02 MeV, el excedente se lo reparten el electrón y el positrón como energía cinética, pudiendo ionizar el material. El positrón al final de su trayecto forma un positronio y luego se aniquila produciéndose dos fotones de aniquilación, de 0.51 MeV cada uno, razón por la cual se denomina a este fenómeno el de creación de pares de Iones. Cada uno de los efectos predomina a diferentes energías de los fotones. A bajas energías (rayos X) predomina el fotoeléctrico; a energías medianas (alrededor de 1 MeV), el Compton; a energías mayores, la producción de pares de Iones.

2.5 Detectores de la radiación nuclear

Las radiaciones nucleares no pueden detectarse mediante los sentidos humanos, estas se pueden descubrir por medio de diferentes métodos de detección los cuales abordaremos de una manera simplificada ya que el que más nos interesa en este trabajo es el Geiger-Müller.

2.5.1 Principio básico de detección de la radiación nuclear

Uno de los sistemas más comúnmente empleados en la detección de la radiación nuclear se basa en la recolección de los Iones positivos y electrones libres que esta produce al interaccionar con la materia. El dispositivo básico para coleccionar estos iones y electrones libres se muestra en la figura 2.10.

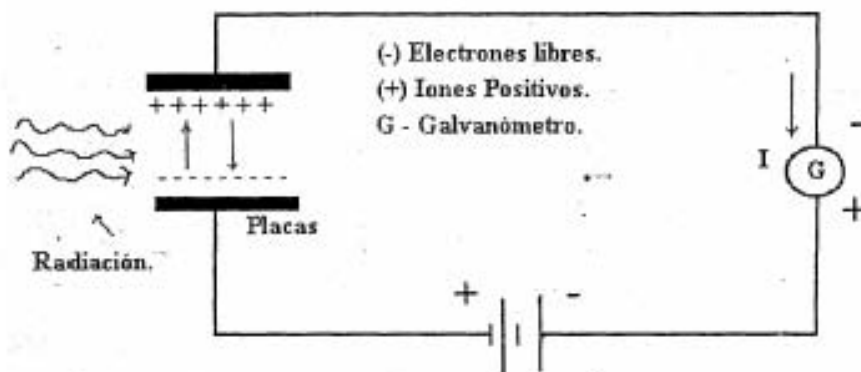


Figura 2.10 Dispositivo básico de detección de la radiación nuclear.

Como podrá apreciarse, la radiación incide en un medio dado y produce ionización. Al producirse la ionización se generan electrones libres e iones positivos. En las terminales del medio antes mencionado se aplica un alto voltaje, de tal manera que los electrones libres sean atraídos al extremo ó terminal positiva de la fuente de alto voltaje y los iones positivos a la terminal negativa; produciéndose con esto que circule una corriente en el Galvanómetro. La intensidad de la corriente medida por el Galvanómetro es proporcional a la intensidad de la radiación incidente, determinándose así las características de la misma.

De acuerdo al tipo de medio con el cual se hace interaccionar a la radiación es la forma en que se clasifican los detectores.

2.5.2 Tipos de detectores

El análisis de procesos en los cuales intervienen materiales radiactivos involucra la presencia de la radiación nuclear. El análisis de estos procesos requiere de técnicas que no sólo revelen el paso de la radiación, sino que también nos proporcionen información sobre las propiedades de la misma. Necesitamos conocer el tiempo de tránsito, la velocidad, el

momento magnético, la energía y algunas propiedades intrínsecas tales como la carga, la masa etc. de algunas partículas. En general, ningún método de detección proporciona la información necesaria para llevar a cabo un experimento tan completo.

Las partículas cargadas se detectan por medio de la excitación e Ionización de átomos de un material al ser atravesado por estas. Este material o volumen de material es conocido como el volumen sensible del detector. La Ionización es la propiedad por la cual también se realiza la detección de las radiaciones sin carga (rayos X, rayos Gamma y neutrones), ya que por medio de una colisión de estas con una partícula cargada se produce Ionización.

Muchos instrumentos de detección están basados en la producción de Ionización en un gas. Tal es el caso de la cámara de Ionización, el detector Geiger Müller y el detector proporcional.

Hay otros instrumentos de detección que son de menor uso que los anteriores, pero que también se basan en la Ionización de un gas, entre estos podemos mencionar a la cámara de niebla, la cámara de burbujas y la cámara de chispas.

Otros detectores basan su medida en el fenómeno conocido como luminiscencia, este fenómeno consiste en la emisión de luz al interaccionar la radiación con la materia. Un ejemplo de este tipo de detectores es el detector de centelleo, el cual al interaccionar la radiación con este, produce una serie de destellos individuales. El número de partículas o fotones que incide sobre el volumen sensible del detector es proporcional al número de destellos o centelleos que se cuentan.

Hay otros tipos de detectores que utilizan semiconductores de estado sólido. Entre estos detectores podemos mencionar a los de Germanio Hiperpuro y a los de barrera superficial. Los de Germanio hiperpuro sirven principalmente para la espectrometría de radiación Gamma y “X”. Los de barrera superficial sirven principalmente para la detección de partículas Alfa.

En general, la elección del tipo de detector estará determinada por el tipo de radiación a detectar, la cantidad de radiación detectada, así como su energía y sus propiedades.

A continuación mencionaremos el proceso fundamental de los instrumentos que detectan y en muchos casos hacen “visibles” las partículas fundamentales subatómicas. Su complejidad va, desde el conocido detector Geiger portátil hasta cámaras de destellos o de burbujas con el tamaño de una habitación.

♦ Cámara de ionización

Uno de los primeros detectores que se empleó en física nuclear fue la cámara de ionización, que está formada esencialmente por un recipiente cerrado que contiene un gas y dos electrodos con potenciales eléctricos diferentes. Según el tipo de instrumento, los electrodos pueden ser placas paralelas o cilindros coaxiales. Otra posibilidad es que las paredes de la cámara constituyan uno de los electrodos, siendo el otro un alambre o varilla situado en su interior. Las partículas o radiaciones ionizantes que entran en la cámara, ionizan el gas situado entre los electrodos. Los iones así producidos se desplazan hacia el electrodo de signo contrario (los iones de carga negativa se desplazan hacia el electrodo positivo, y viceversa), con lo que se crea una corriente que puede amplificarse y medirse directamente con un electrómetro —un

electroscopio dotado de una escala— o amplificarse y registrarse mediante circuitos electrónicos.

♦ Detector de centelleo

El detector de centelleo se basa en la ionización producida por partículas cargadas que se desplazan a gran velocidad en determinados sólidos y líquidos transparentes, conocidos como materiales centelleantes. La ionización produce destellos de luz visible. Los gases argón, criptón y xenón producen luz ultravioleta, por lo que no se emplean en los detectores de centelleo. En los primeros años de la década de 1900 se inventó un dispositivo de centelleo primitivo conocido como espintariscopio, que tuvo una importancia considerable en el desarrollo de la física nuclear. Sin embargo, el espintariscopio exigía contar los centelleos manualmente. La poca fiabilidad de este método hizo que los físicos utilizaran otros detectores, entre ellos el detector de Geiger-Müller. El método de centelleo resurgió en 1947: al colocar el material de centelleo delante de un tubo fotomultiplicador, un tipo de célula fotoeléctrica. Los destellos de luz se convertían en pulsos eléctricos que podían amplificarse y registrarse electrónicamente.

Como material de centelleo se emplean diferentes sustancias orgánicas e inorgánicas, como plástico, sulfuro de cinc, yoduro de sodio o antraceno. Algunas sustancias reaccionan mejor que otras a determinados tipos de radiación, por lo que hay instrumentos muy diversos. En numerosos campos de la investigación actual, el detector de centelleo resulta superior a todos los demás dispositivos de detección. Ha sustituido al detector Geiger en la detección de trazadores biológicos y en la prospección de minerales radiactivos. También se emplea en la investigación de partículas elementales. Un detector de centelleo

denominado Crystal Ball ('bola de cristal') se utiliza desde 1979 para la investigación avanzada en partículas elementales, primero en el Stanford Linear Accelerator Center, de Estados Unidos, y desde 1982 en el DESY, el Laboratorio Alemán del Sincrotrón de Electrones, de Hamburgo. El Crystal Ball es una esfera hueca de cristal con un diámetro de unos 2 metros, rodeada por 730 cristales de yoduro de sodio.

♦ Detectores de trazas

Los detectores que permiten a los investigadores observar las trazas que deja a su paso una partícula se denominan detectores de trazas. Las cámaras de destellos o de burbujas son detectores de trazas, igual que la cámara de niebla o las emulsiones nucleares. Las emulsiones nucleares se asemejan a emulsiones fotográficas, pero son más gruesas y menos sensibles a la luz. Al atravesar la emulsión, una partícula cargada ioniza los granos de plata a lo largo de su trayectoria. Estos granos adquieren un color negro cuando se revela la emulsión, y pueden estudiarse con un microscopio.

La detección, montaje y medición de los parámetros se realiza con ayuda de sistemas ópticos con un aumento de 100 a 2000 veces.

Una importante propiedad es el umbral de sensibilidad ante las partículas pesadas cargadas. Para el registro de partículas alfa, por lo común, se usan polímeros de alto peso molecular, aplicados en forma de capas de nitrato, acetato de celulosa y de policarbonato. El polímero de mayor sensibilidad es el bisalildiglicolcarbonato capaz de registrar partículas alfa con energía hasta de 70 MeV y protones con energía hasta de 10 MeV.

Los detectores dieléctricos de trazas aseguran el registro de partículas cargadas a temperaturas elevadas y bajas, en medios

químicamente activos, a elevadas presiones y en un profundo vacío. El empleo de estos detectores se puede dividir en tres grupos:

- ❖ Los interesados en registrar la presencia de partículas cargadas.
- ❖ Investigaciones en las cuales se emplea el elevado poder resolutorio de estos detectores
- ❖ Mediciones de los números atómicos y másico de los núcleos

Sabiendo las propiedades de estos aparatos, la simplicidad en la detección, su bajo costo y, la posibilidad de automatizar las operaciones más laboriosas han hecho posible la difusión de estos detectores.

Con la ayuda de estos detectores se identificaron nuevos elementos, desde el 104 al 108. Actualmente son utilizados para la dosimetría del radón y la investigación de las contaminaciones del medio ambiente con radionúclidos.

♦ Cámara de niebla

El principio fundamental de la cámara de niebla fue descubierto por el físico británico C. T. R. Wilson en 1896, aunque el instrumento no llegó a construirse hasta 1911. La cámara de niebla está formada por un recipiente con un diámetro de varios centímetros, o mayor, con una ventana de vidrio en un lado y un pistón móvil en el otro. El pistón puede bajarse rápidamente para aumentar el volumen de la cámara. Generalmente, la cámara está llena de aire libre de polvo, saturado con vapor de agua. Cuando se baja el pistón, el gas se expande rápidamente y su temperatura disminuye. El aire pasa a estar sobresaturado de vapor de agua, pero el vapor sobrante no puede condensarse si no hay iones. Las partículas nucleares o atómicas cargadas producen iones, y

cualquier partícula de este tipo que pase por la cámara deja tras de sí una traza de partículas ionizadas sobre las que se condensa el exceso de vapor de agua, lo que hace visible la trayectoria de la partícula cargada. Estas trazas pueden fotografiarse, y las fotografías analizarse para obtener información sobre las características de las partículas.

Como las trayectorias de las partículas eléctricamente cargadas son desviadas por un campo magnético y su desviación depende de la energía de la partícula, las cámaras de niebla se sitúan frecuentemente en el interior de un campo magnético. Las trazas de partículas con cargas negativas y positivas se curvan en sentidos opuestos. Midiendo el radio de curvatura de cada traza puede determinarse la velocidad de las partículas. Los núcleos atómicos, como las partículas alfa, son más pesados y forman trazas gruesas y densas; los protones forman trazas de grosor medio, y los electrones forman trazas finas e irregulares. La cámara de niebla de difusión supuso una mejora del diseño de Wilson. En esta cámara se forma una capa permanente de vapor sobresaturado entre una región caliente y otra fría. La capa de vapor sobresaturado es sensible continuamente al paso de partículas, con lo que la cámara de niebla de difusión no depende de la expansión de un pistón para su funcionamiento. Aunque en la actualidad la cámara de niebla ha sido sustituida casi por completo por la cámara de burbujas y la cámara de destellos, se empleó en muchos descubrimientos importantes de la física nuclear.

♦ Cámara de burbujas

La cámara de burbujas, inventada en 1952 por el físico estadounidense Donald Glaser, tiene un funcionamiento similar a la cámara de niebla. En una cámara de burbujas se mantiene un líquido bajo presión a una temperatura algo inferior a su punto

de ebullición. La presión se reduce justo antes de que las partículas subatómicas atraviesen la cámara. Esto rebaja el punto de ebullición, pero durante un instante el líquido no hierve a no ser que se introduzca alguna impureza o perturbación; las partículas de alta energía constituyen esta perturbación. A lo largo de las trayectorias de las partículas que pasan por el líquido se forman minúsculas burbujas. Si se toma una fotografía justo después de que las partículas hayan atravesado la cámara, las burbujas permiten visualizar las trayectorias de las partículas. Como ocurre con la cámara de niebla, una cámara de burbujas situada entre los polos de un imán puede utilizarse para medir la energía de las partículas. Muchas cámaras de burbujas están equipadas con imanes de superconductores en lugar de imanes convencionales. Las cámaras de burbujas llenas de hidrógeno líquido permiten el estudio de las interacciones entre las partículas aceleradas y los núcleos de hidrógeno.

♦ Cámara de destellos

En una cámara de destellos, las partículas de alta energía ionizan el aire o el gas situado entre placas o rejillas cargadas alternativamente de forma positiva y negativa. A lo largo de las trayectorias de ionización saltan chispas, y fotografiando los destellos se visualiza la traza de las partículas. En algunas instalaciones, la información sobre las trayectorias de las partículas se suministra directamente a un ordenador o computadora sin que sea necesario efectuar fotografías. Una cámara de destellos puede manejarse de forma rápida y selectiva. El instrumento se puede ajustar para que sólo registre las trayectorias de las partículas cuando en una reacción nuclear se produce una partícula que interese estudiar. Esto es una ventaja importante en los estudios de las partículas menos frecuentes; sin embargo, las imágenes de cámaras de destellos carecen de la

resolución y el detalle fino de las imágenes de cámaras de burbujas.

♦ Detectores semiconductores

El último gran paso respecto a sistemas de detección se dio en 1963 con la aparición de los detectores de semiconductor. La diferencia esencial con los detectores de ionización gaseosa es que el medio ionizado no es un gas sino un semiconductor.

El principio de funcionamiento del detector de semiconductor puede asemejarse al de la cámara de ionización donde el medio ionizable en vez de un gas consiste en un semiconductor de alta resistividad. Este semiconductor suele ser germanio o silicio.

Para alcanzar una sensibilidad suficientemente elevada es necesario que en ausencia de partículas a registrar el semiconductor sea pobre en portadores, es decir, que posea conductancia mínima. La partícula al atravesar el semiconductor genera pares electrón-hueco complementarios. Los portadores de carga (electrones y huecos) bajo la acción del campo eléctrico empiezan a migrar, desplazándose hacia los electrodos del detector. En el circuito exterior del detector surge un impulso eléctrico que seguidamente se amplifica y registra. Sus aplicaciones más generalizadas son la espectroscopia de partículas cargadas y de la radiación electromagnética (partículas α , β , rayos x y rayos gamma).

Las ventajas de los detectores mediante semiconductores son:

- ❖ La alta densidad del medio ionizado que implica una alta eficiencia de detección por unidad de volumen.
- ❖ La energía necesaria para producir un par de portadores de carga es aproximadamente 10 veces menor que en los gases y unas 100 veces menor que en un centelleador.

- ❖ El número de portadores de carga producidos es mucho mayor que en gases lo cual se traduce en una mayor regularidad estadística, por lo que se tiene una mejor resolución. La movilidad de los portadores de carga es muy alta, y por otra parte el volumen del medio detector es pequeño; con lo que conseguimos un tiempo de recolección muy breve, en consecuencia es elevada la resolución en tiempo.

Sus inconvenientes son:

- ❖ La alta conductividad respecto los gases se traduce en ruido que oculta la medición de partículas de baja energía.
- ❖ Los defectos en su estructura cristalina producen recombinaciones en los portadores, con lo que algunos se pierden y resta eficiencia al detector.

◆ Detector Geiger Müller

Uno de los detectores más versátiles y utilizados es el detector de Geiger-Müller, o simplemente detector Geiger. Fue desarrollado por el físico alemán Hans Geiger a partir de un instrumento inventado por él mismo y por el físico británico Ernest Rutherford; este instrumento fue mejorado por Geiger y por el físico estadounidense de origen alemán Walter Müller en 1928. El tubo detector está lleno de un gas o mezcla de gases a baja presión. Los electrodos son la delgada pared metálica del tubo y un alambre fino, generalmente de wolframio, que se extiende longitudinalmente a lo largo del eje del tubo. Un fuerte campo eléctrico establecido entre los electrodos acelera los iones, que colisionan con átomos del gas liberando electrones y produciendo más iones. Si la tensión entre los electrodos se hace suficientemente grande, la corriente cada vez mayor producida

por una única partícula desencadena una descarga a través del contador. El pulso causado por cada partícula se amplifica electrónicamente y hace funcionar un altavoz o un contador mecánico o electrónico.

Estos detectores cuyo principio de funcionamiento es más sencillo de entender son los que aprovechan la ionización producida por la radiación de un gas. Sabemos que las radiaciones ionizantes son capaces de arrancar electrones de los átomos de la materia que atraviesan dando lugar a varios pares de iones constituidos por electrones libres (iones negativos) y átomos o moléculas residuales con carga positiva (iones positivos). El número de pares de iones formados es función de la energía de la radiación y de la naturaleza de la sustancia, ya que para sacar un electrón de un átomo es necesaria una cierta cantidad de energía (denominada potencial de ionización), que es característica del átomo involucrado.

Entre los sistemas más comúnmente empleados para detectar la radiación consiste en coleccionar los iones que se producen en un volumen limitado de un gas. El dispositivo es bastante sencillo en su diseño, basta con disponer de dos electrodos cargados para que los iones se dirijan a ellos y sean coleccionados. Se puede emplear un arreglo de placas paralelas o un cilindro con un electrodo central coaxial. Si se aplica una diferencia de potencial entre los electrodos, la detección de la radiación se reduce a medir la pequeña corriente que transportan los iones a los electrodos.

Para entender el funcionamiento del detector es necesario analizar el comportamiento de los iones en el volumen sensible del detector, en función de la diferencia de potencial aplicada ("voltaje") y la forma de medir o registrar las pequeñas corrientes producidas en el circuito acoplado al detector. Para ello puede

colocarse el dispositivo en un campo de radiación constante e irse aumentando el voltaje aplicado, mientras se observa la corriente que pasa a través del gas (que es proporcional al número de iones colectados), se obtendría una curva similar a la que se muestra en la figura 2.11, donde pueden apreciarse varias regiones.

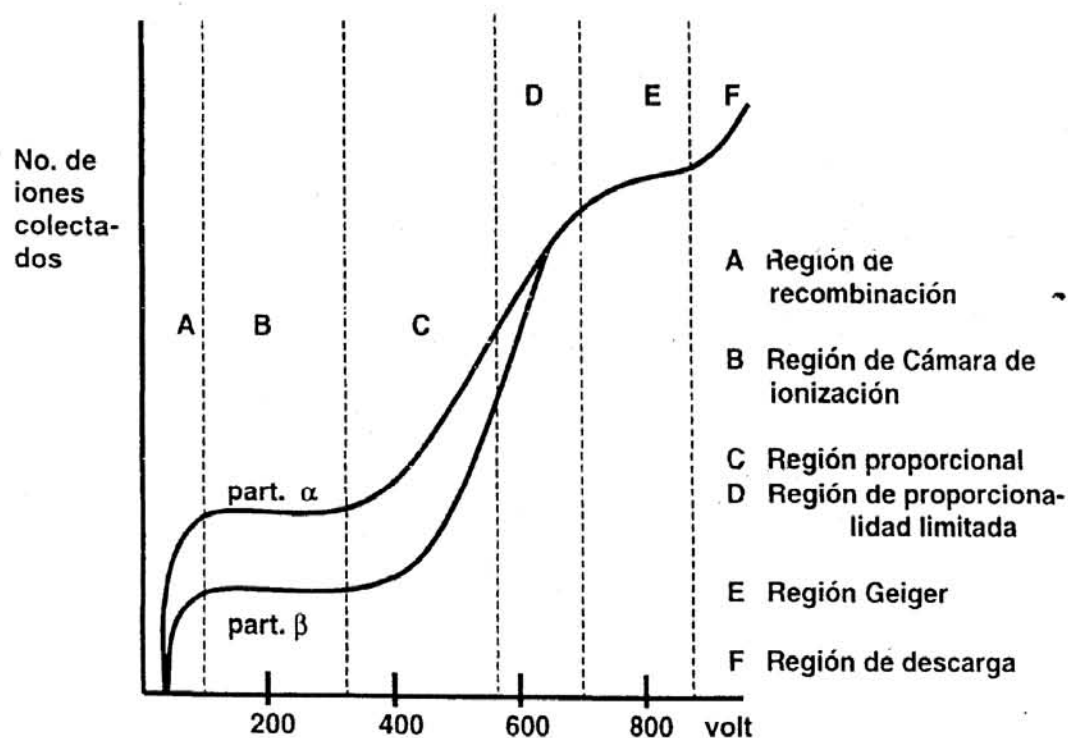


Figura 2.11.- Colección de iones en función del voltaje aplicado al detector.

Al principio de la curva, cuando el voltaje aplicado es muy pequeño, sólo se colecta una fracción de los iones formados, ya que el resto tiene oportunidad de recombinarse antes de llegar al electrodo respectivo. Conforme aumenta el voltaje, el campo eléctrico crece y permite colectar un mayor número de iones hasta que son colectados todos los que produce la radiación, entonces la curva se hace horizontal (número de iones constante) aún cuando siga aumentando el voltaje.

- ♣ La primera región(A) se llama de recombinación por el fenómeno que predomina esto es debido a que el voltaje es tan bajo que la velocidad que adquieren los iones y electrones es pequeña dando lugar a una alta probabilidad de que se recombinen, por el peligro de perder la información, esta región normalmente no se usa
- ♣ En la región de voltaje (B), el número de iones colectados no cambia si se aumenta el voltaje. Se recogen en los electrodos esencialmente todos los iones primarios; es decir, no hay ni recombinación ni ionización secundaria. Por esta razón, el tamaño del pulso depende de la ionización primaria y, por lo tanto, de la energía depositada por cada radiación. Se llama región de cámara de ionización y se usa para medir la energía de la radiación, además de indicar su presencia. En general, la corriente generada en estas cámaras es tan pequeña que se requiere un circuito electrónico amplificador muy sensible para medirla
- ♣ En la región C, llamada proporcional, la carga colectada aumenta al incrementarse el voltaje. Esto se debe a que los iones iniciales (primarios) se aceleran dentro del campo eléctrico pudiendo, a su vez, crear nuevos pares de iones. Si. uno sube el voltaje, la producción cada vez mayor de ionización secundaria da lugar a un efecto de multiplicación. Los pulsos producidos son mayores que en la región anterior, pero se conserva la dependencia en la energía de las radiaciones.
- ♣ Aumentando aún más el voltaje, se llega a la región D llamada de proporcionalidad limitada, que por su inestabilidad es poco útil en la práctica.

- ♣ Si sigue aumentándose el voltaje, se llega a la región E, llamada Geiger Müller. En esta región la ionización secundaria y la multiplicación son tan intensas que se logra una verdadera avalancha de cargas en cada pulso (conocida como avalancha de Townsend), ver Figura 2.12. Los pulsos son grandes por la gran cantidad de iones colectados, pero se pierde la dependencia en la ionización primaria.

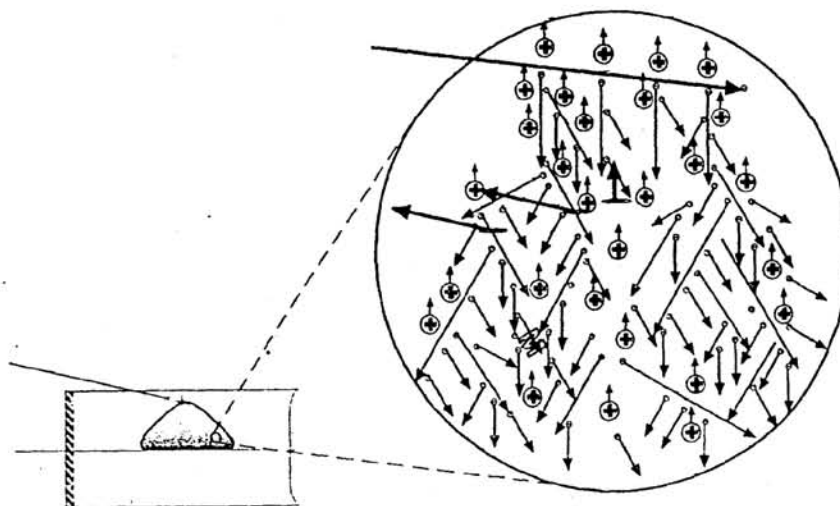


Figura 2.12.- Multiplicación gaseosa o avalancha de Townsend.

Los detectores Geiger-Müller que operan en esta región son indicadores de la presencia de radiación, pero no pueden medir su energía. Son los más usados porque son fáciles de operar, soportan trabajo pesado, son de construcción sencilla y se pueden incorporar a un monitor portátil. Generalmente operan con voltaje de alrededor de 700 a 800 volts, pero esto puede variar según el diseño de cada detector.

Si se incrementa el voltaje aún más, se obtiene una descarga continua (región F), no útil para conteo.

Finalmente, si todavía se aumenta más el voltaje, las avalanchas pueden traslaparse y se produce una descarga continua en el

tubo, (iniciada por electrones o fotones arrancados al electrodo colector por los electrones acelerados) la cual lo inhabilita como detector y puede dañarlo seriamente, por lo que ésta debe evitarse. Los distintos tipos de detectores por ionización en gas reciben su nombre en función de la región en la que operan, así, a los que funcionan en la región de saturación se les denomina cámaras de ionización, los que trabajan en la región proporcional se les llama detectores proporcionales y a los que aprovechan la región Geiger se les conoce como detectores Geiger.

Existen diferencias de construcción entre los distintos tipos de detectores, para favorecer el proceso en que se basa su funcionamiento y evitar la interferencia de otros procesos, así las cámaras de ionización tienen electrodos gruesos para evitar la multiplicación gaseosa, mientras los detectores proporcionales y los Geiger emplean colectores delgados para favorecerla. Cabe recordar que las cámaras de ionización y los detectores proporcionales pueden producir una señal que sea proporcional a la energía de la radiación incidente y en consecuencia medirla, mientras los detectores Geiger producen la misma señal independiente de la energía de las partículas o fotones que entren al volumen sensible.

Los detectores geiger por su sencillez de funcionamiento y bajo costo se han popularizado ampliamente, en la actualidad existen en una gran diversidad de formas y dimensiones, desde los muy pequeños con diámetro de 2mm, hasta con longitudes mayores a 1m, con formas cilíndricas, de campana, como copas, con ventana o sin ella, con paredes de vidrio o de metal. En general están constituidos por una envoltura en la que se alojan los dos electrodos y se llena con un gas adecuado a la presión conveniente.

El electrodo positivo o colector (ánodo), generalmente es un alambre delgado de tungsteno, separado del negativo (cátodo) por un buen aislante, en los detectores cilíndricos el arreglo es coaxial, con el cátodo como envolvente. El gas que se emplea generalmente es un gas noble (He, Ar, Ne) con una pequeña cantidad de un gas orgánico o de un halógeno. Es preferible que el gas principal tenga una afinidad electrónica pequeña para asegurar que los iones negativos se mantengan como electrones libres.

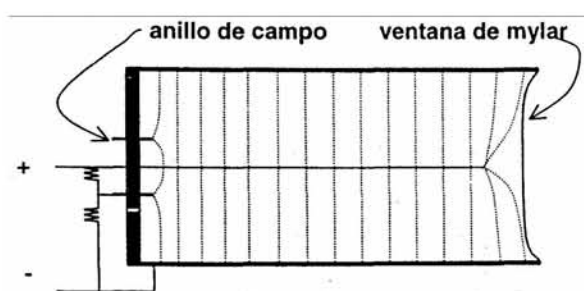


Figura 2.13 Detector Geiger con ventana en el extremo

El tipo más común de detector geiger es como el que se muestra en la figura 2.13, tiene una ventana delgada en un extremo, para facilitar la entrada de radiaciones poco penetrantes, el ánodo está soportado en el otro extremo, la ventana generalmente es de mica o de mylar y debe soportar la diferencia de presión entre la atmosférica y la presión reducida del gas. Algunas ventanas son tan delgadas (1 a 2 mg/cm^2), que permiten la entrada de radiaciones alfa y beta débil. El gas orgánico o halógeno que se agrega en pequeñas cantidades (5 a 10 %) tiene la función de evitar descargas múltiples del tubo, debidas a la liberación de electrones en el cátodo cuando llegan los iones positivos a neutralizarse (si tienen suficiente energía), el mecanismo consiste en que los iones positivos del gas noble chocan en su camino con las moléculas del gas orgánico o halógeno (gas de extinción) y les ceden su energía ionizándolas, de modo que al cátodo sólo llegan esas moléculas y si tienen mucha energía, ésta se emplea en

disociarlas y no en arrancar otro electrón. Los gases de extinción orgánicos se agotan por la descomposición, mientras las moléculas de halógeno disociadas se vuelven a recombinar y el tubo puede funcionar por un tiempo mucho mayor.

En el tubo geiger los electrones viajan rápidamente al ánodo, mientras los iones positivos (por su gran masa, se mueven con una velocidad mucho menor, al llegar la multitud de electrones casi simultáneamente al colector el voltaje disminuye rápidamente "(en una fracción de microsegundo) y después se recupera lentamente, pues los electrones dejan una nube de iones positivos alrededor del colector, que se mueve lentamente hasta llegar al cátodo. Esta disminución y posterior recuperación del voltaje constituye un pulso eléctrico (que puede ser de varias decenas de volt), que se emplea para contar la llegada de cada una de las partículas ionizantes que entran al tubo. La forma del pulso se representa en la figura 2.14 (línea continua).

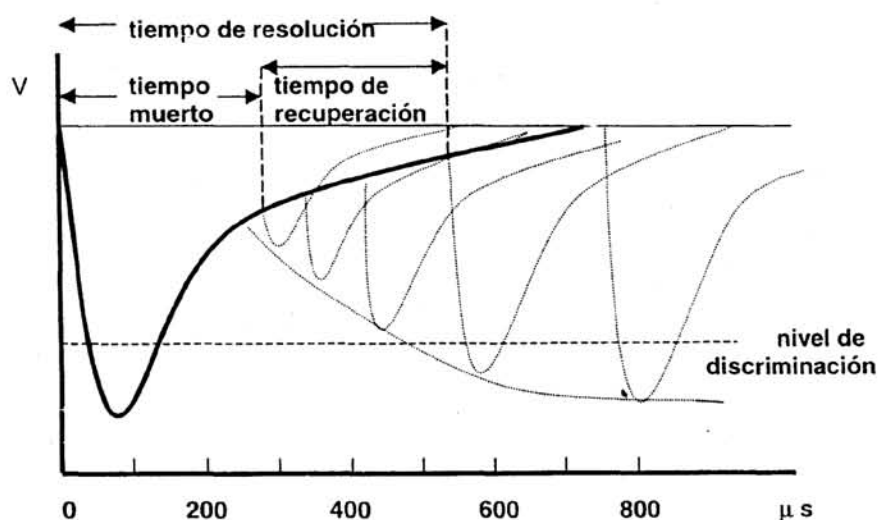


Figura 2.14 Pulsos producidos en un detector geiger

Si llegara una segunda partícula cuando el voltaje está disminuido no se podría producir otra descarga, el detector estaría insensible, si llegara un poco después pero antes de que

se recuperara el campo eléctrico, es decir cuando el colector todavía está rodeado por la nube de iones positivos, el pulso que se produciría sería mucho menor que el inicial (representado en la figura por una línea punteada). Mientras más retrasada llegara la segunda partícula, más se habría recuperado el voltaje y mayor sería el segundo pulso, como puede verse en la figura. Este comportamiento del tubo define un tiempo muerto, en el que no se detecta la radiación y un tiempo de recuperación, que es el que requeriría el tubo para producir un pulso igual al primero. Los pulsos producidos por el detector se alimentan a un contador de pulsos que registra el número de partículas o fotones que entraron al detector, el contador tiene una sensibilidad, sólo registra pulsos superiores a un valor umbral, que en la misma figura se representa como una línea punteada (nivel de discriminación). Para que la llegada de dos partículas se registre como dos eventos (dos pulsos), tienen que llegar separadas por un tiempo mayor al necesario para que el segundo pulso sea mayor al nivel de discriminación, a ése tiempo se le denomina tiempo de resolución. Para obtener un valor del número de partículas que llegaron al detector, más cercano a la realidad, es necesario corregir el número de cuentas empleando la siguiente fórmula:

$$n = \frac{m}{1 - m\tau}$$

Donde:

n es el número de partículas que llegaron por unidad de tiempo

m es el número de pulsos contados en la unidad de tiempo

τ es el tiempo de resolución del sistema detector-contador

el producto $m\tau$ es el tiempo que el detector permaneció insensible.

De la figura 2.15 puede verse que si las partículas llegan al detector muy separadas en el tiempo, cuando ya se recuperó el campo eléctrico, se cuentan todas, mientras que si llegan tan juntas que la segunda llega en el tiempo muerto que produjo la primera, no se podrá detectar por que el voltaje no se ha recuperado, si en cada partícula subsiguiente llega en el tiempo muerto de la anterior no se contaría ninguna, el detector quedaría “paralizado” y la lectura seria cero, este comportamiento es peligroso por que en un campo intenso de radiación no se tendría indicación de la presencia de radiación, para evitar ese riesgo los instrumentos modernos tiene un sistema que marca la lectura máxima cuando el tubo se paraliza.

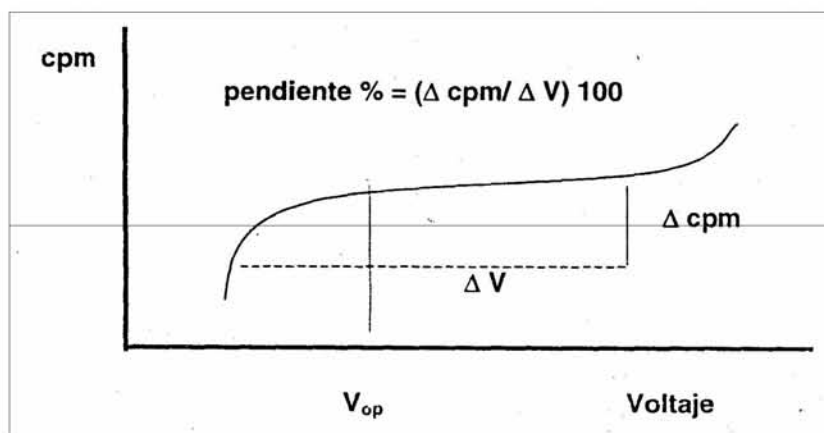


Figura.2.15 Meseta de un detector Geiger

Para determinar el voltaje adecuado para un detector determinado (voltaje de operación), se coloca una fuente de radiación frente al detector y, sin cambiar la geometría, se va aumentando gradualmente el voltaje haciendo lecturas del contador de pulsos para cada valor del voltaje, de esta forma se obtiene una curva que crece hasta que el valor de las lecturas cambia muy poco (meseta) y luego vuelve a aumentar, cuando el

tubo se acerca a la descarga continua, (Figura. 2.15) se recomienda usarse como voltaje de operación el valor del primer tercio de la meseta, para asegurar que se esta en la parte plana de la curva pero lejos del riesgo de una descarga continua.

La eficiencia de detección de un geiger es muy alta para partículas alfa y beta que sean capaces de penetrar al volumen sensible, ya que como se dijo antes basta con que se produzca un par de iones para generar la descarga y el pulso, así para partículas cargadas es casi del 100 %, únicamente se ve afectada por el espesor de la ventana y la energía de las partículas. En el Tabla siguiente se ilustra la transmisión de partículas beta de diferentes energías a través de ventanas de distinto espesor. Para fotones gamma la probabilidad de que tengan una interacción con el gas es mucho menor, especialmente para los de altas energías, con objeto de favorecer la posibilidad de que los fotones arranquen electrones y éstos penetren al volumen sensible, los detectores para radiación gamma tienen paredes más gruesas e inclusive no tienen ventana.

Nuclido ventana	$E_{\max}$ (MeV)	% De Transmisión		
		30 mg / cm ²	4mg / cm ²	1.4 mg / cm ²
¹⁴ C	0.154	0.03	1.5	20
⁴⁵ Ca	0.250	1.5	38	82
⁹⁰ Sr	0.65	31	86	95
³² P	1.7	72	95.5	98.5

Tabla 2.3 .Transmisión de radiación beta a través de una ventana delgada

El detector Geiger-Müller (G-M), que fue utilizado por primera vez en 1908 y mejorado en 1928, es una forma especial de una cámara de ionización que trabaja ' a una tensión considerablemente más alta ' (Región V de la Figura. 2.11). La "avalancha" de Townsend se esparce ahora a lo largo de toda la longitud del electrodo central. El tamaño del impulso es independiente de la ionización primaria, de manera que aun una única partícula beta puede generar una descarga total. El factor de amplificación del gas puede ser tan alto como 10^8 . La mezcla típica de llenado (nueve partes de argón y una parte de vapor de alcohol etílico), está a una presión de 50-100 mm de Hg. Se hace funcionar al instrumento dentro de una gama de tensiones comprendida entre aproximadamente 800 y 1.500 voltios. Por encima de esta tensión el tubo genera una descarga continua, lo que debe evitarse por completo. La Figura. 2.16 ilustra una vista en corte de un detector beta-gamma G-M de paredes delgadas.

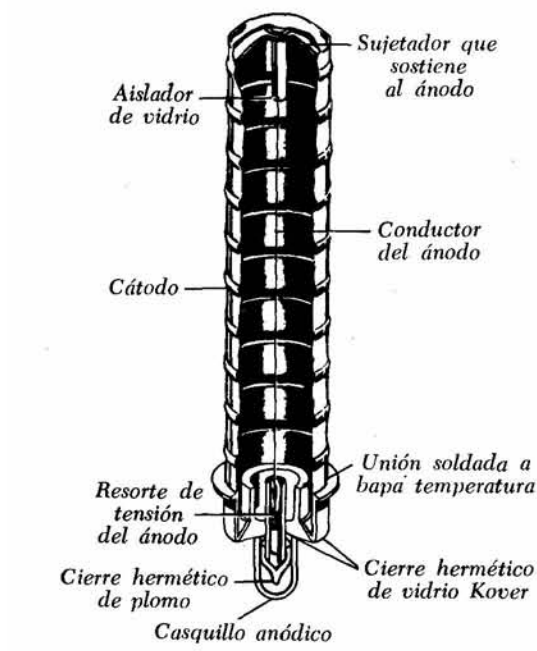


Figura. 2.16 Tubo contador de aluminio de paredes delgadas para la detección de partículas beta y rayos gamma.

El detector Geiger-Müller cuenta en forma rápida y eficiente. Sin embargo, una vez que se ha recibido un impulso debe terminar en forma rápida, si el detector tiene que estar listo para una nueva respuesta. En consecuencia, se debe agregar un material de extinción al gas existente en el tubo (en el detector denominado de autoextinción) para bloquear una posterior ionización. Para esta finalidad, se utilizan vapores alcohólicos, metano, etano y otras mezclas. Aun otra forma de extinguir al tubo consiste en colocar una alta resistencia externa (del orden de $10^9 \Omega$) en serie con el tubo y la fuente de alimentación. El paso de corriente a través del resistor produce una caída IR que reduce el potencial disponible por debajo del valor de disparo o umbral. Luego se restablece la tensión a tiempo para el impulso siguiente.

El circuito básico de conexión del Geiger es:

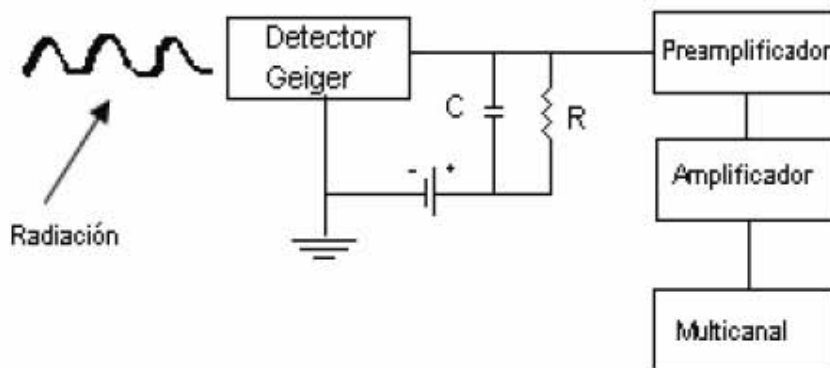


Figura. 2.17 Circuito básico

2.5.3 Sistema de detección con detector Geiger Müller

Como se vio anteriormente, los detectores nucleares entregan impulsos de corriente al ser excitados por la radiación. Tales impulsos son recibidos por circuitos electrónicos encargados de acondicionarlos, medirlos y analizarlos, para proporcionar datos relativos a la intensidad, energía y algunas otras características de la radiación detectada como es la actividad. Dependiendo de cual de las características antes mencionadas es la de interés y del tipo de detector empleado, se tendrán que utilizar algunos o todos los bloques del diagrama general que se muestra en la siguiente figura.

Diagrama de bloques

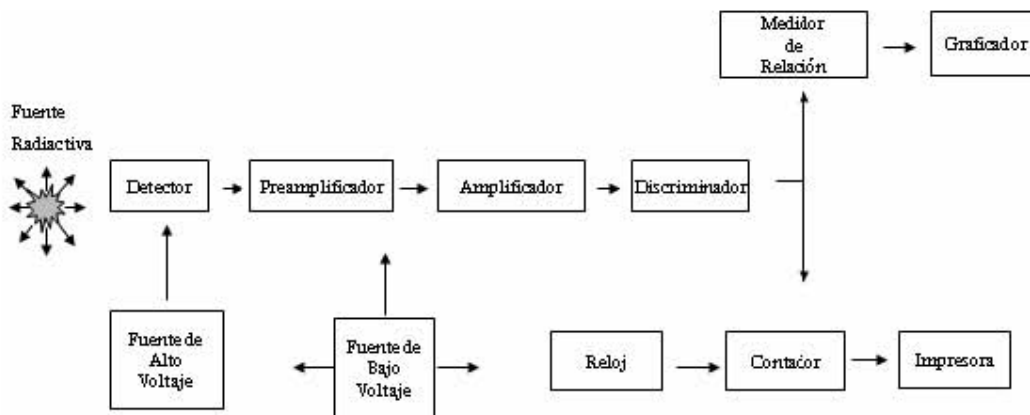


Figura. 2.18 Diagrama de bloques

Descripción de bloques

∞ Fuente de bajo voltaje.

Su objetivo es alimentar a cada uno de los bloques que lo requiera. Las tensiones que se obtienen a su salida pueden ser positivas, negativas o ambas y sus valores varían en un intervalo grande, dependiendo del tipo de dispositivos activos que se van a energizar (válvulas de vacío, transistores, Circuitos integrados, etc.). Las salidas generalmente son reguladas a línea y a carga, o sea, que permanecen constantes aunque haya variaciones en el voltaje de la línea (117 V c.a.) y se tengan cargas variables.

∞ Fuente de alto voltaje.

La gran mayoría de los detectores de radiación requieren de un alto voltaje de polarización. Los valores máximos de las tensiones y corrientes pueden ser de hasta unos cuantos KV de c.d. y en mA de c.d., respectivamente. En la mayoría de los casos se requiere que el voltaje que proporciona sea muy estable ya que variaciones en él, provocarían alteraciones en la información proveniente del detector, como es la altura del pulso (que en varios detectores es proporcional a la energía de la partícula o radiación incidente).

∞ Detector

Su objetivo es convertir la radiación ionizante en pulsos de corriente eléctrica. Para su elección deben considerarse los siguientes factores:

- a. Tipo de radiación a ser detectada
- b. Eficiencia de detección
- c. Selectividad de radiación deseada o no deseada (fondo

natural)

d. Linealidad en la respuesta a la energía de la radiación

e. Resolución

f. Estabilidad

Dependiendo de la aplicación, el detector puede ser de centelleo, de semiconductor, de cámara de ionización, Geiger-Müller, etc.

∞ Preamplificador.

Aunque algunos detectores (G.M., ò de centelleo) producen a su salida un pulso relativamente grande. Para la mayoría de ellos la carga entregada es tan pequeña que es necesario utilizar un preamplificador entre el detector y los demás circuitos procesadores de la señal. El preamplificador se coloca lo más cercano al detector para minimizar la longitud del cable de conexión y así reducir la capacitancia y aumentar la relación señal a ruido. También sirve como acoplador de impedancias, ya que presenta una impedancia alta al detector y baja al amplificador.

El preamplificador no cambia la forma del pulso y su ganancia (relación del tamaño del pulso de salida al de entrada) es generalmente pequeña (1 a 10).

∞ Amplificador.

Sus funciones más importantes son: formar y amplificar el pulso, esto es, dar una forma adecuada y una amplitud necesaria para poder operar el discriminador.

Las características más importantes que se deben tener en consideración son:

- a. Ganancia
- b. Salida máxima
- c. Linealidad
- d. Estabilidad en ganancia
- e. Ancho de banda o respuesta a pulsos
- f. Ruido

La linealidad y estabilidad deben ser buenas para mantener constante la relación altura del pulso/energía, desde el valor mínimo hasta el valor máximo de la amplitud requerida. Para aplicaciones que requieren buena resolución, es necesario un ancho de banda amplio (posiblemente 100 Mhz o más), pero el ruido equivalente de entrada también es función del ancho de banda, por lo que se debe mantener lo más bajo posible. Dependiendo del sistema, los requerimientos de ganancia pueden variar desde 10^1 a 10^7 , de acuerdo con el tipo de detector. Por ejemplo, se necesita de una alta ganancia si el detector es una cámara de ionización (sin multiplicación de gas) y baja o ninguna si se trata de un detector de centelleo con tubo fotomultiplicador.

∞ Discriminador.

La función básica del discriminador de altura de pulsos, es responder solamente a pulsos de entrada que rebasan una amplitud crítica. Las características importantes que se deben considerar son:

- a. Estabilidad
- b. Tiempo de resolución
- c. Constancia en su forma de onda de salida

Un discriminador simple puede ser utilizado para investigar la distribución de energías, al medir la razón de conteo en un número de diferentes niveles, por lo que debe tener buena estabilidad. Si la razón de conteo es grande, el tiempo de resolución debe ser corto e independiente de la altura de los pulsos.

Si se utilizan dos discriminadores simples, de manera tal que uno acepta pulsos menores que L_2 y el otro mayores que L_1 ($L_2 > L_1$), entonces el sistema forma un analizador de altura de pulsos monocanal o discriminador diferencial, el cual selecciona los pulsos dentro del intervalo $L_1 - L_2$. Lo anterior se ilustra en la siguiente figura.

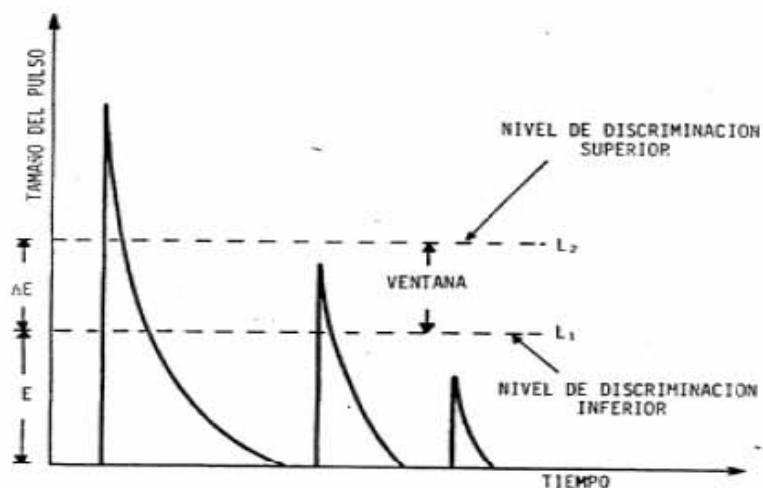


Figura. 2.19 Analizador monocanal o discriminador diferencial

A los niveles L_1 y L_2 se les conoce como niveles de discriminación inferior y superior respectivamente y a la región comprendida entre L_1 y L_2 se le llama ventana, o sea que si un pulso a la entrada tiene una amplitud tal que cae dentro de la ventana

fijada, a la salida se obtendrá un pulso o de lo contrario no habrá salida.

∞ Medidor de relación (ratemeter).

Su función es la de proporcionar el promedio de la razón de conteo por medio de un circuito integrador (generalmente capacitivo), para lo cual se requiere de una constante de tiempo larga comparada con el tiempo promedio entre pulsos. Con la circuitería apropiada, la salida del integrador es mostrada en un medidor, el cual indica en forma proporcional la razón de conteo, generalmente en c.p.s. (conteos por segundo). El medidor de relación lineal tiene una exactitud moderada y por lo general consta de un selector de escalas para cubrir conteos altos y bajos. Cuando se requiere medir conteos altos y bajos en una sola escala, se utiliza un medidor de relación logarítmico.

∞ Graficador x-t.

Por medio de este instrumento se puede registrar (en hojas o rollo de papel) la información proveniente del medidor de relación, lo cual facilita el análisis posterior de la información obtenida.

∞ Contador

En la parte final de un sistema de conteo, el pulso digital debe ser acumulado y procesado en un intervalo de tiempo fijo. El instrumento utilizado para este propósito es un escalador o contador digital, el cual aumenta una cuenta cada vez que se presenta un pulso digital a su entrada.

Los contadores pueden operar en modo de tiempo prefijado o conteo prefijado. En el primer modo el período de conteo se controla por un reloj, mientras que en el segundo modo, el

contador acumulará pulsos hasta alcanzar un total prefijado y en ese momento se dará por terminado el tiempo de conteo.

Los conteos realizados son mostrados en un desplegado digital, donde el número de dígitos varía entre 5 y 8.

∞ Reloj.

La función del reloj es controlar el tiempo de conteo del escalador, el cual puede ser seleccionado desde fracciones de segundo hasta varias horas. Las características más importantes del reloj son su exactitud y precisión.

∞ Impresora.

En muchos casos se requiere de un análisis de la información posterior a un experimento. Para ello es de utilidad una impresora, la cual se puede conectar a la salida del contador (si es que la tiene) y registrar en forma numérica en cinta de papel los conteos totales obtenidos en los intervalos de tiempo seleccionados.

3. Diseño experimental

3.1. Descripción del sistema a utilizar

Nuestro sistema se encuentra formado por tres bloques, los cuales se muestran en la siguiente figura:

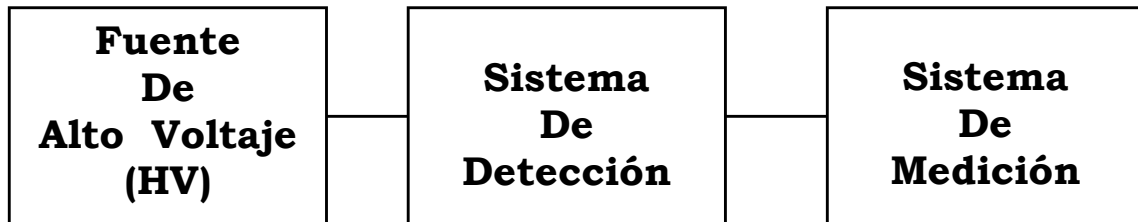


Figura 3.1 Bloques del sistema

⇒ Fuente de alto voltaje

Se realizará el diseño de dicha fuente, la cual alimentará nuestro sistema. Esta deberá operar en un rango de 600 a 1200 volts en CD, ya que dentro de este rango se encuentra el voltaje de operación del tubo geiger para su funcionamiento.

⇒ Sistema de Detección

En este bloque se implementará el sistema con el tubo geiger el cual convertirá la radiación ionizante en pulsos de corriente eléctrica

⇒ Sistema de Medición

En este sistema mediremos los pulsos de salida a los que previamente se les dará forma adecuada y amplitud por medio de un circuito integrador para poder verificarlos.

3.1.1 Diseño de la fuente de alto voltaje

Una fuente de alto voltaje esta formada por un transformador y un rectificador. El rectificador convierte un voltaje de ca en un voltaje unidireccional; los rectificadores se clasifican con base en el voltaje de alimentación de entrada de ca en dos tipos: rectificadores monofásicos en los que el voltaje de entrada de ca es una fuente monofásica y trifásicos en los que el voltaje de entrada de ca es una fuente trifásica. Los convertidores trifásicos se utilizan en aplicaciones de alta potencia y no son útiles para el diseño de nuestra fuente. Para aplicaciones electrónicas podemos ver mas comúnmente los rectificadores monofásicos los cuales pueden ser: rectificadores monofásicos de media onda, rectificadores monofásicos de onda completa con derivación central y rectificadores monofásicos de onda completa tipo puente. El que se diseñará será un rectificador de onda completa tipo puente y este se muestra en la siguiente figura:

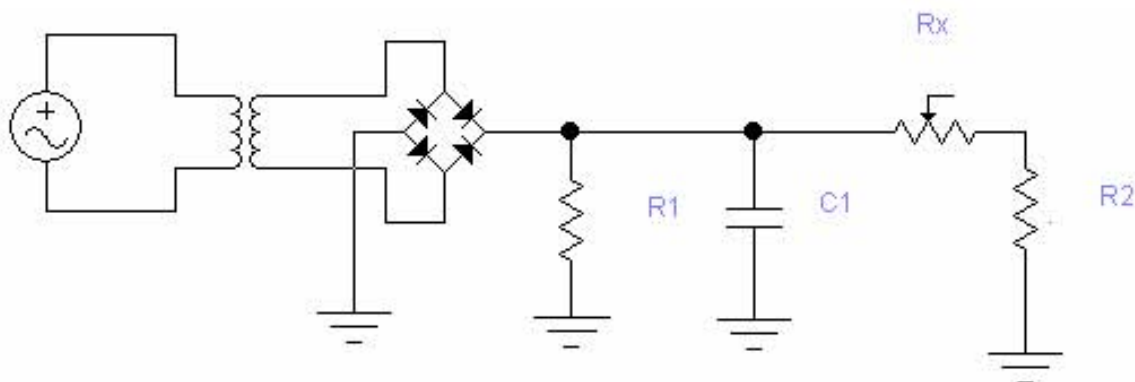


Figura 3.2. Fuente de alto voltaje

Como se ve en la figura 3.2 esta fuente esta formada por un transformador, un rectificador de onda completa tipo puente y un arreglo de resistencias que nos servirán para variar el voltaje de salida.

a) Descripción del circuito.

El transformador es del tipo elevador el cual tiene una relación de vueltas de 1:10 para obtener a la salida 1200 volts y una corriente de 30 μ A. Debido a que este transformador no se encuentra en el mercado por los valores de operación, ha sido necesario mandar a fabricarlo teniendo como datos de placa del fabricante: relación 1:10(figura 3.3).

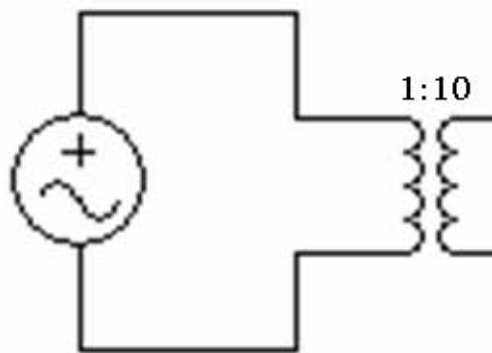


Figura3.3 Transformador

El puente rectificador (figura 3.4) esta compuesto por cuatro diodos. Este convertirá la señal de entrada de un valor promedio de cero en una que tenga un valor promedio sensible al valor pico de la señal de entrada. Para este puente se han encontrado diodos que soportan 1.6 mA que son los NTE525.

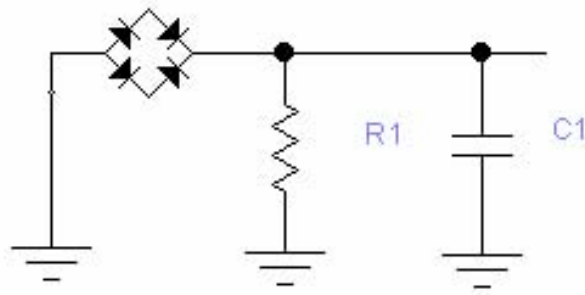


Figura 3.4. Rectificador de onda completa tipo puente

Este rectificador realizará la conversión de corriente alterna a corriente continua (figura 3.5):

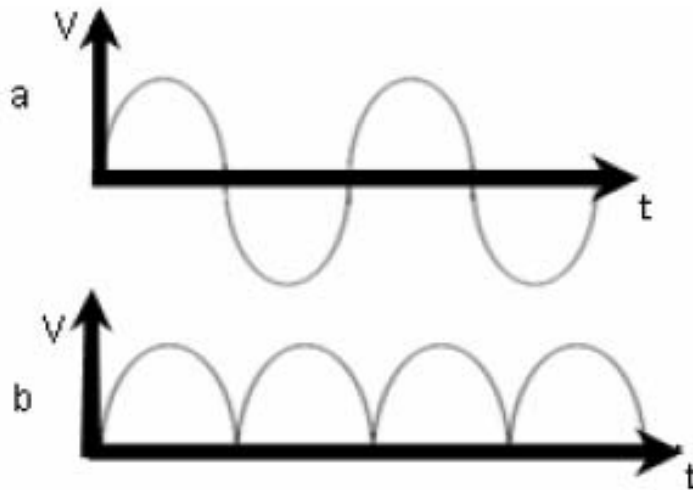


Figura 3.5. Formas de onda de entrada y salida del rectificador
(a) forma a la entrada, (b) forma a la salida

Se fijara R1 en un valor de 100kΩ (el cual esta disponible comercialmente), para obtener el valor del capacitor de la salida El valor de rizo se determina mediante la formula siguiente:

$$V_{pprizo} = \frac{V_p}{2fRC}$$

Donde V_p es el voltaje pico en la carga y V_t es el voltaje de entrada del transformador

$$\frac{V_p}{V_t} = \alpha$$

$$\Rightarrow V_p = \alpha V_t$$

$$V_p = (10)(110) = 1110v$$

$$V_{pprizo} = \frac{V_p}{2 fRC}$$

$$\text{despejando} \rightarrow C :$$

$$C = \frac{V_p}{2 fV_{pprizo}}$$

Si suponemos que $V_{pprizo} = 1 \text{ V}$, Entonces:

$$C = \frac{1110}{2(60)(100K)(1volt)} = 92\mu f$$

Para el capacitor se hará un arreglo en paralelo de cuatro capacitores de $47\mu f$ para obtener el valor deseado, ya que el valor calculado no se encuentra en el mercado.

Tanto la resistencia (R_1) como el capacitor (C) tienen la función de hacer menos variable la salida de voltaje lo que se conoce como voltaje de rizo, ya que el capacitor se carga y descarga gracias a la acción de la resistencia. Si la resistencia tuviera un valor mas pequeño la variación sería mayor (entre cresta y cresta) y viceversa (ver Figura 3.6).

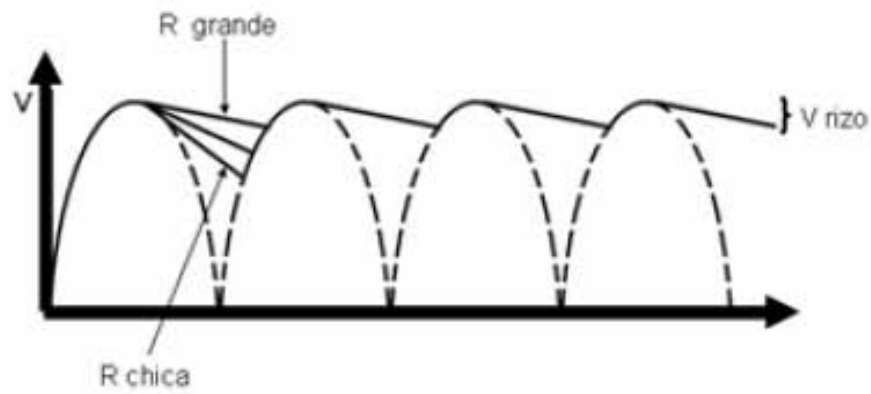


Figura 3.6 Voltaje de rizo

El potenciómetro y la resistencia (ver figura 3.7) nos servirá para que se pueda variar el rango de voltaje de entre 600 a 1200 volts de cd (debido a que los valores calculados no son exactos se obtuvo una fuente variable de 0 – 1300V) el cual es el voltaje de salida. El valor necesario es de $15\text{M}\Omega$ mientras que la siguiente resistencia es de $3.3\text{M}\Omega$. Este valor fue obtenido con los valores de entrada que se necesitan para la corriente de operación.

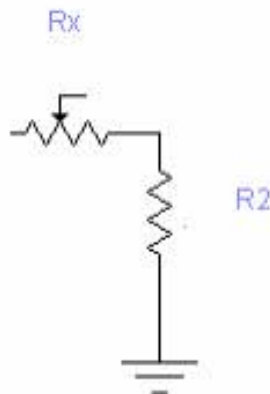


Figura 3.7. Potenciómetro y resistencia

3.1.2 Sistema de Detección

Dentro de este sistema se encuentra el tubo Geiger el cual convertirá la radiación ionizante en pulsos de energía eléctrica. Dicho tubo tiene como datos los siguientes valores: marca Nuclear Chicago type 779030, serial 57-40, voltaje de operación DC 900 V, ventana de mica, hecho en EU (Ver figura 3.8 y 3.9).



Figura 3.8 Tubo Geiger

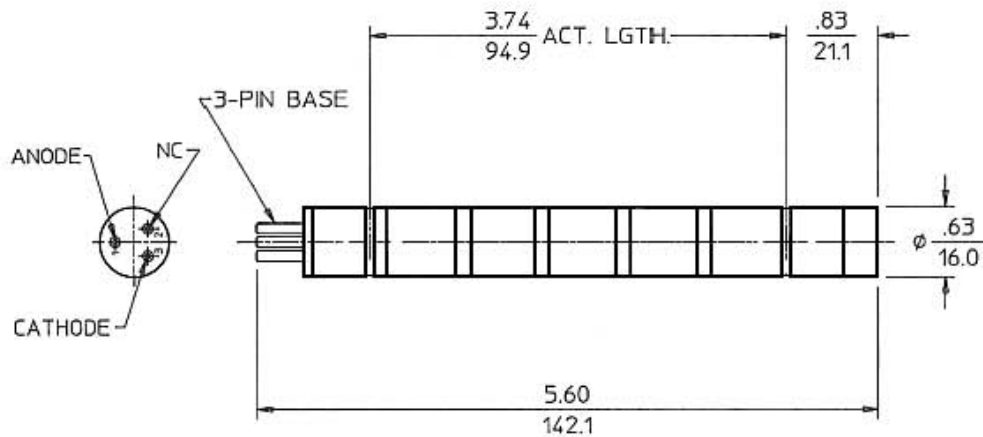


Figura 3.9 Dimensiones del Tubo Geiger

Para este tubo el fabricante recomienda para su funcionamiento conectarle un capacitor de 50 pF y una resistencia de 1 M Ω (Este circuito puede consultarse en la página siguiente:

www.ldinc.com, se muestra a continuación) Que estarán conectadas a un circuito que se ubicara acoplado al tubo.

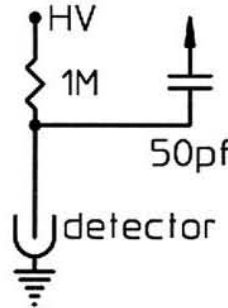


Figura 3.10 Circuito de Acoplo

De igual manera se utilizará un multímetro marca Triplet model 630-PLK type 6, de 5000 vcd/vca hecho en Bluffton Ohio.

3.1.3 Sistema de Medición

El sistema de medición será un circuito integrador que nos permitirá amplificar y dar forma a los pulsos de salida del tubo geiger el cual fue diseñado con los siguientes valores: 2 resistencias de $1\text{K}\Omega$, 1 capacitor de 100nF , 1 capacitor de 10nF . Estos capacitores se encuentran en paralelo debido a que para este diseño se requiere 1 capacitor de 110nF y este valor no se encuentra comercialmente y 1 amplificador operacional LF411 del tipo JFET, se ha elegido un amplificador de este tipo debido a que la impedancia de entrada es considerablemente mas grande que de los amplificadores BJT, además de que este tipo de una corriente de manejo baja que son las requeridas para nuestro sistema de medición; asimismo un ancho de banda adecuado. (Ver figura 3.11).

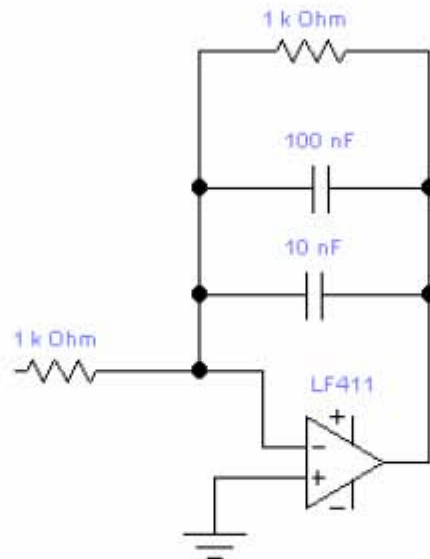


Figura 3.11 Circuito del Integrador

3.2. Sistema de Detección Completo

El sistema de detección completo, quedaría como el que se muestra en la figura 3.12.

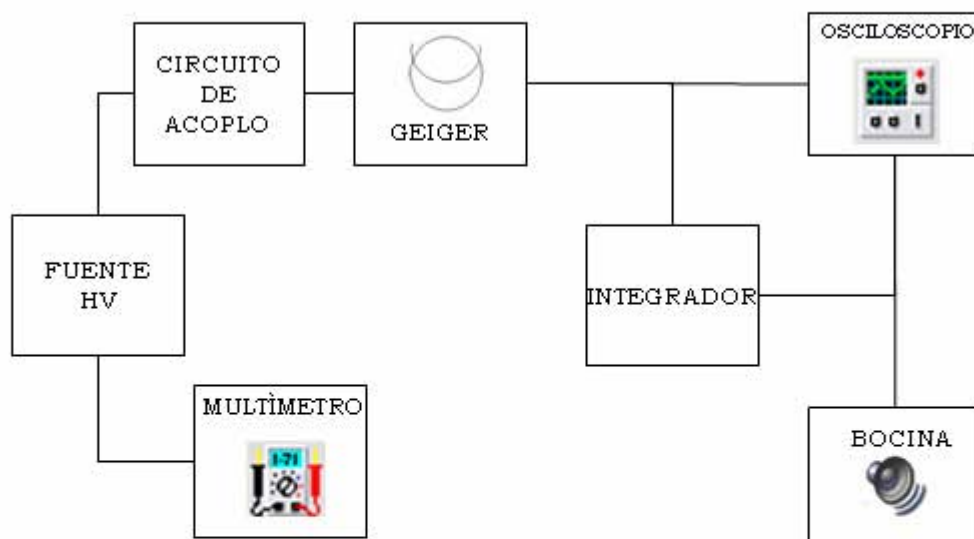


Figura 3.12 Sistema Detección completo Utilizando un Tubo Geiger-Müller.

3.3.- Pruebas del sistema de detección.

Es necesario realizar pruebas al sistema de detección, pero, para tener resultados exactos es preciso efectuarle prueba a cada parte del sistema es decir: verificar el funcionamiento de la fuente para saber si esta opera en el voltaje y corriente requerido, comprobar el funcionamiento del tubo geiger para señalar si de este se obtienen pulsaciones, verificar el funcionamiento del sistema de medición observando si el circuito electrónico al hacer la simulación de las pulsaciones con un generador de señales integra dichas pulsaciones y por ultimo ya comprobada cada parte del sistema de detección por separado efectuar una prueba conectando todo el sistema para observar su correcto funcionamiento. A continuación se detallaran los resultados.

3.3.1) Verificación del funcionamiento de la fuente de alto voltaje

Para verificar el funcionamiento de la fuente, se conectó el transformador a la toma de corriente para comprobar que la relación de vueltas del transformador es de 10:1. Con la ayuda del multímetro obtuvimos una lectura de 1270 V de CD; Demostrando así que la relación es la requerida.

Se conecta el circuito rectificador de onda completa tipo puente al transformador para completar el circuito de la fuente (ya que la fuente la conforma el transformador y el rectificador).

Una vez conectado con la asistencia del multímetro y el osciloscopio se verifica que la rectificación del voltaje de salida sea la adecuada, observando que la conversión de voltaje de corriente alterna se realice a voltaje de corriente directa.

3.3.2) Verificación del funcionamiento del tubo Geiger

Con el voltaje que se requiere y con la variación adecuada se conectó la fuente al circuito de acoplo (que el fabricante recomienda). A la salida de este se conectó el tubo geiger con la ayuda del diagrama (www.ldinc.com) y con la ayuda del osciloscopio conectado a la salida del tubo geiger, se observó que el tubo mostró pequeños pulsos (ver Figura 3.13) debidos a la radiación de fondo natural y gracias a estos pulsos comprobamos que el tubo geiger funciona.



Figura 3.13. Pulsos de salida del Tubo Geiger

3.3.3) Verificación del funcionamiento del sistema de medición

Para comprobar que el sistema de medición funciona se conectó el integrador, a la entrada de este se conectó un canal del osciloscopio y el generador de señales para simular los pulsos que emitirá el tubo geiger, se polarizó el amplificador con el voltaje de $\pm 18V$ que es el que se requiere según el manual de semiconductores, y a la salida se conectó el otro canal del osciloscopio como se muestra en la figura 3.14. Al ponerlo a funcionar que observó que al cambiarle la señal de entrada a senoidal, triangular o cuadrada se integraba la señal como se

muestra en la figura 3.15. Comprobando que el sistema de medición trabaja adecuadamente.

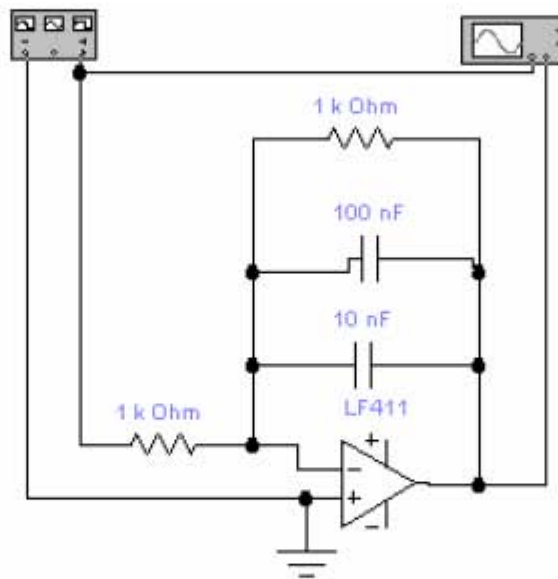


Figura 3.14 Sistema de medición

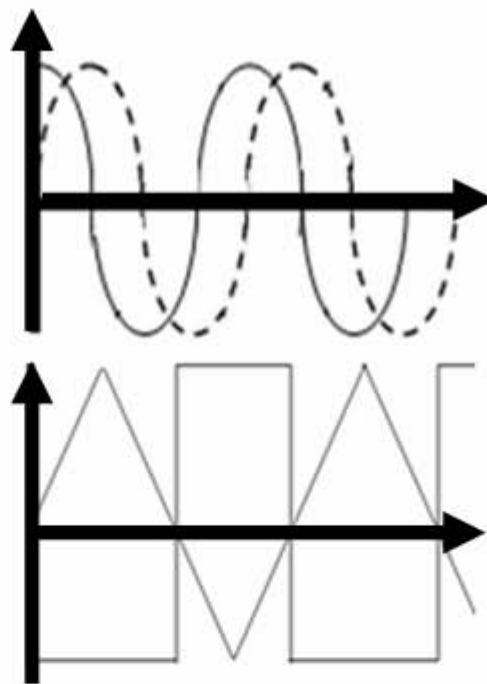


Figura 3.15 Señales de entrada y salida del integrador

3.3.4) Verificación del funcionamiento del Sistema de Detección Completo

Para comprobar si el sistema de detección completo funciona, se implementó de la siguiente forma: Primero conectamos la fuente (el transformador y el circuito rectificador de onda completa tipo puente) al multímetro y al circuito de acoplo, de ahí acoplamos el tubo geiger conectando el ánodo al circuito de acoplo (www.ldinc.com) y cátodo a tierra, la salida del circuito de acoplo se conectó a la entrada del circuito integrador y a la salida de este se conectó el osciloscopio, y se observaron unos pulsos.

Se le ha conectado a la salida del sistema una bocina para escuchar los pulsos, es decir se percibirá un chasquido por pulso.

Estos pulsos son precisamente debidos a la radiación de fondo natural; Comprobando así que el sistema de detección funciona. (Para una prueba con una fuente radiactiva abierta ó sellada deberán utilizarse las normas establecidas y vigentes en el reglamento general de protección radiológica. Estas normas se refieren en el apéndice A₁)

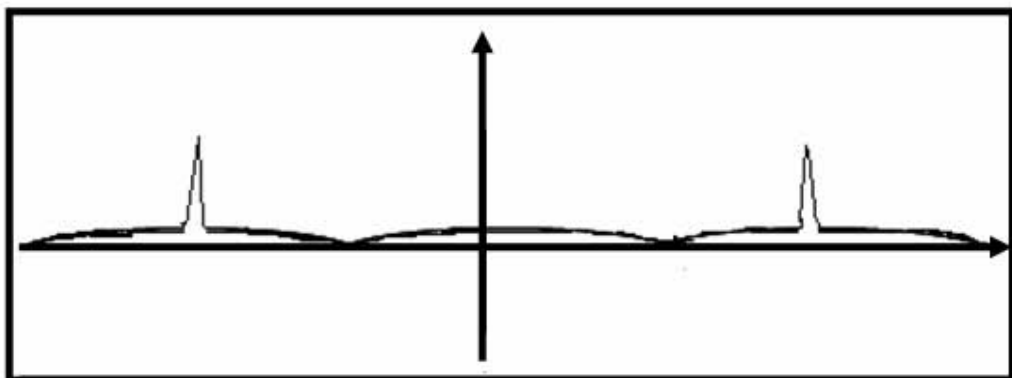


Figura 3.16 Pulsos de salida del sistema completo

3.4 Calibración

La respuesta del método analítico y la sensibilidad del sistema de detección empleado respecto al componente deseado debe calibrarse usando un isótopo radiactivo o una muestra patrón que contenga una cantidad conocida de ese radisótopo.

Para calibrar el detector es necesario un juego de fuentes radiactivas de distintas actividades de un solo radisótopo, pero es difícil obtenerlas ya que solo las poseen instituciones dedicadas a la aplicación de Energía Nuclear o temas afines. Debido a esto se ha tenido que hacer solamente pruebas de escritorio suponiendo los valores y como se desarrolla este proceso. Se han tomado como datos los siguientes; (Esto, por si alguien esta interesado en la Calibración del Equipo):

El juego de fuentes radiactivas será de Cs 137 cuyas actividades son:

Cs - 137 (μ Ci)
10
15
25
40
65
105
170

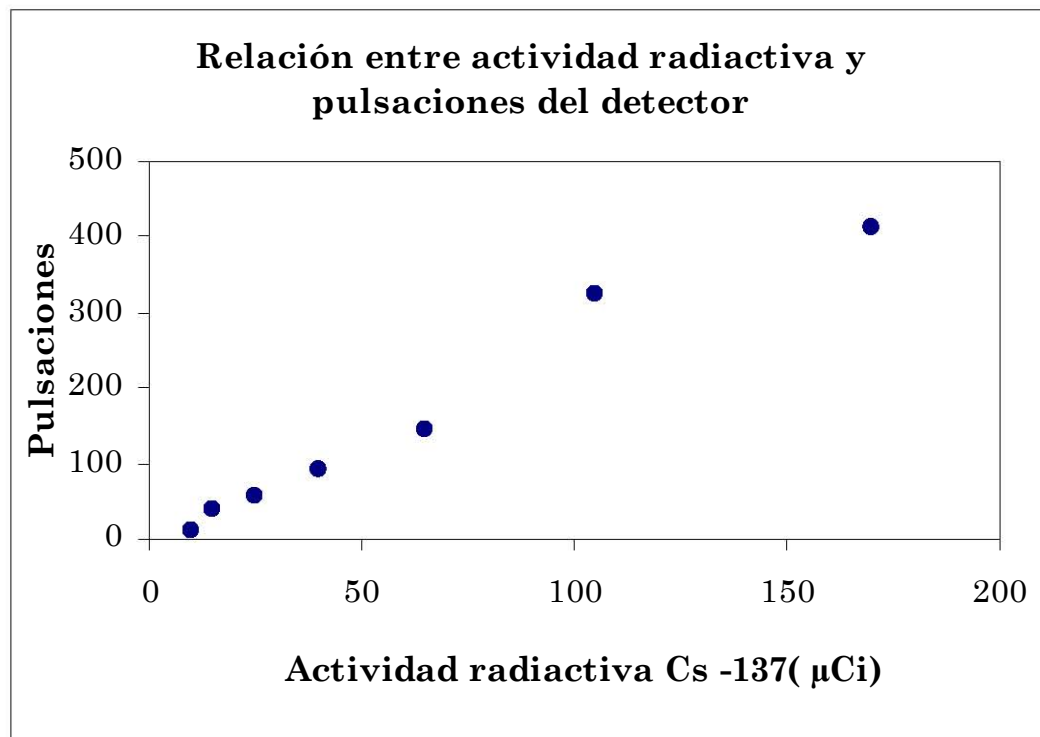
Tabla 3.1 Actividades radiactivas del Cesio 137

A la salida del sistema de medición se le conecto una bocina para escuchar los chasquidos que emitirían los pulsos de salida y estos son:

Cs - 137 (μ Ci)	Chasquido/ Pulso
10	12
15	39
25	57
40	93
65	145
105	325
170	413

Tabla 3.2 Actividad radiactiva y pulsos de salida

Estos datos se muestran en la gráfica 1.



Gráfica 3.1. Relación entre actividad radiactiva y pulsaciones

Pero es necesario hacer una estimación lineal para calcular la línea recta que mejor se ajuste a los datos para que puedan usarse para predecir resultados acerca de observaciones futuras. Para lograr esto se recurrirá al método de “mínimos cuadrados” y este nos indica que la ecuación de regresión es:

$$y = mx + b$$

o

$$Y = m_1x_1 + m_2x_2 + \dots + b$$

(Si hay varios rangos de valores X)

De este mismo método también se obtiene que:

$$m = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sum (x - \bar{x})^2}$$

$$b = \bar{y} - m\bar{x}$$

$$\bar{y} = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n yi}{n}$$

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n xi}{n}$$

Donde

X= actividades radiactivas;

Y= Pulsos emitidos

Entonces sustituimos en las fórmulas y los datos son los siguientes:

$$\bar{x} = 61,4285714$$

$$\bar{y} = 154,857143$$

$$m = 2,61373239$$

$$b = -5,70070396$$

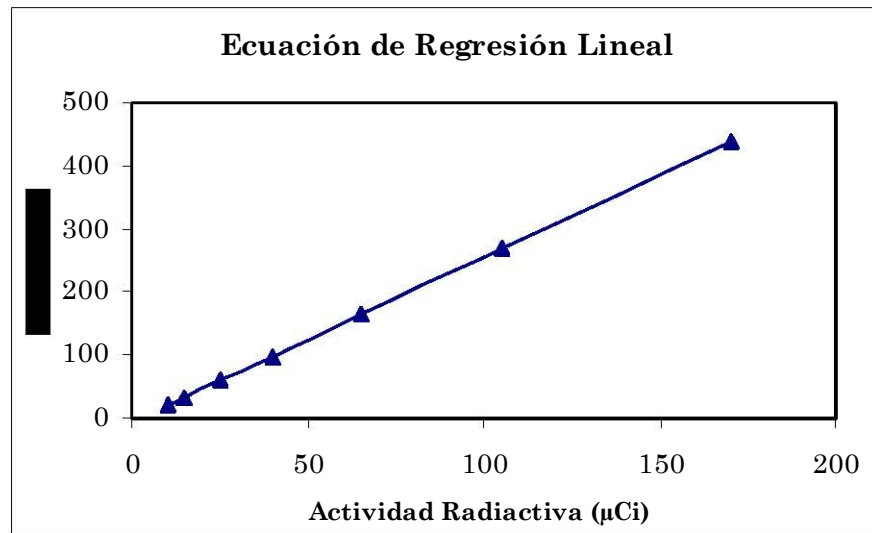
Obteniendo la ecuación de regresión lineal:

$$y = 2.61x - 5.70$$

Cs - 137 (μ Ci)	Chasquido/ Pulso
x	y
10	12
15	39
25	57
40	93
65	145
105	325
170	413

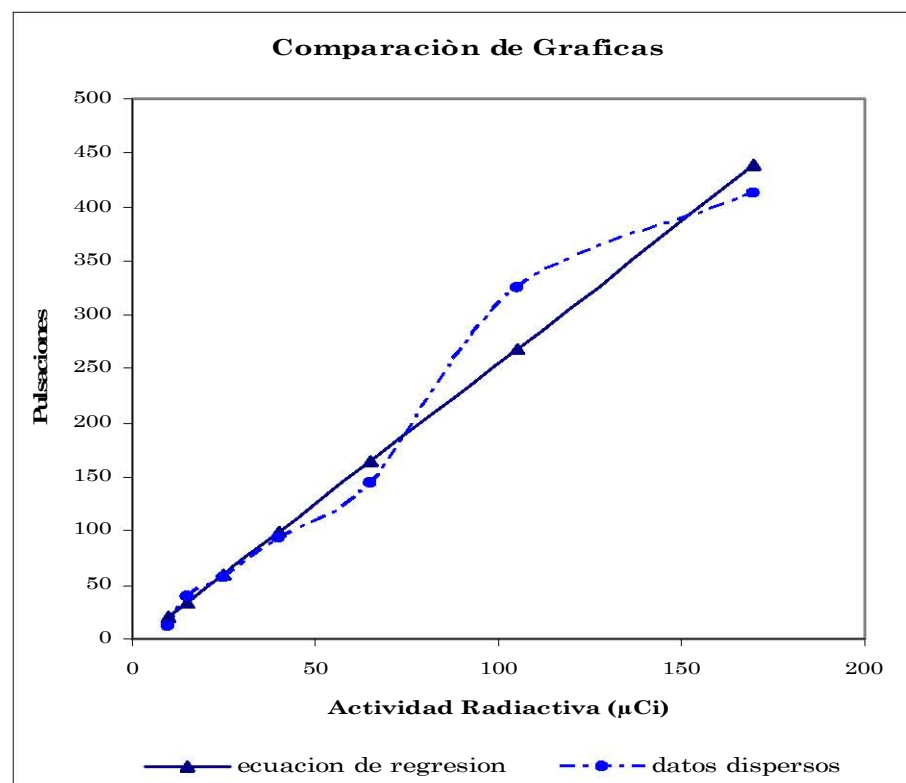
Tabla 3.3 Actividad radiactiva y valores obtenidos con la ecuación de regresión lineal

Que gráficamente da un resultado como el mostrado en la gráfica 3.2:



Gráfica 3.2. Representación de la Ecuación de regresión Lineal

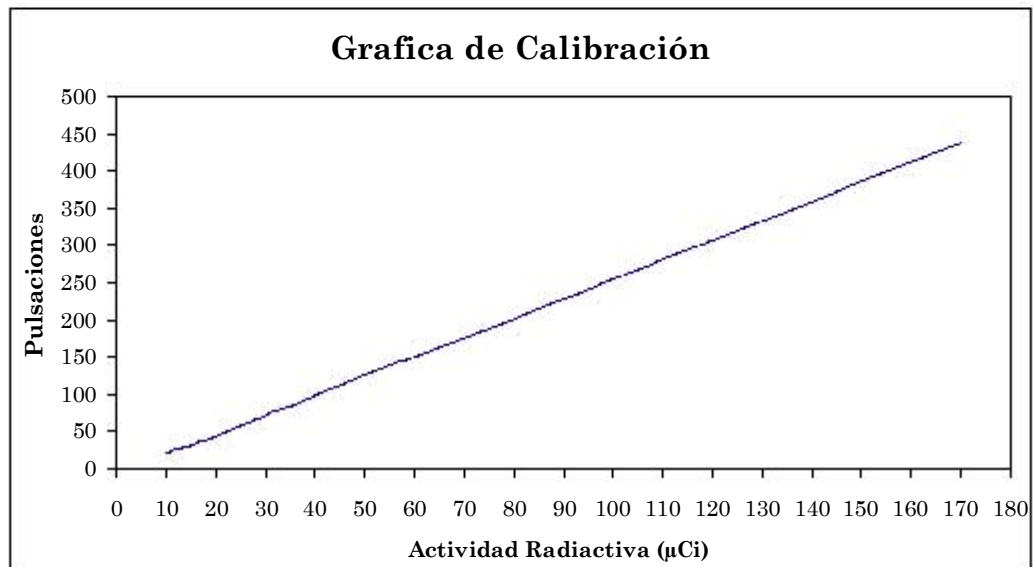
Si comparáramos las dos gráficas para observar el ajuste la gráfica quedaría como la mostrada en la gráfica 3.3:



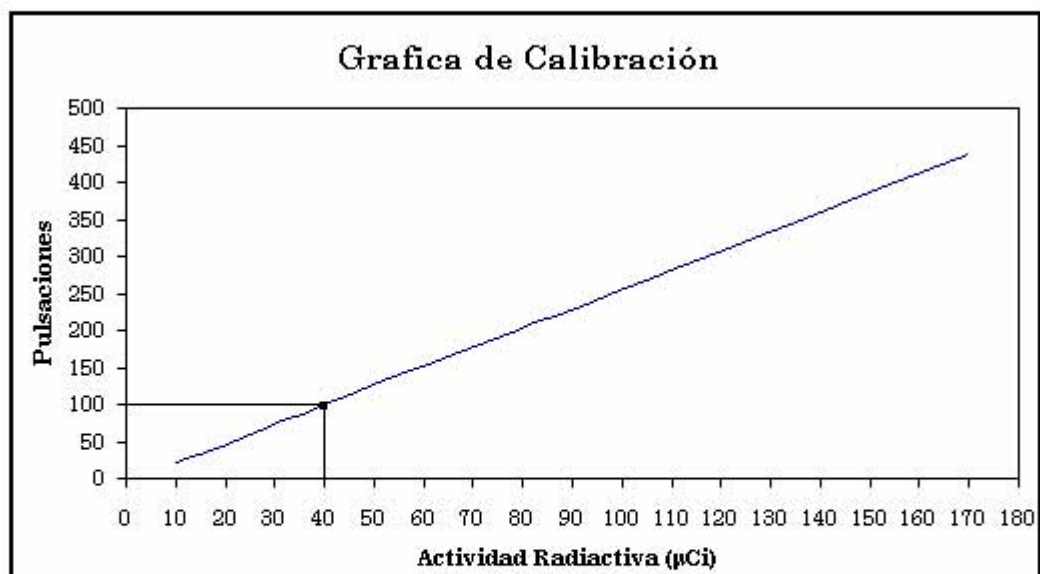
Gráfica 3.3. Comparación de la ecuación de regresión lineal con los datos dispersos

Como puede apreciarse, el nivel de dispersión de datos no debe ser muy grande.

La gráfica de la ecuación de regresión representa la calibración del detector (ver gráfica 3.4) y esta sirve para mediciones futuras es decir que cuando por ejemplo el detector emita 100 pulsaciones representara una actividad radiactiva de $40\mu\text{Ci}$; Esto se muestra en la gráfica 3.5.



Gráfica 3.4. Calibración



Gráfica 3.5. Ejemplo de medición

- Conclusiones:

Para finalizar queremos señalar la importancia que tiene la Energía Nuclear en nuestros días, las aplicaciones de esta en, la medicina, la industria, la agricultura etc. Ayuda a la mejor eficacia de los objetivos en cada uno de sus desempeños.

El detector geiger por su fácil funcionamiento es utilizado en muchas circunstancias, los pulsos que este emite nos ayuda a percibir en los distintos lugares donde podría haber actividad radiactiva.

El tubo geiger que se puso en marcha en este proyecto, es un detector que opera con un alto voltaje y una corriente pequeña, al ser conectado el tubo con su respectiva electrónica asociada se pudo observar los pulsos debido a la radiación de fondo natural en el osciloscopio; Debido a las circunstancias no se pudo calibrar adecuadamente el detector es decir falta el juego de fuentes radiactivas de distintas actividades de un solo radisótopo, se hicieron solamente pruebas de escritorio, detallando el procedimiento de la calibración y encontrando la ecuación de regresión respectiva, la cual nos dio una gráfica que nos serviría para futuras mediciones, pero, las datos que se tomaron para llegar a esta son estimados, no podemos dar como adecuada la curva de calibración.

APENDICE A₁

NORMAS EXPEDIDAS POR LA SE-CNSNS

NOM-001-NUCL-1994	Factores para el cálculo de equivalente de dosis. (DO.02.06.96)
NOM-002-NUCL-1994	Pruebas de fuga y hermeticidad de fuentes selladas. (DO 02.23.96)
NOM-003-NUCL-1994	Clasificación de instalaciones o laboratorios que utilizan fuentes abiertas. (DO 02.07.06)
NOM-004-NUCL-1994	Clasificación de los desechos radiactivos. (DO 03.04.96)
NOM-005-NUCL-1994	Límites anuales de incorporación (LAI) y concentraciones derivadas en aire (CDA) de radionúclidos para el personal ocupacionalmente expuesto. (DO 02.16.96)
NOM-006-NUCL-1994	Criterios para la aplicación de los límites anuales para grupos críticos del público. (DO 02.20.96)
NOM-007-NUCL-1994	Requerimientos de seguridad radiológica que deben ser observados en los implantes permanentes del material radiactivo con fines terapéuticos a seres humanos(DO 03.04.96)
NOM-008-NUCL-1994	Límites de contaminación superficial con material radiactivo. (DO 03.06.96)
NOM-009-NUCL-1994	Índice de transporte para el material radiactivo.(DO1.03.96)
NOM-010-NUCL-1994	Pruebas para embalajes y bultos que contengan material radiactivo. (DO 01.03.96 P)
NOM-011-NUCL-1995	Valores de actividad A1 y A2 para transporte de material radiactivo. (DO 01.03.96 P)
NOM-012-NUCL-1995	Requerimientos y calibración de monitores de radiación ionizante. (DO 07.16.96)
NOM-013-NUCL-1995	Requerimientos de seguridad radiológica para egresar a pacientes a los que se les ha administrado material radiactivo. (DO 11.01.99)
NOM-014-NUCL-1995	Categorías de bultos y sobre envases que contengan material radiactivo: marcado, etiquetado y rotulado. (DO01.24.96 P)

NOM-015-NUCL-1995	Condiciones para la exención de bultos que contengan sustancias fisiónables. (DO 01.04.96 P)
NOM-016-NUCL-1995	Límites de contaminación superficial removible para bultos, equipo utilizado y medios de transporte para material radiactivo. (DO 01.04.96 P)
NOM-017-NUCL-1995	Pruebas para material radiactivo en forma especial para fines de transporte. (DO 01.04.96 P)
NOM-018-NUCL-1995	Métodos para determinar la concentración de actividad y actividad total en bultos de desechos radiactivos. (DO 08.12.96)
NOM-019-NUCL-1995	Requerimientos para bultos de desechos radiactivos de nivel bajo para su almacenamiento definitivo cerca de la superficie. (DO 08.14.96)
NOM-020-NUCL-1995	Requerimientos para instalaciones de incineración de desechos radiactivos. (DO 08.15.96)
NOM-021-NUCL-1996	Pruebas de lixiviación para especímenes de desechos radiactivos solidificados. (DO 08.04.97)
NOM-022/1-NUCL-1996	Requerimientos para una instalación para el almacenamiento definitivo de desechos radiactivos de nivel bajo cerca de la superficie. Parte 1 sitio. (DO 05.09.97)
NOM-022/2-NUCL-1996	Requerimientos para una instalación para el almacenamiento definitivo de desechos radiactivos de nivel bajo cerca de la superficie. Parte 2 diseño. (DO 05.09.97)
NOM-023-NUCL-1995	Alcance y contenido del informe de seguridad radiológica para solicitar licencia de modificación de instalaciones radiactivas. (DO 02.06.96 P)
NOM-024-NUCL-1995	Requerimiento y calibración de dosímetros de lectura directa. (DO 08.05.97)
NOM-025/1-NUCL-1995	Requisitos para equipo de radiografía industrial. Parte 1: Diseño y construcción. (DO 03.01.96)
NOM-025/2-NUCL-1996	Requisitos para equipo de

.	radiografía industrial Parte 2: Operación. (DO 08.18.97)
NOM-026-NUCL-1995	Vigilancia medica del personal ocupacionalmente expuesto. (DO 09.06.96 P)
NOM-027-NUCL-1996	Especificaciones para el diseño de instalaciones Radiactivas tipo II clase A, B y C. (DO 23.09.97)
NOM-028-NUCL-1996	Manejo de desechos radiactivos en instalaciones que utilizan fuentes abiertas. (DO 22.12.98)
NOM-029-NUCL-1997	Límites de actividad para bultos tipo E. (DO 07.25.97 P)
NOM-030-NUCL-1997	Límites de actividad para transporte de material radiactivo de baja actividad especifica (BAE) y objetos contaminados en la superficie (OCS). (DO 07.28.97)
NOM-031-NUCL-1997	Requerimientos para la calificación y entrenamiento del personal ocupacionalmente expuesto a radiaciones ionizantes. (DO 12.03.98)
NOM-032-NUCL-1997	Especificaciones técnicas para la operación de unidades de teleterapia que utilizan material radiactivo. (DO 30.12.98)
NOM-033-NUCL- 1999	Especificaciones técnicas para la operación de unidades de teleterapia. Aceleradores lineales. (P)
NOM-034-NUCL-1999	Requerimientos para la selección, calificación y entrenamiento del personal de centrales nucleoelectricas (P)

SE - Secretaria de Energía

CNSNS – Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias

Bibliografía

1. Apuntes del curso de protección radiológica para el uso de fuentes radiactivas abiertas y selladas (curso para personal ocupacionalmente expuesto).
Instituto de Ciencias Nucleares UNAM, 2003
2. Glenn F. Knoll
Radiation detection and measurement
Ed. John Wiley & Sons, 2000
3. William J. Price
Nuclear Radiation Detection
ED. McGraw Hill, 1964
4. Patlán C. Fernando.
Design and Construction of a Device Films of Vyns or Cellulose with Control Thickness.
Sistema Internacional de Información Nuclear (INIS) del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) de la ONU. Viena, Austria, 1998.
5. Jorge Richards Campbell,
Las radiaciones, reto y realidades.
ED. Fondo de Cultura Económica CONACYT, 1986
6. Jorge R. Campbell, Ricardo Cameras Ross
Las Radiaciones. II. El manejo de las radiaciones nucleares.
ED. Fondo de Cultura Económica CONACYT, 1986
7. Thomas J. Connolly
Fundamentos de Ingeniería Nuclear.
ED. Limusa, 1983
8. Maria Esther Brandan Siques.
La Radiación.
ED. UNAM, 1986

9. Jerry Korn.
Átomos; Estructura de la materia.
ED. Novaro México, 1965
10. F. Klinger
El Átomo?
ED. Marcombo, 2ª Edición 1966
11. Alexander Efron
El Mundo De La Energía Nuclear.
ED. Bell, Argentina, 1971
12. Enrique G. León López
Henri Antoine Becquerel.
Colección Metrológica Técnica. Mexico 1981
13. Tocci Ronald J; Neal S. Widmer
Sistemas Digitales principios y aplicaciones
ED. Prentice Hall, 2003
14. Rafael Pindano
Electrónica Analogía Integrada
ED. Marcombo, 1997
15. Rashid M. H. Muhamnad
Circuitos Microelectronicos Análisis y
Diseño, Editores Thomson, 2000
16. Edgar Gassner
Tablas de Equivalencia Diccionario TTL.
ED. Alfa Omega, 1995
17. Alberth H. Bowker Gerald J. Lieberman
Estadística para Ingenieros
Ed. Prentice Hall Hispanoamericana S. A,
1981
18. [Http://www.lndinc.com](http://www.lndinc.com)
19. [Http://www.escasablanco.xtec.es/radio](http://www.escasablanco.xtec.es/radio)
20. [Http://www.omega.ilce.edu.mx.3000/sites](http://www.omega.ilce.edu.mx.3000/sites)
21. [Http://www.geocities.com/fisicaquimica99/ra](http://www.geocities.com/fisicaquimica99/ra)
22. [Http://www.digprint.com/radiofisica](http://www.digprint.com/radiofisica)

23. [Http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0504-01/ley.html](http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0504-01/ley.html)
24. [Http://www.encomix.es/~fisico/temas/radiacion/radiacion.html](http://www.encomix.es/~fisico/temas/radiacion/radiacion.html)