



uaen

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS

TESIS

**“Sistema de detección de radiación ionizante con un
diodo PIN”**

PRESENTA:

Ing. María Daniela Ortiz Allende

ASESORES

C. a Dr. Víctor Martín Hernández Dávila.

Dr. Héctor René Vega Carrillo.

Dra. Consuelo Letechipía de León.

FRANCISCO

GARCÍA

SALINAS

Zacatecas, Zac. Noviembre 2018

Sistema de detección de radiación ionizante con un diodo PIN.

Aprobada por el jurado:

Dr. Héctor Rene Vega Carrillo

Dra. Consuelo Letechipía de León

Dr. Miguel Ángel Salas Luévano

Dr. Jorge Simón Rodríguez

Dr. J. Ignacio Dávila Rangel

Dedicatoria

Dedicada a mis amados padres
Mireya y Juan Ignacio
que son mi amor eterno y apoyo incondicional,
a toda mi familia y
a Gustavo que me han dado todo su apoyo,
comprensión y amor.

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por haberme otorgado el apoyo para realizar mis estudios de postgrado, así como al COZCyT por el apoyo recibido para participar en los diferentes congresos Nacionales e Internacionales.

Agradezco también a la Universidad Autónoma de Zacatecas y a la Unidad Académica de Estudios Nucleares, por haberme formado profesionalmente como ingeniero y ahora como maestra en Ciencias Nucleares, también agradezco por haberme dado la oportunidad de pertenecer a este programa de maestría para poder continuar con mi formación profesional.

Quiero agradecer infinitamente a mi director de tesis Víctor Martín Hernández Dávila por enseñarme los conocimientos adquiridos a lo largo de mi proyecto de tesis. Por su paciencia y dedicación para mi mejor desempeño, y las enseñanzas aprendidas a lo largo de todo este tiempo, ya que con su apoyo y confianza sirvió de motivación para poder realizar el proyecto planteado. También quiero agradecer a mi co-asesor de tesis Dr. Héctor René Vega Carrillo por el apoyo incondicional para la realización de este proyecto y por seguir siempre motivándonos a los alumnos a ser emprendedores y no tener límites para poder crecer para bien en el ámbito laboral y escolar, también a la Dra. Consuelo Letechipía de León por su valiosa colaboración y su apoyo en mi desarrollo como estudiante y en el presente trabajo.

Quiero agradecer a todos mis maestros de posgrado por todas las lecciones aprendidas y por sus conocimientos compartidos.

Agradezco también al Laboratorio de Instrumentación Nuclear de la Unidad Académica de Estudios Nucleares, por facilitar el material a utilizar para el desarrollo de mi trabajo de tesis, en el mismo laboratorio pude realizar mis experimentos y mediciones.

También queremos agradecer al Laboratorio del Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo en Telecomunicaciones de la UAZ (CIDTE) por permitirnos realizar pruebas de funcionalidad de nuestro sistema de detección con sus equipos de medición.

Agradezco al maestro M. en C. Hugo López del Río por su colaboración en el desarrollo de este trabajo.

Resumen

La necesidad del desarrollar y optimizar la instrumentación nuclear, ha evolucionado a partir de las innovaciones tecnológicas en electrónica para medir campos de radiación en aplicaciones específicas. Actualmente esta evolución incorpora dispositivos y sistemas electrónicos de punta. Para algunas aplicaciones los diseños disponibles en forma comercial, son demasiado pesados, ocupan mucho espacio y consumen mucha energía, abriendo un área de oportunidad para el diseño de la optimización de sistemas de detección y medición de la radiación ionizante. El objetivo de este trabajo, fue diseñar un sistema de detección y medición de radiación ionizante con un detector tipo diodo PIN. El sistema utiliza un banco de baterías, los pulsos del diodo PIN se preamplifican con el fin de darle forma al pulso, en la siguiente etapa se amplifican con el fin de ser contados y/o procesados en un analizador multicanal. En este diseño se cambió de la tecnología DIP (dual-in-line-package) a SMD (surface mounting device) reduciendo el volumen y el consumo de energía; así el sistema resultante ocupa un menor volumen y peso. Se realizaron pruebas con una fuente de radiación compuesta. En conjunto el sistema es muy compacto, de fácil transportación y de consumo energético pequeño. Además, el sistema fue probado insertando pulsos mediante un generador de pulsos y evaluando cada una de las etapas de su tratamiento. También, se utilizó una fuente de triple de partículas alfa de Am-241 y se obtuvo el espectro de altura de pulsos en un analizador multicanal.

Palabras clave: Detección, radiación ionizante, diodo PIN.

Abstract

The need for the development and optimization of nuclear instrumentation has evolved from technological innovations in electronics and the need to measure radiation fields in specific applications. Currently, this evolution incorporates state-of-the-art electronic devices and systems. For some applications, the commercially available designs are too heavy, take up a lot of space and consume a lot of energy, opening an area of opportunity for the design of the optimization of systems for the detection and measurement of ionizing radiation. The objective of this work was to design a system for the detection and measurement of ionizing radiation with a detector type PIN diode. The system uses a battery bank. The pulses of the PIN diode are pre-amplified in order to shape the pulse, in the next stage they are amplified in order to be counted and / or processed in a multichannel analyzer. In this design, DIP (dual-in-line-package) technology was changed to SMD (surface mounting device), reducing volume and energy consumption; thus the resulting system occupies a smaller volume and weight. Tests were carried out with a composite radiation source. Overall, the system is very compact, easy to transport and with small energy consumption. The system was tested by inserting pulses through a pulse generator and evaluating each of the stages of its treatment. Also, a source of alpha particles of Am-241 was used and the pulse height spectrum was obtained in a multichannel analyzer.

Keywords: Detection, ionizing radiation, PIN diode.

Contenido

Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Resumen	iv
Nomenclatura.....	ix
Índice de Figuras.....	xi
Índice de Tablas	xii
Capítulo 1. Introducción.....	13
1.1 Problema Científico	15
1.2. Objetivo general	15
1.2.2 Objetivos específicos	15
Capítulo 2. Revisión de literatura	17
2.1 Procesos de interacción.....	17
2.1.2 Fotones.....	17
2.1.2.1 Efecto fotoeléctrico	19
2.1.2.2 Dispersión Compton	20
2.1.2.3 Producción de pares	21
2.2 Detectores	22
2.2.1 Detectores de semiconductor	23
2.2.1.2 Fotodiodo PIN	24
2.3 Procesamiento analógico	28

2.3.1 Amplificador operacional	28
2.3.1.2 Especificaciones de los amplificadores operacionales.....	31
2.3.1.2.1 Ganancia y ancho de banda	31
2.3.1.2.2 Estabilidad	31
2.3.1.2.3 Slew rate (velocidad de respuesta)	32
2.3.1.2.4 Voltaje de offset.....	33
2.3.1.2.5 Rechazo al modo común	33
2.3.1.2.6 Drift μ V/ $^{\circ}$ C.....	34
2.3.1.2.7 Ruido	34
2.4 Configuraciones básicas de los amplificadores operacionales.....	35
Capítulo 3. Materiales y Métodos	37
3.1 Metodología.....	37
3.2 Diseño del sistema de detección.....	38
3.3 Implementación del Circuito Integrado.....	38
3.4 Fotodiodo PIN.....	39
3.4.1 Amplificador operacional	40
3.4.2 Divisor de voltaje y tierra virtual de precisión.....	41
3.4.3 Componentes Pasivos	43
3.4.4 Capacitor	43
3.4.5 Filtro Butterworth.....	44
3.5 Amplificador de Transimpedancia	47

3.7 Fuente Triple.....	50
3.8 Diseño del circuito.....	52
3.8.1 Construcción	54
3.8.2 Pruebas	57
Capítulo 4. Resultados y Discusión.....	60
Capítulo 5. Conclusiones	67
Referencias	68
Curriculum Vitae.....	70

Nomenclatura

MeV	Megaelectronvolt
V	Voltaje
α	Alfa
β	Beta
γ	Gamma
Rn	Radón
P I N	Dispositivo semiconductor de tres capas
Si	Silicio
Li	Litio
Ge	Germanio
h	Constante de Planck
λ	Longitud de onda
f	Frecuencia
c	Velocidad de la luz
A	Amper
I	Corriente eléctrica
C A	Corriente alterna
C D	Corriente directa
R	Resistencia Eléctrica

C	Capacitor
eV	Electrón Volt
M C A	Analizador multicanal
FET	Transistor de efecto de campo
pF	Picofaradio
Xc	Reactancia capacitiva
dB	Decibeles
seg	Segundos
η	Eficiencia de conteo
nm	Nanómetros
t	Tiempo
m	Mili
μ	Micro
Hz	Hertz
Co	Cobalto
Cs	Cesio
PCB	Circuito Impreso

Índice de Figuras

Figura 1. Efecto fotoeléctrico.....	19
Figura 2. Dispersión de Compton	20
Figura 3. Producción de pares.....	21
Figura 4. Sistema básico para detección de radiación.....	23
Figura 5. Capas del fotodiodo PIN.....	25
Figura 6. Configuración del diodo PIN.....	26
Figura 7. Sección transversal y símbolo esquemático del diodo PIN	27
Figura 8. Amplificador operacional	29
Figura 9. Encapsulados más comunes de los amplificadores operacionales	30
Figura 10. Slew Rate	32
Figura 11. Amplificador operacional inversor	35
Figura 12. Amplificador operacional no inversor	36
Figura 13. Fotodiodo PIN S3590-09	40
Figura 14. Amplificador operacional TLE2074I de Texas Instruments	41
Figura 15. Divisor de voltaje y tierra virtual de precisión	42
Figura 16. Resistencia y su símbolo eléctrico.....	43
Figura 17. Capacitor y su símbolo eléctrico.....	44
Figura 18. Circuito integrado TLC04.....	45
Figura 19. Terminales del TLC04	45
Figura 20. Configuración de auto-reloj para fuente doble	46
Figura 21. Amplificador de transimpedancia.....	47
Figura 22. Amplificador inversor de 20dB	48
Figura 23. Amplificador inversor con ganancia.....	48
Figura 24. Amplificador para bocina	49
Figura 25. Filtro Butterworth	49
Figura 26. Sistema de alimentación (fuente).....	50
Figura 27. Fuente triple	50
Figura 28. Decaimiento de (a) Pu 239, (b)Am 241 y (c) Cm 244.....	51
Figura 29. Diseño del Sistema de detección ionizante con un diodo PIN	53
Figura 30. Vista del PCB en KiCad	53
Figura 31. Prototipo vista frontal en 3D (KiCad)	54
Figura 32. Prototipo vista trasera en 3D (KiCad)	54
Figura 33. Impresión de una de las caras del circuito en baquelita con cobre	55
Figura 34. Proceso del circuito.....	55
Figura 35. Circuito en cloruro férrico	56
Figura 36. Circuito impreso doble cara con componentes soldados	56
Figura 37. Vista del prototipo y pruebas a diferente voltaje	57
Figura 38. Bandeja de muestras (SOLOIST)	59
Figura 39. Arreglo experimental (SOLOIST)	59
Figura 40. Fuente triple en el multicanal	60
Figura 41. Prueba con el PIN	61
Figura 42. Respuesta de la ganancia del sistema en función del voltaje y la frecuencia	62
Figura 43. Espectros de altura de pulsos de la fuente triple.....	66

Índice de Tablas

Tabla 1. Propiedades de interacción con la materia	17
Tabla 2. Amplificadores básicos y sus terminales ideales	29
Tabla 3. Principales características de dos modelos de circuitos integrados	39
Tabla 4. Energías y probabilidad de emisión de las α del ^{239}Pu , ^{241}Am y el ^{244}Cm	52

Capítulo 1. Introducción

Con el descubrimiento de la radiactividad, ha existido un gran interés en la medición de la radiación ionizante (Bayrak et al., 2013). La radiación se manifiesta en forma de ondas electromagnéticas o radiación corpuscular; si la energía de la radiación es lo suficientemente alta, y puede ionizar la materia, tal caso se conoce como radiación ionizante. Los tipos de radiación ionizante más conocidos son fotones (rayos X y gamma), partículas cargadas (electrones, protones y partículas alfa) y los neutrones (Bos et al., 2011).

Es importante destacar que la espectroscopía ha sido durante mucho tiempo la base de muchas áreas como en la física, la química, la biología y las ciencias ambientales. En las últimas décadas se han desarrollado métodos de detección, y las aplicaciones contemporáneas las cuales son numerosas (Adler et al., 2010), por consiguiente, en los últimos años la importancia de la espectrometría ha seguido aumentando el estudio en el campo de las mediciones nucleares. Al mismo tiempo, se han realizado contribuciones a esta, para la espectrometría de partículas, por lo tanto, los mejores resultados para las mediciones de partículas alfa se obtienen con detectores de semiconductores de silicio. Asimismo, los detectores han evolucionado y se ha implementado el uso de los fotodiodos (Drndarević, 2008).

De la misma manera, la espectroscopía ha sido durante mucho tiempo la columna vertebral de muchas aplicaciones en física, química, biología y ciencias ambientales. Los espectros de absorción de átomos y moléculas contienen no solo información estructural, sino también conocimiento de su dinámica. Además, los espectros ofrecen suficiente resolución espectral y ancho de banda recuperando información detallada y sistemática (Adler et al., 2010).

La espectrometría alfa es una técnica de medición que ha encontrado muchas aplicaciones prácticas en campo, que permite la identificación y cuantificación de isótopos radioactivos emisores de este tipo. Estas partículas están constituidas por dos protones y dos neutrones, equivalente a un núcleo helio, dichas partículas son emitidas por algunos elementos

radioactivos (inestables), con energías del orden de los MeV. Los radioisótopos que emite vía emisión de partículas alfa son considerados extremadamente peligrosos, por esta razón, su identificación y cuantificación son de gran importancia, tanto en la protección radiológica, como en la caracterización de zonas ambientales (García-Torano, 2006).

Por este motivo, surge la necesidad de diseñar un equipo espectroscópico con resolución espectral y ancho de banda adecuados. Los módulos electrónicos relacionados comúnmente para la espectrometría son: el pre-amplificador, una configuración de amplificación, un analizador multicanal e incluso otros circuitos electrónicos auxiliares para fines especiales, los cuales están disponibles comercialmente, cabe mencionar, que con frecuencia estos dispositivos se fabrican mediante tecnología híbrida, sus costos son relativamente altos y nos vuelve dependientes tecnológicos de empresas y países donde estos equipos se diseñan y se fabrican. El fotodiodo PIN utilizado en este proyecto, así como otros elementos propuestos, se produce mediante el uso de tecnología de silicio convencional para la fabricación de circuitos integrados, dicho arreglo experimental puede ser utilizado para mediciones de laboratorio y para mediciones de campo.

1.1 Problema Científico

La generación desarrollo y optimización de la tecnología nuclear, ha evolucionado e incrementado en los últimos años por las diferentes aplicaciones en las que se envuelve. En la Unidad Académica de Estudios Nucleares se han generado diseños en el Laboratorio de Instrumentación Nuclear, los cuales permiten la mejora de sistemas de detección con los que actualmente se cuenta, de tal manera, se requiere valorar el rediseñarlos y optimizarlos, contemplando las características de espacio en cuanto a su práctica transportación y manejo, del mismo el cual permitirá ampliar las aplicaciones de estos sistemas para campo.

Por lo tanto, el objetivo general de este trabajo es el siguiente:

1.2. Objetivo general

Diseñar, construir y evaluar el desempeño de un sistema de detección para radiación ionizante con base en un detector de diodo PIN, capaz de enviar su señal de salida a un analizador multicanal para la obtención de los espectros de altura de pulsos.

Con el fin de alcanzar el objetivo general, éste se ha disgregado en los siguientes objetivos particulares:

1.2.2 Objetivos específicos

1. Implementar el uso de un fotodetector (diodo PIN) para la detección de fotones y partículas cargadas; implementar el diseño de cada una de las etapas involucradas en la detección del diodo PIN, así como la pre-amplificación para el acoplamiento de la señal recibida del fotodetector y la etapa de amplificación, para otorgar ganancia a la señal.
2. Realizar el diseño del filtro Butterworth (corte de 20kHz) y su respectiva configuración para obtener una onda semi-gaussiana posteriormente al filtro Butterworth conmutable de cuarto orden.

3. Implementar el uso de la tecnología de Montaje Superficial (SMD) con la finalidad de tener un diseño lo más compacto posible, en cuanto a dimensiones.
4. Integrar cada una de las etapas de potencia para tener nuestro detector (prototipo) para evaluar el sistema de detección.

Capítulo 2. Revisión de literatura

2.1 Procesos de interacción

La radiación, ya sea en forma de partículas emitidas o radiación electromagnética, tiene propiedades de energía, masa, momento y carga; ciertas propiedades sirven para determinar cómo interactúan con la materia. Diversas interacciones de absorción y dispersión producen ionización o excitación del medio, o la radiación puede convertirse en otro tipo más (un ejemplo claro son los fotones de aniquilación de positrones y electrones). En general, las partículas cargadas pierden energía considerable por ionización, mientras que los fotones y neutrones ceden energía mediante reacciones de dispersión y absorción. Dichas propiedades principales de los tipos de radiación se resumen en la tabla 1 (Martin, 2006).

Tabla 1. Propiedades de interacción con la materia

Radiación	Carga	Energía	Rango en el aire	Rango en H2O
Partículas α	2	3-10 MeV	2-10cm	20-125 μ m
Partículas β^+, β^-	± 1	0-3 MeV	0-10m	<1cm
Neutrones	0	0-10 MeV	0-100m	0-1m
rayos X	0	0.1-100 keV	m-10m	mm-cm
rayos gamma	0	0.01-10 MeV	cm-10m	mm-10s de cm

2.1.2 Fotones

Describir un fotón es difícil, ya que sus propiedades más obvias son la masa en reposo igual a cero, las cuales siempre viaja a la velocidad de la luz y puede interactuar como una partícula aunque también sea una onda (Martin, 2006).

Los rayos gamma, los rayos x y la luz, son tipos de radiación de naturaleza ondulatoria y son fotones con diferentes tipos de energías. La energía de un fotón está determinada por su frecuencia f o la longitud de onda λ y está dada por:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

Donde h es la constante de Planck y c es la velocidad de la luz en el vacío, el factor hc en términos usados en física nuclear será (Gaytán, 2010):

$$hc = 1.24\text{eV } \mu\text{m} = 1240\text{MeV} \quad (2)$$

Existe tal relación en la longitud de onda y la frecuencia de la señal, siendo inversamente proporcional, cuando la longitud de onda tiende a ser baja, su frecuencia será alta; dicha relación demostrada en la siguiente ecuación (Sarmiento, 2017):

$$c = \lambda\nu \quad (3)$$

Donde: c es la velocidad de la luz en el vacío, λ representa la longitud de onda (λ) y ν es la frecuencia de la radiación.

De acuerdo a Sarmiento (2017) Los fotones interactúan de diversas maneras con la materia, dependiendo de su energía y de la naturaleza del material. Pueden ionizar un átomo (expulsando el electrón) o pueden excitarlo (dejando todos los electrones dentro del átomo), de tal manera, que existen tres mecanismos de interacciones más comunes, los cuales son:

1. Efecto fotoeléctrico.
2. Dispersión Compton.
3. Producción de pares.

2.1.2.1 Efecto fotoeléctrico

Dicho fenómeno ocurre cuando un fotón interactúa con algún electrón que está en un átomo o con un electrón, como resultado de la interacción, el fotón es absorbido y un electrón es expulsado del átomo como un electrón libre, denominado fotoelectrón. Esto puede ocurrir solamente cuando el fotón entrante tiene una energía mayor que la energía de ionización E_B del electrón que se expulsará como se observa en la figura 1 (Schorge & Williams, 2008). Un átomo es mucho más pesado que el electrón expulsado, toma prácticamente toda la energía y momento del fotón. La energía cinética K del electrón expulsado es entonces:

$$K = hf - E_B \quad (4)$$

En esta ecuación h es la constante de Planck, f es la frecuencia del fotón incidente y E_B es la función de trabajo del material (la energía de amarre del electrón en el átomo).

Los electrones expulsados se conocen como fotoelectrones y se ioniza el átomo, tal proceso es una forma de fotoionización.

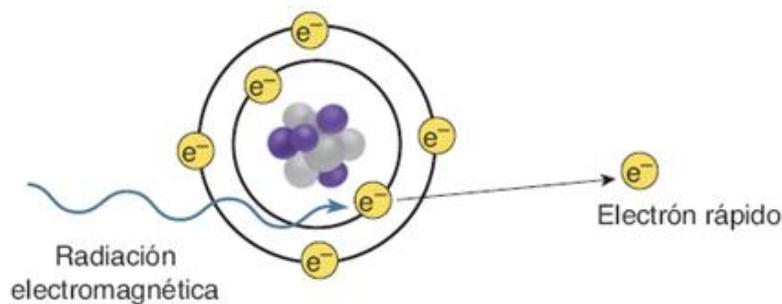


Figura 1. Efecto fotoeléctrico

El coeficiente de atenuación total en la absorción fotoeléctrica disminuye con el aumento de la energía del fotón; es decir, los fotones de alta energía son de alto poder de penetración que la radiación de baja energía.

Si la energía de un fotón incidente es menor que la necesaria para expulsar un electrón en la superficie del material, puede ser lo suficiente para poder cambiar un electrón a un nivel de energía más alto en el material, este proceso permitirá que el electrón se mueva y de tal manera, aumentar la conductividad del material, a este efecto se le conoce como fotoconductividad, y se utiliza para detectores de luz conocidos como fotoresistores y fotodiodos.

2.1.2.2 Dispersión Compton

En la dispersión Compton, también conocido como efecto Compton, el fotón interactúa con un electrón libre, o ligado a un átomo, y parte de su energía es transferida al electrón, como se muestra en la figura 2 (Schorge & Williams, 2008).

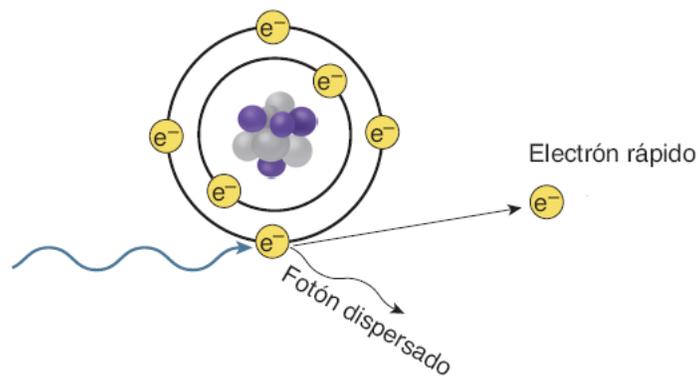


Figura 2. Dispersión de Compton

Si un fotón dispersado tiene menos energía que un fotón incidente, la diferencia de energía es transferida al electrón. La ley de la conservación de la energía-masa y de la conservación del momento, limita el máximo valor de la energía cinética del fotoelectrón y está dado por:

$$K_{max} = hf \frac{2g}{(1 + 2g)} \quad (4)$$

donde:

$$g = \frac{hf}{m_0c^2} \quad (5)$$

Donde g es la razón de la energía del fotón (hf) entre la energía de la masa en reposo (m_0c^2) de la partícula cargada que produce la dispersión. Por otra parte, en el caso de la máxima transferencia de energía, el electrón viaja hacia adelante y el fotón es dispersado hacia atrás a lo largo del fotón incidente, pero en sentido contrario. Entonces concluimos que si un fotón choca contra un electrón, el electrón solo adquiere parte de la energía del fotón, el resto de la energía se la lleva otro fotón de menor energía que es dispersado en un cierto ángulo (Muñoz, 2014).

2.1.2.3 Producción de pares

Un fotón de alta energía se transforma en un par electrón-positrón. En donde la producción de pares puede ocurrir cuando un fotón con suficiente energía encuentra un campo eléctrico fuerte en las proximidades del núcleo, por lo que la energía de amarre de un electrón es 0.51 MeV, la producción de pares es imposible para las energías del fotón menores de 1.02 MeV. Aunque cuando la producción de pares llega a ser posible, pronto se convierte en el proceso dominante de la interacción para los flujos de los fotones de energía muy alta. El coeficiente de atenuación μ de producción (Knoll, 2000), como se puede observar en la figura 3 (Schorge & Williams, 2008).

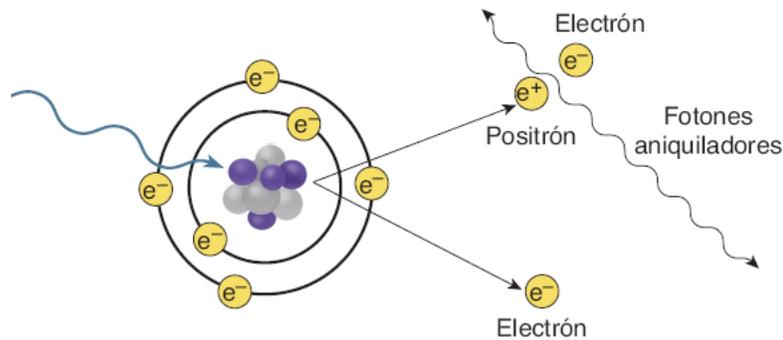


Figura 3. Producción de pares

2.2 Detectores

Los detectores son dispositivos con la capacidad de poder detectar ciertos fenómenos físicos. La forma en la que interpreta el detector una partícula es produciendo una señal, dicha acción permite la fácil identificación de radiación para su caracterización. Existe una gran variedad de detectores empleados para las diferentes áreas, así como las cámaras de ionización, contadores proporcionales, contadores tipo Geiger Müller, detectores de centelleo, detectores de neutrones y detectores de semiconductor (Tsoulfanidis, 2010).

Cada uno de los detectores tienen un funcionamiento diferente, es decir, la forma en la que interactúa la radiación con la materia. Al momento de seleccionar un detector debemos considerar los siguientes parámetros y el tipo de radiación que se pretende detectar.

- **Eficiencia.** - Relación entre el número de partículas detectadas con el número de partículas que entran al detector.
- **Resolución.** - Capacidad del detector para distinguir entre dos radiaciones de energía similar.
- **Sensibilidad.** - Capacidad de detectar tipo de radiación y energía.
- **Respuesta.** - Relación entre la altura del pulso y la energía de la partícula.
- **Tiempo muerto.** - Tiempo requerido por el detector para procesar un suceso (relacionado con pulso de señal).
- **Tamaño.**
- **Costo.**

Cabe mencionar que no existe detector alguno que cumpla con todos los requisitos, por este motivo, se requiere seleccionar el que satisfaga dichas propiedades como las mencionadas anteriormente (Tsoulfanidis, 2010).

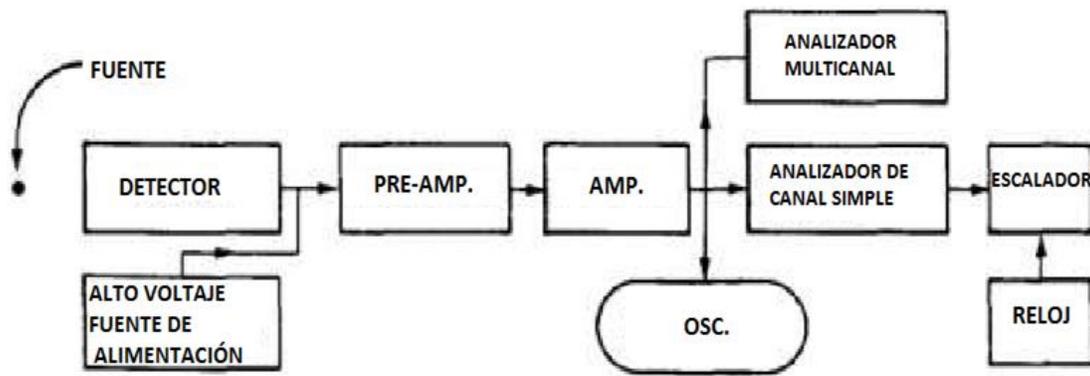


Figura 4. Sistema básico para detección de radiación

En el área de instrumentación se utiliza el término de *detector* para hablar de forma general, y posteriormente, se define como *sistema de detección* para referirse al sistema en conjunto, el cual su función es indicar o registrar fenómenos físicos (Tsoulfanidis, 2010).

2.2.1 Detectores de semiconductor

Existe una amplia variedad de detectores específicos, los cuales son encargados de la detección de radiación ionizante. Los detectores de semiconductor se caracterizan por utilizar un material semiconductor, también son componentes de estado sólido, los cuales operan como cámaras de ionización produciendo el acarreo de cargas, en los semiconductores estas cargas son pares electrón-huecos. Actualmente, los detectores de semiconductor óptimos son fabricados de materiales más comunes como de silicio (Si) y/o germanio (Ge). Además, se emplean para observar el fenómeno de la partícula (fotón incidente). Este tipo de detectores tiene una aplicación muy amplia en el área de rayos gamma, rayos X y detección de partículas (Tsoulfanidis, 2010).

Los semiconductores son básicamente sólidos cristalinos en donde los átomos se mantienen unidos por enlaces covalentes. También, se denominan así debido a sus propiedades de conducción eléctrica (aislantes y conductores). La tendencia actual de los detectores realizados por materiales semiconductores, son fabricados con silicio, esta visión puede cambiar en el futuro, ya que se pretende la búsqueda de semiconductores que poseen más tolerancia a la radiación.

Las ventajas más importantes de los detectores de semiconductor comparados con los de otro tipo de detectores de radiación, respecto a su energía en cuanto a resolución, es superior y la capacidad para resolver la energía de partículas de un espectro polienergético. Existen otras ventajas como:

- Respuesta lineal sobre un amplio rango de energía.
- Flexibilidad en geometrías especiales.
- Rápida respuesta a los pulsos (relativo a los contadores de gas).
- Capacidad para operar en vacío.
- Alta eficiencia de conteo.
- Insensibilidad a campos magnéticos.

Las características de un detector de semiconductor dependen no sólo del tipo de material usado, sino también de la manera en la que el semiconductor está formado y tratado; el tipo, tamaño y forma juegan un papel importante en la operación y diseño de un detector de semiconductor (Bayrak et al., 2013; Tsoulfanidis, 2010).

2.2.1.2 Fotodiodo PIN

En el área de los detectores, concretamente en los fotodetectores, uno de los más comunes es el fotodiodo PIN. Se denomina fotodiodo PIN debido a su estructura de tres capas de las

cuales, dos son externas: una de tipo P y otra de tipo N, y una capa intermedia con un material semiconductor tipo intrínseco, de ahí el origen de su nombre PIN. Consecuentemente de su estructura tienen la gran ventaja de que pueden ser producidos en procesos completamente automatizados, y por lo tanto, pueden ser baratos, se adaptan a las necesidades individuales, abren nuevas áreas de uso debido a sus pequeñas dimensiones y no son afectados por campos magnéticos (Muñoz, 2014). En la siguiente figura, se observan las capas que componen el PIN.

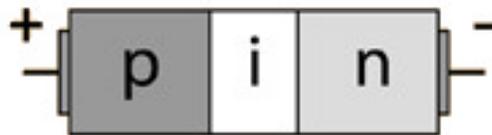


Figura 5. Capas del fotodiodo PIN

También, los fotodiodos PIN tienen algunas ventajas sobre los diodos PN, las desventajas del diodo PN es que tienen una región de agotamiento corta, gran capacitancia y una respuesta lenta, la solución a este problema para aumentar el ancho de agotamiento fue introducir una capa intrínseca de un material semiconductor (I). La principal ventaja de la introducción de un material intrínseco es que, esencialmente fija el ancho de agotamiento a la anchura de la región intrínseca. De esta manera, una gran anchura de agotamiento está disponible sin la necesidad de una alta polarización inversa. Esto resuelve la mayoría de los problemas asociados con las uniones PN simples (Sarmiento, 2017).

Por otro lado, los fotodiodos PIN se pueden utilizar de dos formas que dependerán de cómo se configure con el preamplificador:

- En el que se mide la cantidad de radiación de forma integral, el diodo se usa en modo foto-voltaico, se genera una corriente al interactuar la radiación con el detector sin que se requiera un voltaje de polarización en el detector, como se ve en la figura 6

- (a). En este caso la respuesta del detector es el promedio de los eventos que ocurren dentro del mismo. El preamplificador convierte la corriente generada a voltaje.
- Polarizados inversamente para que se cree una máxima región de indización por vaciamiento de portadores de la región intrínseca, en este caso el detector responde a cada evento que se realiza dentro del detector, como se observa en la figura 6 (b). El convertidor transforma la carga de entrada en voltaje (Wieczorek et al., 2013).

Una contribución importante en el comportamiento de los detectores tipo PIN, lo tienen los preamplificadores utilizados, ya que se requiere que sean de bajo ruido debido al tamaño de las cargas generadas dentro del detector, esto se logra con componentes discretas que deben ser seleccionadas individualmente por sus parámetros de ruido (Moncerrat, 2017).

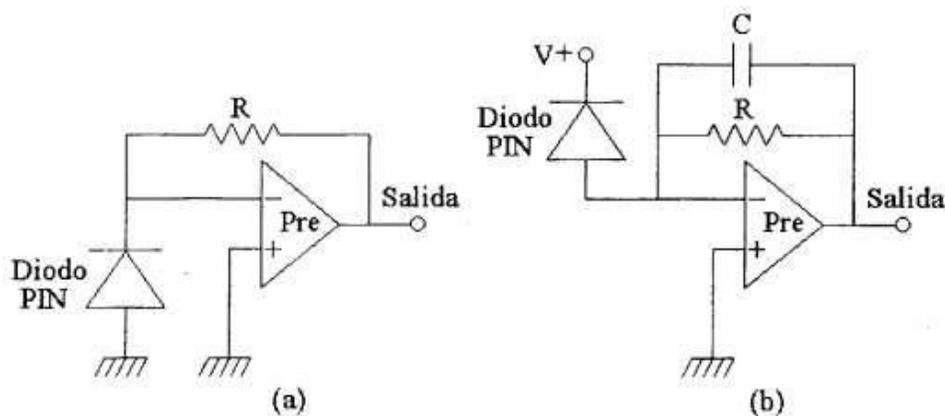


Figura 6. Configuración del diodo PIN

Debe considerarse que el flujo de la señal en el fotodiodo, determinado por el número de pares electrón-hueco generados, y en la aplicación de un voltaje inverso no afecta la señal ni atenúa la linealidad en la conversión fotoeléctrica. Cabe mencionar que el uso de un voltaje inverso aplicado a un fotodiodo, es muy útil ya que mejora la respuesta en frecuencia y linealidad, pero tiene la desventaja de que aumenta la corriente de oscuridad y los niveles de ruidos, junto con el peligro de dañar el dispositivo si el voltaje inverso aplicado es

excesivo. Por lo tanto, se requiere mantener el voltaje inverso dentro de los rangos máximos permitidos para asegurarse de que el cátodo está situado en un potencial positivo con respecto al ánodo (Hamamatsu, 2010).

El modo de operación del fotodiodo como detector, es al incidir un fotón en la superficie del fotodiodo, el electrón dentro de la estructura cristalina es estimulado. Si la energía del fotón es mayor que la energía de la banda prohibida, los electrones son enviados a la banda de conducción dejando su lugar en la banda de valencia. Estos pares electrón-hueco ocurren totalmente en la capa P, la capa I y la capa N. En la capa de agotamiento del campo eléctrico, acelera los electrones hacia la capa N y los agujeros orientados hacia la capa P. De esta manera, los pares electrón-hueco que se generan en proporción a la cantidad de luz incidente que recogen las capas N y P. En la figura 7, se puede apreciar de forma gráfica la manera de operación del PIN cuando existe un fotón incidente que hace que los pares electrón-hueco sean orientados a sus respectivas capas (carga positiva en P, carga negativa en N) (Sarmiento, 2017).

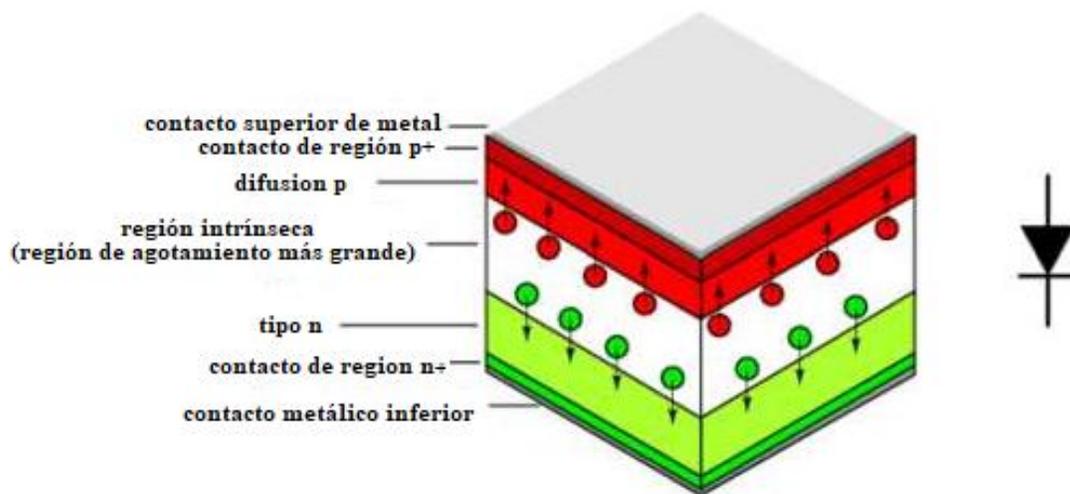


Figura 7. Sección transversal y símbolo esquemático del diodo PIN

2.3 Procesamiento analógico

2.3.1 Amplificador operacional

En el mundo de los circuitos analógicos, se considera que se puede realizar casi cualquier función con el clásico modo de tensión de un amplificador operacional (operational amplifier). La selección de sus componentes externos puede configurar una variedad de operaciones tales como amplificación, suma, resta, diferenciación, e integración. La primera aplicación de los amplificadores operacionales fue en computadoras analógicas. Actualmente, el amplificador operacional es uno de los dispositivos con mayor uso y versatilidad. Es ampliamente utilizado para procesar señales de CD, CA o combinación de estas señales.

El costo de los amplificadores operacionales es bajo, ya que son fáciles de utilizar, ocupan poco espacio y requieren menos potencia que los componentes discretos, oportuno a esto se utilizan en exorbitantes cantidades permitiendo diseñar y desarrollar una infinidad de circuitos electrónicos aplicables (amplificadores, computadoras, filtros, fuentes de señales y corriente, osciladores y flip-flops entre otros) dichos diseños electrónicos son de alto rendimiento con un mínimo de circuitería (componentes electrónicos).

El amplificador operacional es un dispositivo de dos puertos que acepta una señal externa, llamada entrada y genera una señal de salida, que es igual a la entrada por la ganancia; donde la ganancia es una constante de proporcionalidad. Un dispositivo conforme a esta definición es llamado amplificador lineal. Dependiendo de la naturaleza de las señales de entrada y salida, se tienen diferentes tipos de amplificadores (Muñoz, 2014; Coughlin & Driscoll, 1993).

En la siguiente tabla, se observa como es la representación más común de un amplificador operacional, el cual cuenta con una salida y dos entradas. El amplificador operacional ideal tiene ganancia infinita, resistencia de entrada también infinitas y una resistencia cero en la salida.

Tabla 2. Amplificadores básicos y sus terminales ideales

Entrada	Salida	Tipo de Amplificador	Ganancia	R_i	R_o
v_i	v_o	Voltaje	V/V	∞	0
i_i	i_o	Corriente	A/A	0	∞
v_i	i_o	Transconductancia	A/V	∞	∞
i_i	v_o	Transresistencia	V/A	0	0

La representación más común de un amplificador operacional se muestra a continuación en la figura 4:

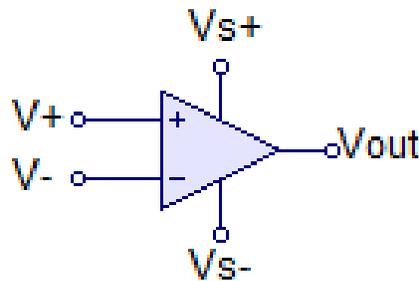


Figura 8. Amplificador operacional

Donde V_+ es la entrada no inversora, V_- representa la entrada inversora, V_{out} es la Salida, V_{S+} es la Alimentación positiva y V_{S-} es la Alimentación negativa.

La salida del amplificador depende de la diferencia de voltaje de las dos entradas, multiplicadas por un factor de ganancia (G):

$$V_{out} = G (V_+ - V_-) \quad (7)$$

El amplificador operacional, es de cierto modo, un amplificador diferencial el cual ofrece una combinación de parámetros que son de gran utilidad como:

- Alta ganancia
- Alta impedancia de entrada
- Baja impedancia de salida

El amplificador operacional se fabrica en un pequeño chip de silicio y se encapsula en una caja adecuada. Interconexiones muy finas, conectan el chip con terminales externas que salen del encapsulado que puede ser de materiales como metal, plástico o cerámica. Los amplificadores operacionales se encuentran disponibles en diferentes presentaciones como son: **(a)** encapsulado de caja metálica, **(b)** y **(c)** encapsulados dobles en línea (DIP) de 14 y 8 terminales, respectivamente y **(d)** encapsulado con tecnología de montaje de superficie (SMT o SMD) (Coughlin & Discroll, 1993).

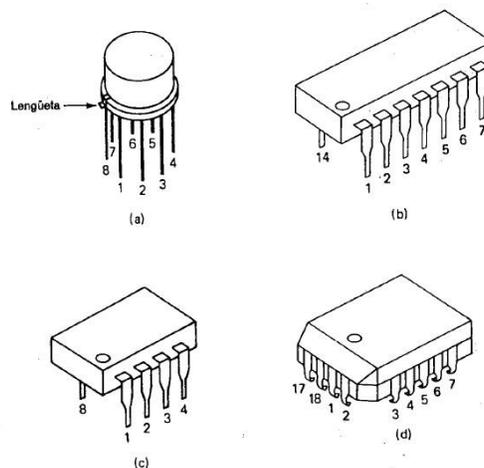


Figura 9. Encapsulados más comunes de los amplificadores operacionales

Las fuentes de alimentación de los amplificadores operacionales de propósito general son bipolares. El funcionamiento básico de los amplificadores operacionales, se puede verificar a partir de un análisis detallado de los parámetros fundamentales que caracterizan a los dispositivos reales de los ideales (Coughlin & Driscoll, 1993).

2.3.1.2 Especificaciones de los amplificadores operacionales

Los amplificadores operacionales cuentan con especificaciones técnicas, de estas mismas especificaciones dependerán la selección del tipo de amplificador a emplear, es decir su aplicación y el diseño para el que fue realizado. Al considerar este criterio, es necesario saber los conceptos básicos que están implícitos en el uso de los amplificadores operacionales, es decir, con que ganancia (dB) cuentan, que ancho de banda tienen, la estabilidad del circuito, el slew rate (velocidad de disparo), el ruido, entre otros parámetros. A consecuencia de que cada amplificador cuenta con distintas características, es de gran ayuda conocer estos conceptos, ya que con ello es posible elegir un amplificador operacional ideal para la realización del proyecto (Coughlin & Driscoll, 1999).

2.3.1.2.1 Ganancia y ancho de banda

Un amplificador operacional es de banda amplia, ganancia y *slew rate* afectan el ancho de banda, por lo que estos tres parámetros están estrechamente relacionados. Entonces si la ganancia del amplificador operacional disminuye, aumenta la frecuencia de este, esto es a consecuencia de la circuitería interna del amplificador operacional (Boylestad et al., 2002). La mayoría de los amplificadores operacionales están compensados internamente; debido a que el fabricante ha instalado dentro de dichos dispositivos un pequeño capacitor comúnmente de $30pF$, este capacitor de compensación interna de frecuencia impide que el amplificador operacional oscile a altas frecuencias.

2.3.1.2.2 Estabilidad

La realimentación negativa es más utilizada porque además de ser menos propensa a la inestabilidad, cuando la inestabilidad es inevitable se puede recurrir a técnicas de compensación que estabilizan al sistema que estabilizan al sistema. El criterio para la estabilidad contra la oscilación de un amplificador de retroalimentación, es que su desplazamiento de fase de lazo abierto debe ser inferior a 180° en la frecuencia a la que la ganancia es la unidad. El estudio de la estabilidad de un amplificador retroalimentado, es la

menor o mayor probabilidad de que el mismo entre en oscilación, cuando la cantidad de retroalimentación necesaria para obtener la mejora deseada es grande, el sistema es más propenso a la inestabilidad (Wieczorek et al., 2013).

2.3.1.2.3 Slew rate (velocidad de respuesta)

Las corrientes y voltajes en un amplificador operacional, son limitados. Cada etapa tiene su propia limitación (Huijsing, 2011). El *slew rate*, es la razón de cambio del voltaje de salida causado por una entrada escalón, como se muestra en la ecuación (8), sus unidades son $V / \mu s$ o V / ms . En la figura 10, se muestra de forma gráfica la velocidad de respuesta. La velocidad de respuesta más lenta ocurre para la ganancia unitaria, por lo tanto, la velocidad de respuesta comúnmente se especifica para la ganancia unitaria en las hojas de datos del fabricante (Coughlin & Driscoll, 1999).

$$SR = \frac{dV_o(t)}{dt} \quad (6)$$

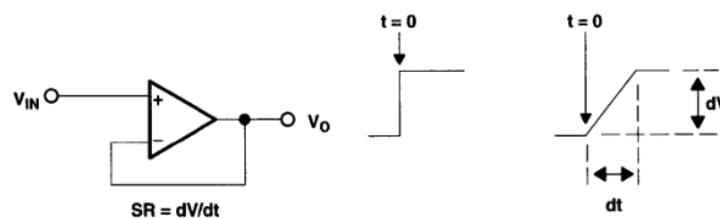


Figura 10. Slew Rate

El *slew rate*, determina la frecuencia más alta en que puede operar el amplificador operacional sin distorsión.

$$f \leq \frac{SR}{2\pi V_p} \quad (7)$$

Donde V_p es el voltaje pico.

2.3.1.2.4 Voltaje de offset

Es el voltaje que se obtiene a la salida del amplificador operacional cuando el voltaje de entrada es cero; en un amplificador operacional ideal, este voltaje también es cero, mientras que en un amplificador operacional real, hay una salida distinta de cero, este voltaje puede ajustarse a cero por medio del uso de las entradas de offset mediante un potenciómetro en caso de buscar precisión. El offset puede variar dependiendo de la temperatura del operacional. Un parámetro importante, a la hora de calcular las contribuciones a la tensión de offset en la entrada de un operacional, es el CMRR (Rechazo al modo común) (Boylestad et al., 2002; Coughlin & Driscoll, 1999).

2.3.1.2.5 Rechazo al modo común

La razón de rechazo al modo común (o *CMRR*, de las siglas en inglés *Common Mode Rejection Ratio*) es un parámetro único de los amplificadores operacionales, debido a que tienen dos entradas que están opuestas en fase (entrada inversora y entrada no inversora) cuando una señal es común a ambas entradas, existe una pequeña señal de salida, cuando lo ideal sería que esta fuera cero, pero no es así, ya que da un número positivo cuyo valor es la relación de la amplificación de tensión diferencial a la amplificación de tensión de modo común, como se muestra en la siguiente ecuación y se mide en dB. Idealmente, esta relación sería infinito, cuando la tensión de modo común está totalmente rechazada. La CMRR, según lo publicado en la hoja de datos, es un parámetro de corriente continua, cuando se gráfica contra frecuencia, se cae al aumentar la frecuencia. Un buen amplificador diferencial tiene un alto (CMRR).

$$CMRR = 20 \log_{10} \left(\frac{A_d}{A_s} \right) dB \quad (8)$$

Donde A_d : es la ganancia diferencial y A_s : representa la ganancia en modo común.

$$A_d = \frac{V_o}{V_+ - V_-} \quad (9)$$

$$A_s = \frac{V_o}{V_s} \quad (10)$$

La CMRR es una medida del rechazo que ofrece el amplificador a la entrada de voltaje común, que permite cancelar señales comunes, además de captar una señal débil y extraerla de una señal de ruido más intensa (Boylestad et al., 2002; Coughlin & Driscoll, 1999).

2.3.1.2.6 Drift μ V/°C

Los amplificadores operacionales al ser dispositivos semiconductores, están sujetos a cambios en el comportamiento respecto a los cambios de temperatura con su funcionamiento, lo cual se conoce como drift. Lo ideal es que sea cero, es decir que el amplificador operacional no presente sensibilidad alguna debido a las variaciones. Para minimizarlo y evitar que su funcionamiento se vea afectado, se puede seleccionar un amplificador operacional con mínimo drift y mantener la temperatura de funcionamiento lo más estable posible (Muñoz, 2014).

2.3.1.2.7 Ruido

Las señales eléctricas indeseables presentes en el voltaje de salida se clasifican como ruido. El ruido se genera por cualquier material que esté arriba del cero absoluto (-273C), también se genera por todos los dispositivos eléctricos y sus controles (Coughlin & Driscoll, 1999). En casi todas las áreas de medición, el nivel de ruido establece el límite fundamental en la señal más pequeña que un sistema puede medir de forma fiable, la presencia de ruido degrada

la exactitud de la medición. Algunas formas de ruido son inevitables, otras pueden ser reducidas o eliminadas y también, hay ruido que surge en el proceso de amplificación en sí mismo, y puede reducirse a través de las técnicas de diseño de bajo ruido del amplificador.

2.4 Configuraciones básicas de los amplificadores operacionales

Un circuito con amplificador operacional se obtiene mediante la conexión de componentes externos alrededor de un amplificador operacional, la diferencia entre uno y otro es que el último es un componente del primero, así como los componentes externos. Las siguientes configuraciones son de uso común en el diseño de nuestro circuito (Boylestad et al., 2002).

2.4.1 Amplificador inversor

Una de las configuraciones más empleadas, es un amplificador cuya ganancia está dada por R_f y R_1 , pueden amplificar señales de CA y CD (Boylestad et al., 2002).

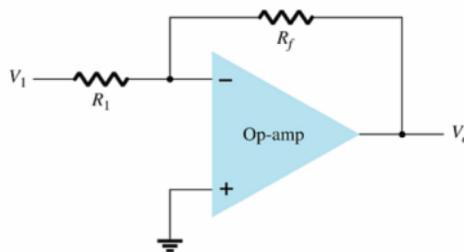


Figura 11. Amplificador operacional inversor

Se aplica un voltaje positivo V_1 a través de la resistencia de entrada R_1 a la entrada negativa del amplificador operacional. Se proporciona retroalimentación negativa mediante la resistencia R_f . El voltaje entre las entradas positivo y negativo es casi igual a 0 V. Por lo tanto, la terminal de entrada (-) también está a 0 V, de modo que el potencial de tierra está en la entrada (-). Por esta razón, la entrada (-) se dice que es tierra virtual. El voltaje a la salida del operacional está dado por la ecuación (13) el signo menos muestra que la polaridad de la

salida V_o esta invertida con respecto a V_1 . Por lo cual, se denomina amplificador inversor (Boylestad et al., 2002).

$$V_o = \frac{-R_f}{R_1} V_1 \quad (11)$$

2.4.2 Amplificador no inversor

El circuito muestra la configuración del amplificador no inversor, funciona de manera similar que el op amp inversor, solo que en este caso el voltaje de entrada es aplicado a la entrada (+). A la salida del operacional el voltaje está dado por la siguiente ecuación (Boylestad et al., 2002) .

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) V_1 \quad (12)$$

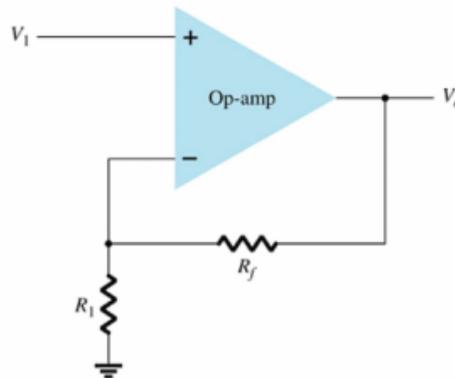


Figura 12. Amplificador operacional no inversor

Capítulo 3. Materiales y Métodos

3.1 Metodología

- **Análisis del problema**

Se realizó el análisis del problema, donde también se buscó y recolecto fuentes de información referente al tema a investigar. Se estudiaron de sistemas similares, en donde se revisaron distintos diseños que pudieran ser útiles para la elaboración de nuestro sistema.

- **Definir métodos para la construcción del sistema**

Se sintetizo la información obtenida para el diseño de nuestro prototipo. En donde contemplamos cada una de las etapas involucradas en el sistema, y diseñamos cada una de ellas de una forma más óptima.

- **Diseño y materiales**

Se implementó el uso de tecnología *SMD* (montaje superficial). Se realizó el diseño de la etapa de detección y se obtuvo la configuración óptima para la detección de radiación. También, se diseñó e implementó la etapa de pre-amplificación y amplificación, las cuales se sometieron a pruebas. Por consiguiente, se implementó un diseño y configuración del filtro Butterworth con el circuito *TLC04*, con la finalidad de obtener distintas configuraciones y seleccionar la más óptima.

- **Pruebas con el prototipo diseñado**

Se realizaron pruebas con una fuente radioactiva sobre nuestro sistema. Posteriormente, se realizaron pruebas para las diferentes configuraciones del filtro de nuestro circuito integrado.

- **Resultados**

Se realizó un prototipo nuevo con componentes de tecnología *SMD* (montaje superficial). Se obtuvieron resultados con nuestro sistema completo y una fuente de radiación. Finalmente, se realizó un reporte de resultados.

3.2 Diseño del sistema de detección

Para el diseño del detector de partículas ionizantes, se llevó a cabo la implementación de un fotodetector (diodo PIN) (Hamamatsu, 2010) con la finalidad de recibir la señal de los fotones y partículas incidentes. El sistema de detección se construyó basado en cuatro etapas, en donde la primera consistió en tener la etapa de detección, en secuencia la etapa de pre-amplificación, posteriormente la etapa de amplificación y de filtrado, finalmente, se unificó el diseño del amplificador espectroscópico para el mismo sistema. Además, se utilizó el software libre llamado KiCad versión 4.0.7, para la realización del diseño y del *PCB*, en este programa se puede visualizar el modelo en 3D del *PCB* con la finalidad de observar como sería finalmente físicamente, también podemos ver los circuitos integrados, resistencias, capacitores y diodo PIN.

3.3 Implementación del Circuito Integrado

Para la selección del amplificador operacional empleado para el diseño del detector de partículas ionizantes, se realizó comparación entre las características más importantes de los circuitos que se muestran en la siguiente tabla, dichos componentes están disponibles en el laboratorio de Instrumentación Nuclear de la Unidad Académica de Estudios Nucleares.

Tabla 3. Principales características de dos modelos de circuitos integrados

Características	<i>TLE2074I</i>	<i>TL084</i>
Slew Rate (V/ μ s)	25	16
CMRR (dB)	98	86
GBW (MHz)	10	2.5 - 4
Low Noise f=10 kHz	11.6 - 17	15
Offset voltage drift (μ V/ $^{\circ}$ C)	10.1	10
Voltaje de operación (V)	2.25 - 19	6 - 36
Temperatura ($^{\circ}$ C)	-55 - 125	-65 -150

A continuación, se mencionan los diferentes componentes a utilizar en el sistema de detección diseñado, en donde se proponen diseños electrónicos y las respectivas configuraciones para cada una de las etapas, donde el detector espectroscópico contará con las siguientes etapas: circuito detector, circuito preamplificador, circuito de amplificación y etapa de filtrado.

3.4 Fotodiodo PIN

El diodo PIN con serie *S3590-09* (Hamamatsu Photonics K.K., 2010) es un fotodiodo de silicio tipo PIN, con una gran área activa, dicho diodo PIN se usó como detector de partículas ionizantes. Entre sus características más relevantes podemos mencionar:

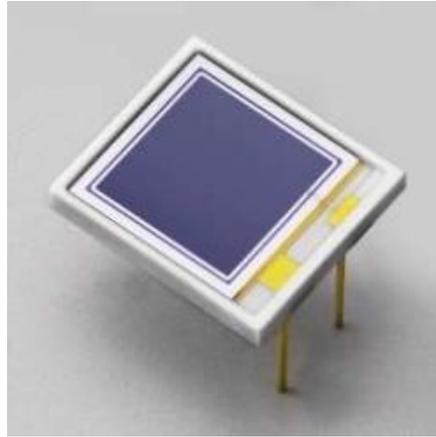


Figura 13. Fotodiodo PIN S3590-09

- Tipo de paquete: con plomo (terminales del diodo PIN)
- Área activa de 1cm^2
- Tipo de chip desnudo (sin ventana, es decir sin resina epoxica)
- Eficiencia cuántica alta ($\lambda = 540\text{nm}$)
- Baja capacitancia
- Alta velocidad de respuesta
- Alta estabilidad
- Buena resolución en cuanto a energía

Aplicaciones:

- Detectores de centello
- Detección de radiación
- Detección de rayos X
- Contadores TOF

3.4.1 Amplificador operacional

La amplificación en las diferentes etapas del diseño, la primera de ellas es un amplificador de transimpedancia el cual es el encargado de convertir la señal de la partícula en un pulso eléctrico, la segunda etapa, es un amplificador con ganancia el cual lleva la señal a un nivel

manejable, la tercera etapa, es un amplificador de salida además de que se conecta a un pequeño amplificador para una alarma sonora. La selección de este elemento se basa en la entrada JFET que aumenta la impedancia (baja corriente de polarización).



Figura 14. Amplificador operacional TLE2074I de Texas Instruments

Las características más importantes del amplificador son (Instruments, 2009):

- Entrada JFET
- Voltaje de offset
- Bajo ruido
- Gran ancho de banda

Por sus características este tipo de amplificador se usa vastamente en el diseño de diversos instrumentos electrónicos, diseño de equipo para uso médico y para el diseño de preamplificadores.

3.4.2 Divisor de voltaje y tierra virtual de precisión

La referencia de voltaje de precisión virtual en tierra de la serie TLE2426 (Instruments, 1998) proporciona una salida de baja impedancia con 20mA de capacidad de receptor y fuente, mientras que extrae menos de 280 μ A de corriente de suministro en todo el rango de entrada de 4 a 40V. En aplicaciones de acondicionamiento de señal que utilizan una única fuente de alimentación, se requiere un voltaje de referencia igual a la mitad de la tensión de

alimentación para la terminación de todos los motivos de señal analógica. Texas Instruments presenta una tierra virtual de precisión cuyo voltaje de salida siempre es igual a la mitad del voltaje de entrada, el divisor de riel TLE2426. La combinación única de un amplificador operacional de alto rendimiento (y micropower) y también, con un divisor con corte de precisión en un solo chip de silicio da como resultado una relación V_O / V_I precisa de 0,5 mientras se hunde y suministra corriente. Un diseñador no necesita pagar el precio en términos de espacio en la placa para una señal de tierra convencional que consta de resistencias, condensadores, amplificadores operacionales y referencias de voltaje.

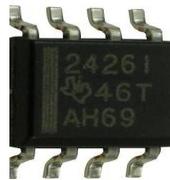


Figura 15. Divisor de voltaje y tierra virtual de precisión

Características:

- $1/2 V_I$ Tierra virtual para sistemas analógicos
- $170\mu A$, $V_I = 5V$ (operación de Micropower)
- 0.0075Ω Salida típica de baja impedancia
- Producto verde y no Sb / Br

Aplicaciones:

- Administración de energía

3.4.3 Componentes pasivos

Se denominan componentes pasivos de un circuito a todos aquellos que se limitan a disipar o almacenar energía. Generalmente, se utilizan como la carga de un circuito. Los componentes pasivos utilizados en el presente trabajo: resistencias y capacitores.

En éste proyecto las resistencias están presentes en todos los circuitos, en el preamplificador el resistor hace la función de convertir la corriente en un voltaje, ya que el detector entrega una pequeña corriente. Además, su uso en los amplificadores nos ayuda a obtener la ganancia deseada con los respectivos cálculos.

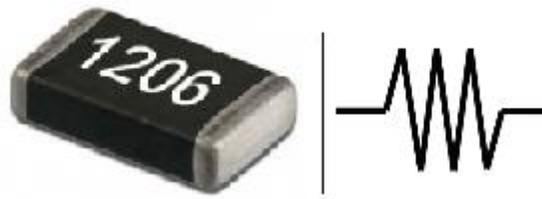


Figura 16. Resistencia y su símbolo eléctrico

Otro uso que se le da a la resistencia fue en el diseño del filtro Butterworth con el integrado TLC04, ya que, con ayuda de la capacitancia, podemos diseñar el reloj necesario para la frecuencia de corte en nuestro diseño para el filtro pasa bajas de cuarto orden. Cabe destacar, que en el proyecto se está implementando tecnología *SMD*, el trabajar con tecnología de este tipo, implica conocer cuál tamaño se implementara en el diseño a realizar, ya que hay una gran variedad. En este caso se seleccionó la medida de *SMD* de 1206.

3.4.4 Capacitor

Al igual que las resistencias, los capacitores están presentes en todas las etapas del circuito, desde el dispositivo de detección, el preamplificador, el amplificador hasta el filtro Butterworth. En el dispositivo de detección, hace la función junto con la resistencia, de un

filtro pasa bajas, para eliminar posibles señales de alta frecuencia que pudiese tener la fuente de alimentación.



Figura 17. Capacitor y su símbolo eléctrico

En la etapa de pre amplificación, nos ayuda a convertir una corriente a un voltaje usando su respectiva configuración con un circuito operacional, un capacitor y una resistencia, a la salida de este circuito obtenemos el voltaje deseado para su debido procesamiento. En la etapa del filtro Butterworth, nos ayuda a diseñar el reloj necesario para la frecuencia de corte de nuestro diseño para el filtro pasa bajas de cuarto orden.

3.4.5 Filtro Butterworth

El TLC04/MF4A-50 y TLC14/MF4A-100 son filtros conmutables monolíticos Butterworth pasa-bajos. Cada uno es diseñado para optimizar recursos, pues es económico de fácil uso que provee una respuesta pasa-bajos de cuarto orden en función de las configuraciones de diseño del circuito. Cada filtro posee una estabilidad en la frecuencia de corte que sólo dependerá de la estabilidad de la frecuencia del reloj. La frecuencia de corte es sintonizable y tiene una relación reloj-a-frecuencia de corte de 50:1 con menos de $\pm 0.8\%$ de error para el TLC04/MF4A-100. El reloj de entrada es compatible para la configuración de auto-reloj, TTL- o compatible con CMOS, son opciones que se configuran en función de la terminal de nivel de cambio (LS) (Instruments, 1995).

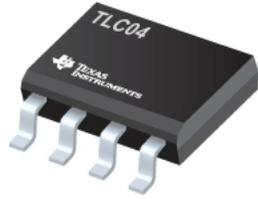


Figura 18. Circuito integrado TLC04.

Características:

- Relación de error reloj a frecuencia de corte: $\pm 0.8\%$
- La frecuencia de corte del filtro depende sólo de la estabilidad del reloj
- Rango de frecuencia de corte desde 0.1 Hz a 30 kHz, $V_{CC \pm} = \pm 2.5V$
- Operación de 5 V a 12 V
- La entrada del reloj puede ser auto-ajustable, o TTL-Compatible y CMOS Compatible.
- Sensible a fuentes de bajo voltaje
- Diseñado para ser intercambiable con el MF4-50

El circuito utilizado en este proyecto es el TLC04, un circuito integrado con un encapsulado para montaje superficial, es de fácil uso y se usará en modo de auto-reloj, esta configuración nos ayuda a disminuir los posibles componentes que pudiera haber en las demás configuraciones, disminuyendo así el tamaño de nuestro sistema.

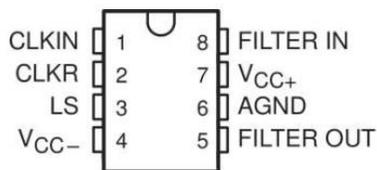


Figura 19. Terminales del TLC04

El circuito de la configuración utilizada únicamente requiere de una resistencia y un capacitor para ajustar su reloj, el diseño dependerá de la frecuencia de corte que se necesita y está dada por:

$$f_{clock} = \frac{1}{RC * \ln \left[\left(\frac{V_{CC} - V_{IT}}{V_{CC} - V_{IT}} \right) \left(\frac{V_{IT} +}{V_{IT} -} \right) \right]} \quad (13)$$

Para un $V_{CC} = 10V$ la fórmula se simplifica a:

$$f_{clock} = \frac{1}{1.69 * RC} \quad (14)$$

La configuración fue propuesta por la hoja de datos del mismo fabricante, ya que nos muestra algunas aplicaciones, se eligió la siguiente configuración, dado que se optimiza en cuanto a espacio y se reducen relojes externos:

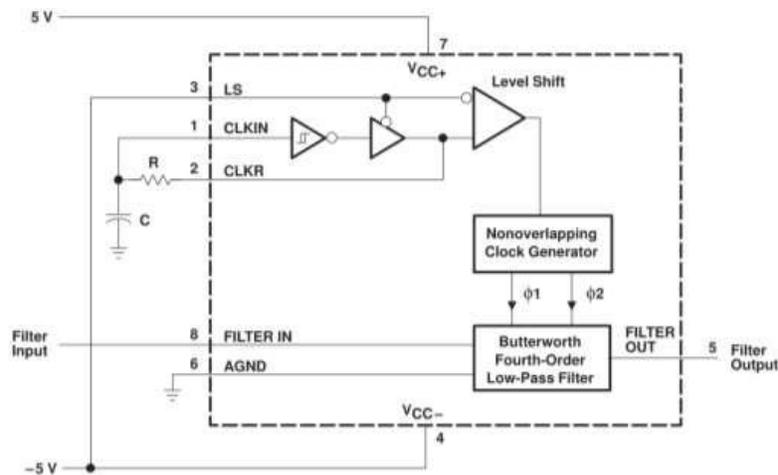


Figura 20. Configuración de auto-reloj para fuente doble

3.5 Amplificador de transimpedancia

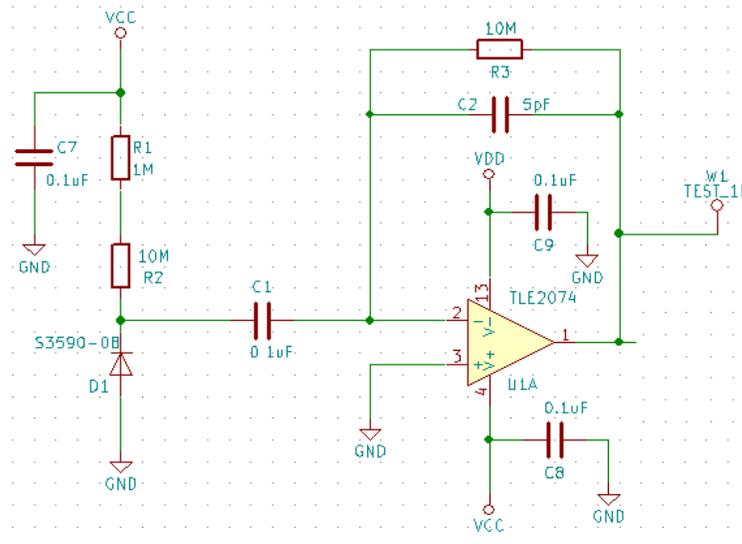


Figura 21. Amplificador de transimpedancia

Esta etapa es la encargada de transformar las partículas de energía en impulsos eléctricos, se divide la alimentación del diodo PIN (polarizado inversamente) que está basada en un filtro pasa-bajas formado por el capacitor C7, R1 y R2, con lo cual se asegura una alta inmunidad a los ruidos de alta frecuencia. El C1 desacopla la fuente de directa y deja pasar la componente de alterna, alimentando el amplificador UA1A teniendo una ganancia de 140dB alimentando a la siguiente etapa:

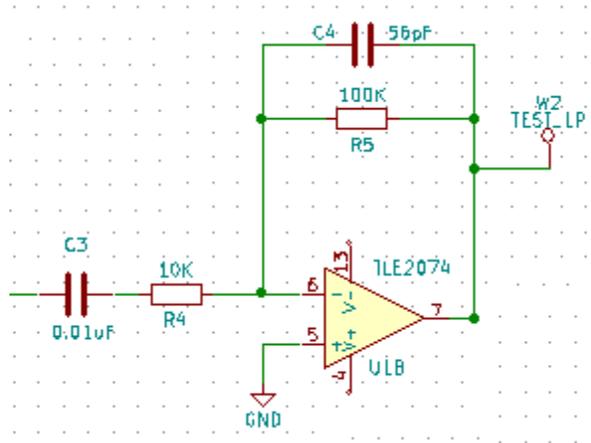


Figura 22. Amplificador inversor de 20dB

La etapa de la figura 22, es un amplificador inversor con ganancia de 20dB y filtro pasa-bajos pasivo. A continuación, alimenta a una etapa de ganancia variable que se controlara por medio de un potenciómetro para la calibración adecuada del instrumento, formado por un amplificador inversor con ganancia de 0 hasta 33 dB.

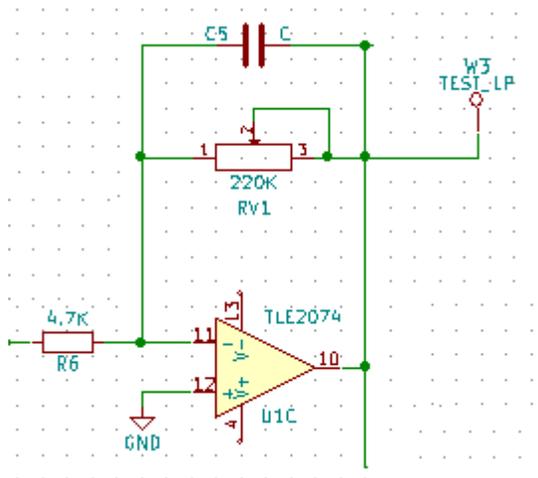


Figura 23. Amplificador inversor con ganancia

El siguiente amplificador, es el encargado de emitir por medio de una bocina un pequeño tono cada vez que se detecta una partícula.

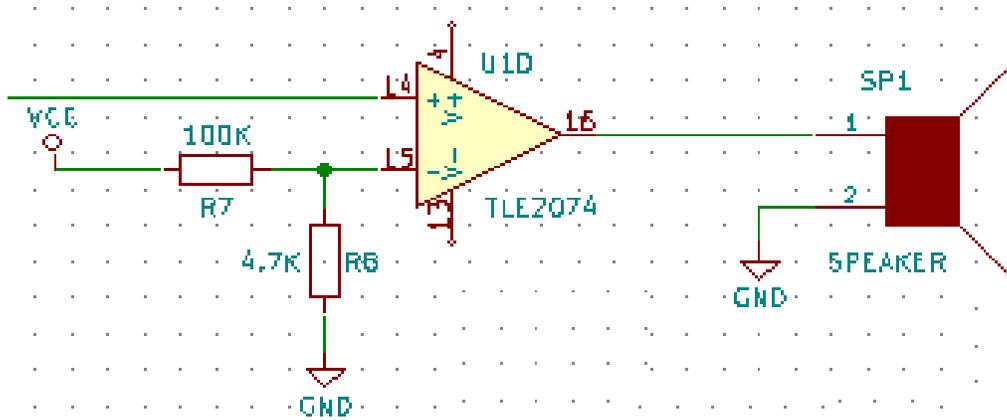


Figura 24. Amplificador para bocina

Se usa una etapa integrada por un filtro digital Butterworth de cuarto orden sintonizado, el cual se muestra en la figura 18 y es conectado al multicanal.

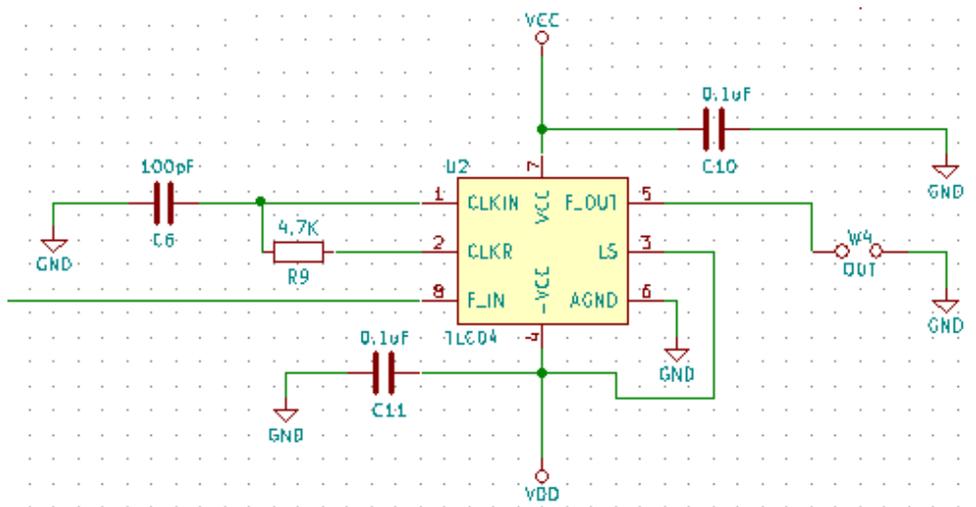
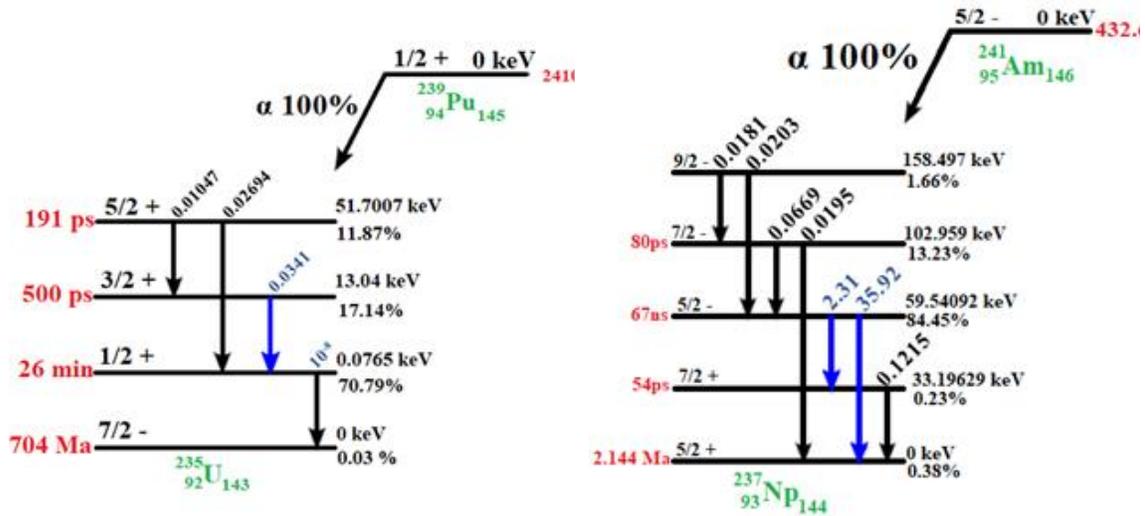


Figura 25. Filtro Butterworth

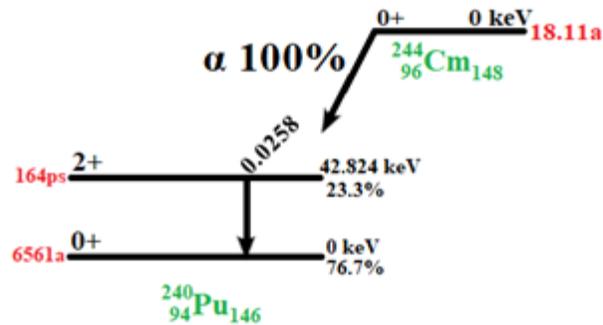
Para la alimentación, se utilizó un divisor de fuente para generar una alimentación dual (-6V y +6V) mediante una fuente de alimentación unipolar (12V).

La fuente triple contiene Pu 239 (Plutonio), Am 241 (Americio) y Cm 244 (Curio); todos estos radioisótopos decaen mediante la emisión de partículas alfa, en la figura 28, se muestran los esquemas de desintegración de éstos radioisótopos.



a).- Plutonio 239

b).- Americio 241



c).- Curio 244

Figura 28. Decaimiento de (a) Pu 239, (b) Am 241 y (c) Cm 244

La vida media del Cm 244 es de 18.1 años y decae a Pu 240 emitiendo partículas alfa de 5.8 MeV; a su vez el Pu 240 decae emitiendo partículas alfa de 5.16 MeV. El Pu 239 tiene una vida media de 24110 años y se desintegra emitiendo partículas alfa de 5.15 MeV. Por otro lado, el Am 241 emite partículas alfa de 5.48 MeV y se desintegra con una vida media de 432.2 años. En la tabla 4, se muestran algunas características más importantes de las partículas alfas producidas en la desintegración del ^{239}Pu , el ^{241}Am y el ^{244}Cm .

Tabla 4. Energías y probabilidad de emisión de las a del ^{239}Pu , ^{241}Am y el ^{244}Cm

Padre	Vida media [años]	Hija	Vida media [años]	Energía de la partícula α [keV]	Probabilidad de emisión [%]
^{239}Pu	24100	^{235}U	704000000	5105.81	11.87
				5143.82	17.14
				5156.59	70.79
^{241}Am	432.6	^{237}Np	2144000	5388.25	1.66
				5442.86	13.23
				5485.56	84.45
^{244}Cm	18.11	^{240}Pu	6561	5762.65	23.30
				5804.77	76.70

3.8 Diseño del circuito

El diseño del sistema de detección de radiación ionizante con un diodo PIN, está conformado por cuatro etapas: etapa de detección, etapa de pre-amplificación, etapa de amplificación y etapa de filtrado, su representación esquemática se muestra en la figura 29. Este diseño se realizó en el programa de software libre KiCad versión 4.07.

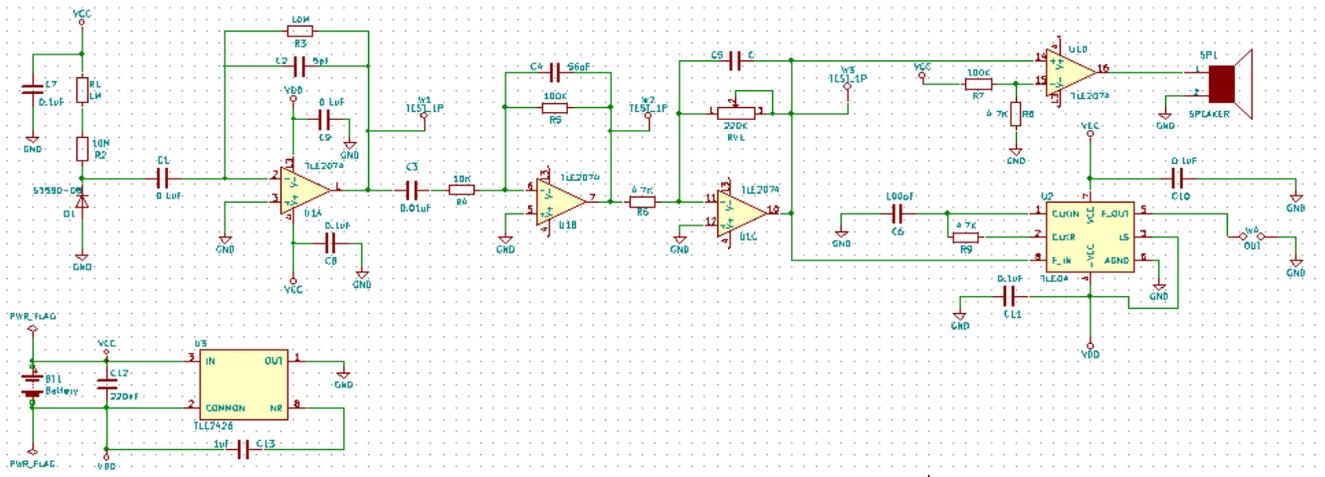


Figura 29. Diseño del Sistema de detección ionizante con un diodo PIN

Una vez ya realizado el diseño del circuito (*sketch*), se procedió a realizar el *PCB* (circuito impreso), en donde se acomodaron las pistas a nuestra conveniencia para tener un diseño óptimo y dimensionalmente compacto, nuestro diseño se hizo a doble cara, como se muestra en la figura 30.

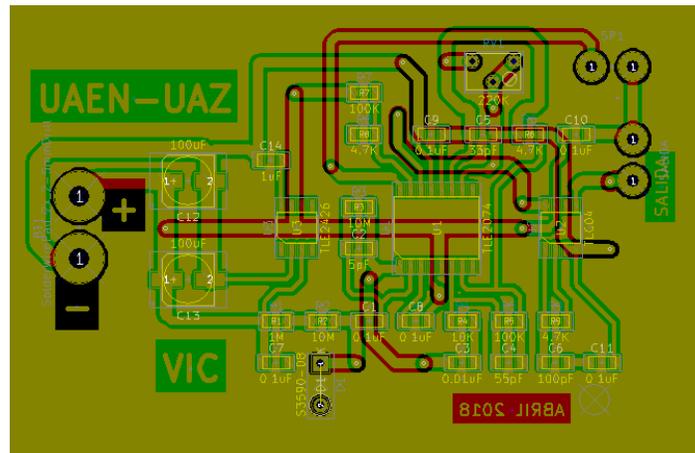


Figura 30. Vista del PCB en KiCad

El programa *KiCad* también nos permite visualizar el prototipo del diseño en 3D, como se muestra en las figuras 31 y 32.

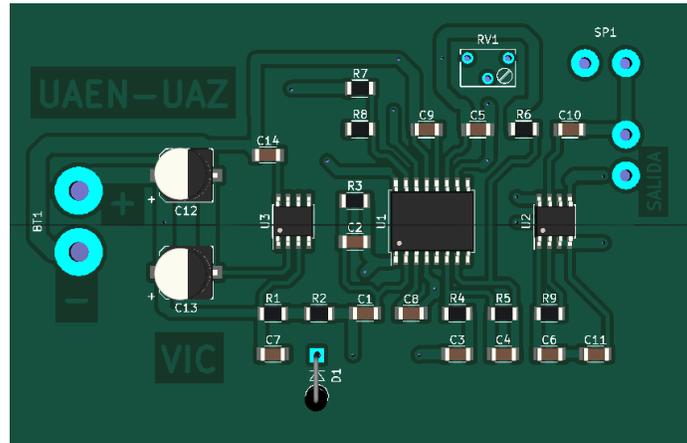


Figura 31. Prototipo vista frontal en 3D (KiCad)

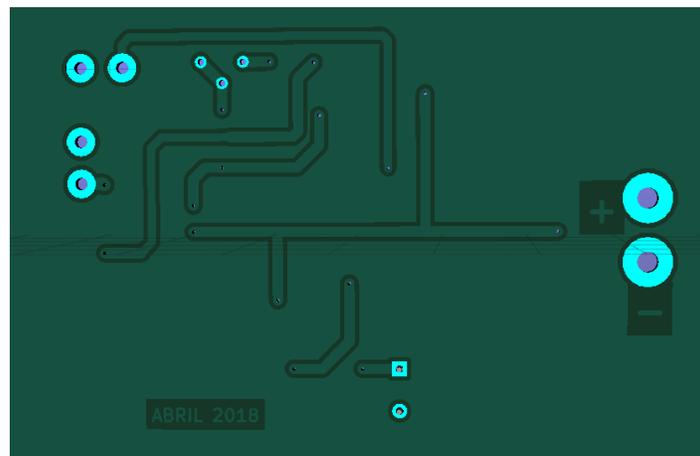


Figura 32. Prototipo vista trasera en 3D (KiCad)

3.8.1 Fabricación

Una vez realizado el diseño del circuito en *PCB*, se procedió a realizar la impresión en láser con papel *couche*, ya que es el indicado para realizar esta técnica artesanal. Ya obtenida la impresión del circuito, sobre una baquelita con doble cara de cobre se procedió a planchar el diseño (la hoja impresa con el diseño electrónico), como se muestra en la figura 33. Con este procedimiento se transfiere, por el calor, la impresión en tinta a la placa de cobre.



Figura 33. Impresión de una de las caras del circuito en baquelita con cobre

Ya transferida la primera cara, se colocó el circuito sobre un recipiente con agua caliente para poder desprender el papel *couche*, después de que el papel *couche* se desprendió, se lavó la placa para poder continuar con el proceso, como se muestra en la figura 34.

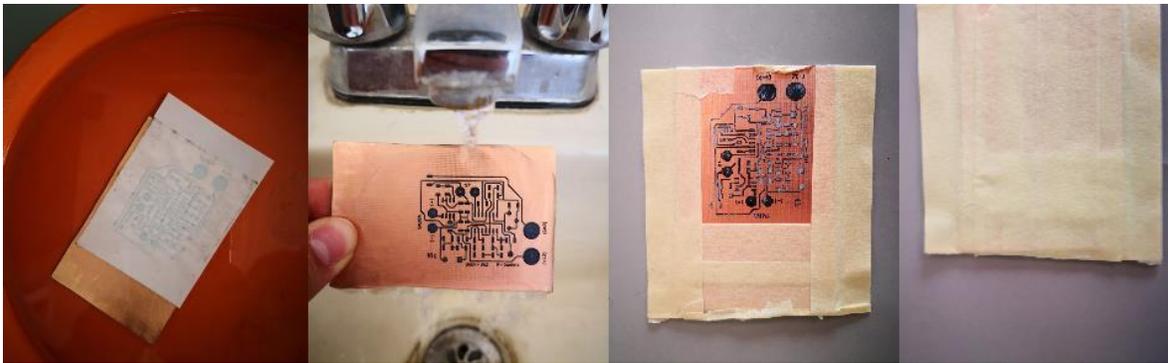


Figura 34. Proceso del circuito

Con *cinta adhesiva* se cubrió la cara del circuito que aún conservaba el cobre sin planchado, esto con la finalidad de proteger el cobre y también, para poder sumergir el circuito al ácido (cloruro férrico) y eliminar el excedente de cobre, como se muestra en la figura 35.



Figura 35. Circuito en cloruro férrico

Para la otra cara del circuito se repitió el mismo procedimiento, pero en esta ocasión se cubrió con cinta adhesiva la primera cara del circuito, de esta manera se evitó que se desprendiera cobre.

Finalmente, se obtuvo un circuito con cara doble, donde se perforar los sitios donde se sueldan los componentes, como se muestra en la figura 36.

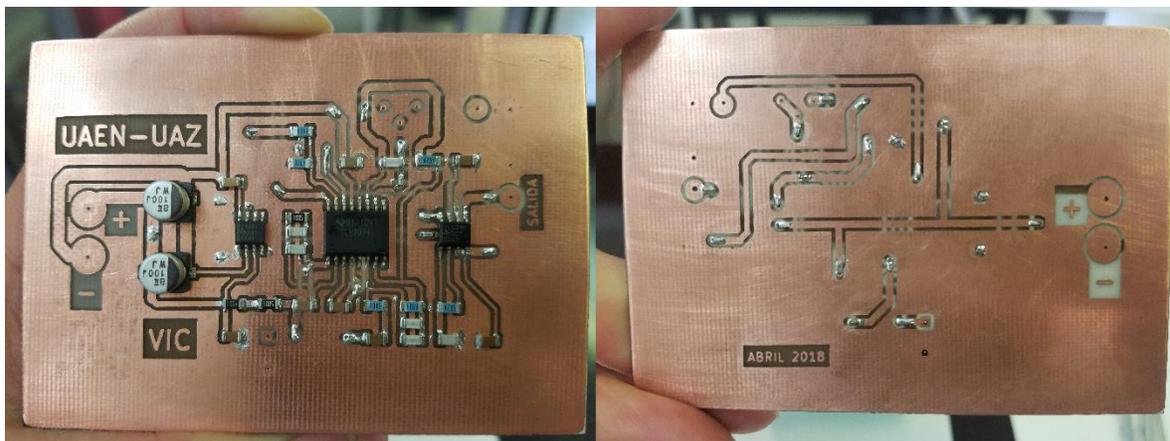


Figura 36. Circuito impreso doble cara con componentes soldados

Una vez montados todos los componentes se procedió a realizar las pruebas de funcionalidad y de desempeño de las etapas del circuito.

3.8.2 Pruebas

La etapa de pruebas se realizó en el laboratorio de Instrumentación Nuclear de la Unidad de Estudios Nucleares de la Universidad Autónoma de Zacatecas. Donde el arreglo experimental fue el siguiente, ya una vez comprobado que el circuito funcionaba en óptimas condiciones, se hicieron pruebas respecto a voltaje para observar el comportamiento del circuito, es decir, observar cual voltaje era el adecuado para que el sistema trabajara, los voltajes a los que se sometió el circuito fueron de los 3V a los 12V como máximo, ya que era el voltaje máximo permitido, ya que si este excedía se podría quemar el amplificador operacional. También, se observó cómo era el comportamiento del circuito si lo alimentábamos con una fuente o una alimentación externa (porta pilas 12V), y obtuvimos como respuesta un cambio mínimo, ya que si alimentábamos con la fuente por medio de la línea donde estábamos conectados se montaba una especie de señal, y al momento de alimentar con una fuente externa, se eliminaba el ruido y se obtenía una señal más limpia, añadiendo que la carcasa que lo contenía, actuaba como jaula de Faraday ya que el material de esta carcasa es de aluminio, también, en estas pruebas se utilizó la fuente triple de partículas alfa para poder observar en el osciloscopio los pulsos que se pretendían ver.

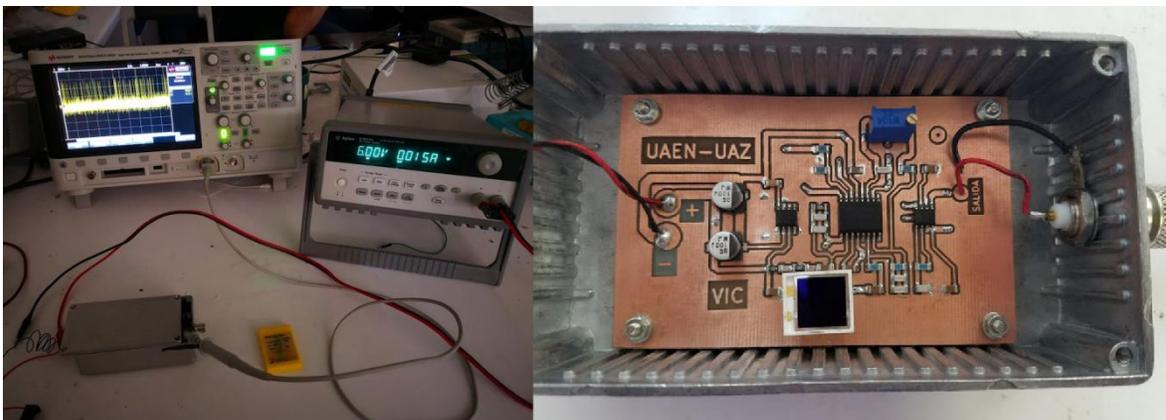


Figura 37. Vista del prototipo y pruebas a diferente voltaje

Posterior a estas pruebas, se procedió a realizar mediciones de análisis de espectro en el Centro De Investigación, Innovación y Desarrollo en Telecomunicaciones (CIDTE). El equipo que se empleó para la medición fue Keysight Technologies, modelo N9916A, versión A.08.06. En este equipo prácticamente podía observar la frecuencia (Hz) y la ganancia (dB), donde también se sometió el prototipo a diferentes voltajes de entrada, desde los 3V hasta los 12V para poder observar el desempeño del sistema y determinar el voltaje era su óptimo funcionamiento y desempeño.

Otra de las pruebas que se le realizaron al prototipo, fueron con un Espectrómetro alfa SOLOIST™ (ORTEC, 2007) , el cual cuenta con las siguientes características:

- SOLOIST-U0300 espectrómetro alfa con detector de ULTRA-AS de 300 mm².
- ALFA-PPS-230; Estación de bombeo portátil 230 V.
- 576-VM succionadora y Control para 115 V.
- SOL-ST-1 bandeja de muestra para muestras de diámetro de 1 pulgada (25 mm) y 3/4 pulg (19 mm).

La medición se realizó por 1 hora bajo condiciones de vacío. La fuente triple se colocó en un soporte muy cerca de la cara del detector como se muestra en la figura 38.



Figura 38. Bandeja de muestras (SOLOIST)

Este equipo se complementa con una fuente de voltaje y un analizado multicanal como se muestra en la figura 39.

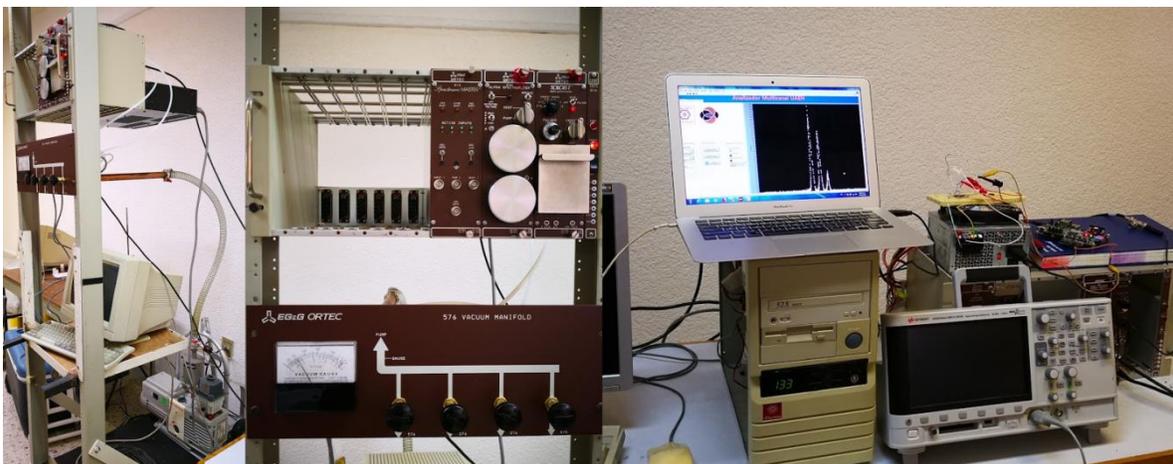


Figura 39. Arreglo experimental (SOLOIST)

Capítulo 4. Resultados y Discusión

A partir del arreglo experimental con el SOLOIST se obtuvo el siguiente espectro. Donde se observan cada uno de los picos de los tres isotopos.

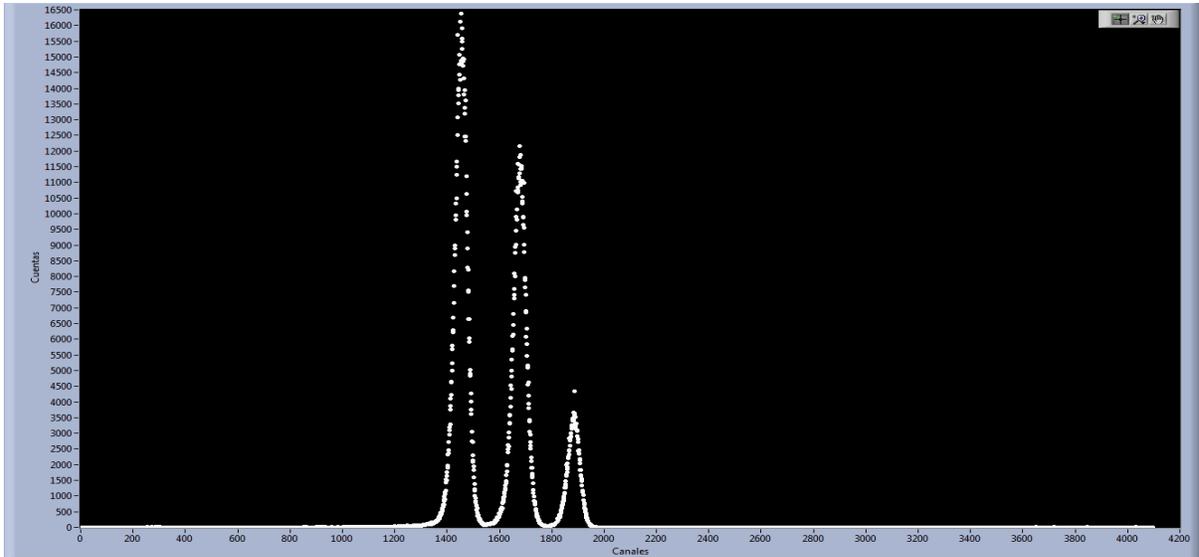


Figura 40. Fuente triple en el multicanal

Donde se puede apreciar en la imagen anterior el espectro de la fuente triple, donde se observan bien definidos cada uno de los isotopos correspondientes a los tres elementos.

En el siguiente espectro podemos observar el comportamiento que tuvo el diodo PIN.

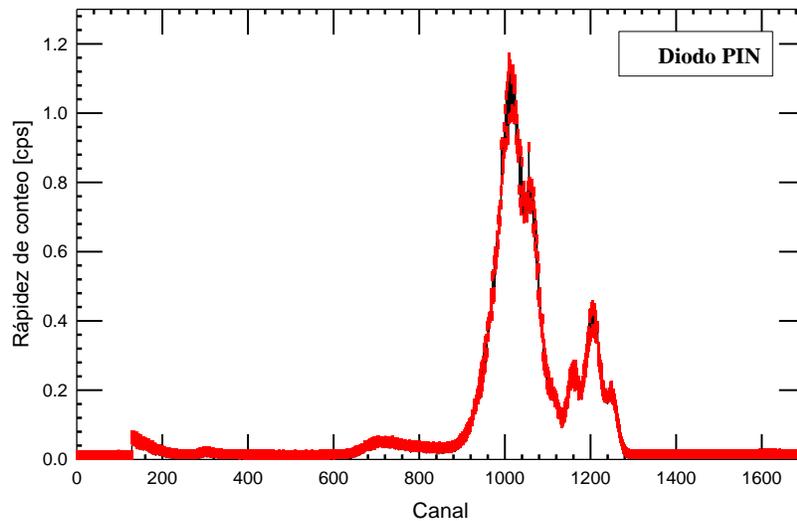


Figura 41. Prueba con el PIN

Después se realizaron mediciones en el laboratorio del CIDTE, donde se hizo un análisis sobre el comportamiento del prototipo a diferentes voltajes de entrada (desde 3V a los 12 V), se observó que el comportamiento del circuito fue optimo en los voltajes de 7 V a los 12 V; si se alimentaba con un voltaje inferior, simplemente no funciona eficientemente el circuito. En la siguiente grafica como resultado se muestra el comportamiento que obtuvo el circuito a los diferentes voltajes y corroborando la hipótesis de que efectivamente el centro de operación del sistema para un desempeño optimo comienza desde los 7V y finaliza en 12V, como se observa en la figura 42. Fue de gran utilidad el equipo que se utilizó para poder observar el comportamiento del sistema a diferentes voltajes, los datos se analizaron en el programa de SigmaPlot, donde se realizaron las gráficas, y así obtener un mejor criterio.

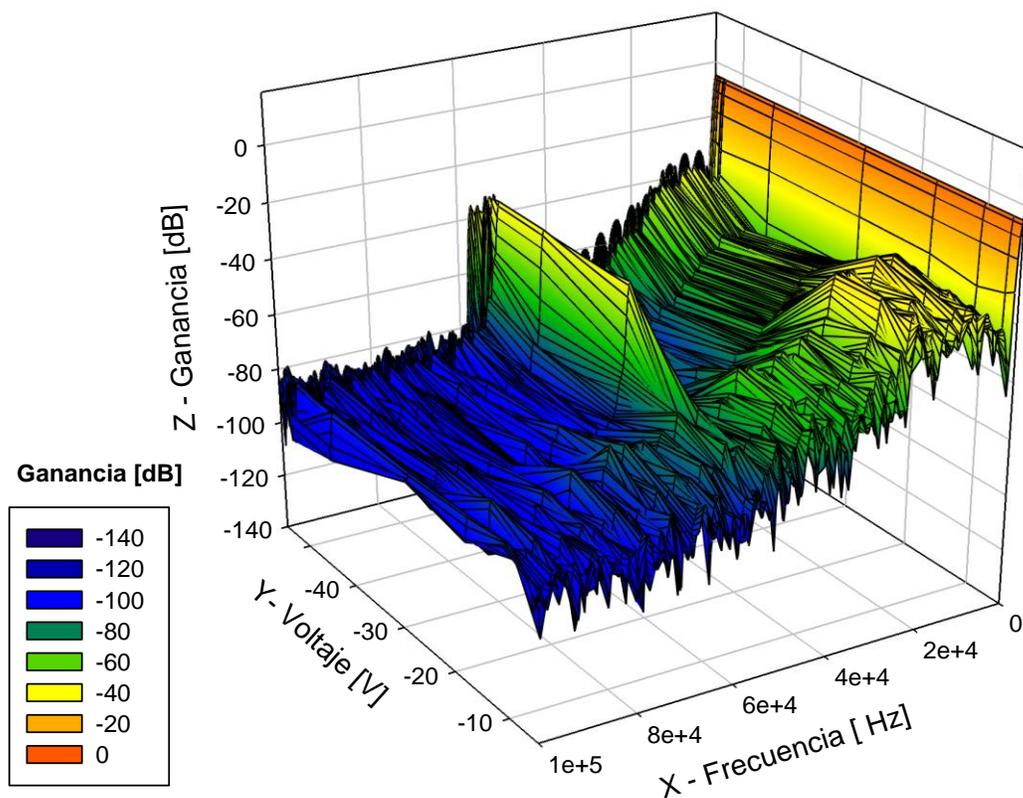


Figura 42. Respuesta de la ganancia del sistema en función del voltaje y la frecuencia

Asimismo, se realizó el siguiente cálculo para determinar el error sobre la fuente triple de alfas que se utilizó para las mediciones.

Datos:

- Tiempo de medición: 21,600 seg (6 h)
- Actividad nominal: 5.55 kBq (150 nCi) \approx 5,550 Bq (5,550 desintegraciones/seg)
- Distancia entre detector y fuente: 1 cm

Al tomar como referencia el isótopo de Pu 239 para realizar nuestros cálculos, ya que actualmente no se cuenta con el certificado de la fuente triple, se sabe que los radionúclidos se depositan en un disco de acero inoxidable, de 25 mm de diámetro, 0.5 mm de espesor, son tres isótopos que se electrodepositaron, el Pu 239, Am 241, Cm244. En este caso, como el

Plutonio decae más lento, es decir tiene una vida media de 24,110 años, es por eso que fue seleccionado como referencia.

En este caso, la probabilidad que se tiene respecto a las tres partículas alfa que emite este isotopo, se muestran en la Tabla 4 previamente mencionada.

$$\frac{\alpha}{seg} \begin{cases} A_0Pu^{\alpha 1} = \left(\frac{A_0}{3} \times 0.1187\right) \left(\frac{1}{2}\right) \\ A_0Pu^{\alpha 2} = \left(\frac{A_0}{3} \times 0.1714\right) \left(\frac{1}{2}\right) \\ A_0Pu^{\alpha 3} = \left(\frac{A_0}{3} \times 0.7079\right) \left(\frac{1}{2}\right) \end{cases} \quad (15)$$

Se dividió la actividad nominal sobre los tres isotopos para obtener las desintegraciones por segundo.

$$A_0Pu^{239} \frac{5550}{3} = 1850 \frac{d}{seg} \quad (16)$$

Después se calcularon las partículas por segundo de las tres alfas α_1 , α_2 y α_3 .

$$\begin{cases} \alpha_1 = \left(1850 \frac{d}{seg}\right) \left(\frac{0.1187 \alpha_1}{1 d}\right) = 219.595 \frac{\alpha_1}{seg} \\ \alpha_2 = \left(1850 \frac{d}{seg}\right) \left(\frac{0.1714 \alpha_2}{1 d}\right) = 317.09 \frac{\alpha_2}{seg} \\ \alpha_3 = \left(1850 \frac{d}{seg}\right) \left(\frac{0.1187 \alpha_3}{1 d}\right) = 1309.62 \frac{\alpha_3}{seg} \end{cases} \quad (17)$$

Enseguida se realizó el cálculo para saber las alfas totales que se emiten donde se realiza una sumatoria.

$$\begin{aligned}
\alpha_{T'} &= \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 \\
&= 219.595 + 317.09 + 1309.62 \\
&= 1846.3 \frac{\alpha}{seg}
\end{aligned}
\tag{18}$$

Se efectuó el cálculo para obtener la cantidad de alfas que alcanzan a llegar al detector.

$$\alpha_T \text{ q' um al det.} = \frac{1846.3}{2} = 923.15 \frac{d}{seg}
\tag{19}$$

Finalmente, fue calculada la eficiencia del detector.

$$\begin{aligned}
\eta_{Pu^{239} \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3} &= \frac{(\dot{c} \text{ medio})}{\alpha_{emitidas}} = \frac{0.046713 \frac{c}{seg}}{923.15 \frac{\alpha}{seg}} \times 100 = \\
\eta &= 5.060 E(-3) \pm 5\% \\
&= (5.060 \pm 0.253) E(-3) \frac{cuenta}{\alpha} \approx \frac{1}{\eta} = 19762.2 \pm 988.11 \frac{\alpha}{cuenta}
\end{aligned}$$

Para realizar los cálculos se tomó el criterio del número de cuentas en el pico.

En la figura 41, se muestran los espectros de altura de pulsos de la fuente triple medida con el detector de barrera superficial en vacío y con el diodo PIN sin vacío.

Claramente, se puede observar que cambia el espectro, debido a la resolución que tienen cada uno de los dos detectores, ya que es diferente. El detector utilizado en el sistema de

fabricación en comparación al otro detector de barrera superficial, tiene una resolución menor, pero aun así es capaz de detectar, no es una limitante.

Mientras que el detector de barrera superficial observa los tres picos bien definidos, porque las condiciones de la medición fueron las siguientes:

1. El detector se encuentra a vacío
2. El sistema de amplificación del SOLOIST tiene un cancelador polo-cero de $1\mu\text{s}$ de constante de tiempo
3. La ganancia total del sistema SOLOIST está preconfigurado a los niveles de energía de la fuente de alfas triple

En el caso de nuestro sistema espectro métrico del diodo PIN tiene las siguientes condiciones:

1. El detector no se encuentra a vacío. Solo se protege en el interior de una carcasa metálica, la cual tiene dos funciones; el diodo PIN es sensible a la luz visible por lo que no debe llegar luz visible a él; y que funcione como una campana de Faraday, con la finalidad de blindarlo de señales electromagnéticas (radio).
2. El sistema desarrollado, no cuenta con un cancelador polo-cero por lo que se trabaja con la constante de tiempo de los parámetros físicos del detector.
3. La resolución en la energía del diodo PIN es menor que el detector de barrera superficial del SOLOIST.
4. Al comparar los dos espectros de ambos detectores se llegó a la conclusión de que el sistema fabricado le falta un incremento en la ganancia para que empaten los tres picos del espectro obtenido con el espectro del SOLOIST.

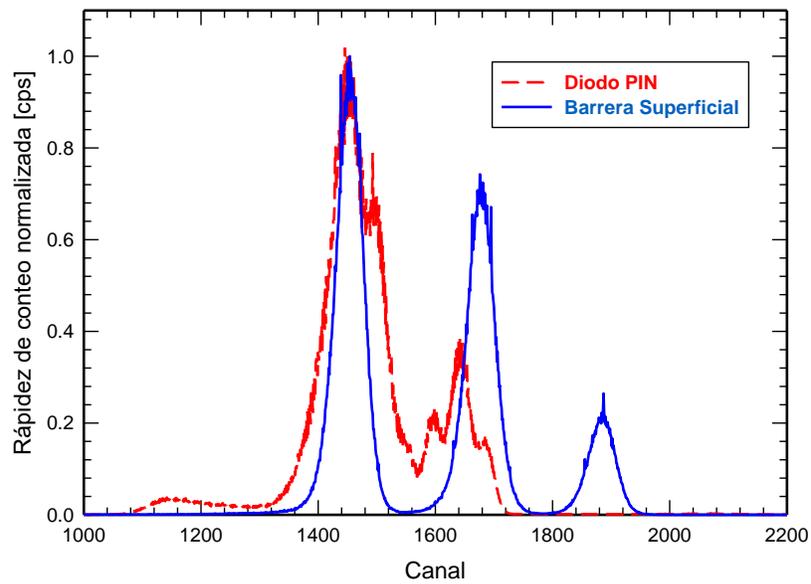


Figura 43. Espectros de altura de pulsos de la fuente triple

Todo esto que se explicó anteriormente podemos concluir que nuestro sistema es funcional a pesar de que no empata exactamente con las características del arreglo experimental del SOLOIST, considerando además que la resolución del diodo PIN es un parámetro importante en la obtención del espectro.

Capítulo 5. Conclusiones

Se diseñó, construyó y se probó un sistema espectrométrico, con un filtro Butterworth conmutable de cuarto orden, con un diodo PIN para la detección de partículas alfa. En donde el sistema funcionó correctamente, los resultados obtenidos por los prototipos son satisfactorios, confirmando que al utilizar el circuito integrado TLC04 reduce el trabajo en cuanto la realización de filtros activos, ya que, sin este, el filtro Butterworth se deberá obtener con otros métodos, anteriormente se han hecho prototipos con este tipo de filtros, utilizando amplificadores operacionales los que también son funcionales, pero ocupan de mayor circuitería.

1. Se logró diseñar el sistema de detección en un prototipo funcional de montaje superficial, lo que ayuda en la reducción en cuanto a tamaño y eficiencia. Las pruebas realizadas con el sistema espectroscópico de forma experimental cumplieron con las expectativas esperadas.
2. El diseño por etapas permite modificaciones sin alteraciones las demás etapas, esto quiere decir que si quisiéramos manejar la señal de distintas maneras será posible con estos diseños, sólo es cuestión de rediseño, si se busca una mayor o menor pre amplificación, basta con cambiar la resistencia, si se busca aumentar o disminuir la ganancia también es posible cambiando alguna de sus resistencias, de esa manera se aplica el mismo principio en la etapa del filtrado, aunque en esta etapa es posible cambiar tanto resistencia como capacitor.
3. El sistema diseñado es dinámico y puede adaptarse fácilmente a distintas ganancias y variaciones. El funcionamiento del sistema depende mayormente de sus componentes pasivos. Las señales externas pueden afectar la medición de dicho sistema, el blindaje (tipo jaula de Faraday) ayuda a que nuestra señal tenga la mayor fidelidad posible, obteniendo reducción de ruido.
4. El sistema construido, tiene trabajo a futuro, el cual, involucra la comunicación del sistema con otros equipos, un ejemplo claro es el *bluetooth*, entre otros.

Referencias

- ADLER, F., THORPE, M. J., COSSEL, K. C. & YE, J. 2010. Cavity-enhanced direct frequency comb spectroscopy: technology and applications. *Annual Review of Analytical Chemistry*, 3, 175-205.
- BAYRAK, A., BARLAS, E., EMIRHAN, E., KUTLU, C. & OZBEN, C. S. 2013. A complete low cost radon detection system. *Applied Radiation and Isotopes*, 78, 1-9.
- BOS, A. J. J. 2011. *Fundamentals of Radiation Dosimetry*. AIP Conference Proceedings, 1345, 5-23.
- BOYLESTAD, R. L., NASHELSKY, L. & LI, L. 2002. *Electronic devices and circuit theory*, Prentice Hall.
- COUGHLIN, R. F. & DRISCOLL, F. F. 1999. *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales*, Pearson Educación.
- DRNDAREVIĆ, V. 2008. A very low-cost alpha-particle spectrometer. *Measurement Science and Technology*, 19, 057001.
- GARCIA-TORANO, E. 2006. Current status of alpha-particle spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes*, 64, 1273-80.
- GAYTÁN, A. K. G. A. Y. M. A. P. 2010. *SISTEMA MULTICANAL PARA ESPECTROMETRÍA DE RADIACIÓN NUCLEAR*. Tesis de Maestría en Ciencias Nucleares de la Universidad Autónoma de Zacatecas.
- HAMAMATSU PHOTONICS K.K., S. S. D. 2010. Photodiode Technical Information.
- HUIJSING, J. 2011. Operational Amplifiers. Second edition. Springer.
- INSTRUMENTS, T. 1995. TLC04 Butterworth Fourth order datasheet.
- INSTRUMENTS, T. 1998. TLE2426 Rail Splitter datasheet.
- INSTRUMENTS, T. 2009. TLE2074 Op Amp Datasheet.

- KNOLL, G. F. 2000. Radiation detection and measurements. *John Wiley & Sons, Inc.* , Third Edition.
- MARTIN, J. E. 2006. Physics for Radiation Protection: A Handbook. *Wiley-Vch Verlag*.
- MUÑOZ, M. S. A. 2014. *Amplificador Espectroscópico*. Tesis de Maestría en Ciencias Nucleares de la Universidad Autónoma de Zacatecas.
- ORTEC 2007. SOLOIST Alpha Spectrometer.
- ROBERT F. COUGHLIN & DRISCOLL, F. F. 1993. AMPLIFICADORES OPERACIONALES Y CIRCUITOS INTEGRADOS LINEALES. Pearson Education.
- SCHORGE, J. O. & WILLIAMS, J. W. 2008. *Williams gynecology*, McGraw-Hill Medical.
- SARMIENTO ROSALES, S.M. 2017. *Diseño y Construcción de un Sistema Espectroscópico con Filtro Butterworth Conmutable de Cuarto Orden*. Tesis de licenciatura en Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica de la Universidad Autónoma de Zacatecas.
- TSOULFANIDIS, N. 2010. *Measurement and detection of radiation*, CRC press.
- WIECZOREK, A., YANG, H., ROYCROFT, B., PETERS, F. H. & CORBETT, B. 2013. PIN-photodiode with a large spot size input waveguide. *Optical and Quantum Electronics*, 45, 365-371.
- ZIEGLER, E. 2018. [Online]. *Alpha Spectroscopy sources*. <<https://www.ezag.com/?id=183>>. [Consultada el 20 Septiembre 2018].

Curriculum Vitae

Ing. María Daniela Ortiz Allende



DATOS PERSONALES

Celular: (044) 492 125 98 91
Buzón-e: ice_daniela@hotmail.com
Inglés: 80-100%
Licencia de manejo: Tipo A

OBJETIVO

“Mantenerme activa mental y profesionalmente en una organización comprometida, cumplir con los estándares de calidad y competitividad que me fueren marcados”.

FORMACIÓN ACADÉMICA

Centro de Idiomas UAZ 2010 – 2013	Lengua Extranjera
UAZ 2010 – 2015	Ing. Comunicaciones y Electrónica
UAZ 2016-2018	Maestría en Ciencias Nucleares con orientación en Ing. Nuclear
SPAMEX (Universitat Politècnica de Catalunya) 2018	Experto Universitario – Energías Renovables y Eficiencia Energética

- Diplomado “*Curso de Electrónica Básica Práctica*”. (UAZ 2013)
- Diplomado curso “*El congreso científico como instrumento de aprendizaje y formación del investigador*”. (SPAUAZ 2017)
- Diplomado curso “*Investigación y redacción de trabajos académicos en posgrado*”. (SPAUAZ 2017)
- Diplomado curso “*Introducción al método Monte Carlo*”. (SPAUAZ 2018)

- Diplomado curso “*LabVIEW básico*”. (SPAUAZ 2018)
- Diplomado curso “*La publicación científica*”. (SPAUAZ 2018)
- Diplomado curso “*La gestión bibliográfica una herramienta para la elaboración de trabajos de investigación*”. (SPAUAZ 2018)
- Diplomado curso “*El congreso científico como instrumento de comunicación y formación del investigador*”. (SPAUAZ 2018)

ASISTENCIA Y PARTICIPACIÓN EN FOROS Y CONGRESOS

Palacio de Convenciones (ZAC) 2009	Estrategias Contra el Cambio Climático- 28 y 29 de Septiembre del 2009.
CONCyE (ZAC) 2013	Congreso de Computación y Electrónica – 21,22 y 23 de Marzo del 2013.
COZCyT (ZAC) 2010-2016	Semana de la Ciencia y la Tecnología.
(AGS) 2017	17° Seminario de Investigación 24-27 de Mayo 2017.
SANTO DOMINGO (REP.DOM) 2017	XVII International Symposium on Solid State Dosimetry on September 26-30 2017 at Santo Domingo, Dominican Republic.
(MTY) 2017	LX CONGRESO NACIONAL DE FÍSICA 8-13 de Octubre 2017.
(ZAC) 2017	XXIV Semana Nacional de Ciencia y Tecnología 2017.
(ZAC) 2017	Jornadas de Investigación UAZ 2017.
(MERIDA) 2018	29 Congreso Anual Sociedad Nuclear Mexicana.

FORMACIÓN COMPLEMENTARIA:

- Estudio del idioma Inglés en el Instituto Washington. (Zacatecas)
- Sistema de Desarrollo y Agilidad de la Lectura y del Pensamiento Activo (DALPA,2008).
- Curso de Kumon (matemáticas aplicadas).

EXPERIENCIA PROFESIONAL:

Laboratorio de PDS y Plataformas Virtuales, UAIE –UAZ. (2014-2015)

- Auxiliar
- Asesorías
- Lab. De Procesamiento Digital de señales
- Plataformas Virtuales

Jefe Directo: Dr. Arturo Moreno Báez

Tortas ahogadas Alberto´s (2015-2016)

Restaurant:

- Trato y atención con el cliente
- Auxiliar en caja

Jefe Directo: Alberto Farias Montalban

Proyecto Social y Juvenil (2016)

- Asesorías académicas a todo público

Jefe Directo: Lic. Juan Ignacio Romo

Capacitador Asistente Electoral (2018)

- Trato y atención con funcionarios de casilla y votantes
- Ubicación, integración y funcionamiento de las mesas directivas de casilla
- Operación del Sistema de Información sobre el desarrollo de la Jornada Electoral (SIJE)
- Mecanismos de recolección y traslado del paquete electoral
- Auxiliar en el cómputo distrital

Jefe Directo: IEEZ - INE

Manejo de distintos Softwares de Ingeniería como lo son:

- Word
- Excel
- Power Point
- Programación
- EndNote
- Orcad
- LiveWire
- Matlab
- KiCad
- SigmaPlot

PRODUCTIVIDAD CIENTÍFICA

- **Trabajos presentados en congresos científicos**

1. ORTIZ-ALLENDE, M.D.; CANO-SÁNCHEZ, D. & VEGA-CARRILLO, H.R. (2017). Coeficiente de atenuación lineal de la cerveza para rayos g de 662 keV. XVII International Symposium on Solid State Dosimetry (ISSSD 2017). Santo Domingo, República Dominicana.
2. CANO-SÁNCHEZ, D.; AMARILLAS-SALIÁ, L.E; ORTIZ-ALLENDE, M.D.; & VEGA-CARRILLO, H.R. (2017). Visualización de partículas cargadas ionizantes. XVII International Symposium on Solid State Dosimetry (ISSSD 2017). Santo Domingo, República Dominicana.
3. ORTIZ-ALLENDE, M.D.; CANO-SÁNCHEZ, D. & VEGA-CARRILLO, H.R. (2017). Coeficiente de atenuación lineal de la cerveza. LX CONGRESO NACIONAL DE FÍSICA. Monterrey, Nuevo León.
4. ORTIZ-ALLENDE, M.D.; VÁZQUEZ-BAÑUELOS, J.; ESCALONA-LLAGUNO, M.I.; ALVARADO-QUINTERO, J.S.; CANO-SÁNCHEZ, D. & VEGA-CARRILLO, H.R. Capacidad de atenuación de los rayos gamma entre dos líquidos. Jornadas de Investigación UAZ – 2017; Zacatecas, Zac.
5. ESCALONA LLAGUNO MI; CAMPILLO RIVERA G.E.; ORTIZ-ALLENDE, M.D.; MARTÍNEZ-RENDÓN, A.E.; VÁSQUEZ-BAÑUELOS, J; & VEGA-CARRILLO, H.R (2017). Presencia de K-40 en alimentos para mascotas. Jornadas de Investigación UAZ – 2017; Zacatecas, Zac.
6. ORTIZ ALLENDE M.D.; MARTÍNEZ RENDÓN A.E.; ESCALONA LLAGUNO MI; HERNÁNDEZ-DÁVILA VM; VEGA-CARRILLO HR. Sistema de detección de radiación ionizante con diodo PIN. XXIX Congreso Anual de la Sociedad Nuclear Mexicana; Julio, 2018; Mérida, Yuc. México.

- **Artículos publicados *in-extenso***

1. ORTIZ-ALLENDE, M.D.; CANO-SÁNCHEZ, D. & VEGA-CARRILLO, H.R. Coeficiente de atenuación lineal de la cerveza para rayos g de 662 keV. ISSSD 2017 Proceedings. Vol. 3: 34-43 (2017).
2. CANO SÁNCHEZ, D.; ORTIZ ALLENDE, M.D.; AMARILLAS SALIÁ, L.E. & VEGA-CARRILLO, H.R. Visualización de partículas cargadas ionizantes ISSSD 2017 Proceedings. Vol. 2: 65-76 (2017).

3. ORTIZ-ALLENDE, M.D.; CANO-SÁNCHEZ, D. & VEGA-CARRILLO, H.R. (2017). Coeficiente de atenuación lineal de la cerveza. LX CONGRESO NACIONAL DE FÍSICA. Monterrey, Nuevo León.

4. MARTÍNEZ RENDÓN A.E.; CAMPILLO RIVERA G.E.; ORTIZ ALLENDE M.D; VEGA-CARRILLO, H.R. & LETECHIPÍA DE LEÓN C. (2018). Dosis Equivalente ambiental por fotones gamma y neutrones dentro de recintos habitacionales. Memorias del XXIX Congreso Anual de la Sociedad Nuclear Mexicana.

- **Artículos publicados en revistas internacionales**

1. SARMIENTO-ROSALES, S.; HERNÁNDEZ-DÁVILA, V.M.; GARCÍA-DURÁN, Á.; ESCALONA-LLAGUNO, M.I.; VEGA-CARRILLO, H.R.; ORTIZ-ALLENDE, M.D & ORTIZ-LÓPEZ, M. Analong section of a spectrometric system base on PIN diode.
[En proceso]

- **Premios y distinciones**

1. SARMIENTO-ROSALES, S.; HERNÁNDEZ-DÁVILA, V.M.; GARCÍA-DURÁN, Á.; ESCALONA-LLAGUNO, M.I.; VEGA-CARRILLO, H.R.; ORTIZ-ALLENDE, M.D & ORTIZ-LÓPEZ, M. Analong section of a spectrometric system base on PIN diode. XVIII International Symposium on Solid State Dosimetry (ISSSD 2018). Oaxaca, Oax., México.
[MEJOR TRABAJO DE INVESTIGACIÓN]

- **Conferencias**

1. “Atenuación de los rayos γ en líquidos”. XXIV Semana Nacional de Ciencia y Tecnología 2017. Instituto Universitario del Centro de México (UCEM).