



# **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONTADOR DE PULSOS  
PARA UN MONITOR DE RADIACIÓN BETA-GAMMA CON  
DETECTOR GEIGER-MÜLLER”

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PRESENTAN

SUGEIL SUÁREZ PIÑA  
JUAN JOSE MARTINEZ RAMÍREZ

ASESOR: ING. FERNANDO PATLAN CARDOSO



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTO APROBATORIO  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN



DEPARTAMENTO DE  
EXÁMENES PROFESIONALES

DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE

ATN: LIC. ARACELI HERRERA HERNANDEZ  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos  
comunicar a usted que revisamos la Tesis:

Diseño y construcción de un contador de pulsos para un monitor  
de radiación beta-gamma con detector Geiger-Müller.

que presenta la pasante: Suzett Suárez Pina  
con número de cuenta: 09731903-2, para obtener el título de  
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en  
el EXÁMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Mex. a 24 de septiembre de 2008

PRESIDENTE Ing. Jose Luis Rivera López

VOCAL M.C. Vicente Magaña Gonzalez

SECRETARIO Ing. Fernando Patián Cardoso

PRIMER SUPLENTE M.A.I. Pedro Guzmán Tinajero

SEGUNDO SUPLENTE Ing. Petra Medel Ortega



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTO APROBATORIO  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLÁN



DEPARTAMENTO DE

EXÁMENES PROFESIONALES

DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
P R E S E N T E

ATN: L. A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos  
comunicar a usted que revisamos la Tesis:

Diseño y construcción de un contador de pulsos para un monitor  
de radiación beta-gamma con detector Geiger-Müller

que presenta el pasante: Juan Jose Martínez Ramírez  
con número de cuenta: 40109086-8 para obtener el título de:  
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en  
el EXÁMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 24 de septiembre de 2008

PRESIDENTE

Ing. José Luis Rivera López

VOCAL

M.C. Vicente Magaña González

SECRETARIO

Ing. Fernando Patlan Cardoso

PRIMER SUPLENTE

MAI. Pedro Guzmán Tinajero

SEGUNDO SUPLENTE

Ing. Petra Medel Ortega

## ***Dedicatorias y Agradecimientos:***

*A mis padres Mary y Gonzalo, quienes me dieron la vida, quienes sin esperar nada, lo dieron todo. A quienes rieron conmigo en mis triunfos y lloraron también en mis fracasos. A quienes me guiaron por un camino de rectitud y me enseñaron también que es lo mejor. A un par de corazones buenos con gratitud eterna. Porque me comprendieron al haber elegido mi camino. Porque con su enseñanza, amor y confianza, fortalecieron mi vida. Porque siempre existieron palabras de apoyo, que me ayudaron a seguir adelante. Porque con sus esfuerzo y sacrificios, logré el triunfo que hoy les brindo. Con admiración y respeto.*

*A mis hermanas Jacqueline y Marisol que siempre me brindaron su gran apoyo y comprensión a pesar de cualquier obstáculo, estuvieron a mi lado. Gracias Hermanitas!!!*

*A Olaf porque eres de esa clase de persona que todo lo comprende. Porque sabes escuchar y brindar ayuda cuando es necesario... porque te has ganado el cariño, admiración y respeto de todo el que te conoce. Sinceramente. Porque siempre hubo una palabra cuando mas lo necesite. Porque siempre has estado a mi lado en lo bueno y en lo adverso. Por tu amor gracias.*

*A Cut te agradezco por todo el apoyo que me brindaste, durante toda mi carrera de estudiante, te agradezco toda la ayuda que me diste, en los momentos en que en mí la confianza me faltaba. Por todo esto gracias.*

*A Juan José, Emilio y Gerardo que durante toda la carrera fueron unos grandes amigos incondicionales y por ser parte de este gran proyecto, por sus palabras de aliento muchas gracias.*

*Al termino de esta etapa de mi vida. Quiero expresar todo mi agradecimiento a quienes con su ayuda, apoyo y comprensión, me alentaron a lograr esta hermosa realidad... mi formación profesional.*

***Dedicatoria:***

*A mis padres, pilares indispensables los cuales me han sostenido en todo momento, y que han sido pieza fundamental para no dejar de perseguir uno de los mas preciados sueños que un ser humano pueda lograr, por que gracias a sus consejos y regaños he logrado culminar mis estudios profesionales, y aunque tengo muy presente que ni escribiendo un millón de gracias en este y mas trabajos míos sería suficiente para agradecerles todo lo que a lo largo de mi vida me han obsequiado sin esperar nada a cambio.*

***LOS ADORO!!!!***

## *Agradecimientos:*

*A mis hermanos Eduardo, Jaime, Rosa, Guadalupe, por que al ser confidentes, consejeros, jueces y lo mas importante portadores de los lazos de sangre que nos mantienen unidos en las buenas y en las malas en esta familia y que a lo largo de toda mi vida me han enseñado a ser más que un hermano para ellos gracias por todo lo que me han apoyado en esto.*

*A mis amigos: Miguel, Leopoldo, Gerardo porque gracias a ellos sé lo que es la amistad verdadera, valor importante en mi vida, gracias por estar conmigo todos estos años, por aconsejarme, regañarme, compartir risas, llantos y parrandas en todo este tiempo.*

*A Aiko por haber aparecido en mi vida con sonrisa y una palabra de aliento siempre para seguir adelante con este proyecto.*

*Gracias a todos!!  
Gracias por ayudarme a lograrlo.*

## *Agradecimientos:*

*Al ingeniero Fernando Patlan Cardoso por asesorarnos a lo largo de la tesis y compartirnos sus conocimientos acerca del presente proyecto, ya que sin su ayuda en este proyecto no hubiera sido posible su culminación. Y a lo largo del tiempo que tenemos de conocerlo nos ha brindado su amistad incondicional.*

*A los todos los profesores que nos brindaron sus conocimientos pero principalmente a los Profesores Vicente Magaña y Marcelo Bastida Tapia, por ayudarnos a lo largo de la tesis desinteresadamente y brindarnos su amistad. Además de estar con nosotros, porque sin ellos y sus enseñanzas no estaríamos aquí ahora*

*A nuestros amigos de la universidad: Emilio, Gerardo, Gabby, Anabel, Cut, Oscar, Leonel, Marco, Sergio, Osvaldo y Juan Carlos, por permitirnos conocerlos y ser parte de su vida. Por ayudarnos y estar con nosotros a lo largo de la carrera, y aun después... recuerden que el orden de los factores no altera el producto.*

*Al ININ (Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares), en especial al Dr. Francisco Javier Ramírez Jiménez.*

*Muchas gracias!!*



## ÍNDICE

Introducción .....	1
1. Conceptos básicos de medida y detección de la radiación nuclear.....	3
1.1. Estructura molecular y atómica. ....	3
1.1.1 Isótopo.....	4
1.1.2 Notación.....	4
1.1.3 Radisótopo. ....	6
1.2 Ley de decaimiento radiactivo.....	6
1.2.1 Vida media de un isótopo radiactivo. ....	7
1.2.2 Actividad radiactiva.....	8
1.3 Interacción de la radiación con la materia. ....	9
1.3.1 Excitación. ....	9
1.3.2 Ionización.....	10
1.4 Interacción de la radiación electromagnética ionizante con la materia.....	10
1.4.1 Efecto fotoeléctrico.....	11
1.4.2. Efecto Compton. ....	13
1.4.3. Creación de pares de iones.....	15
1.5. Principio básico de detección de la radiación nuclear. ....	16
1.5.1. Detectores gaseosos. ....	17
1.5.2. Detectores de centelleo. ....	18
1.5.3. La película fotográfica. ....	19
1.5.4. Cámara de niebla.....	19
1.5.5. Cámara de burbujas.....	21
1.5.6. Cámara de chispas.....	21
1.5.7. Detectores semiconductores.....	22
1.5.7.1. Detectores de barrera superficial. ....	23
1.5.7.2. Detectores de germanio hiperpuro. ....	23
1.5.8. Detectores de germanio litio. ....	25

2. Monitor de Radiación. ....	26
2.1. Detector Geiger Muller.....	26
2.2. Fuente de Alto Voltaje.....	31
2.3. Pre-amplificador.....	33
2.4. Amplificador.....	33
2.5. Sistema de Conteo.....	34
3. Diseño de un contador de pulsos para un monitor de radiación nuclear basado en un detector Geiger-Muller.....	35
3.1. Monitor de radiación.....	36
3.2. Temporizador.....	38
3.3. Contador.....	41
3.4. Calibración del equipo.....	44
4. Resultados.....	51
4.1. Implementación del sistema completo.....	56
5. Conclusiones.....	58
Anexo.....	59
Bibliografía.....	64

# Introducción

---

El descubrimiento de la radiactividad se debe al físico francés Henri Becquerel, al comprobar casualmente en 1896 como queda impresa una placa fotográfica en la que se habían colocado cristales de uranio y potasio, aún sin la intervención de la luz solar. La radiactividad supone que las sustancias llamadas radiactivas emiten espontáneamente radiaciones capaces de atravesar la materia, impresionar placas fotográficas o producir ionización o fluorescencia. La ionización es una propiedad por la cual se realiza la detección de radiaciones. La radiación ionizante es cualquiera de los varios tipos de partículas y rayos emitidos por material radiactivo, equipos de rayos X, reacciones nucleares y las estrellas. Los tipos de radiación que son generalmente importantes son las partículas alfa, beta, los rayos X y los rayos gamma.

Hay diferentes tipos de instrumentos que sirven para medir los niveles de radiación. Estos equipos comunmente conocidos como detectores basan su funcionamiento en la interacción de la radiación con la materia por medio del fenómeno de ionización. Por mencionar algunos de estos equipos se encuentran los detectores gaseosos, entre los que se encuentran el detector proporcional, la cámara de ionización y el detector Geiger-Müller. Otros detectores que también basan su funcionamiento en la ionización son la cámara de niebla y la cámara de burbujas. Los mas comunes son los del tipo gaseoso y en especial el detector Geiger-Müller debido a su versatilidad y bajo costo. Existen otro tipo de detectores entre los que podríamos mencionar al de centelleo, que normalmente utiliza material sólido o líquido, cuyos átomos emiten luz visible al interaccionar con la materia. Finalmente existen un tipo de detectores de mayor precisión; estos son los detectores semiconductores de estado sólido. Unos ejemplos de estos detectores son los de germanio Hiperpuro y los de Barrera Superficial, todos estos tipos de detectores se explicaran con más detalle en el Capítulo I.

Este trabajo tratará de la detección de radiación Ionizante por medio de un monitor de radiación que utiliza un tubo Geiger-Müller; para el cual se diseñará un dispositivo

contador de pulsos para medir la actividad radiactiva de muestras emisoras beta-gamma. Estas radiaciones son de amplio uso en aplicaciones médicas, industriales, la agricultura y las artes.

El trabajo se desarrollará de la siguiente manera:

- En el Capítulo I se describirán algunos conceptos básicos necesarios para poder explicar algunas definiciones requeridas en el trabajo, las cuales se basarán primordialmente sobre radiación nuclear y los detectores mas utilizados.
- En el Capítulo II se presenta la descripción del funcionamiento del Monitor de radiación utilizado.
- En el Capítulo III se presenta el diseño del contador de pulsos para el monitor de radiación nuclear basado en un detector Geiger-Muller. Este dispositivo contará con un temporizador implementado con un microcontrolador PIC.
- En el Capítulo IV se obtendrán los resultados obtenidos con el diseño y construcción del contador.
- En el Capítulo V se presentan las conclusiones obtenidas del trabajo.

En el anexo A se presenta el programa utilizado para el microcontrolador PIC.

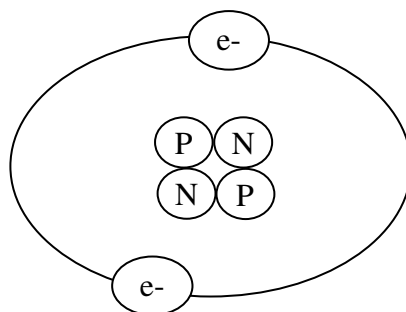
# 1. Conceptos básicos de medida y detección de la radiación nuclear.

---

En este capítulo se abordarán algunos conceptos que definen los principios de la medida y la detección de la radiación nuclear. Además de temas como la estructura molecular atómica, lo que son los isótopos, estabilidad e inestabilidad nuclear así como los tipos de radiación nuclear más comunes; además, se abordarán los tipos de detectores de radiación mas importantes y se presentará al fenómeno de ionización como el principio básico de detección de la radiación nuclear. Cabe señalar que no se trata de hacer un tratado del tema, sino proporcionar al lector de los principios básicos necesarios para la comprensión del trabajo.

## 1.1 Estructura molecular y atómica

Los átomos son la unidad fundamental estructural de todos los materiales, por esta razón es muy importante recordar algunos principios de la estructura. Los átomos están constituidos por tres tipos de partículas: Protones, Neutrones y Electrones. De manera muy simple se puede describir el átomo como un pequeño núcleo (diámetro  $10^{-14}$  m.) rodeado de una nube de electrones de densidad variable de tal forma que el átomo tiene un diámetro de  $10^{-10}$  m. En el núcleo se concentra la casi totalidad de la masa del átomo y contiene protones y neutrones (véase *Figura 1.1*).



*Figura 1.1. Modelo Atómico*

## NÚMERO ATÓMICO

Indica el número de protones que hay en el núcleo y en un átomo neutro coincide con el número de electrones. Cada elemento tiene un número atómico característico y es este número el que permite el ordenamiento en la tabla periódica desde el Hidrógeno (1) hasta el Hafnio (105).

El número atómico es el número  $Z$  que acompaña al símbolo  $X$  de un elemento,  ${}_Z X$ . Un átomo neutro posee el mismo número de protones que de electrones, de manera que  $Z$  indica también el número de electrones de un átomo neutro.

## MASA ATÓMICA

Constituye la masa en gramos de  $6.02 \times 10^{23}$  átomos del elemento. Este valor también se encuentra en la tabla periódica.

### 1.1.1 Isótopo

En general, un elemento químico dado está constituido por varias especies de átomos de masa o peso atómico diferente. A cada especie atómica así definida se la denomina **isótopo** del elemento dado. Los átomos de cada isótopo tienen el mismo número atómico o de protones,  $Z$ , pero distinto número másico,  $A$ , lo cual indica que el número de neutrones es diferente y característico para cada isótopo. La palabra isótopo, proviene del griego y significa "en el mismo sitio". Se usa para indicar que todos los isótopos de un mismo elemento se encuentran en el mismo sitio de la tabla periódica.

### 1.1.2 Notación

En la nomenclatura científica, los isótopos se denotan por el nombre del elemento correspondiente seguido por el número másico, separados habitualmente por un guión. Algunos isótopos poseen nombres especiales. Así: hidrógeno-3 o tritio, carbono-12,

carbono-14, uranio-238, etc. En forma simbólica, el número de nucleones se añade como superíndice a la izquierda del símbolo químico:  $^3\text{H}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{238}\text{U}$ .

Si la relación entre el número de protones y de neutrones no es la apropiada para obtener la estabilidad nuclear, el isótopo es radiactivo.

La radiactividad es un fenómeno físico natural, por el cual algunas sustancias o elementos químicos llamados radiactivos, emiten radiaciones que tienen la propiedad de impresionar placas fotográficas, ionizar gases, producir fluorescencia, atravesar cuerpos opacos a la luz ordinaria, etc. Debido a esa capacidad se les suele denominar radiaciones ionizantes (en contraste con las no ionizantes). Las radiaciones emitidas pueden ser electromagnéticas, o bien partículas, como pueden ser núcleos de Helio, electrones o positrones, protones u otras.

La radiactividad es una propiedad de los isótopos que son "inestables". Es decir que se mantienen en un estado excitado en sus capas electrónicas o nucleares, con lo que para alcanzar su estado fundamental deben perder energía. Lo hacen en emisiones electromagnéticas o en emisiones de partículas con una determinada energía cinética. Esto se produce variando la energía de sus electrones (emitiendo Rayos X), sus nucleones (rayo gamma) o en un proceso de transmutación del isótopo (al emitir neutrones, protones o partículas más pesadas), y en varios pasos sucesivos, con lo que un isótopo pesado puede terminar convirtiéndose en uno mucho más ligero, como el Uranio que con el transcurrir de los siglos acaba convirtiéndose en plomo.

Por ejemplo, en la naturaleza el carbono se presenta como una mezcla de tres isótopos con números de masa 12, 13 y 14:  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$  y  $^{14}\text{C}$ . Sus abundancias respecto a la cantidad global de carbono son respectivamente: 98,89%, 1,11% y trazas.

Los isótopos se subdividen en isótopos estables (existen menos de 300) y no estables o isótopos radiactivos (existen alrededor de 1200). El concepto de estabilidad no es exacto, ya que existen isótopos casi estables. Su estabilidad se debe al hecho de que, aunque son radiactivos, tienen un tiempo de neutralización extremadamente largo, aún comparado con la edad de la Tierra.

Solamente 21 elementos (ejemplos: berilio, flúor, sodio) poseen un solo isótopo natural.

La mayoría de los elementos químicos poseen más de un isótopo.

### 1.1.3 Radisótopo:

Un isótopo radiactivo de un elemento se caracteriza por tener un núcleo atómico inestable (por el balance entre neutrones y protones) y emitir energía cuando cambia de esta forma a una más estable. La energía liberada al cambiar de forma puede detectarse con un detector de radiación o con una película fotográfica, las cuales se estudiarán con más detalle más adelante.

Cada isótopo tiene una vida media característica la cual es el tiempo en el cual el número de núcleos radiactivos iniciales se reducen a la mitad. La energía puede ser liberada, principalmente, en forma de partículas alfa (núcleos de helio), beta (electrones) o rayos gamma (energía electromagnética).

Varios isótopos radiactivos artificiales tienen usos en medicina. Por ejemplo, el isótopo del talio puede usarse para identificar vasos sanguíneos bloqueados. Varios isótopos radiactivos naturales se usan para reconstruir cronologías, por ejemplo, arqueológicas.

Muchos de estos no se encuentran en la naturaleza por que de haberse formado alguna vez, rápidamente hubieran decaído y desaparecido por eso solamente se conocen producidos artificialmente, en aceleradores o en reactores nucleares.

## 1.2 Ley de decaimiento radiactivo

La ley de decaimiento radiactivo es válida no importando el tipo de desintegración de que se trate.

La fórmula matemática que describe la Ley de decaimiento radiactivo es la siguiente:

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

Donde:

N representa el número de núcleos radiactivos después de un tiempo t.

$N_0$  es el número inicial de núcleos radiactivos cuando  $t=0$

$\lambda$  Se denomina la constante de decaimiento y depende del Isótopo en cuestión.



$e$  es la base del logaritmo natural

La constante de decaimiento presenta la probabilidad de que los núcleos radiactivos del isótopo decaigan.

### 1.2.1 Vida media de un isótopo radiactivo.

En física nuclear, vida media es el tiempo en el cual el número de núcleos radiactivos iniciales se reducen a la mitad. Se representa como  $t_{1/2}$ . Como la desintegración nuclear sigue leyes estadísticas, no se puede establecer que un determinado núcleo vaya a tardar ese tiempo en desintegrarse, sin embargo si se puede determinar el número de núcleos a desintegrarse por unidad de tiempo.

La vida media de un isótopo radiactivo es el tiempo que tarda la mitad del número de núcleos radiactivos iniciales en decaer. Partiendo de la ecuación de la ley de decaimiento radiactivo, se tiene:

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

Si transcurre una vida media, entonces:

$$t = t_{1/2}$$

Si definimos que  $t_{1/2}$  es el tiempo transcurrido para que el número de núcleos radiactivos disminuya a la mitad, tenemos:

$$N = N_0 / 2$$

La cual nos conduce a que:

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

Lo que implica que:

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

Aplicando logaritmos en ambos lados:

$$\ln e^{-\lambda t_{1/2}} = \ln \frac{1}{2}$$

Entonces:

$$-\lambda t_{1/2} = \ln 1 - \ln 2$$

Entonces:

$$-\lambda t_{1/2} = -\ln 2$$

Lo cual implica que:

$$t_{1/2} = \frac{-\ln 2}{-\lambda}$$

Entonces:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \cong \frac{0.693}{\lambda}$$

### 1.2.2 Actividad radiactiva

La actividad radiactiva, también denominada velocidad de desintegración de una muestra radiactiva, es el número de núcleos atómicos de una cantidad determinada de esta muestra que se desintegran por unidad de tiempo.

En principio, se adoptó como unidad la actividad de 1 gramo de radio, equivalente a  $3.7 \times 10^{10}$  desintegraciones por segundo y que recibió el nombre de curie (Ci). La unidad actual es el becquerel (Bq), que equivale a un núcleo desintegrado por segundo.

La actividad de una muestra radiactiva es proporcional al número de núcleos radiactivos presentes,  $\lambda N$ , donde  $\lambda$  la constante de desintegración radiactiva; es independiente del estado físico o químico del elemento que se desintegra. Si  $\lambda$  es muy grande, el elemento es muy activo, mientras que si  $\lambda$  tiene un valor pequeño, el elemento es muy poco activo.

Las leyes que rigen la desintegración radiactiva son de tipo estadístico. Es imposible predecir cuándo se desintegrará un núcleo concreto, sólo se puede hablar de la probabilidad de que ese hecho tenga lugar. Por otro lado, podemos apreciar que hay una relación entre la

vida media y la actividad radiactiva con lo cual podemos redefinir a la vida media como el tiempo necesario para que la actividad radiactiva inicial se reduzca a la mitad.

### **1.3 Interacción de la radiación con la materia**

Cuando se habla de reacciones nucleares se hace referencia a todo tipo de interacción con los núcleos atómicos. Un tema más general, que engloba las reacciones nucleares, es el de las interacciones producidas por los fotones y partículas (agrupados bajo la denominación común de radiación) cuando inciden sobre la materia e interactúan con los núcleos o con los electrones atómicos, lo que se conoce como interacción de la radiación con la materia.

Las radiaciones que más interesan son las que crecen de carga (neutrones y fotones), y las constituidas por partículas cargadas (electrones, protones, partículas alfa, etc.). La diferenciación de ambos grupos es muy importante pues los mecanismos de interacción son completamente diferentes. Las radiaciones de neutrones y fotones, debido a la gran variedad de interacciones que producen y a su capacidad de penetración en la materia, son las de mayor interés. Las principales formas de interaccionar la radiación con la materia son la excitación y la ionización.

#### **1.3.1 Excitación**

En la teoría sobre la estructura atómica propuesta por Bohr en 1913, se explican satisfactoriamente las características observadas en el espectro de radiación electromagnética emitida por ciertos átomos de estructura simple. El átomo tiende, de acuerdo con la regla general de la naturaleza a permanecer en estado fundamental de mínima energía y constituye un sistema estable. Cuando existe un aporte externo de energía, alguno de sus electrones puede absorberla y alcanzar otra órbita superior, con lo que el átomo adquiere un nivel de energía superior. Esto es lo que se conoce como estado de excitación.

Excitar un átomo consiste en provocar un desplazamiento de sus electrones a órbitas o niveles de mayor energía, suministrándole la necesaria para realizar el salto, ya sea en forma de energía térmica, cinética o electromagnética. Al elevar la temperatura de un

cuerpo de modo considerable, este se calienta hasta la incandescencia, estado en el que se emiten fotones de muy amplia variedad, parte de los cuales pertenecen a la franja visible del espectro electromagnético. Éste es el fundamento de las fuentes luminosas incandescentes, como el fuego o las lámparas de filamento.

### **1.3.2 Ionización**

La manifestación de la interacción de la radiación nuclear con la materia es la ionización, es decir la creación de iones positivos o negativos. Cuando se arranca un electrón de un átomo se dice que el átomo se encuentra ionizado.

La radiación ionizante es cualquiera de los varios tipos de partículas y rayos emitidos por material radiactivo, equipos de alto voltaje, reacciones nucleares y las estrellas. Los tipos que son generalmente importantes para su estudio y aplicación son las partículas alfa, beta, los rayos X y los rayos gama.

Las partículas alfa y beta son pequeños fragmentos de alta velocidad, emitidos por átomos radiactivos cuando se transforman a otra sustancia. Los rayos X y los rayos gama son tipos de radiación electromagnéticas. Estas partículas de radiación y rayos poseen suficiente energía para desplazar electrones de átomos y moléculas (tales como agua, proteína y DNA) a los que impactan o que pasan cerca. Este proceso es llamado ionización, por lo que esta radiación suele llamarse "radiación ionizante."

### **1.4 Interacción de la radiación electromagnética ionizante con la materia**

La materia está constituida por átomos, y la radiación ionizante interactúa con los núcleos y los electrones orbitales de los mismos con una probabilidad de ocurrencia que depende del tipo y energía de la radiación, así como también de la naturaleza del medio material. En todos los casos los resultados de la interacción de la radiación con la materia son la excitación y/o la ionización de los átomos del medio material.

Los tipos de radiación ionizante de interés son:

- 1 Electromagnética (rayos gamma y x) masa = 0 No tienen carga eléctrica
- 2 Neutrones masa  $\neq 0$  No tienen carga eléctrica
- 3 Radiación beta (electrones negativos y positivos) masa  $\neq 0$  Tienen carga eléctrica
- 4 Partículas pesadas (protones, deuterones, partículas alfa y otros iones pesados) masa  $\neq 0$  Tienen carga eléctrica.

Estos cuatro tipos de radiación presentan características marcadamente diferentes en sus formas de interactuar con la materia, y por esta razón es necesario su tratamiento en forma separada. Es conveniente destacar que para las partículas con carga eléctrica, por interactuar en forma directa con el medio material a través de las fuerzas coulombianas (fuerzas de atracción o repulsión entre cargas eléctricas), existe un espesor tal que las frenará totalmente.

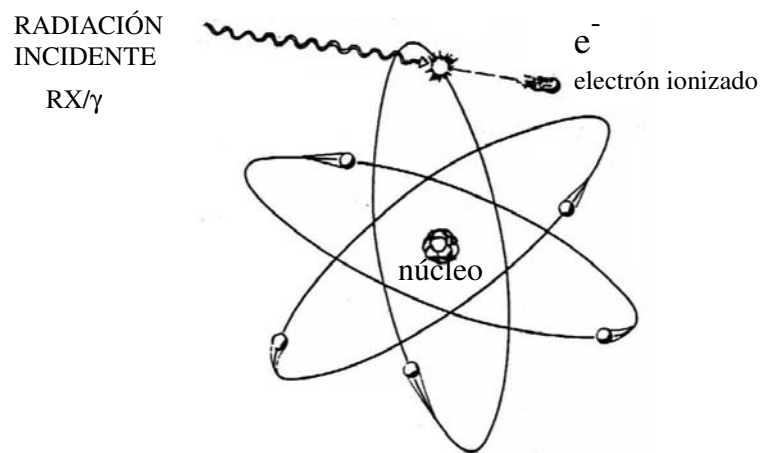
Para radiación electromagnética y neutrones, carentes de carga eléctrica, el alcance de su recorrido en el medio es indefinido ya que cuando estas partículas interactúan son absorbidas o dispersadas del haz en un solo evento.

Las formas de interacción de la radiación electromagnética ionizante, son tres a saber: *el efecto Compton, el efecto fotoeléctrico y la creación de pares de iones.*

#### **1.4.1 Efecto fotoeléctrico**

Este consiste en la formación y liberación de partículas eléctricamente cargadas que se produce en la materia cuando es irradiada con luz u otra radiación electromagnética como se muestra en la *Figura 1.2*. El término efecto fotoeléctrico designa varios tipos de interacciones similares. En el efecto fotoeléctrico externo se liberan electrones en la superficie de un conductor metálico al absorber energía de la luz que incide sobre dicha superficie. Este efecto se emplea en la célula fotoeléctrica, donde los electrones liberados por un polo de la célula, el fotocátodo, se mueven hacia el otro polo, el ánodo, bajo la influencia de un campo eléctrico.

El estudio del efecto fotoeléctrico externo desempeñó un papel importante en el desarrollo de la física moderna. Una serie de experimentos iniciados en 1887 demostró que el efecto fotoeléctrico externo tenía determinadas características que no podían explicarse por las teorías de aquella época, que consideraban que la luz y todas las demás clases de radiación electromagnética se comportaban como ondas. Por ejemplo, a medida que la luz que incide sobre un metal se hace más intensa, la teoría ondulatoria de la luz sugiere que en el metal se liberarán electrones con una energía cada vez mayor. Sin embargo, los experimentos mostraron que la máxima energía posible de los electrones emitidos sólo depende de la frecuencia de la luz incidente, y no de su intensidad.

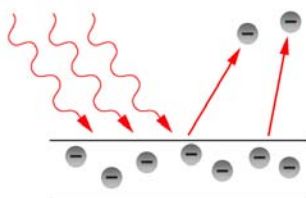


*Figura 1.2. Esquema del Efecto Fotoeléctrico. En el efecto fotoeléctrico externo se liberan electrones en la superficie de un conductor metálico al absorber energía de la luz que incide sobre dicha superficie.*

En 1905, para tratar de explicar el mecanismo del efecto fotoeléctrico externo, Albert Einstein sugirió que podría considerarse que la luz se comporta en determinados casos como una partícula, y que la energía de cada partícula luminosa, o fotón, sólo depende de la frecuencia de la luz. Para explicar el efecto fotoeléctrico externo, Einstein consideró la luz como un conjunto de "proyectiles" que chocan contra el metal. Cuando un electrón libre del metal es golpeado por un fotón, absorbe la energía del mismo. Si el fotón tiene la suficiente energía, el electrón es expulsado del metal como se muestra en la *Figura 1.3*. La teoría de Einstein explicaba muchas características del efecto fotoeléctrico externo, como por

ejemplo el hecho de que la energía máxima de los electrones expulsados sea independiente de la intensidad de la luz. Según la teoría de Einstein, esta energía máxima sólo depende de la energía del fotón que lo expulsa, que a su vez sólo depende de la frecuencia de la luz. La teoría de Einstein se verificó por experimentos posteriores. Su explicación del efecto fotoeléctrico, con la demostración de que la radiación electromagnética puede comportarse en algunos casos como un conjunto de partículas, contribuyó al desarrollo de la teoría cuántica.

El término efecto fotoeléctrico también puede referirse a otros tres procesos: la fotoionización, la fotoconducción y el efecto fotovoltaico. La fotoionización es la ionización de un gas por la luz u otra radiación electromagnética. Para ello, los fotones tienen que poseer la suficiente energía para separar uno o más electrones externos de los átomos de gas. En la fotoconducción, los electrones de materiales cristalinos absorben energía de los fotones y llegan así a la gama de niveles de energía en la que pueden desplazarse libremente y conducir electricidad. En el efecto fotovoltaico, los fotones crean pares electrón-hueco en materiales semiconductores. En un transistor, este efecto provoca la creación de un potencial eléctrico en la unión entre dos semiconductores diferentes.



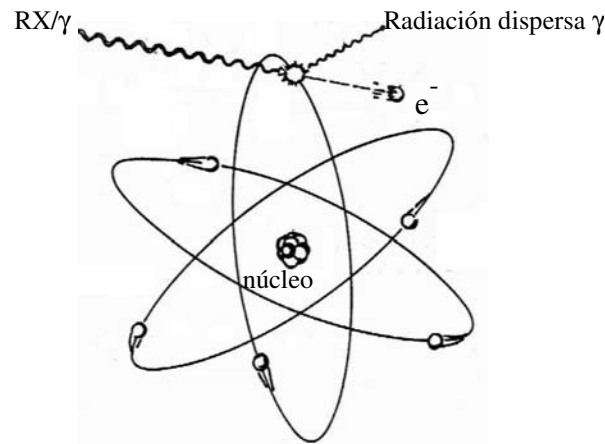
*Figura 1.3. Diagrama del efecto fotoeléctrico. Los fotones incidentes son absorbidos por los electrones del medio dotándoles de energía suficiente para escapar de éste.*

### **1.4.2. Efecto Compton**

El Efecto Compton, consiste en la difusión de fotones debida a las interacciones entre la radiación electromagnética y la materia. Este efecto fue descubierto por el físico estadounidense Arthur Holly Compton en 1922, durante su estudio de la difusión de los rayos X por el grafito. Como reconocimiento a sus trabajos, Compton recibió el Premio Nobel en 1927.

En el efecto Compton, un fotón de rayos X o rayos gamma, de longitud de onda  $\lambda$ , colisiona con un electrón libre de la materia provocando la emisión de un electrón llamado “de retroceso” y de un fotón de longitud de onda  $\lambda'$ , superior a la longitud de onda  $\lambda$ . El fotón difundido pasa a propagarse en una dirección que forma un ángulo  $\phi$  con la dirección de propagación del fotón inicial. Al ser la longitud de onda  $\lambda'$  superior a la longitud de onda  $\lambda$ , la energía del fotón difundido es inferior a la del fotón incidente (*Figura 4*).

Se cumple la relación  $\lambda' - \lambda = \lambda_c(1 - \cos \phi)$ , donde  $\lambda_c$  es igual a la constante de Planck dividida por la masa del electrón y la velocidad de la luz. Su valor numérico es de 0,2426 nanómetros.



*Figura 1.4. Esquema del Efecto Compton. Un fotón de rayos X o rayos gamma, de longitud de onda  $\lambda$ , colisiona con un electrón libre*

El efecto Compton, que no se podía explicar mediante la teoría ondulatoria clásica de la radiación electromagnética, constituyó en la época de su descubrimiento una prueba experimental de la existencia de los fotones. Intuitivamente, el fenómeno puede compararse con la trayectoria de una bola de billar que golpea a otra bola inmóvil. El efecto conlleva una disminución de energía (aumento de la longitud de onda) y un ensanchamiento de la radiación (que corresponde a la distribución de los ángulos de salida). También provoca una agitación anómala de los electrones de la materia atravesada.

El efecto Compton permite medir la intensidad de los rayos gamma, lo que resulta de gran utilidad en física de partículas. Otra consecuencia práctica del efecto Compton, esta vez

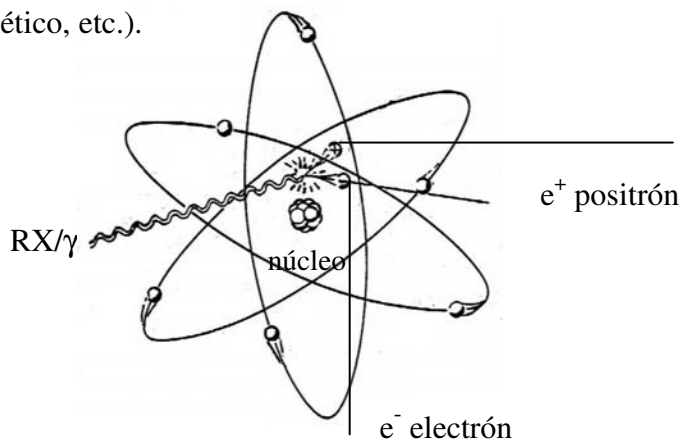


negativa, es que provoca en las radiografías un ensombrecimiento de la imagen debido a la degradación de los rayos X y a la emisión de electrones parásitos.

### 1.4.3. Creación de pares de iones

Cuando los fotones poseen una energía superior a 1.02 MeV, pueden desaparecer, creando en el proceso nueva materia (electrón - positrón), el fotón se transforma en par electrón-positrón ( $e^-$ ,  $e^+$ ). Si la energía es muy superior a 1.02 MeV el electrón provoca nuevos procesos de ionización, mientras que el positrón interacciona con un electrón del tejido o de la materia, aniquilándose mutuamente, generando radiación fotónica como se muestra en la *Figura 1.5*.

Además del fenómeno de ionización, las radiaciones ionizantes pueden producir fenómenos de excitación. Toda la energía de la radiación creará en sus procesos de interacción finalmente electrones en movimiento. Serán estas partículas directamente ionizantes que determinaran el efecto biológico que produce la radiación en su paso por la materia (daño somático, daño genético, etc.).



*Figura 1.5. Gracias a la energía adquirida por la colisión el foton se transforma en un par de electrón-positrón los cuales dependiendo de la energía de la colisión será su comportamiento posterior.*

## 1.5. Principio básico de detección de la radiación nuclear

Para la detección de radiación se deben utilizar instrumentos que detectan ésta radiación y en muchos casos hacen “visibles” las partículas fundamentales subatómicas. Su complejidad va, desde el conocido contador Geiger portátil hasta cámaras de destellos o de burbujas con el tamaño de una habitación.

En los detectores se emplean muchas otras interacciones entre la materia y las partículas elementales. En los de semiconductores, por ejemplo, los pares electrón-hueco formados por las partículas elementales con carga eléctrica aumentan momentáneamente la conducción eléctrica, lo que permite detectar estas partículas. El detector de Cherenkov, por su parte, emplea un efecto descubierto por el físico ruso Pável Alexéievich Cherenkov en 1934: una partícula cargada emite luz cuando atraviesa un medio no conductor a una velocidad superior a la velocidad de la luz en dicho medio (la velocidad de la luz en cualquier medio transparente es menor que la velocidad de la luz en el vacío). En los detectores de Cherenkov, materiales como vidrio, plástico, agua o dióxido de carbono constituyen el medio donde se producen los destellos de luz. Al igual que en los contadores de centelleo, los destellos luminosos se detectan mediante tubos fotomultiplicadores.

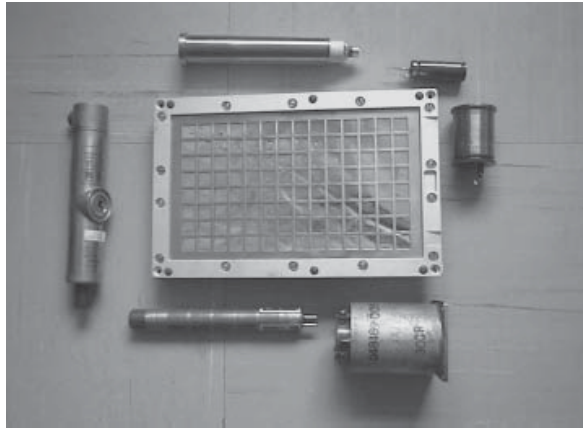
Las partículas neutras como neutrones o neutrinos no pueden detectarse directamente con ningún detector, pero sí de forma indirecta a partir de las reacciones nucleares que tienen lugar cuando colisionan con los núcleos de determinados átomos. Los neutrones lentos producen partículas alfa, detectables con facilidad, al colisionar con los núcleos de boro del trifluoruro de boro. Los neutrinos, que apenas interactúan con la materia, se detectan en depósitos enormes de percloroetileno ( $C_2Cl_4$ , un líquido para limpieza en seco). Los neutrinos que chocan con núcleos de cloro producen núcleos radiactivos de argón. El depósito de percloroetileno se vacía a intervalos regulares y se cuentan los átomos de argón que se han formado, presentes en cantidades mínimas. Este tipo de detector de neutrinos, situado a gran profundidad bajo tierra para evitar la radiación cósmica, se utiliza actualmente para medir el flujo de neutrinos procedente del Sol. Los detectores de neutrinos también pueden adoptar la forma de contadores de centelleo; en ese caso, los depósitos están llenos de un líquido orgánico que emite destellos de luz cuando es atravesado por

partículas eléctricamente cargadas producidas por la interacción de los neutrinos con las moléculas del líquido.

Los detectores que se están desarrollando en la actualidad para su utilización en los anillos de almacenamiento y los haces de partículas incidentes de los aceleradores de última generación son un tipo de cámara de burbujas conocida como cámara de proyección temporal. Estas cámaras pueden medir tridimensionalmente las trazas que dejan los haces incidentes, y cuentan con detectores complementarios para registrar otras partículas producidas en las colisiones de alta energía. En el CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire “Consejo Europeo para la Investigación Nuclear”), por ejemplo, existen detectores de varios pisos de altura, formados a su vez por distintos tipos de detectores situados de forma concéntrica.

### **1.5.1. Detectores gaseosos**

Los detectores gaseosos, entre los que se cuentan los clásicos detectores Geiger–Muller, las cámaras de ionización y los detectores proporcionales los cuales se muestran en la *Figura 1.6*, son parte fundamental de los monitores de radiación portátiles y fijos empleados en la protección y seguridad radiológica en todas las instalaciones de tipo nuclear. El gas que contienen se ioniza repentinamente al pasar una radiación. Si le aplica un alto voltaje, los iones y los electrones producidos por la ionización se dirigen a los electrodos. Los iones positivos se dirigen al cátodo, y los electrones al ánodo, lo cual produce un pulso eléctrico muy corto que luego puede amplificarse y analizarse. Con las cámaras de ionización se intenta recolectar todas las cargas producidas por el gas. Entonces el tamaño del pulso depende del número de iones producidos y, por lo tanto de la energía de la radiación. Éste detector tiene por esto una doble utilidad: saber el instante en que llegó la radiación y conocer su energía.



*Figura 1.6. En la fotografía se muestran algunos tipos de detectores gaseosos, entre los que se cuentan los clásicos detectores Geiger–Muller,*

### **1.5.2. Detectores de centelleo**

Este tipo de detectores (*Figura 1.7*) utiliza por lo general material sólido o líquido, cuyos átomos emiten luz visible cuando regresa a su estado base. Los materiales comunes usados como destelladores son cristales de yoduro de sodio y ciertos plásticos. Si tal material se fija a un extremo de un dispositivo llamado tubo fotomultiplicador, los fotones emitidos por el centellador pueden ser convertidos en una señal eléctrica. El tubo fotomultiplicador consiste en varios electrodos, llamados *dinodos*, cuyos potenciales aumentan sucesivamente a lo largo de la longitud del tubo como se muestra en la Figura 8. La parte superior del tubo contiene un fotocátodo, el cual emite electrones por el efecto fotoeléctrico.



*Figura 1.7. Los detectores de centelleo se utilizan en aplicaciones donde se requiere tener una gran sensibilidad de detección.*

### 1.5.3. La película fotográfica

Una partícula de carga o fotón ioniza los átomos en una capa de emulsión. La traza de la radiación corresponde a una familia de puntos en los cuales han ocurrido cambios químicos en la emulsión. Cuando la emulsión es revelada, la traza dejada por la radiación se hace visible. Tales dispositivos son comunes en los paquetes de película utilizados en cualquier medio ambiente en que los niveles de radiación deben ser monitoreados.

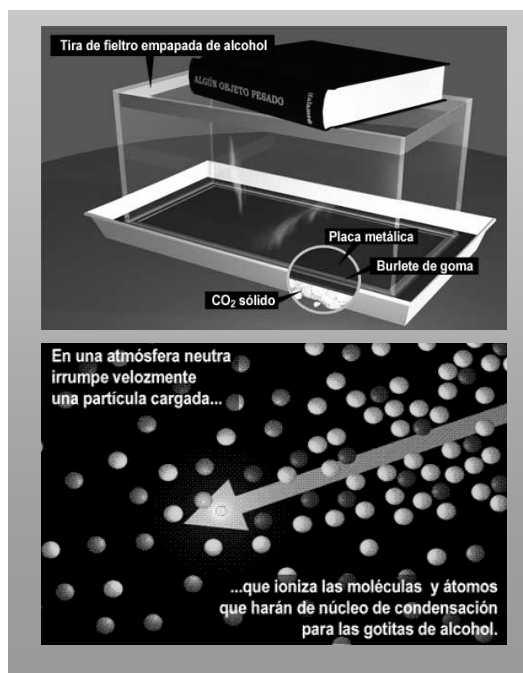
### 1.5.4. Cámara de niebla

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 (*véase Figura 1.8*). El pistón puede bajarse rápidamente para aumentar el volumen de la cámara. 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.



*Figura 1.8. Cámara de niebla.*

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 como se muestra en la *Figura 1.9*. 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.



*Figura 1.9.* La figura muestra una cámara de niebla, generalmente, la cámara está llena de aire libre de polvo, saturado con vapor de agua y alcohol.

### **1.5.5. 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.

### **1.5.6. Cámara de chispas.**

Es un dispositivo contador formado por un conjunto de placas paralelas conductoras que es capaz de registrar una huella tridimensional. Las placas de números impares están conectadas a tierra y las placas de números pares se mantienen a un potencial eléctrico alto (unos 10KV). Los espacios entre las placas contienen un gas inerte a presión atmosférica. Cuando una partícula cargada pasa por la cámara, los átomos de gas son ionizados y con ello resulta una elevación repentina de corriente y chispas visibles a lo largo de la trayectoria de la partícula. Éstas chispas pueden ser fotografiadas o detectadas electrónicamente, y los datos se envían a una computadora para la reconstrucción de la trayectoria y determinación de la masa, cantidad de movimiento y energía de la partícula.

Este dispositivo detecta los rayos gamma y también puede estar equipado para rastrear sus trayectorias. La trayectoria de las partículas revela la dirección del rayo gamma de entrada. Este tipo de instrumental se encuentra equipado con centelladores o detectores de estado sólido con el objeto de transformar al rayo gamma captado en señales ópticas o electrónica que permitan registrarlo.

### 1.5.7. Detectores semiconductores

Los detectores de semiconductor son los más delicados y sensibles a la radiación, ya que emplean un material semiconductor, a base de germanio o silicio, como medio detector. Existen diferentes tipos, siendo los más conocidos los de barrera superficial, de silicio-litio y los de germanio de muy alta pureza o también llamados de Germanio Hiperpuro.

El detector de semiconductor enfriado cuenta con un termo normalmente llamado Dewar como el que se muestra en la *Figura 1.10*, el cual es un recipiente de doble pared aislado al vacío; es frágil y en él se deposita el nitrógeno líquido, lo que provoca una temperatura en el interior de aproximadamente menos 190 °C. Dentro de dicha cápsula al vacío se encuentra el detector, que tiene una barra de cobre llamada “dedo frío” la cual transfiere la temperatura del nitrógeno líquido al detector.



*Figura 1.10. Detector de Germanio Hiperpuro con Dewar, de la Familia de los semiconductores .*



El principio de funcionamiento del detector semiconductor puede semejarse a de la cámara de ionización en donde el medio ionizante en vez de un gas consiste en un semiconductor de alta resistividad. Este semiconductor suele ser de germanio o de 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 empieza a migrar, desplazándose hacia los electrodos del detector. En el circuito exterior del detector surge un impulso eléctrico que seguidamente se amplifica y registra (*Figura 1.10.*).

#### **1.5.7.1. Detectores de barrera superficial**

Los detectores de barrera superficial se usan para medir partículas cargadas como radiación alfa y beta y se operan a temperatura ambiente. Consiste en un cristal de silicio o de germanio que contiene impurezas que le permiten conducir electricidad. La radiación incidente produce ionización, y así libera cargas móviles que se puedan recolectar en un par de electrodos. Se parece su operación a la de una cámara de ionización, excepto que, en vez de suceder en un gas, las cargas se desplazan dentro de un cristal sólido. También en estos detectores se tiene información sobre la energía de la radiación. Se usan de silicio para detectar partículas cargadas y rayos X; de germanio para partículas alfa.

#### **1.5.7.2. Detectores de germanio hiperpuro**

El detector del germanio, similar a otros detectores del semiconductor, es un diodo de ensambladura reverse-biased grande del tipo **p-n**. En la ensambladura entre el material tipo p y el material tipo n, la migración de electrones del material tipo **n** y los agujeros en el

material tipo **p** da lugar a una región de la carga de la red cero. Esta región se conoce como la *región de agotamiento*. La carga positiva neta en un lado de la ensambladura, y la carga negativa neta en el otro lado, instala un gradiente del campo eléctrico a través de la región de agotamiento. Cualquier rayo gamma ( $\gamma$ ) que interacciona recíprocamente con el germanio, producirá los pares en la región de agotamiento, que del electrón-agujero entonces será barrida a los bordes del detector debido a el gradiente del campo eléctrico, constituyendo una corriente eléctrica. Puesto que la región de agotamiento es la parte activa del detector de Ge (Hp), el volumen activo se requiere ser tan grande como sea posible. Si se aplica un reverso-diagonal, la anchura de la región de agotamiento puede ser aumentada.

La anchura es proporcional a  $\left(\frac{V}{N}\right)^{1/2}$ . Aquí, V es el voltaje de polarización aplicado y N

es la concentración de impureza del germanio. El germanio natural de la pureza puede mantener solamente una región de agotamiento de algunos milímetros antes de que ocurra la interrupción eléctrica. Por lo tanto en un voltaje de polarización dado la única manera de aumentar la anchura de la región de agotamiento es reducir la concentración de impureza N. Los avances en técnicas de fabricación, sin embargo, han permitido que los cristales extremadamente puros de Ge sean crecidos. Este *germanio de gran pureza*, o Ge (Hp), tiene concentraciones de impureza de alrededor una porción en  $10^{12}$ , permitiendo que las profundidades del agotamiento de varios centímetros sean alcanzadas. El germanio de gran pureza también tiene la ventaja sobre el Ge (Li), en que puede ser almacenado en la temperatura ambiente.

Los detectores de germanio son los más caros. Existen algunos con un costo superior a los 50 mil dólares. Se utilizan para medir radiación gamma principalmente en aplicaciones de análisis por activación con neutrones, determinación de radiación presente en alimentos, suelo o agua, y en experimentos de física nuclear.

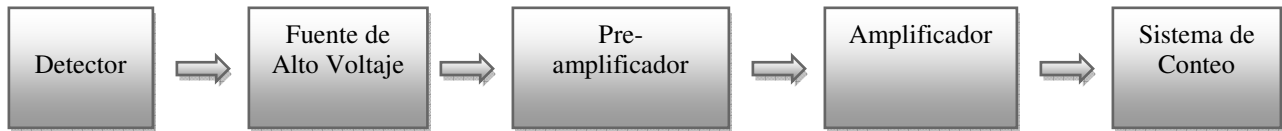
### **1.5.8. Detectores de germanio litio**

Los detectores Germanio-litio conocidos como detectores de Ge (Li) funcionan exactamente igual que el de Germanio Hiperpuro lo que hace la diferencia entre estos dos tipos de detectores es el tipo de semiconductor utilizado, estos detectores son fabricados agregando los átomos dispensadores de aceite del litio al material de Ge a muy baja temperatura, aproximadamente a menos 90°C.. Los átomos dispensadores de aceite del litio balancean exactamente las impurezas del aceptador, dando por resultado un nivel de impureza neto muy bajo. Esto permite que la región de agotamiento sea ampliada sobre el conjunto de la región mandilada litio. Los detectores de Ge (Li) se deben almacenar en 77 K, para evitar una redistribución del litio mandilado, que destruye con eficacia el detector. Están formados por dos partes: un termo y una cápsula al vacío.

## 2. Monitor de Radiación

---

El monitor de radiación utilizado en el sistema esta basado en el uso de un detector Geiger-Muller, este tipo de detector aprovecha el hecho de que ciertas partículas producen ionización al interactuar con el medio en el cual se propagan para convertirla a pulsos de energía eléctrica. Las partes constitutivas de un monitor de radiación se presentan en la *Figura 2.1.*



*Figura 2.1. Partes Constitutivas de un Monitor de Radiación*

Estos elementos se describirán con mas detalle a continuación:

### 2.1. Detector Geiger Muller

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. Los detectores Geiger emplean colectores delgados para favorecer la multiplicación gaseosa, para que esta produzca una señal independientemente de la energía de las partículas o fotones que entren a un volumen sensible (Bib).

Los detectores Geiger por su sencillez de funcionamiento y bajo costo se han popularizado ampliamente. En la actualidad existen en gran diversidad de formas y dimensiones desde los muy pequeños, con longitudes de algunos centímetros hasta los muy grandes, con longitudes mayores a un metro; con formas cilíndricas, de campana, como copas, de

ventana o sin ella, con paredes de vidrio o de metal. En general están constituidos por una envoltura en la que se alojan dos electrodos; y se llenan con un gas inerte adecuado a una presión conveniente.

El electrodo positivo o colector (ánodo), generalmente es un alambre delgado fabricado de tungsteno ó Volframio, 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. La *Figura 2.2* muestra un detector Geiger-Muller comercial.

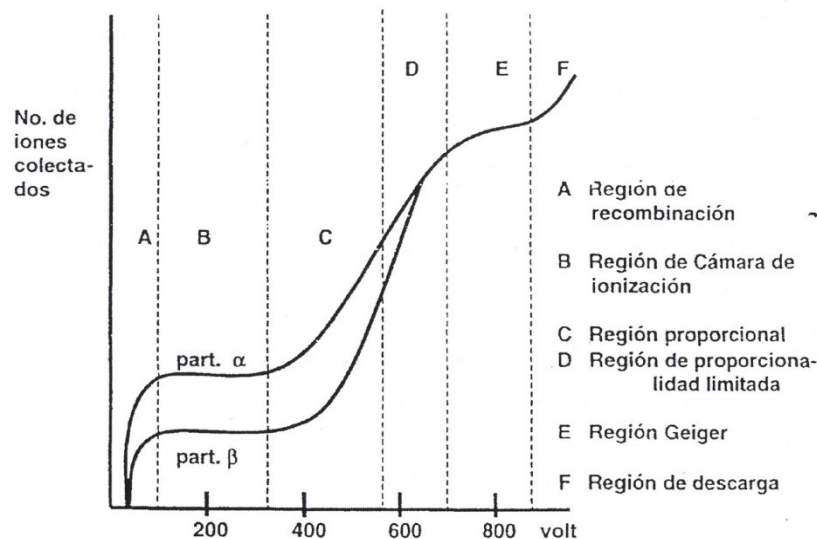


*Figura 2.2. Detector Geiger-Muller Comercial (Cortesía Nuclear Chicago)*

El detector Geiger es uno de los más versátiles y utilizados. Este fue desarrollado por el físico alemán Hans Geiger a partir de un instrumento inventado por el mismo y con la colaboración del físico estadounidense de origen alemán Walter Muller en 1928. El tubo detector esta lleno de un gas o mezcla de gases a baja presión. Los electrodos son una delgada pared metálica del tubo y un alambre fino, generalmente de Tungsteno ó volframio, que se extiende longitudinalmente a lo largo del eje del tubo. En las terminales de los electrodos se aplica un alto voltaje, el cual genera un campo eléctrico muy alto. Cuando la radiación interacciona con el detector se produce ionización en el gas contenido dentro de él mismo. Debido al campo eléctrico aplicado entre los electrodos del detector es posible recolectar a los iones y obtener una corriente eléctrica. Si la tensión entre los electrodos se

hace suficientemente grande, la corriente cada vez mayor producida por una partícula ó fotón desencadena una descarga a través del preamplificador. El preamplificador a vez funciona también como acoplador de impedancias entre el amplificador y el detector. El pulso generado por cada partícula o fotón se amplifica electrónicamente, el cual tratado de manera adecuada puede utilizarse como señal de reloj en un circuito de conteo.

Para entender con más claridad el funcionamiento del detector es necesario analizar el comportamiento de los iones en el volumen sensible del detector, en función de las diferencias de potencial aplicada (voltaje) y la forma de medir o de registrar esas pequeñas corrientes producidas en el circuito acopladas 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 a numero de iones colectados), se obtendría una curva similar a la que se muestra en la *Figura 2.3* en la que se aprecian varias regiones.

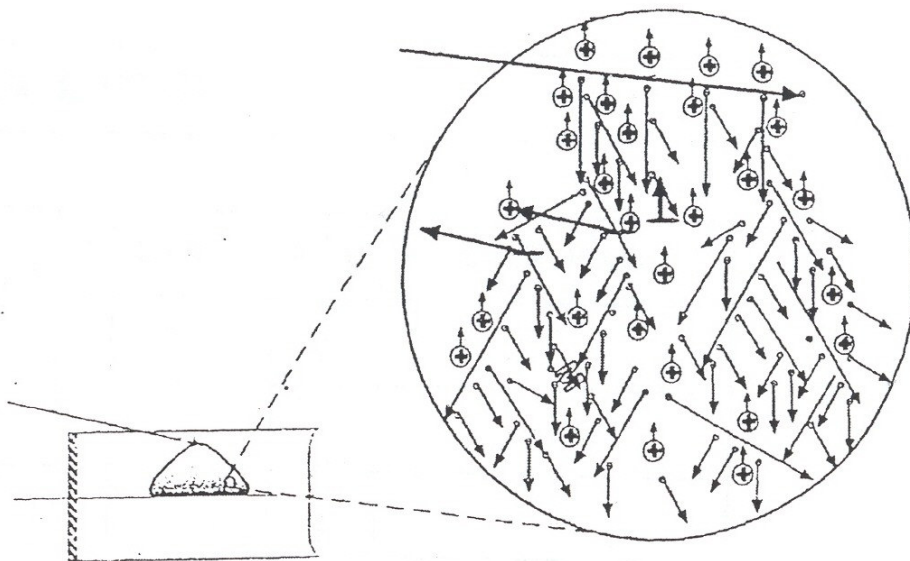


*Figura 2.3.- Regiones de funcionamiento de los detectores gaseosos*

Al principio de la curva, cuando el voltaje aplicado es muy pequeño, solo 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) aun 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 esencialmente en los electrodos todos los iones primarios; es decir, no hay 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 esta cámara 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 aun 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 Muller. 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) este fenómeno se aprecia en la *figura 2.4*. Los pulsos son grandes por la gran cantidad de iones colectados, pero se pierde la dependencia de la ionización primaria



*Figura 2.4.- Fenómeno de avalancha electrónica de Townsend.*

Los detectores Geiger Muller que operan con esta región son indicadores de la presencia de radiación, pero no pueden medir su energía. Son los mas usados porque son fáciles de operar, soportan trabajo pesado, son de construcción sencilla y son fáciles de incorporar a un monitor portátil. Generalmente operan a un voltaje de alrededor de 700 a 800 volts de C.D., variando según el diseño de cada detector.

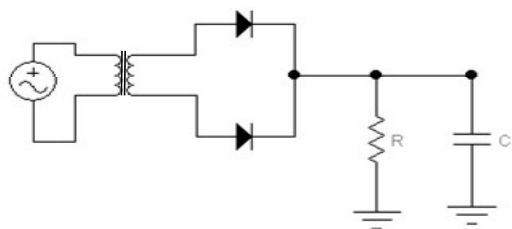
Si se incrementa el voltaje aun mas, se obtiene una descarga continua denominada como la región F la cual no es útil para realizar un conteo.

Finalmente si todavía se aumenta mas 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 esta debe de evitarse.

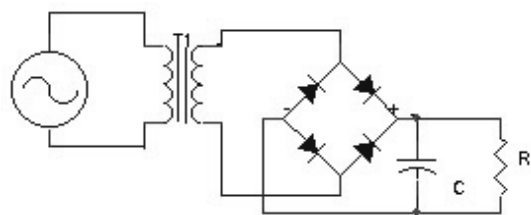


### 2.3. Fuente de Alto Voltaje

La fuente de Alto Voltaje es un circuito rectificador de onda completa con filtro capacitivo para eliminación en lo posible del rizado generado en la transformación de una fuente primaria de corriente alterna en corriente directa. Ésta puede diseñarse por medio de los arreglos tradicionales que se tienen para un rectificador de onda completa con transformador con Tap-Central ó bien de un rectificador tipo puente. Estos arreglos se muestran en la *Figura 2.5*.



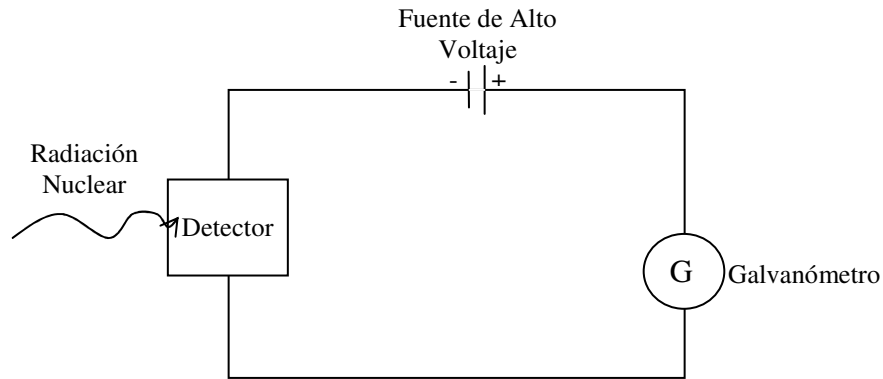
a) Rectificador de onda completa



b) Rectificador tipo puente

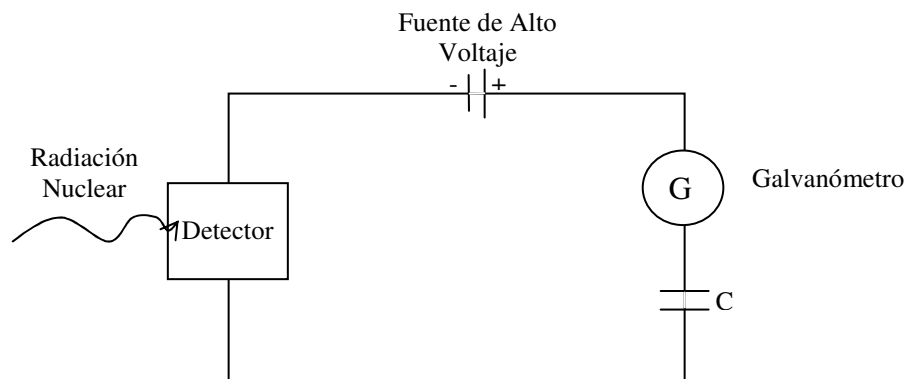
*Fig. 2.5.- Arreglos típicos de rectificadores de voltaje.*

La función de la fuente de alto voltaje consiste en polarizar al detector, ya sea del tipo gaseoso como lo son las cámaras de ionización, los detectores proporcionales, los del tipo Geiger Muller, así como los del tipo electrónico. La fuente de alto voltaje se conecta en las terminales del detector Geiger Muller, generando un campo eléctrico intenso en el volumen sensible del detector. Al interaccionar las partículas o fotones emitidos en la desintegración de un núcleo radiactivo con el mismo se produce el fenómeno de ionización, generándose iones positivos y electrones libres; debido al alto campo eléctrico producido es posible coleccionar éstos iones positivos y/o electrones libres, con lo cual se genera una corriente eléctrica. Mientras mas grande sea la cantidad de partículas o fotones que produzcan ionización en el detector, mayor será la actividad radiactiva de la muestra. Este fenómeno se presenta en la *Figura 2.6*.



*Fig. 2.6. Principio de recolección de Iones en un detector de radiación.*

En este caso, el galvanómetro sirve para medir la intensidad de la corriente producida por la recolección de los iones generados durante el proceso de ionización dentro del detector. Si nosotros colocáramos un capacitor en serie con la fuente de alto voltaje, el detector y el galvanómetro; entonces al circular la corriente en el capacitor se produciría la carga del mismo. Este arreglo lo podemos observar en la *Figura 2.7*.



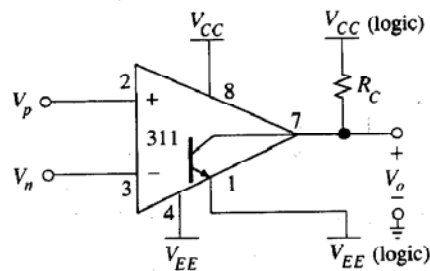
*Fig. 2.7. Proceso de carga de un capacitor a partir del fenómeno de ionización en un detector de radiación nuclear.*

Ahora bien, si nosotros colocamos en paralelo una resistencia con el capacitor, lo que obtendríamos sería un pulso eléctrico que en un momento dado es factible que sea medido por medio de un circuito electrónico de conteo. Obviamente éste pulso no tiene una forma simétrica perfectamente bien definida, lo cual dificulta el proceso de conteo; para esto

necesitamos un circuito que aproxime éste pulso a una Gaussiana, la cual es una forma de pulso totalmente simétrica y factible de medir completamente sus propiedades. Para esto se necesita un circuito pre- amplificador, el cual se describe a continuación.

### 2.3. Pre-amplificador

Un pre-amplificador es un circuito comparador diseñado a partir de elementos amplificadores de tipo analógico como lo son los amplificadores operacionales por ejemplo. La función primordial de este circuito es aproximar a una Gaussiana el pulso generado en la etapa de recolección de iones en el circuito de polarización del detector, así como la de acoplar la impedancia existente entre el detector y el circuito amplificador, el cual posteriormente se describirá con mas detalle. Un circuito integrado básico que se utiliza para éstas aplicaciones es el LM311. Un arreglo de circuito comparador muy utilizado en los monitores de radiación nuclear es el que se presenta en la *Figura 2.8*.

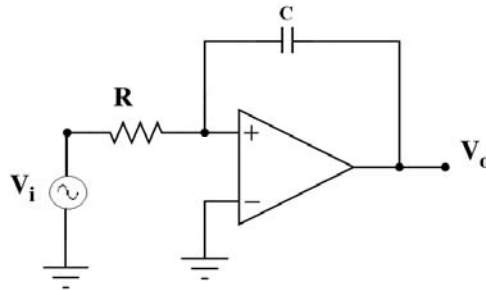


*Fig. 2.8.- Comparador con LM311.*

### 2.4. Amplificador

El circuito amplificador proporciona ganancia al pulso entregado por el pre-amplificador, ya que la salida entregada por este es muy pequeña. Los circuitos amplificadores para los monitores de radiación nuclear pueden diseñarse a partir de circuitos integrados como los

amplificadores operaciones o bien por medio de elementos discretos tales como los transistores, ya sean bipolares o de efecto de campo. En esencia el circuito amplificador que se usa es el llamado amplificador integrador. El circuito básico de un amplificador integrador se muestra en la *Figura 2.9*.



*Figura 2.9. Amplificador Integrador*

En este caso, el circuito integrador amplifica la señal para enviarla a un circuito de conteo. Como se trata de un circuito en el cual puede utilizarse un amplificador operacional o un transistor, entonces es factible que la impedancia de entrada del mismo pueda acoplarse con el detector, ya que dependiendo de la impedancia del detector la impedancia del dispositivo básico del amplificador deberá ser la misma.

## **2.5. Sistema de Conteo**

En todo sistema de medición hay necesidad de cuantificar la cantidad física a la cual se esta haciendo alusión. Los monitores de radiación nuclear no son la excepción, y en este caso se necesita un sistema de conteo. Los sistemas de conteo pueden ser analógicos o digitales, con temporizadores o sin ellos; todo depende de las características de la radiación y del isótopo que se este manejando. En este trabajo se diseñará un sistema de conteo digital con temporizador basado en un microcontrolador. Este diseño se presenta en el capítulo posterior.

### 3. Diseño de un contador de pulsos para un monitor de radiación nuclear basado en un detector Geiger-Muller.

---

El sistema con cual se trabajará esta constituido de la manera que se muestra en la *Figura 3.1*. En este caso, el monitor a utilizar será un monitor estudiantil de la marca National Instruments ModeloSRM-BTD este monitor cuenta con todas las partes constitutivas básicas que se describieron en el capítulo anterior con la variante de que no posee el sistema de conteo de pulsos, así como el circuito de acoplo de impedancias requerido entre el detector y la electrónica asociada. Para completar el sistema se diseñará un sistema de conteo por medio de circuitos digitales cuyo circuito de mando será un microcontrolador del tipo PIC. Este circuito se acoplará a la salida digital del monitor de radiación referido para poder contar el número de eventos radiactivos presentes y de ésta manera poder cuantificar la actividad radiactiva de una muestra. Este monitor se muestra en la *Figura 3.2*.



*Figura 3.1. Diagrama de bloques*



*Figura 3.2. Monitor de radiación nuclear estudiantil marca National Instruments, Modelo SRM-BTD*

### **3.1. Monitor de radiación**

El monitor de radiación estudiantil se utiliza para detectar radiaciones nucleares beta y gamma. Este detector portátil de radiación, se puede utilizar en el aula, laboratorio ó en el campo. Se trata de un tubo Geiger-Muller montado en una superficie pequeña. El monitor de radiación estudiantil permite a los usuarios detectar la presencia de una fuente de radiación, ya sea de tipo particular tal como lo son las partículas beta o bien del tipo electromagnético como son el caso de los rayos X y los rayos gamma.

El monitor permite realizar conteos de eventos aun cuando se interponen entre el detector y una fuente de radiación beta, de rayos X o de rayos gamma de materiales de distinto espesor.

El monitor permite encontrar las características que presentan los distintos tipos de blindaje que se utilizan para la protección y aprovechamiento de la energía emitida por una fuente de radiación beta, gamma ó X.

Es posible crear un histograma cuando se realizan conteos de duración prolongada. Este conteo lo puede realizar utilizando una plataforma conveniente en ambiente LAB-VIEW (ambiente virtual).

Esto es muy factible de realizar cuando se realiza un experimento dentro del laboratorio, sin embargo cuando se realizan pruebas de campo en ambientes radiactivos que no permiten el uso de la computadora o bien que el tiempo de exposición a la radiación no permita una exposición prolongada del operador, es necesario utilizar un sistema confiable y práctico. Por esta razón en este trabajo se propone el diseño de un contador de pulsos del tipo electrónico que asociado al monitos de radiación nos permita cumplir con éstos requisitos.

#### Especificaciones

Sensor: Tubo Geiger-Muller (GM), pared de vidrio inyectado con gas Halógeno al alto vacío. La densidad superficial de la pared del tubo GM es de  $50 \text{ mg/cm}^2$

Alimentación: Utiliza una batería alcalina de 9 volts que proporciona una autonomía de 500 horas. Cuenta con una condición de batería baja que se indica cuando al momento de contar la luz del indicador del conteo se muestra atenuada.

Sonido: Un sonido zumbador indica la presencia de radiación. Esta característica puede ser silenciada.

Visual: El LED rojo activo indica el conteo de la radiación.

Dimensiones: 30 x 80 x 150 mm

Peso: 200 g (7 oz) con batería instalada

Datos de salida: la salida del sensor y el cable de patillas están disponibles en el sitio web del fabricante ([www.vernier.com](http://www.vernier.com)).

El sensor en el monitor de radiación estudiantil es un tubo Geiger-Muller (GM), el cual puede detectar radiación beta y radiación gamma. Debido a que la pared del tubo es de cristal y visible a través de una ventana en el instrumento del panel trasero, la ionización de los gases en el tubo se puede observar cuando se expone a una fuente radiactiva en un cuarto oscuro, o bien en campo. El instrumento posee una extraordinaria sensibilidad a la radiación beta en comparación con los detectores de su tipo, que lo hace un instrumento adecuado para la realización de estudios ambientales comunes de fuentes de radiactividad, como el gas radón, isótopos hijos de potasio-40 en muestras biológicas y de Cesio-137, así como de los ensayos de armas nucleares en cenizas (aplicación que esperamos no sea utilizada nunca).

Nota: El monitor de radiación estudiantil no puede ser utilizado para la detección de partículas alfa. casi todas las partículas alfa que interaccionan con el detector son absorbidas por la ventana que cubre al tubo GM.

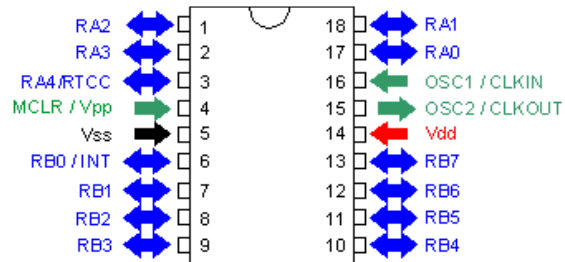
### 3.2. Temporizador

Un temporizador es un circuito diseñado expresamente para controlar el tiempo en el cual el contador deberá estar registrando los eventos radiactivos que interaccionen con el detector. Este circuito se diseñará con un PIC para determinar el tiempo de conteo de la muestra a analizar; este tiempo puede ser de algunos cuantos segundos cuando se trata de isótopos radiactivos de vida media corta, hasta un máximo 60 min, cuando se estén analizando muestras con vidas medias mayores.

Las principales características deseables en el temporizador son las siguientes:

- \* Exactitud
- \* Tiempo de programación
- \* Interrupciones
- \* Señal de alto constante

En base a éstas características procederemos a realizar el diseño correspondiente. El diseño contará con un microcontrolador PIC16F84A el cual es de la familia de los Pics y debido a su relativamente sencilla forma de programar se escogió para el diseño del temporizador. Este microcontrolador se muestra en la *Figura 3.3*.



a) Forma física

b) Configuración de patas

*Figura 3.3. Microcontrolador PIC16F84A*





Como puede apreciarse en la figura, el material requerido para su construcción es el siguiente:

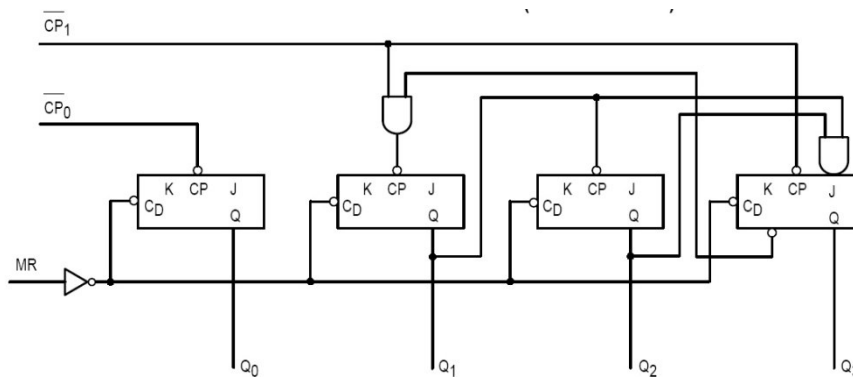
- 2 Display dual
- 1 PIC 16F84A
- 4 Circuitos Integrados 74LS48
- 2 Circuitos Integrados 74LS373
- 1 Cristal 4MHz
- 4 Push button
- 1 Led
- 8 Resistencias 470 K $\Omega$

Como puede apreciarse, la configuración es básica tratándose de un temporizador. En éste se presentan 4 displays los cuales nos mostrarán los minutos y los segundos que se requieran dependiendo de la muestra a analizar. También cuenta con cuatro interruptores del tipo push los cuales sirven para indicar los minutos y los segundos. El push que se encuentra en el pin 4 del PIC será nuestro reset, el cual deberá poner en ceros nuevamente nuestro contador para iniciar un nuevo análisis. El push del pin 18 al activarlo le indicará al PIC como deseamos que sean nuestros conteos ya sea en minutos o segundos; con el pin 19 dependiendo del número de veces que lo activemos indicaremos los minutos requeridos. Por ejemplo si presionamos dos veces el push le estamos indicando al PIC que serán 2 minutos, si presionamos tres veces serán 3 minutos y así sucesivamente. Determinado el número deseado de minutos, con el push del pin18 confirmamos los minutos y se da por iniciado el conteo, mostrándonos los minutos y los segundos que van en descenso en el proceso de conteo. Podemos detener el conteo con el push del pin 6 y retomar el conteo con el push del pin 18. El led de la salida nos muestra la señal que entrará directo al contador. Las salidas 1 y 7-13 del PIC deberán estar conectadas a las entradas de un decodificador BCD a 7 Segmentos para poder desplegar los dígitos en los displays. El programa de computadora utilizado se muestra en el Anexo 1.

### 3.3. Contador

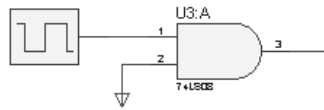
A la salida de nuestro sistema es necesario un contador que registre el número de cuentas o eventos de característica que registre el detector. En este caso el temporizador nos proporcionará el tiempo de conteo, mientras que el contador nos mostrará el número de eventos presentados en ese intervalo de tiempo.

En este caso utilizaremos el modelo de un contador asíncrono, en el cual la salida del primer Flip-flop siempre está conectada a la entrada de pulso de reloj del siguiente Flip-flop. Este arreglo se presenta en la *Figura 3.5*.



*Figura 3.5. Circuito contador asíncrono contenido en el circuito integrado 74LS390*

El circuito integrado 74LS390 contiene dos contadores como el mostrado en la figura 3.5, con lo cual si se utilizan dos circuitos integrados de este tipo es posible generar 4 dígitos de conteo y así poder contabilizar hasta un máximo de 9999 eventos. Como es necesario alimentar al primer Flip-flop de los contadores con un pulso de reloj proveniente de el monitor de radiación, entonces la salida de los pulsos entregados por el monitor serán alimentados a una compuerta AND de dos entradas; alimentando una de las entradas con la salida del monitor y la otra entrada con uno lógico. La salida de ésta compuerta lógica será precisamente la que servirá como el pulso de reloj antes mencionado. Este circuito se muestra en la *Figura 3.6*.



*Figura 3.6. Circuito de control para el contador de pulsos*

El material y equipo necesario para implementar este circuito contador es el siguiente:

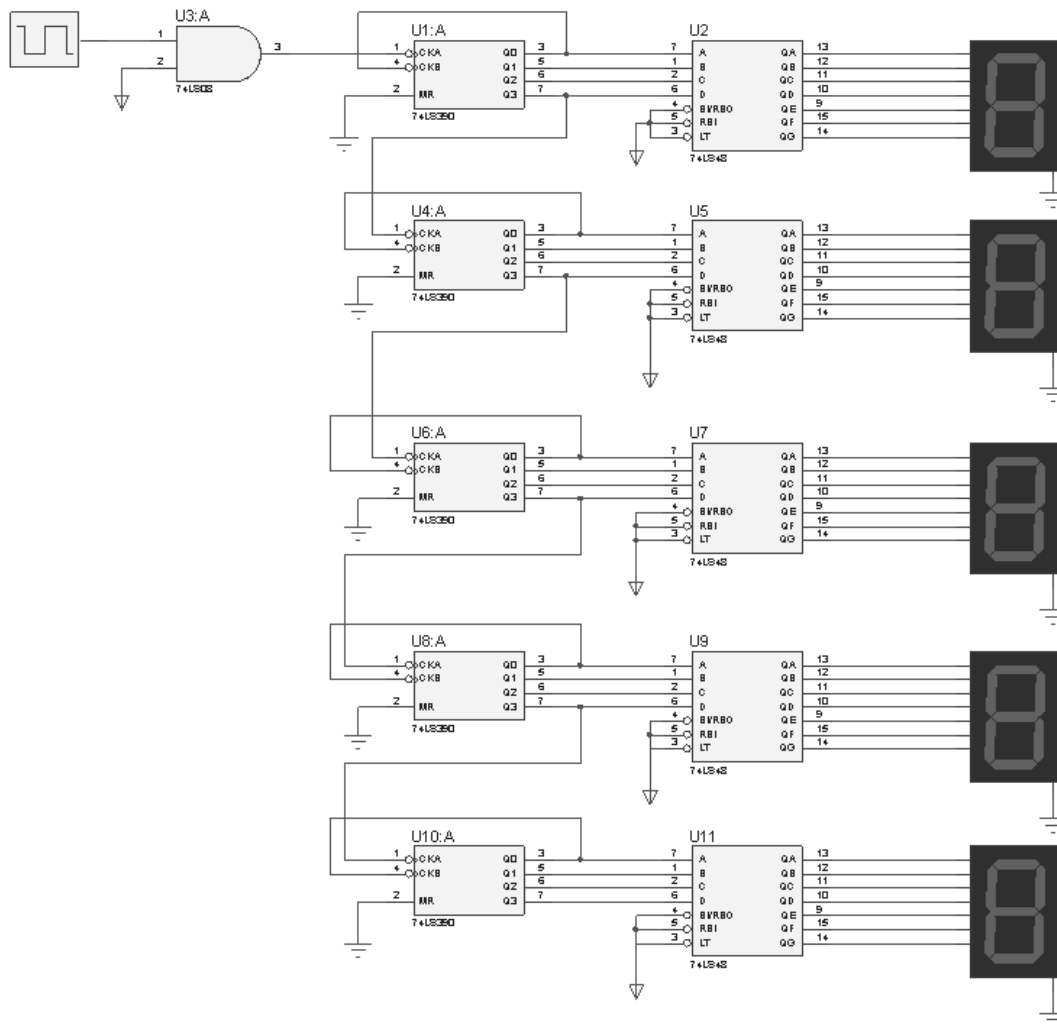
Equipo:

- 1 Fuente de Poder
- 1 Generador de funciones

Material:

- 2 Displays duales cátodo común
- 4 Circuitos Integrados HD74LS48P (Decodificador BCD de 7 segmentos)
- 2 Circuitos Integrados DM74LS390N (Contador Dual)
- 1 Circuitos Integrados 74LS08N
- 1 Circuitos Integrados 74LS04N
- 4 Resistencias de  $470\Omega$ ,  $\frac{1}{2}$  watt

El circuito final es el que se muestra en la *Figura 3.7*.



*Figura 3.7. Circuito Contador de Pulsos*

### 3.4. Calibración del equipo

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 actividad conocida de ese radisótopo.

Para calibrar el monitor de radiación con el contador de pulsos ya acoplado, es necesario un juego de fuentes radiactivas de distintas actividades de un solo radisótopo. Este tipo de trabajo solo puede realizarse en un laboratorio que cuente con las instalaciones adecuadas y que posea el juego de fuentes radiactivas antes mencionadas. Este tipo de laboratorios son poco comunes y están sujetos a la legislación que en materia nuclear dicte la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias así como las que marque el Organismo Internacional de Energía Atómica que depende de la ONU. Debido a estas cuestiones se presenta solamente el procedimiento con el cual se calibran los monitores de radiación. El procedimiento a seguir está basado en un ajuste por mínimos cuadrados de una curva de datos dispersos; con éste ajuste de curva nosotros podremos encontrar cualquier actividad radiactiva desconocida referida a el tipo de radiación emitida por el isótopo con el que se calibra el equipo. Para este caso utilizaremos una fuente de Co-60 el cual es un emisor radiactivo predominantemente gamma. Supongamos un juego de fuentes radiactivas de Co-60 con las actividades mostradas en la *Tabla 3.1.*:

<b>Co- 60 (<math>\mu</math> Ci)</b>
10
15
25
40
65
105
170

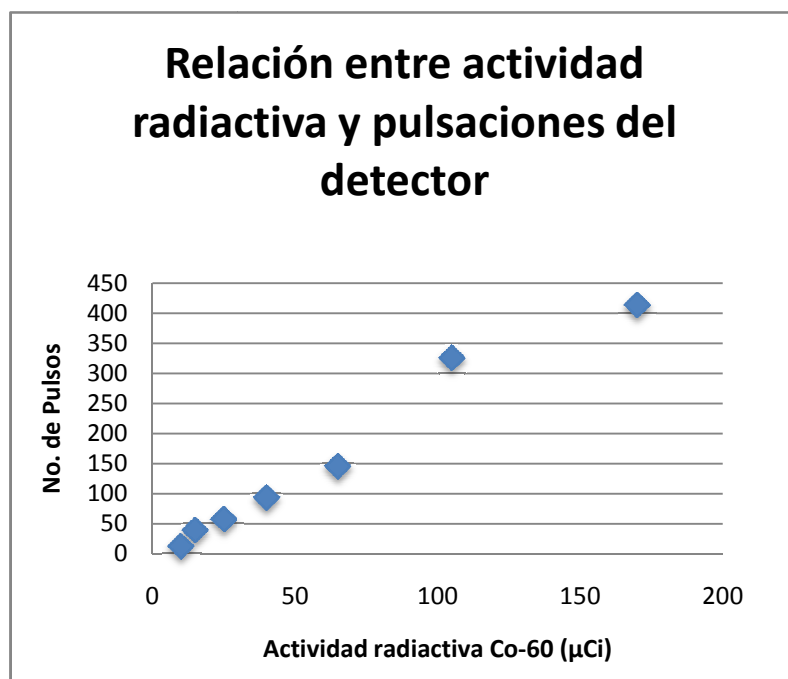
*Tabla 3.1.- Actividades radiactivas de un juego de fuentes*

Si a la salida del sistema de medición obtuviéramos los siguientes resultados que se muestran en la *Tabla 3.2.*:

Co- 60 ( $\mu$ Ci)	No. de Pulsos
10	12
15	39
25	57
40	93
65	145
105	325
170	413

*Tabla 3.2.- Actividad radiactiva y pulsos de salida*

Sí graficáramos el número de pulsos o conteos contra la actividad radiactiva de las fuentes obtendríamos una gráfica como la mostrada en la *Figura 3.8.*



*Figura 3.8.- Relación entre actividad radiactiva y número de conteos.*

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:

$$y = mx + b$$

ó

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

(Si hay varios rangos de valores X)

De este mismo método también se obtiene que:

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

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

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

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

Donde:

x= actividades radiactivas de las fuentes;

y= número de conteos registrados por el monitor



Estos datos se muestran en la *Tabla 3.3*.

<b>Co- 60 (<math>\mu</math> Ci)</b>	<b>No. de Pulsos</b>
<b>X</b>	<b>y</b>
10	12
15	39
25	57
40	93
65	145
105	325
170	413

*Tabla 3.3. Datos utilizados para obtener la ecuación de regresión.*

Entonces, sustituyendo los datos en las ecuaciones anteriores tenemos:

$$\bar{x} = 61.4285714$$

$$\bar{y} = 154.857143$$

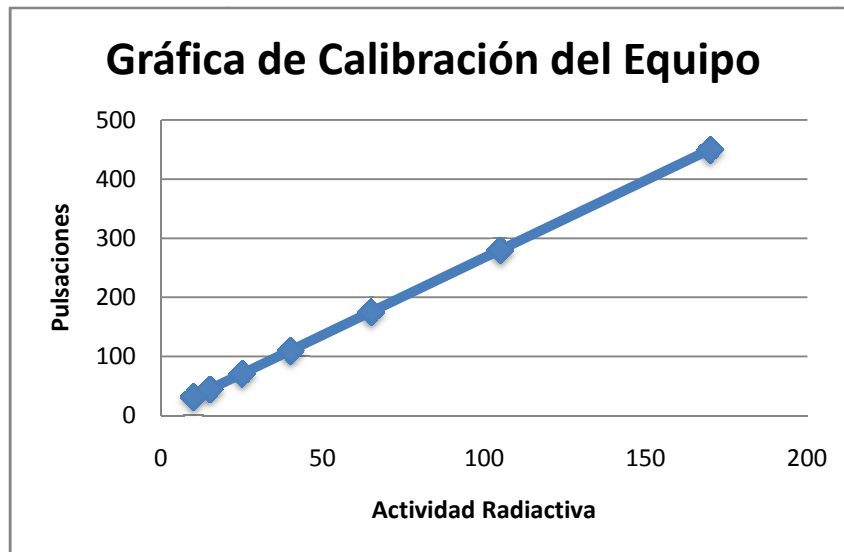
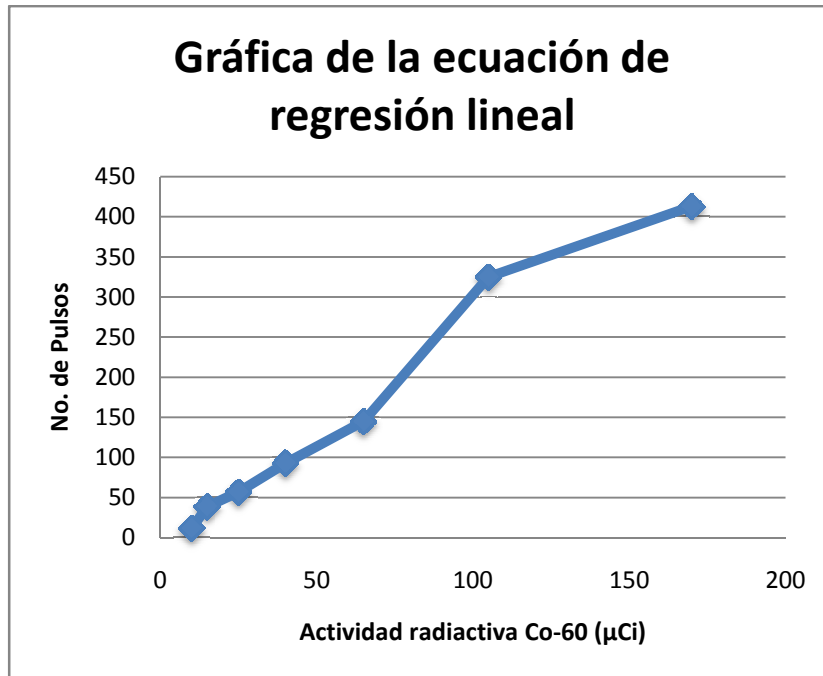
$$m = 2.61373239$$

$$b = 5.70070396$$

Con lo cual se obtiene la siguiente ecuación de regresión lineal:

$$y = 2.61x - 5.70$$

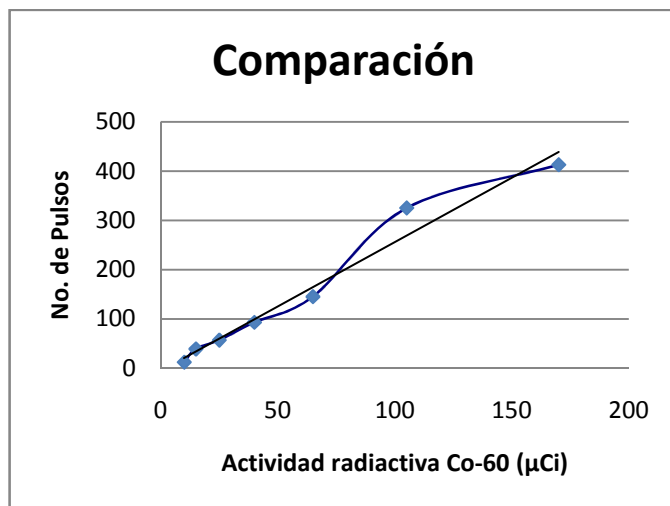
Si graficáramos esta ecuación de regresión lineal obtendríamos lo que se muestra en la *Figura 3.9*.



*Figura 3.9- Gráfica de la ecuación de regresión lineal*

La cual es precisamente la gráfica que nos define la calibración del equipo. En este caso, si tuviéramos una fuente desconocida emisora beta o gamma, el número de pulsos que obtuviéramos en el monitor lo podríamos llevar a la gráfica y de ésta manera conocer la

actividad radiactiva de la cual estamos midiendo. Una comparación de la gráfica de calibración con la curva de los datos dispersos se muestra en la *Figura 3.10*.



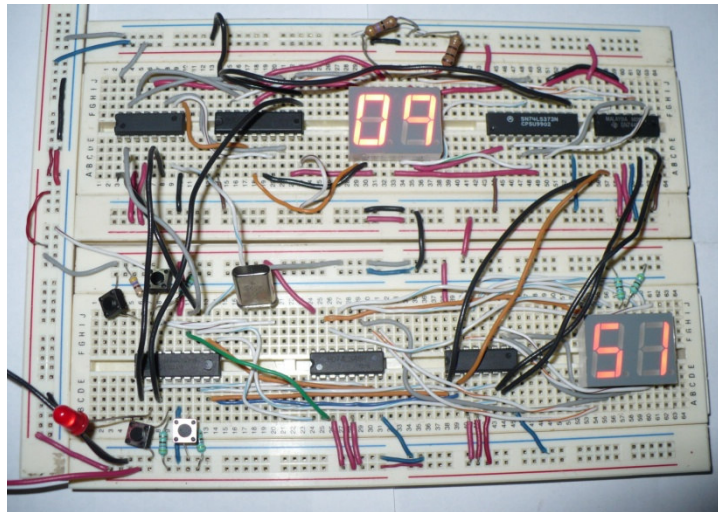
*Figura 3.10.- Comparación de la gráfica de calibración con la curva de los datos dispersos*

Cabe señalar que es muy importante tomar en cuenta la eficiencia del detector que el monitor esta utilizando, ya que esto nos permite ser más precisos en los conteos y medidas que estamos realizando.

## 4. Resultados

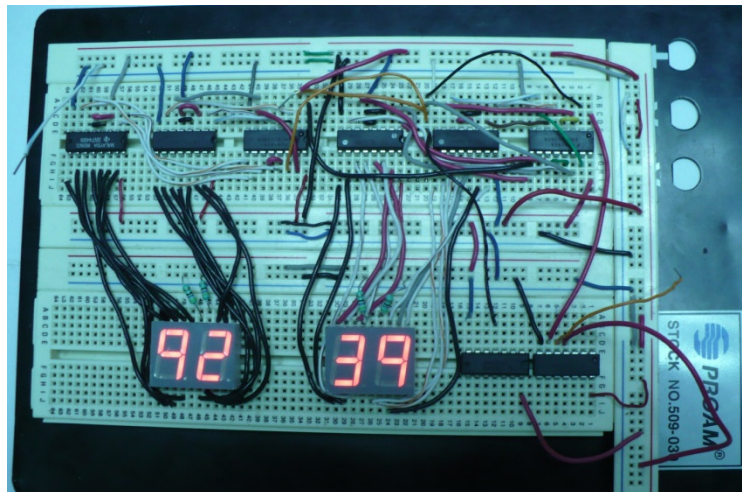
---

Se realizaron distintas pruebas de funcionamiento del circuito sin conectarlo al monitor de radiación. Estas pruebas nos reportan que el sistema de conteo puede contar por un tiempo de 60 min como máximo y un máximo de 9999 pulsos. En este caso el pulso de reloj fue proporcionado por la salida TTL de un generador de funciones la *Fig. 4.1* muestra al circuito temporizador en funcionamiento.



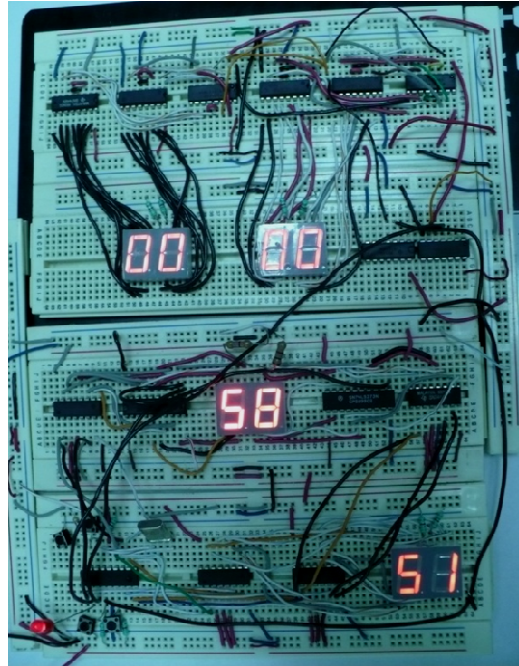
*Figura 4.1. Circuito Temporizador*

En la *figura 4.2*. Se muestra el circuito del contador alimentado con el pulso de reloj correspondiente.



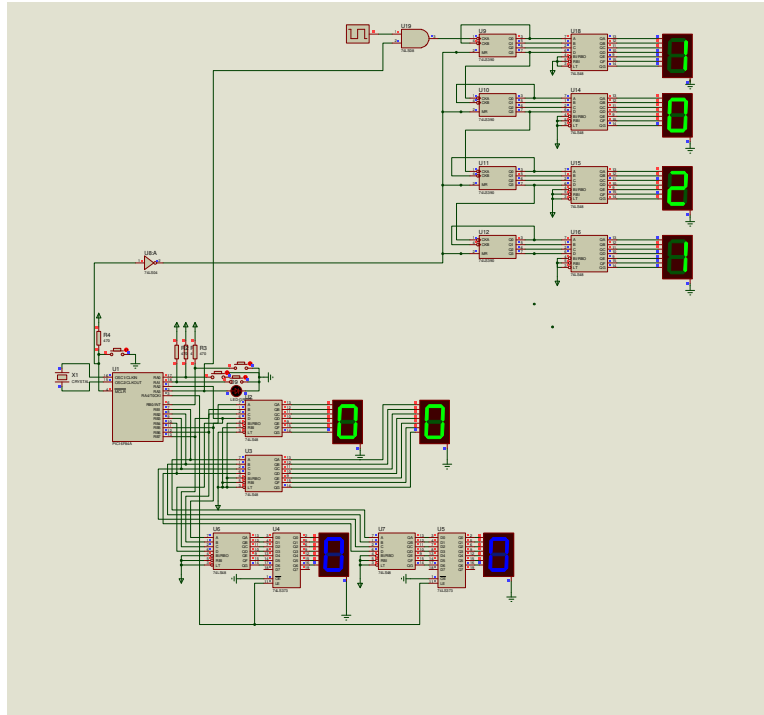
*Figura 4.2. Circuito del Contador*

Uniendo al temporizador con el circuito del contador, obtenemos el circuito final. Este circuito se muestra en la Figura 4.3.

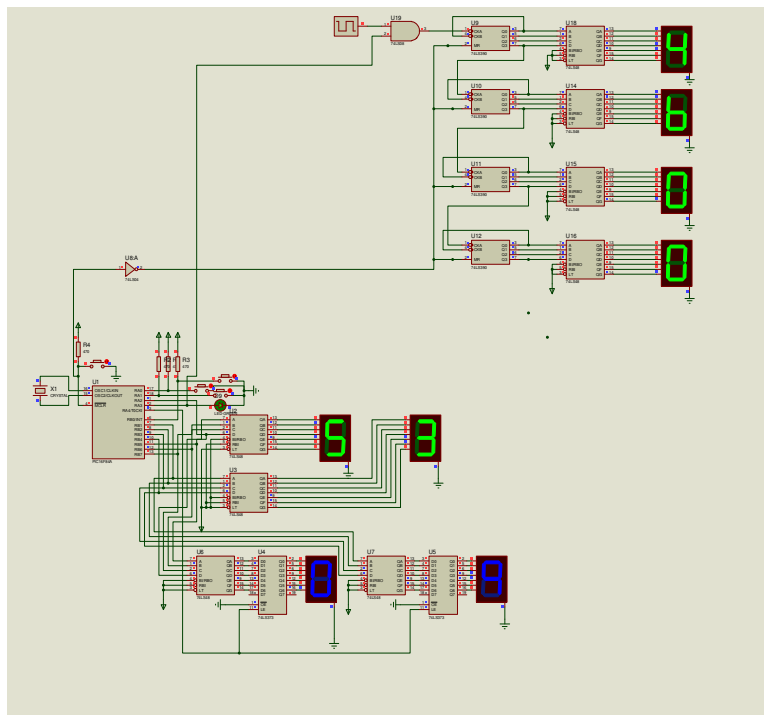


*Figura 4.3. Circuito final del contador de pulsos*

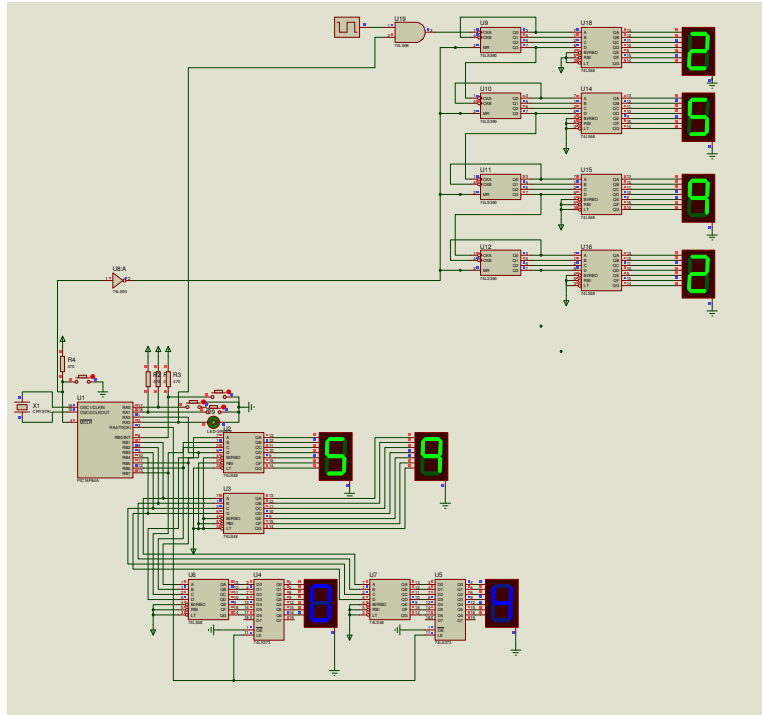
En un afán por demostrar el perfecto funcionamiento del circuito, se realizó una simulación del mismo en el paquete de simulación electrónica Proteus. Esta simulación se muestra en la Figura 4.4. a), b), c), d), e), f) y g).



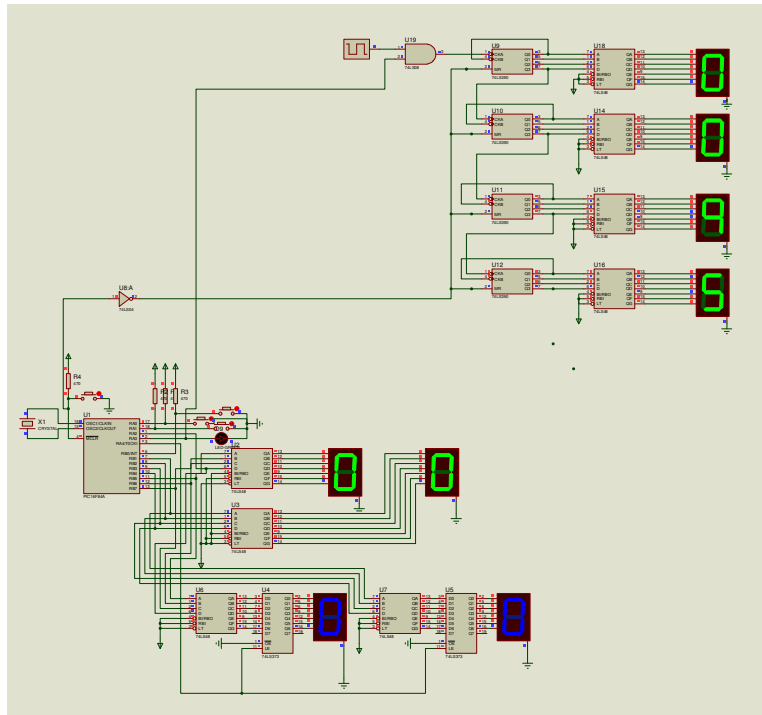
a) *Conteo total (1201) después de los 2 minutos*



b) *Conteo inicial de 10 minutos*



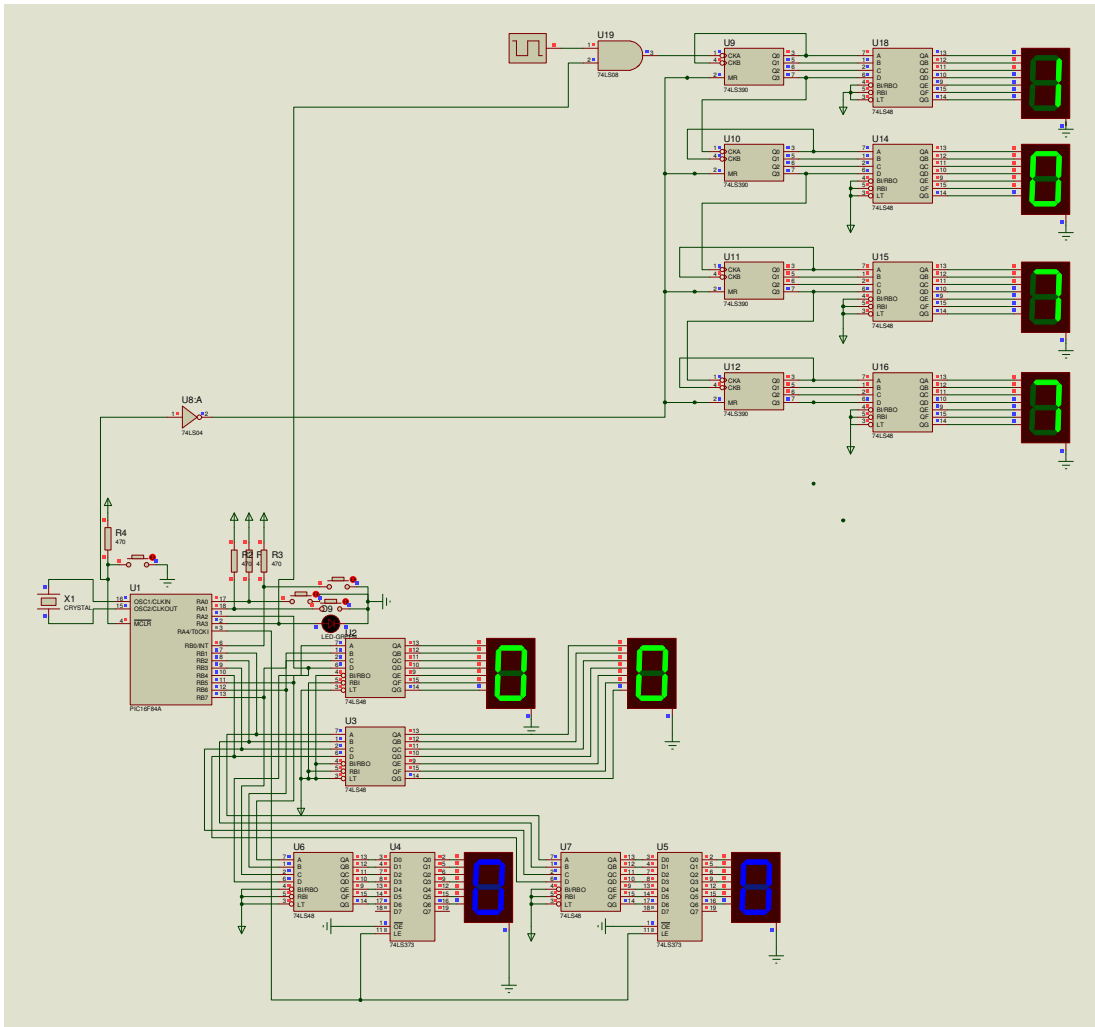
*c) Conteo a la mitad de 10 minutos*



*d) Conteo final de los 10 minutos*







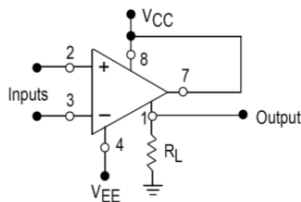
*g) Termino del conteo de los 30 minutos*

*Figura 4.4. Simulación en diferentes conteos.*

Como apreciarse el conteo se hizo durante un periodo de 30 min y se reportan los conteos correspondientes; con lo cual queda comprobado el funcionamiento del circuito.

#### 4.1. Implementación del sistema completo.

El circuito completo consta del monitor de radiación, un circuito comparador de acoplo entre el monitor y el sistema de conteo. Un circuito comparador se muestra en la Figura 4.5.



*Figura 4.5. Circuito comparador*

El arreglo de bloques final del sistema se muestra en el Figura 4.6.



*Figura 4.6. Arreglo del sistema final.*

## 5. Conclusiones

---

En este trabajo se logro implementar el sistema de conteo de pulsos para integrarlo a un monitor de radiación. El monitor de radiación utilizado es de uso estudiantil de la marca National Instruments Modelo SRM-BTD el cual esta basado en el uso de un tubo Geiger-Muller, pero con el detalle de que no posee el sistema de conteo de pulsos. El monitor de radiación proporciona los pulsos o eventos que deberá registrar el sistema de conteo; este sistema se dividió en dos partes: el temporizador y el contador.

El temporizador se implemento por medio de un microcontrolador PIC, el cual dada su funcionalidad se programó para darle un intervalo de tiempo que puede ser preestablecido según las necesidades del operador. También se le adicionaron interrupciones para que por medio de estas el operador pueda manipular desde una pausa hasta un apagado del sistema de conteo de una forma muy sencilla, gracias al diseño, facilidad del programa y a la construcción física del mismo. Se programó básicamente para un tiempo máximo de 60 minutos. El contador realizado fue del tipo asíncrono el cual registró el número de pulsos generados por el detector. Unidos los dos, el temporizador nos proporcionó el tiempo que se requiere en el conteo y el contador nos mostró el número de conteos en el intervalo de tiempo establecido.

Una de las ventajas que presenta el sistema es la versatilidad del mismo, ya que podría ser utilizado no solo para este tipo de eventos ó variables físicas, sino para cualquier otro que requiera de un sistema de conteo con intervalo de tiempo predeterminado. Debido al uso de dispositivos electrónicos de bajo costo, el sistema diseñado competiría con facilidad con otro tipo de dispositivos contadores que actualmente existen en el mercado; esto sin considerar que actualmente el desarrollo en el ámbito de la instrumentación electrónica y en particular la dedicada al ámbito nuclear es todavía muy incipiente y el acceso al uso de este tipo de equipo es todavía muy limitado.

## Anexo

### Programa utilizado para programación del PIC:

:CONTAR 60 MIN DE TAL MODO QUE SE PUEDA SELECCIONAR EL CONTEO CON PUSH Y DETENER EL CONTEO

```
list P=16F84                                ;tipo de pic
include "P16F84.inc"
__CONFIG 0x3FF1

;DECLARACION DE VARIABLES
VECES EQU 0x0C
CARRYIZQ EQU 0x0E
SALIDA EQU 0x0F
UNIDADES EQU 0x10
DECENAS EQU 0x11
CUENTA EQU 0x12
REPETIR EQU 0x13
DATOENTRADA EQU 0x14
REPETIR1 EQU 0x15
CHECA EQU 0x16
SUNIDADES EQU 0x17
TS EQU 0x19
DATOCOMPARA EQU 0x1A
DATOSALIDA EQU 0x1B
DATOIZQ EQU 0x1D
org 0
goto inicio ;vectores de inicio
org 4
goto INTERRUP
org 5 ;SALTAMOS EL VECTOR DE INTERRUPCION

;Programa principal contar 60 seg
inicio BSF STATUS,RP0 ;CAMBIA A BANCO 1 PARA UTILIZAR TRISA
MOVLW 0x01 ;SELECCIÓN DE RB1-RB7 SALIDA, RB0 ENTRADA
MOVWF TRISB ;CONFIGURA EL PUERTOB
MOVLW 0x03 ;SELECCIONA RA0-RA1 ENTRADA, RB2-RB3 SALIDA
MOVWF TRISA ; CONFIGURAR PUERTO A
MOVLW 0x90 ;CONFIGURA INTERRUPCIONES
MOVWF INTCON ;REGISTRO DE INTERRUPCIONES
MOVLW 0x07 ;CONFIGURACIÓN TIMER
MOVWF OPTION_REG ;CONFIGURAR TIMER
BCF STATUS,RP0 ;CAMBIA A BANCO 0
CICLO_INIC BCF PORTA,3 ;HACER QUE EL PUERTO SE APAGUE
CLRF PORTB
BCF PORTA,4
CALL UNSEG
BSF PORTA,4
CLRF DECENAS
CLRF UNIDADES
CALL SELECCION
GOTO CICLO_INIC

;SUBROUTINA PARA CARGAR DATOS
DATOS CALL COMPAR ;VERIFICA SI SE HA OPRIMIDO RA0
CALL DUNIDADES ;SELECCIONA Y GUARDA UNIDADES
CLRF DATOENTRADA ;LIMPIA REGISTRO
CALL DDECENAS ;SELECCIONA Y GUARDA DECENAS
CALL DATOSUMADO ;SUMA UNIDADES Y DECENAS Y LAS MANDA AL CONTADOR
RETURN
```

;SUBROUTINA DE SELECCION DE TIEMPO EN MINUTOS O SEGUNDOS

```

SELECCION      BTFSS   PORTA,0      ;VERIFICA Y SALTA SI ES UNO
                GOTO    SEGUND      ;SI NO ES UNO CUENTA SEGUNDOS
                BTFSS   PORTA,1      ;VERIFICA Y SALTA SI ES UNO
                GOTO    MINUT       ;SI NO VE A MINUTOS
                RETURN
    
```

;SUBROUTINA DE SEGUNDOS

```

SEGUND         BCF     CHECA,0      ;PONE EN CERO PARA QUE REGRESE A SEGUNDOS
                CALL    DATOS       ;CARGA EL VALOR A CONTAR
                CALL    XSEGUNDOS    ;INTRODUCE EL VALOR DE SEGUNDOS AL CONTADOR
                CALL    CICLOSEG     ;REALIZA EL CONTEO
                GOTO    CICLO_INIC   ;REGRESA A INICIO
                RETURN
    
```

;SUBROUTINA DE MINUTOS

```

MINUT         BSF     CHECA,0      ;PONE EN UNO CHECA PARA REGRESAR A MINUTOS
                CALL    DATOS       ;CARGA VALOR DE DATOS
                MOVLW   .59
                MOVWF   REPETIR
                CALL    XMINUTOS    ;INTRODUCE EL VALOR DE MINUTOS
                CALL    CICLOMIN     ;REALIZA EL CONTEO EN MINUTOS
                GOTO    CICLO_INIC   ;REGRESA A INICIO
                RETURN
    
```

;SUBROUTINA DE INTERRUPCION

```

INTERRUP BCF   PORTA,3      ;APAGA EL LED DEL PUERTO A3
                BTFSS   PORTA,0      ;VERIFICA EL VALOR Y SI ES CERO
                GOTO    CICLO_INIC   ;RESET A EL SISTEMA
                BTFSC   PORTA,1      ;SI ES CERO CONTINUA EL CONTEO
                GOTO    INTERRUP     ;SI NO REvisa NUEVAMENTE
                BTFSC   CHECA,0      ;SI ES CERO VE A SEGUNDOS
                GOTO    CUENTAMIN     ;SI NO A MINUTOS
                BSF     INTCON,GIE    ;ACTIVAR NUEVAMENTE LA INTERRUPCION
                BCF     INTCON,INTF   ;ACTIVAR NUEVAMENTE LA INTERRUPCION
                BSF     PORTA,3      ;ACTIVA EL LED DEL PUERTO A3
                CALL    CICLOSEG     ;CONTINUA EL CONTEO EN SEGUNDOS
                BCF     PORTA,3      ;APAGA EL LED
                GOTO    CICLO_INIC   ;REGRESA A INICIO
CUENTAMINBSF INTCON,GIE    ;ACTIVAR NUEVAMENTE LA INTERRUPCION
                BCF     INTCON,INTF   ;ACTIVAR NUEVAMENTE LA INTERRUPCION
                BSF     PORTA,3      ;PRENDE EL LED
                MOVLW   .1
                ADDWF   REPETIR,1,F
                CALL    CICLOMIN     ;REALIZA EL CONTEO DE MINUTOS
                BCF     PORTA,3      ;APAGA EL LED
                GOTO    CICLO_INIC   ;REGRESA A INICIO
                RETFIE               ;RETORNO DE SUBROUTINA
    
```

;SUBROUTINA DE MINUTOS, DECREMENTO

```

XMINUTOS BSF   PORTA,3      ;ENCIENDE EL LED
                MOVF    UNIDADES,W    ;GUARDA EL VALOR A CONTAR INTRODUCIDO
                MOVWF   REPETIR1     ;GUARDA EL VALOR EN REPETIR Y REALIZA EL CONTEO
                RETURN
CICLOMIN MOVLW .1
                SUBWF   REPETIR1,F
                MOVF    REPETIR1,W    ;EL VALOR DE REPETIR LO GUARDAMOS EN W
    
```

```

MOVWF CUENTA
CALL HEX_BCD ;CONVIERTE EL VALOR DE HEX A BCD
CALL DISPLAY ;MUESTRA EN EL DISPLAY
BSF PORTA,4
CALL DIEZMS
BCF PORTA,4
CALL DIEZMS
CALL CICLOSEG
MOVLW .59
MOVWF REPETIR
MOVLW .1
ADDWF REPETIR1,F
DECFSZ REPETIR1,F ;DECREMENTA REPETIR HASTA QUE SEA CERO
GOTO CICLOMIN ;REPITE EL CICLO MIENTRAS NO SEA CERO
RETURN

;SUBROUTINA DE SEGUNDOS, DECREMENTO

XSEGUNDOS BSF PORTA,3 ;ENCIENDE EL LED
MOVF UNIDADES,W ;GUARDA EL VALOR A CONTAR INTRODUCIDO
MOVWF REPETIR ;GUARDA EL VALOR EN REPETIR Y REALIZA EL CONTEO
RETURN

CICLOSEG MOVF REPETIR,W ;EL VALOR DE REPETIR LO GUARDAMOS EN W
MOVWF CUENTA
CALL HEX_BCD ;CONVIERTE EL VALOR DE HEX A BCD
CALL DISPLAY ;MUESTRA EN EL DISPLAY
CALL UNSEG ;ESPERA UN SEGUNDO ANTES DE SEGUIR EL CONTEO
DECFSZ REPETIR,F ;DECREMENTA REPETIR HASTA QUE SEA CERO
GOTO CICLOSEG ;REPITE EL CICLO MIENTRAS NO SEA CERO
RETURN

;SUBROUTINA DE UNIDADES

DUNIDADES MOVLW 0X01 ;INTRODUCIR UNOS EN LOS 4 BITS MENOS SIGNIFICATIVOS
MOVWF CARRYIZQ ;EL DATO INTRODUCIDO SE RECORRE UN VALOR A LA IZQUIERDA
MOVLW 0X0F ;APAGAS EL DISPLAY DE UNIDADES
MOVWF DATOIZQ ;GUARDA EL DATO PARAR RECORRER
CALL CORRIMIENTO ;REALIZA EL CORRIMIENTO Y LO GUARDA EN DATO SALIDA
MOVF DATOSALIDA,W ;GUARDA EL NUEVAMENTE EL CORRIMIENTO EN W
MOVWF PORTB ;LO MUESTRA EN EL PUERTO
CALL CIENMS ;EL DATO APARECE APAGADO
MOVLW .10 ;EMPIEZA EL INCREMENTO DE 10 QUE GUARDA EN W
MOVWF DATOCOMPARA ;EL VALOR DE 10 ES GUARDADO EN EL REGISTRO DE DATOCOMPARA
CALL TEST ;REALIZA LA SUMA PARA OBTENER EL VALOR
MOVF DATOENTRADA,W ;EL VALOR SE GUARDA EN W
MOVWF UNIDADES ;ESTE VALOR GUARDADO SE GUARDA EN EL REGISTRO DE UNIDADES
CALL DISPLAY ;REALIZA LA CONVERSIÓN PARA PASARLO A BCD Y MOSTRARLO EN EL
DISPLAY
CALL CIENMS

;EL DATO APARECE PRENDIDO
BTFS PORTA,1 ;SI ES CERO TERMINA
GOTO DUNIDADES ;SI ES UNO SE REGRESA Y CONTINUA EL CONTEO
RETURN

;SUBROUTINA DE VERIFICACION DE INCREMENTOS .10

TEST BTFS PORTA,0 ;VERIFICA SI HAY UN CERO
RETURN
INCF DATOENTRADA,F ;REALIZO EL INCREMENTO QUE SE TIENE EN DATO ENTRA

```

	MOVF	DATOCOMPARA,W	:EL DATO QUE SE TIENE EN DATO COMPAR SE GUARDA EN W
	XORWF	DATOENTRADA,W	:SE REALIZA LA COMPARACION DE AMBOS
	BTFSZ	STATUS,Z	:SI ES DIFERENTE CONTINUA
	CALL	LIMPIA	:SINO PONE EN CERO EL DATO DE ENTRADA
	RETURN		
LIMPIA	CLRF	DATOENTRADA	:PONE EN CERO EL DATO DE ENTRADA
	RETURN		
:SUBROUTINA DE DECENAS			
DDECENAS BSF	PORTB,7		:HACE QUE
	BSF	PORTB,6	:SE APAGUE
	BSF	PORTB,5	: EL
	BSF	PORTA,2	:DISPLAY
	CALL	CIENMS	:HACE QUE SE MANTEGA APAGADO EL DISPLAY
	MOVLW	.6	:GUARDA UN VALOR DE 6 EN W
	MOVWF	DATOCOMPARA	: EL VALOR DE W SE GUARDA EN DATO COMPARA
	CALL	TEST	:VERIFICA LA COMPARACION DE LOS DATOS DE ENTRADA
	MOVF	DATOENTRADA,W	:EL DATO DE ENTRADA LO GUARDA EN W
	MOVWF	DECENAS	: EL DATO LO GUARDA EN DECENAS
	CALL	DISPLAY	:REALIZA LA CONVERSIÓN PARA PASARLO A BCD Y MOSTRARLO EN EL
DISPLAY	CALL	CIENMS	:EL DATO APARECE PRENDIDO
	BTFSZ	PORTA,1	:SI ES CERO TERMINA EL CONTEO
	GOTO	DDECENAS	:SI ES UNO SE REGRESA Y CONTINUA EL CONTEO
	RETURN		
:SUBROUTINA DE RERTRASO DE 10MS			
DIEZMS	BCF	INTCON,T0IF	:LIMPIAR BANDERA DE SOBRE FLUJO
	MOVLW	0xD9	:CONTAR 39 VECES
	MOVWF	TMR0	:REALIZADO EL CONTEO SE GUARDA EN
CICLO	BTFSZ	INTCON,T0IF	:CHECAR SI EL BIT ESTA EN UNO
	GOTO	CICLO	:SI ES CERO REGRESA HASTA QUE SEA UNO
	RETURN		
:SUBROUTINA DE CORRIMIENTO			
CORRIMIENTO	BCF	STATUS,C	:PONE EN CERO
CORRR	RLF	DATOIZQ,1	:RECORRE EL DATO UNA POSICIÓN
	DECFSZ	CARRYIZQ,F	:REALIZA EL DECREMENTO
	GOTO	CORRR	:SINO CONTINUA EL CORRIMIENTO
	MOVF	DATOIZQ,W	:GUARDA EL DATO RECORRIDO EN W
	MOVWF	DATOSALIDA	:Y LO GUARDA EN DATOSALIDA
	RETURN		
:SUBROUTINA DE DECREMENTO			
UNMIN	MOVLW	.60	:REPETIR 60 VECES
	MOVWF	TS	:GUARDA EL VALOR DE 60 EN EL REGISTRO
CICLO3	CALL	UNSEG	:LLAMAR SUBROUTINA UNS
	DECFSZ	TS,F	:SE DECREMENTA DESDE 60
	GOTO	CICLO3	:SINO REGRESA A CICLO
	RETURN		
UNSEG	MOVLW	.100	:REPITE 100 VECES
	MOVWF	VECES	:GURDA EN VALOR EN VECES
CICLO2	CALL	DIEZMS	:LLAMAR A LA SUBROUTINA DE 10MS
	DECFSZ	VECES,F	:SE DECREMENTA DESDE 100
	GOTO	CICLO2	:SINO REGRESA HA CICLO2
	RETURN		

```

COMPAR          BTFS    PORTA,0      ;SALTA SI NO ES UNO
                GOTO    COMPARE      ;SINO HASTA QUE SEA UNO
CERO            BTFS    PORTA,0      ;SALTA SI ES UNO
                GOTO    CERO         ;SINO HASTA QUE SEA UNO
                RETURN

;SUBROUTINA PARA OBTENER UNIDADES Y DECENAS

HEX_BCD        CLRF    UNIDADES      ;PONE EN CERO LO QUE HAY EN LAS UNIDADES
                CLRF    DECENAS      ;PONE EN CERO LO QUE HAY EN LAS DECENAS
                MOVLW  .10          ;VALOR A RESTAR
RESTA          SUBWF   CUENTA,F      ;RESTA 10 A CUENTA Y GUARDA
                BTFS    STATUS,C     ;SALTA SI NO HAY ACARREO(LA BANDERA SA ACTIVA CON 0)
                GOTO    ACABA        ;SI HAY ACARREO TERMINA
                INCF    DECENAS,F    ;INCREMENTA LAS DECENAS
                GOTO    RESTA        ;REPITE
ACABA          ADDWF   CUENTA,W      ;LE SUMA 10 AL RESIDUO PARA OBTENER LAS UNIDADES
                MOVWF   UNIDADES     ;GUARDA EN W
                RETURN

;SUBROUTINA PARA ACOMODAR EL NUMERO EN BCD

DISPLAY        MOVLW  0X01          ;GUARDA UN 1 PARA RECORRRERLO UNA VEZ
                MOVWF   CARRIZQ      ;EL VALOR SE GUARDA EN CARRIZQ
                MOVF    UNIDADES,W    ;EL VALOR DE UNIDADES LO GUARDA EN W
                MOVWF   DATOIZQ      ;Y LO GUARDA EN DATOIZQ
                CALL    CORRIMIENTO   ;REALIZA EN CORRIMIENTO DE LOS VALORES
                MOVF    DATOSALIDA,W  ;Y LO GUARDA EN W
                MOVWF   SUNIDADES     ;DESPUES LO GUARDA EN SUNIDADES
                MOVLW  0X05          ;SE GUARDA UN CINCO PARA RECORRRERLO CINCO VECES
                MOVWF   CARRIZQ      ;Y LO GUARDA EN CARRIZQ
                MOVF    DECENAS,W    ;EL VALOR DE DECENAS SE GUARDA EN W
                MOVWF   DATOIZQ      ;EN VALOR DE W SE GUARDA EN DATOIZQ
                CALL    CORRIMIENTO   ;SE REALIZA EL CORRIMIENTO CON LO VALORES ANTERIORES
                MOVF    DATOSALIDA,W  ;EN DATO OBTENIDO EN EL CORRIMIENTO SE GUARDA EN W
                IORWF   SUNIDADES,W   ;SE REALIZA LA SUMA DE DOS VALORES
                MOVWF   PORTB        ;SE MUESTRA EN EL PUERTO B
                BCF    PORTA,2        ;SE ACOMPLETAN LAS DECENAS
                RETURN

;SUBROUTINA PARA RETARDAR 100 MSEG

CIENMS         MOVLW  .10           ;CARGA UN 100 A W
                MOVWF   VECES        ;MANDA EL DATO A LA DIRECCION EN LA QUE SE ENCUENTRE VECES
CICLO4         CALL    DIEZMS        ;LLAMA A LA RUTINA DIEZMS
                DECFSZ  VECES,F      ;DECREMENTE VECES Y GUARDA EL RESULTADO EN VECES, SALTA SI ES
CERO           GOTO    CICLO4        ;SINO REGRESA A CICLO4
                RETURN

;SUBROUTINA PARA SUMAR DECENAS Y UNIDADES

DATOSUMADO     MOVLW  .10           ;GUARDA UN 10 EN W
                MOVWF   VECES        ;GUARDA W EN VECES
                MOVLW  0X00          ;SE GUARDA UN CERO EN W
SUMA           ADDWF   DECENAS,W     ;SE REALIZA LA ADICION 10 VECES
                DECFSZ  VECES,F      ;SE REALIZA EL DECREMENTO
                GOTO    SUMA         ;SINO NO ES CERO REGRESA A SUMA
                ADDWF   UNIDADES,F    ;SI ES CERO SE SUMA CON UNIDADES
                RETURN
                END

```



# Bibliografía

- 1) A. Spagnol, E. de Roost and O. Lerch,  
**“High Precision  $4\pi\beta\text{-}\gamma$  Coincidence Counting and The Preparation of Solid C0-60 Standard Sources and Solutions for International Comparison”** EUR 477.e, 1964
  
- 2) William J. Price,  
**Nuclear Radiation Detection, Second Edition**  
Mc. Graw Hill, 1958
  
- 3) Patlán F., Cortés A.,  
**“Soportes para fuentes radiactivas puntuales”**  
Reporte SS, Material de consulta exclusivamente en el LPR-CMRI-ININ, 1994.
  
- 4) Glenn F. Knoll,  
**“Radiation Detection and Mesurement”**  
John Willey and Sons 1979.
  
- 5) N. Kudomi, et. al.  
**Nuclear Instruments and Methods in Physics Research,**  
A322 (1992) Pags. 53-52
  
- 6) Marcelo Alonso & Edward J. Finn.,  
**“Fundamental University Pshysics Vol. III”.**  
Addison Wesley Publishing Company. 1967. Ontario Canada
  
- 7) Evans Robley D.,  
**“The Atomic Nucleus”,**  
Mc Graw Hill Book Company, Inc., 1955

- 8) Hongshn Du, et.al,  
**“Nuclear Instruments and Methods in Physics Research,”**  
A369 (1996).
- 9) H. Du, Z. Jia and Y. Yu,  
**“Nuclear Instruments and Methods”**,  
A251 (1986), 254.
- 10) W. Parker, M. De Croes and K. Sevier Jr.,  
**“Nuclear Instruments and Methods”**,  
7 (1960) 22-36.
- 11) R. Daris, C. St. Pierre,  
**“Nuclear Instruments and Methods”**,  
64 (1968) 346.
- 12) E. Brunnix, G. de Rustam,  
**“Nuclear Instruments and Methods”**,  
13 (1961), 302.
- 13) G. Bertolini, G. de Pasqualli, R. Fantechi,  
**“Nuclear Instruments and Methods”**,  
32 (1965) 355