

# DISEÑO DEL PROTOTIPO PORTATIL DE UN DETECTOR DE MUONES

María José Cristancho Vanegas



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

TUNJA

2022

# **Diseño del prototipo portátil de un detector de muones**

María José Cristancho Vanegas

## **DOCENTES TUTORES**

Profesor Jossitt Williams Vargas Cruz, PhD.

Ing. Carlos Alberto Cardona Coy

Ing. José Ricardo Casallas Gutiérrez

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

TUNJA

2022

*Las ideas expresadas en este documento son responsabilidad única de la autora, la universidad Santo Tomás es ajena a cualquier cargo que pueda tener el documento.*

## Tabla de contenido

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>
<b>2. JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>9</b>
<b>3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>10</b>
<b>4. OBJETIVOS.....</b>	<b>11</b>
4.1. OBJETIVO GENERAL .....	11
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	11
<b>5. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>12</b>
<b>6. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>14</b>
6.1. RAYOS CÓSMICOS .....	14
6.2. MUONES .....	15
6.3. DETECCIÓN DE MUONES .....	17
6.3.1. <i>Detector Cherenkov.....</i>	<i>17</i>
6.3.2. <i>Detectores de Centelleo .....</i>	<i>18</i>
6.4. POLÍMERO CENTELLEANTE .....	20
6.5. FOTOMULTIPLICADOR DE SILICIO SiPM (SILICON PHOTOMULTIPLIER).....	21
6.5.1. <i>SiPM MICROFC-SMTPA-60035 .....</i>	<i>24</i>
6.6. AMPLIFICADOR OPERACIONAL .....	26
6.6.1. <i>Configuración inversora .....</i>	<i>27</i>
6.6.2. <i>Configuración no inversora .....</i>	<i>28</i>
6.6.3. <i>Configuración sumadora.....</i>	<i>28</i>
6.6.4. <i>Configuración diferencial .....</i>	<i>30</i>
6.6.5. <i>Circuito detector de picos .....</i>	<i>31</i>
6.6.6. <i>Amplificador AD8001 .....</i>	<i>31</i>
6.7. MICROCONTROLADORES .....	33
6.7.1. <i>ARDUINO .....</i>	<i>34</i>

6.8.	DEFINICIONES DE INSTRUMENTACIÓN .....	37
6.8.1.	<i>Error</i> .....	37
6.8.2.	<i>Precisión</i> .....	37
6.8.3.	<i>Exactitud</i> .....	38
<b>7.</b>	<b>DISEÑO METODOLÓGICO</b> .....	<b>39</b>
<b>8.</b>	<b>DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE DEL DISPOSITIVO</b> .....	<b>41</b>
8.1.	ACOPLAMIENTO DEL SiPM Y EL POLÍMERO CENTELLEANTE.....	42
8.2.	CIRCUITO PARA EL SiPM.....	44
8.3.	ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL.....	46
8.3.1.	<i>Diseño del amplificador</i> .....	46
8.3.2.	<i>Diseño del detector de picos</i> .....	48
8.4.	CIRCUITO DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS .....	50
8.4.1.	<i>Conexión del display LCD (Lyquid-crystal display)</i> .....	51
8.5.	CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN DEL SISTEMA .....	52
8.6.	DISEÑO Y MONTAJE DE LOS CIRCUITOS IMPRESOS.....	57
	<i>Diseño del circuito impreso de la fuente</i> .....	57
8.6.1.	<i>Diseño del circuito impreso del fotomultiplicador de silicio</i> .....	58
8.6.2.	<i>Diseño del circuito impreso de la etapa de acondicionamiento de la señal</i> .....	58
8.6.3.	<i>Diseño del circuito impreso de la etapa de adquisición de datos</i> .....	60
8.7.	PRUEBAS DE LOS CIRCUITOS DE HARDWARE DEL PROTOTIPO.....	60
<b>9.</b>	<b>PROGRAMACIÓN DE LOS ALGORITMOS DE ADQUISICIÓN Y VISUALIZACIÓN DE DATOS</b> .....	<b>66</b>
9.1.	ALGORITMO PROGRAMADO EN ARDUINO .....	67
<b>10.</b>	<b>PRUEBAS Y RESULTADOS</b> .....	<b>75</b>
10.1.	PRUEBAS INICIALES.....	75
10.2.	CALIBRACIÓN DEL PROTOTIPO .....	81
10.3.	RESULTADOS.....	87

10.3.1.	<i>Error y precisión del dispositivo</i> .....	89
10.3.2.	<i>Exactitud del dispositivo</i> .....	89
<b>11.</b>	<b>CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS</b> .....	<b>92</b>
<b>12.</b>	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>94</b>

## 1. Introducción

Los muones son partículas elementales masivas cargadas eléctricamente y que poseen una masa aproximadamente 207 veces más grande que la masa de los electrones. Estas partículas se encuentran presentes, hasta el momento, en los rayos cósmicos, los cuales se generan desde el espacio exterior y llegan a la tierra de manera constante y masiva. Cuando los rayos cósmicos traspasan la atmósfera terrestre se genera una reacción entre los átomos de ésta y las partículas cósmicas, que da como resultado una lluvia de partículas secundarias mejor conocida como el fenómeno de Cascada Atmosférica Extensa (CAE) [1].

El estudio de los rayos cósmicos inició a comienzos del siglo XX cuando en 1912 Víctor Hess, un físico austriaco, realizó un experimento con electroscopios quien descubrió que estos instrumentos podían medir partículas cargadas, incluso si estaban fuera de alcance de las fuentes de radioactividad conocidas en ese entonces. Hess descubrió en su experimento que esta ionización provenía del espacio exterior cuando realizó pruebas con tres electroscopios diferentes, a alturas de sobre los 5000 metros. Descubrió que mientras más ascendía, el nivel de ionización aumentaba [1].

Actualmente las técnicas de detección de muones se han simplificado y a su vez han ganado suma importancia en áreas como la meteorología, estudios geológicos, ingeniería, y sobre todo en los campos astronómicos y de la física de energías. Esto expandió las posibilidades de investigación no solo sobre lo que sucede con los rayos cósmicos en la tierra, sino también lo que sucede con ellos desde su origen en el espacio, lo que permite realizar mapeos del universo a partir de la cantidad de energía cuantificada.

En Latinoamérica existe un proyecto de investigaciones de astropartículas que es el proyecto LAGO (Latin American Giant Observatory) [2], este es el más importante y más grande en cuanto a estudios de rayos cósmicos en latinoamericana, su objetivo, es generar una red de detectores de muones de altura a nivel global. Los países que conforman este proyecto son Colombia, Ecuador, Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Perú, Guatemala, México y actualmente cuentan con apoyo de España. Este proyecto inició en el 2005 en Argentina con el fin de implementar una red de detectores instalados en las montañas para estudiar

partículas gama y estudiar la actividad solar mediante el flujo de los rayos cósmicos. Hasta ahora se han implementado cinco detectores de muones de altura, cada uno en un país diferente, y se cuentan con diferentes detectores de baja altura en cuatro países diferentes incluido Colombia [2].

En este trabajo se mostrará el diseño y la implementación de un detector portátil de muones, en el cual se implementaron dispositivos electrónicos de detección de fotones para emplear el método de detección por medio de centelleo, ya que es el más práctico en cuanto tamaño y precio y también permite un tratamiento y visualización de datos de formas sencillas como por medio de un Arduino.

## 2. Justificación

El estudio de rayos cósmicos permitió que este tipo de radiación no se quedara únicamente en su observación y contemplación por el hecho de venir del espacio, al estar presente en la tierra de forma prácticamente permanente su presencia se ha podido aprovechar para diversos estudios que involucran actividad científica de alto rango hasta estudios que involucran situaciones más simples y cotidianas. Un ejemplo de esto es un proyecto del Ministerio Agropecuario y Forestal de Sudán, en donde un grupo de científicos desarrolló un método de medición de la humedad del suelo en cultivos a partir del estudio de los neutrones de los rayos cósmicos por medio de una sonda detectora [3]. El estudio de rayos cósmicos ofrece alternativas hacia diferentes tipos de problemáticas y es preciso tener en cuenta que este estudio aún no culmina, a medida que pasa el tiempo se encuentran cada vez más opciones de aprovechar la energía cósmica presente en el planeta por lo que, en consecuencia, este tema en la física de partículas.

Los rayos cósmicos a pesar de estar compuestos de todos los tipos de partículas elementales encontradas en el espacio, se destacan principalmente por los muones, esto se debe a que los muones son las partículas más fáciles de detectar y de analizar debido a su elevada carga eléctrica, sin embargo, es importante tener en cuenta que el instrumento detector de muones es particularmente costoso y su producción no es de tipo numerosa, es por eso que se plantea el diseño y el desarrollo de un prototipo de detector de rayos cósmicos con dispositivos electrónicos relativamente comunes y prácticos que pueda cumplir la función de detectar niveles de carga de los muones y así poder dejar abiertas posibles mejoras que podrían llegar a facilitar el involucrar a más participantes en el estudio de detección de partículas cósmicas ya que se brindaría una mayor accesibilidad al equipamiento necesario permitiendo que el nivel de investigación pueda crecer de manera más versátil ya que estaría a disposición de instituciones y/o proyectos que no necesariamente cuenten con un financiamiento significativamente alto.

Además, el estudio de rayos cósmicos en el sector cundiboyacense es pionero, ya que ninguna institución ha dedicado esfuerzos en esta dirección.

### 3. Planteamiento del problema

El desarrollo de detectores de muones ha aumentado y evolucionado de una manera óptima, ya que se han encontrado nuevas formas de detección a partir de elementos semiconductores, elementos centelleantes con nuevos sensores más sensibles, precisos y estandarizados, facilitando cada vez más el análisis de datos y la visualización de la actividad energética de los muones. En consecuencia, se han descubierto cada vez más aplicaciones de los rayos cósmicos en diferentes áreas haciendo uso de la presencia de estos en la tierra.

A pesar de que el estudio de rayos cósmicos y muones es un tema bastante atractivo y prometedor para muchas áreas de la ciencia y la tecnología, es un estudio que se ve bastante limitado debido a que la detección de muones requiere de ciertas etapas y de ciertos dispositivos de detección caracterizados para dicho trabajo, tales dispositivos actualmente demandan un elevado presupuesto, adquirir un detector para un observatorio, para una universidad o para un proyecto cualquiera resulta complicado debido a los costos de los equipos y además de eso también por el lugar en donde se fabriquen y están a la venta ya que no son herramientas que se encuentren en establecimientos comunes.

En países como Colombia, la importación de un equipo detector de muones representa un aumento en el costo de compra ya que no hay un proveedor nacional de dichos aparatos, provocando en el caso de ciertas instituciones el retraso o incluso el total impedimento de la realización de investigaciones que involucren partículas cósmicas. A parte cabe resaltar que se presenta un grado de desinterés en cuanto a desarrollar los equipos en vez de comprarlos a pesar de que el país hace parte del proyecto latinoamericano más importante en cuanto a estudio de partículas cósmicas. Con base a estos planteamientos surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo diseñar y caracterizar el prototipo portátil de un detector de muones de bajo costo con Arduino?

## 4. Objetivos

### 4.1. Objetivo General

Diseñar e implementar el prototipo portátil de un detector de muones de bajo costo con Arduino con el fin de obtener una herramienta para iniciar el estudio de astropartículas en la región cundiboyacense.

### 4.2. Objetivos Específicos

- Identificar la teoría de la física y de la electrónica del prototipo del detector de muones para tener un entendimiento de su funcionamiento teórico.
- Diseñar los circuitos necesarios para el hardware del prototipo para obtener una señal analógica
- Implementar un algoritmo en un microcontrolador para obtener datos numéricos de la información de la señal analógica y exportarlos para facilitar su análisis.
- Analizar los datos obtenidos de las pruebas del prototipo para determinar su estado de funcionamiento

## 5. Estado del arte

En la actualidad se presentan varios estudios y proyectos sobre los rayos cósmicos y sus formas de detección; un claro e importante ejemplo es todo lo que rodea al proyecto LAGO, (Latin American Giant Observatory), el cual es un observatorio de astropartículas que funciona a nivel global y que funciona a partir de la construcción e instalación de detectores de partículas en diferentes lugares y a latitudes que van desde México hasta la Antártida y a altitudes que van desde el nivel del mar hasta 5000 metros más arriba [4].

El Proyecto LAGO dio inicio en el 2005 en Argentina en la región de Bariloche en donde se inició con la adaptación de un prototipo de un detector para el Observatorio Pierre Auger, en consecuencia, se construyó un detector de altura en Bolivia en Chacaltaya en el 2006, posteriormente Ecuador y México se unieron al proyecto con detectores de baja y de alta altura, hasta llegar a once países en total incluyendo el apoyo de España, y lógicamente a medida que se van integrando detectores el estudio se amplía [5].

Uno de los proyectos publicados por la colaboración LAGO es la del proyecto del Diseño y Caracterización de un Detector de Muones Combinado, realizado en la Universidad de Buenos Aires en el 2019 y dirigido por uno de los colaboradores de LAGO en Argentina, el doctor Sergio Dasso, en donde se tomaron dos materiales centelladores diferentes y se acoplaron al modelo de un detector comercial de rayos cósmicos desarrollando un método híbrido de detección de muones para encontrar coincidencias y diferencias entre los dos materiales utilizados para la detección [6].

En Ecuador, en la ciudad de Quito en la Escuela Politécnica Nacional, a raíz de la participación del país en LAGO se desarrolló el proyecto de Construcción de un Detector de Muones Portátil destinado para los laboratorios de dicha universidad. En este trabajo se desarrolló un detector de muones a partir de un cristal de silicio, un sensor centellador y una placa microcontroladora, el cual entrega los datos de los muones medidos de forma numérica en una pantalla instalado en el mismo dispositivo y a su vez en una tarjeta SD para poder realizar un análisis de datos en ordenadores u otros dispositivos [7].

Así en Latinoamérica la influencia de LAGO generó que varios estudiantes y profesionales profundizaran en el estudio de Rayos cósmicos desarrollando diferentes y nuevos métodos y equipos de detección. En Colombia se pueden apreciar los trabajos realizados en la ciudad de Bucaramanga bajo la dirección del Doctor Luis Núñez el cual es el director del proyecto en el país. Entre estos trabajos se puede encontrar el del Diseño e Implementación de un Sistema de Adquisición de Datos para Muones, desarrollado en la universidad de los andes en Bogotá, en el cual se plantea un diseño electrónico de un detector de muones cuyos datos se observan de manera gráfica en un osciloscopio y se comparan con base a diferentes simulaciones realizadas de los posibles datos reales de la cantidad de muones presentes en el área en el que el detector se puso a prueba [8].

## 6. Marco teórico

### 6.1. Rayos Cósmicos

En el planeta tierra se puede encontrar la presencia de diferentes tipos de radiación, sin embargo, esto no quiere decir que todas las fuentes provengan del planeta, parte de esta energía viene de afuera de la atmosfera terrestre. Esto fue comprobado en 1912 gracias a un experimento realizado por el físico austriaco Víctor Franz Hess.

El experimento que dio como resultado el descubrimiento de los rayos cósmicos fue en su mayoría accidental ya que el objetivo principal de la realización del experimento era diferente. En ese entonces se sabía que existían fuentes de radiación terrestres y se utilizaba el electroscopio para medir la energía que emanaba de esas fuentes, sin embargo en ciertas ocasiones se veía que dichos aparatos se cargaban de manera espontánea sin que hubiera una fuente de radiación conocida lo suficientemente próxima, debido a esto, Teodoro Wulf, un físico jesuita de origen alemán decidió realizar un experimento en el que llevo un electroscopio a 300 metros por encima del suelo, en lo más alto de la torre Eiffel, ahí Wulf descubrió que el electroscopio estaba midiendo cargas de radiación mucho menos intensas que en el suelo, por lo que la teoría de que una fuente terrestre de radiación desconocida estaba presente fue en su momento no muy bien recibida [9]. Sin embargo, Víctor Hess quiso realizar dicho experimento, pero a una altura mucho mayor del suelo y arregló 10 vuelos en globo aerostático llevando consigo tres electroscopios diferentes para medir la ionización del aire.

En uno de los diez vuelos, el 7 de agosto de 1912, Hess alcanzó los 5000 metros sobre el suelo y tomo los datos pertinentes con los electroscopios. El resultado fue que a esa altura se encontraba presente una radiación 16 veces mayor que la radiación que podía medirse desde el suelo, lo que lo llevó a concluir que lo que generaba las cargas espontaneas de los electroscopios no era una fuente de radiación presente en el suelo o en el aire, era una fuente de radiación que venía de más allá de la atmósfera terrestre. Su

conclusión textual fue “Los resultados de estas observaciones parecen explicarse mejor por la existencia de una radiación de gran poder penetrante entrando en nuestra atmósfera” [9].

A partir de este descubrimiento la radiación proveniente del espacio comenzó a estudiarse más a fondo, determinando que toda la energía proveniente de ahí es la actualmente llamada radiación cósmica. Debido a esto, es posible afirmar que los rayos cósmicos son las partículas que constantemente bombardean la tierra desde todos los ángulos y direcciones del espacio exterior, dichas partículas son cargas negativas, positivas, neutrales y hasta núcleos atómicos completos e incluso algunas de estas partículas tienen cargas energéticas mucho mayores a las de cualquier otra partícula que se haya descubierto. A parte de sus propiedades de carga, estas partículas se mueven a una velocidad bastante cercana a la de la luz, lo que hace que cuando atraviesan la atmósfera llegan a la tierra generando un fenómeno llamado Cascada de Atmósfera Extensa [7].

Otra característica de todas las partículas que comprenden la radiación cósmica, es que son partículas elementales subatómicas, esto quiere decir que son partículas de tamaño menor a un átomo y que cuya composición no está hecha por otras partículas. Dentro de las partículas elementales que están presentes en los rayos cósmicos se pueden identificar neutrinos, fotones, electrones, muones, neutrones y un porcentaje de piones también [7].

## **6.2. Muones**

Los muones como se mencionó anteriormente, hacen parte de las llamadas partículas elementales subatómicas, pertenecen específicamente a la segunda generación de la familia de los leptones y su símbolo es  $\mu^-$ . Estas partículas poseen una masa aproximadamente 207 veces mayor a la de un electrón y se encuentran únicamente dentro de los rayos cósmicos (con excepción de ciertos tipos de aceleradores partículas), y de todas las partículas que los componen, los muones son característicamente los más sencillos de detectar debido a que componen el mayor porcentaje de partículas cósmicas que llegan al nivel del mar debido al fenómeno de la Cascada de Atmosférica Extensa [10].

La Cascada Atmosférica Extensa se genera en el instante en el que los rayos cósmicos interactúan con la atmósfera terrestre, específicamente con moléculas de aire, es en ese momento en el que de los rayos cósmicos se desprende un chorro de diferentes tipos de partículas que cae masivamente a la tierra, entre estas se encuentran componentes muónicos, (que son tanto muones como su antipartícula  $\mu^+$ ), neutrinos, electrones, protones, neutrones etc. [10].

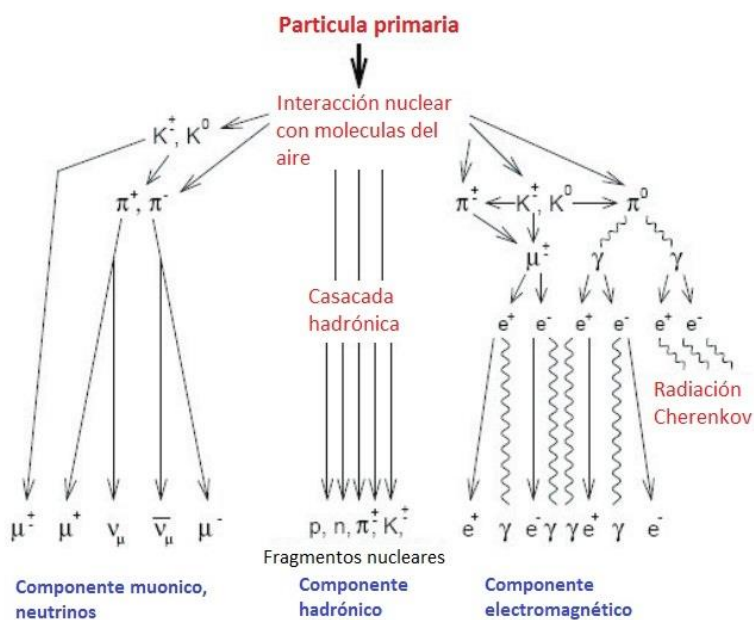


Figura 1: Generación de la Cascada Atmosférica Extensa a partir de la interacción de un rayo cósmico primario con moléculas de aire [11]

Los muones cuentan con una cantidad de energía que puede variar entre el orden de los GeV (Gigaelectronvoltios) hasta los PeV (Petaelectronvoltios) y tienen una vida media de aproximadamente de 2.2  $\mu$ s, lo que los clasifica como partículas inestables. Casi en el instante en el que los muones entran en la atmósfera se presenta una pérdida de energía que responde a la cantidad de materia que deben atravesar en su trayecto y aproximadamente dicha pérdida de energía es de 2GeV [10]. Teniendo esto en cuenta, es lógico que los niveles de energía de los muones no sean iguales en todas las partes del planeta, como lo había probado anteriormente Hess, el nivel de muones medido aumenta o disminuye en cuanto a la altura a la que se encuentren los detectores.

### **6.3. Detección de muones**

Desde el descubrimiento de estas partículas han surgido una gran cantidad de experimentos para poder detectar muones y facilitar su estudio y conocimiento, ya que cada vez más se generan teorías e interrogantes que giran alrededor de las astropartículas. Conforme se van desarrollando nuevos métodos la complejidad disminuye o aumenta dependiendo del resultado que se desee obtener, estos métodos pueden variar desde el uso de agua, hasta de cristales.

#### ***6.3.1. Detector Cherenkov***

El detector Cherenkov se caracteriza por utilizar agua como medio principal para la detección de radiación. Estos detectores están compuestos por un tanque de material opaco que impide la filtración de luz, sellado de manera hermética de modo que no entre ni salga aire de él y que esta lleno de una sustancia centelleante, en la mayoría de los casos la sustancia es agua ultrapura, además el interior del tanque está completamente cubierto de un material dispersivo y cuenta con un tubo fotomultiplicador en la parte interna superior del tanque cuya función es la detección de la luz producida por las partículas cósmicas [12].

Esencialmente este tipo de detectores son usados para el estudio de la radiación Cherenkov, que es uno de los componentes que se desprenden de la Cascada Atmosférica Extensa, por lo que el agua ultrapura es de vital importancia ya que si existe algún tipo de impureza en el líquido centelleante la radiación Cherenkov puede chocar contra masas que generarían una dispersión de la energía y un porcentaje de pérdida [12]. El detector funciona de tal forma en la que cuando una partícula cargada cruza a través del líquido ultrapuro se genera un centelleo de luz y ésta es detectada por los tubos fotomultiplicadores que se encuentran dentro del tanque y es cuantificada para su posterior estudio en un ordenador, y para que esto se logre la estructura física del detector es fundamental, debido a que las paredes internas del tanque están cubiertas de material reflectante, la luz generada por la interacción de las partículas y el agua rebota dentro de todo el tanque a la velocidad suficiente para el tubo fotomultiplicador detecte la luz y multiplique las cargas eléctricas de las partículas.

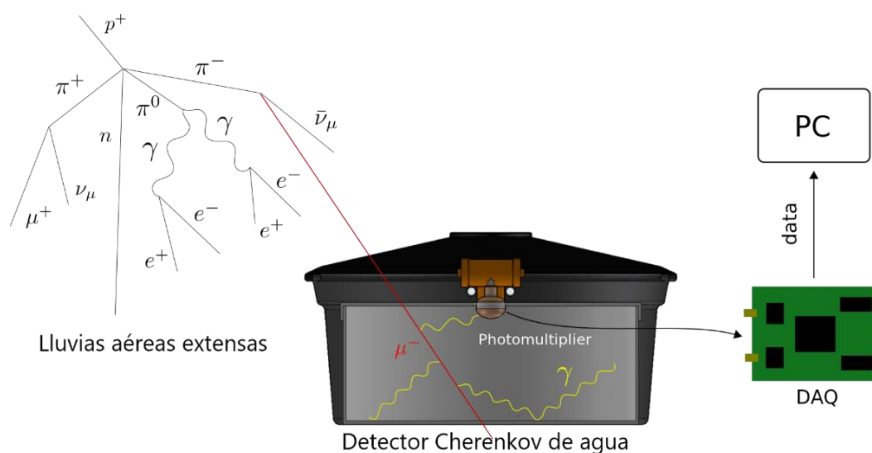


Figura 2: Funcionamiento de un detector Cherenkov [13]

Lo que sucede con el detector Cherenkov es que no se enfoca únicamente en la detección de muones, como se puede observar en la figura 2, en las partículas que caen en la lluvia de la radiación se encuentran también electrones, protones y en especial fotones ( $\gamma$ ), eso hace parte de las razones por las cuales este detector es de los más usuales en laboratorios de astropartículas. En el observatorio Pierre Auger de Argentina se encuentra un detector Cherenkov que cuenta con 1600 tanques cilíndricos y cuenta con 12000 litros de agua ultrapura y es uno de los detectores más importantes del proyecto LAGO [14].

### 6.3.2. Detectores de Centelleo

El detector de centelleo es un detector cuyo principio de funcionamiento es relativamente similar al del detector Cherenkov; utiliza un elemento centelleante por el cual cruzan las partículas cósmicas hacia un multiplicador de cargas eléctricas para poder realizar su posteriori cuantificación y análisis. Sin embargo, en lo que difieren los dos detectores es que mientras el Cherenkov está compuesto de tanques de agua, varios tubos fotomultiplicadores y es considerablemente grande, el de centelleo es más compacto, y utiliza un polímero centelleante unido directamente a un sensor fotomultiplicador [15].

En este detector, los muones atraviesan el cristal centellador y emite una pequeña luz en el momento de su interacción, esa señal luminosa es detectada con un fotomultiplicador, por esta razón el polímero plástico se cubre con algún material hermético dejando únicamente descubierta la sección en la que el

fotodetector está conectado [15]. La eficiencia de estos detectores depende mucho del tamaño del polímero centellador y del fotomultiplicador junto con el área que se deje libre del material hermético unida con el fotomultiplicador, algunos detectores cuentan con más de un centellador y de un fotomultiplicador acoplados para incrementar la cantidad de muones detectados y llevarlos directo a una placa cuya función es hacer una conversión AD (análoga – digital).

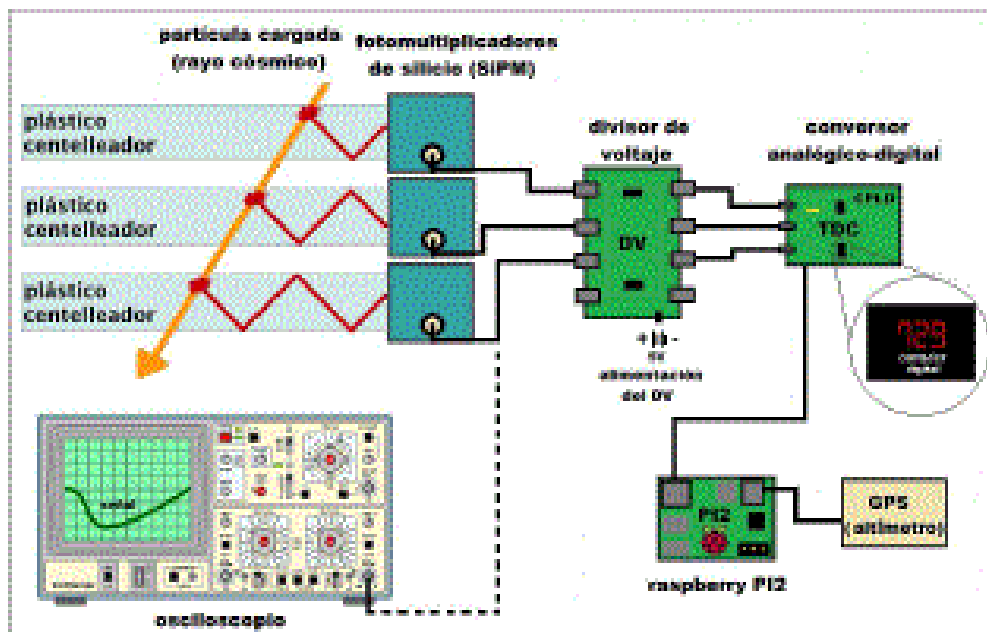


Figura 3: Esquema de la estructura de un detector de centelleo [16]

En la figura 3 se puede observar un esquema básico de un detector de centelleo, en ellos generalmente se encuentran uno o más polímeros plásticos centelladores (en este caso 3), conectados a tres fotomultiplicadores, específicamente se usan sensores fotomultiplicadores de silicio (SiPM) los cuales pueden emitir la señal lumínica que cruza por los polímeros a una alta frecuencia. De ahí la señal de los muones puede ser observada por un osciloscopio tomando la señal directa de la salida del SiPM y a su vez puede ser dirigida hacia un convertor AD [17]. Para detectores de alta precisión utilizados en observatorios se utilizan tarjetas tipo QuarkNet DAQ las cuales hacen una conversión análoga digital y a su vez el tratamiento de la señal de una forma más eficiente y precisa para entregar los datos numéricos necesarios

en estudios avanzados, sin embargo con microcontroladores más comunes como un PIC, una Raspberry o un ARDUINO hacer la conversión AD es posible también, los nuevos datos digitales se comunicarían a un computador o directamente a un display para hacerlos visibles [16].

Debido a la facilidad de manipulación de los componentes que utilizan los detectores de centelleo, se escogió un modelo simplificado de estos detectores para la realización del prototipo que se tiene como objetivo general.

#### **6.4. Polímero centelleante**

Los centelladores son elementos que fueron usados desde un principio para investigaciones en el área nuclear, desde 1944 las herramientas centellantes dieron resultados óptimos de detección de radiación ionizante, inició con fosforo acoplado con tubos fotomultiplicadores y su uso continuó perfeccionándose hasta llegar a polímeros centelleantes más compactos, fáciles de utilizar y con características específicas para diferentes tipos de detecciones [18]. Debido a que son elementos fabricados químicamente con un objetivo puntual, no son objetos que puedan modificarse físicamente con facilidad (reducir su tamaño, su grosor, pulir etc.) ya que puede afectar directamente su eficiencia a la hora de la interacción con las partículas a detectar.

La fabricación de los polímeros puede realizarse en un laboratorio de investigación dependiendo con base a la función específica que se quiera cumplir, o puede adquirirse bajo referencias industriales las cuales ya están estandarizadas para diferentes funciones. Saint – Gobain Crystals es una industria que fabrica polímeros centelleantes con diferentes materiales para diferentes tipos de radiaciones, maneja elementos compuestos de forma orgánica como inorgánica. Dentro de los centelladores orgánicos que ofrece esta industria se encuentran los sólidos plásticos de la serie BC-400, los cuales se caracterizan por tener una salida de luz rápida, lo que los hace adecuados para mediciones de partículas inestables con una vida media muy fugaz. En el conjunto de las referencias de los plásticos BC-400 se encuentran varias que son aptas para la detección de partículas provenientes del espacio:

- BC-400: Es el centellador de uso más general, sus propiedades químicas y físicas permiten que los rayos gamma, alfa, beta y los neutrones crucen por su estructura generando los destellos de luz necesarios para poder detectar estas partículas en específico. La longitud de onda de la luz emitida por este polímero es de 423nm [19].
- BC-404: Este polímero cumple con casi las mismas funciones que el de su referencia anterior, sin embargo, su característica especial es que ofrece una constante de tiempo de 1.8ns lo cual facilita el conteo rápido de partículas alfa y beta. La longitud de onda de la luz emitida por este polímero es de 408 nm [19].
- BC-408: La composición de este plástico le da las características necesarias para lograr la interacción necesaria con más partículas a parte de las que el BC-400 puede alcanzar, este centellador logra interacción con partículas cargadas como muones, neutrinos, protones y electrones. La longitud de onda de la luz emitida por este polímero es de 425 nm [19].
- BC-412: Esta referencia ofrece las mismas funciones que el BC-408, solo que tiene una longitud de atenuación de las señales lumínicas mayor, lo que permite que la detección y el estudio sea más precisos. La longitud de onda de la luz emitida por este polímero es de 434nm [19].

Según las características del conjunto de polímeros plásticos que sugiere Saint – Gobain Crystals para la detección de partículas cósmicas, el BC-408 es el más adecuado para la implementación del detector ya que a partir de esa referencia es que los muones interactúan de manera adecuada y debido a que solo es un prototipo, aún no se necesita un centellador con longitudes de atenuación extensas ya que son características que no se necesita tener en cuenta por el momento.

### **6.5. Fotomultiplicador de silicio SiPM (Silicon PhotoMultiplier)**

Las detecciones que se realizan a partir de pulsos lumínicos requieren de un fotomultiplicador . Desde los orígenes de la detección de radiación se han utilizado tubos fotomultiplicadores, y desde entonces

han continuado presentes en los procesos de detección, sin embargo, el uso de estos dispositivos no es el más práctico en algunos casos debido a su costo, a su tamaño y a su manipulación por lo que para proyectos más compactos, económicos o más simples se ha optado por el desarrollo de fotomultiplicadores menos complejos.

Los fotomultiplicadores de silicio conocidos por sus siglas SiPM han funcionado como el reemplazo ideal de los tubos fotomultiplicadores, se han desarrollado de tal forma que su tamaño puede variar según la necesidad sin siquiera sobrepasar las dimensiones de un circuito integrado, además el consumo de energía de estos es significativamente menor ya que a diferencia de los tubos que requieren de un voltaje de polarización en el orden de kilovoltios, los SiPM se polarizan a un voltaje de 24V a 27V [20]. Estos dispositivos se caracterizan por tener una alta sensibilidad y un tiempo de respuesta muy corto debido a su composición ya que consiste en el acople en paralelo de fotodiodos de avalancha [8].

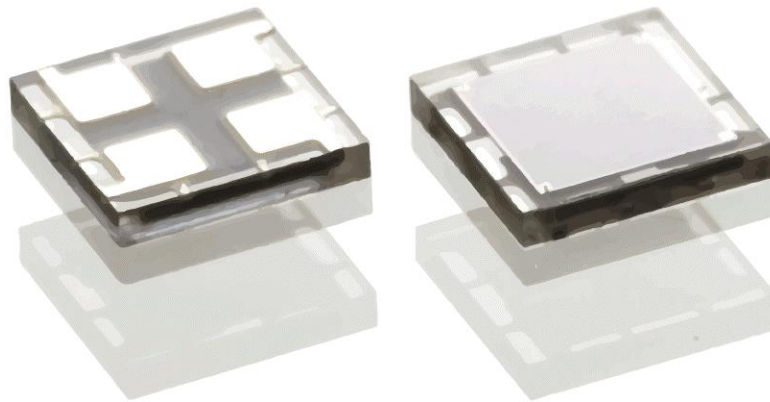


Figura 4: Fotomultiplicador de silicio SiPM [21].

Los fotodiodos conforman cada uno una micro celda super sensible, las cuales tienen dimensiones que varían aproximadamente entre  $10\mu m^2$  y  $100\mu m^2$  y se almacenan en áreas de silicio cuya área esta entre  $1mm^2$  y  $6mm^2$ , esto dependiendo de la necesidad de detección y precisión [8]. El funcionamiento de los fotodiodos (fotodiodos de avalancha en modo Geiger, GM-APD) se explica con un circuito equivalente de GM-APD, el cual es un arreglo sencillo de un condensador, un interruptor y dos resistencias.

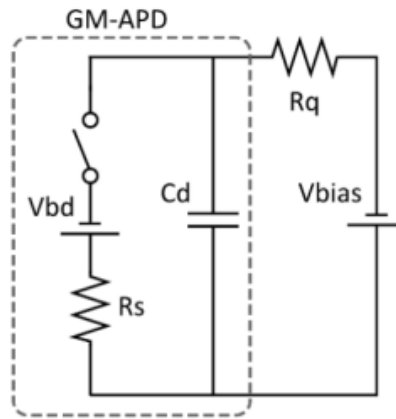


Figura 5: Circuito equivalente de una serie GM-APD [22].

En la figura 5 se puede observar el circuito equivalente de un GM-APD, en este caso el condensador existente representa la capacitancia misma que tiene el fotodiodo en polarización inversa,  $R_s$  corresponde a la resistencia que tiene el silicio y  $R_q$  es la resistencia de quenching (resistencia de fluorescencia) [8]. El funcionamiento se explica básicamente que cuando el circuito GM-APD está inactivo, el fotodiodo presenta una polarización inversa que se representa por medio de la siguiente ecuación:

$$V_b = V_{bd} + V_{ov} \quad (1) [8]$$

En la ecuación 1 se tiene que  $V_b$  es igual al voltaje de polarización de todo el SiPM,  $V_{bd}$  corresponde al voltaje mínimo que se necesita para producir la avalancha, y  $V_{ov}$  es el voltaje que excede al voltaje mínimo necesario. El circuito se activa cuando un fotón interactúa con el SiPM, por medio del efecto fotoeléctrico, en ese momento el switch del circuito equivalente se cierra y el capacitor genera una descarga del voltaje  $V_{bias}$  que pasa por  $R_s$  hacia el voltaje de polarización del fotomultiplicador; en esta interacción es cuando se produce la avalancha multiplicadora generando a su vez una corriente que es atenuada por la resistencia del silicio para que posteriormente el circuito se cierre nuevamente para recibir a un nuevo fotón [8]. Para que este procedimiento suceda con muones es necesario el acople del fotomultiplicador de silicio con el plástico centellador por el que los muones pueden incidir para que lleguen a las micro celdas del SiPM y activen los fotodiodos, sin embargo la señal que emite el sensor no es lo suficientemente grande

para poder hacer un análisis adecuado, por lo que es sumamente necesario que la salida del fotomultiplicador esté conectada a un amplificador operacional que pueda amplificar la señal a la frecuencia que la emite el sensor.

### 6.5.1. SiPM MICROFC-SMTPA-60035

Según Saint – Gobain Crystals, el fotomultiplicador que funciona mejor con el plástico BC-408 es un SiPM de la serie C, el MicroFC-SMTPA-60035 pertenece a esa serie y es el más práctico en cuanto a pruebas rápidas de obtención de datos, esto se debe a que SMTPA hace referencia a que la matriz de silicio viene soldada directamente a una placa PCB adaptadora de pines la cual facilita la conexión a sondas, protoboards y conectores sencillos ya que no necesita ningún tipo de soldadura. Esta referencia no puede optimizar el tiempo de respuesta de los datos que se detectan, así que el rendimiento de temporización será fijo en todo momento en el que esté en uso [23].



Figura 6: SiPM MicroFC-SMTPA-60035 [23].

Como se muestra en la figura 6, éste SiPM está disponible en tres tamaños de la matriz de silicio diferentes: 1mm, 3mm y 6mm, dependiendo del tamaño del área, el tamaño de las micro celdas varía de tal forma que independientemente del tamaño del área de la matriz el SiPM funcione de igual forma en sus tres presentaciones.

Sensor Size	Microcell Size	Parameter (Note 1)	Overvoltage	Min.	Typ.	Max.	Units
1 mm	10 $\mu$ , 20 $\mu$ , 35 $\mu$	Breakdown Voltage (Vbr) (Note 3)		24.2		24.7	V
3 mm	20 $\mu$ , 35 $\mu$ , 50 $\mu$						
6 mm	35 $\mu$						
1 mm	10 $\mu$ , 20 $\mu$ , 35 $\mu$	Recommended overvoltage Range (Voltage above Vbr) (Note 2)		1.0		5.0	V
3 mm	20 $\mu$ , 35 $\mu$ , 50 $\mu$						
6 mm	35 $\mu$						
1 mm	10 $\mu$ , 20 $\mu$ , 35 $\mu$	Spectral Range (Note 4)		300		950	nm
3 mm	20 $\mu$ , 35 $\mu$ , 50 $\mu$						
6 mm	35 $\mu$						
1 mm	10 $\mu$ , 20 $\mu$ , 35 $\mu$	Peak Wavelength ( $\lambda_p$ )			420		nm
3 mm	20 $\mu$ , 35 $\mu$ , 50 $\mu$						
6 mm	35 $\mu$						

Figura 7: Tabla de parámetros de rendimiento de la hoja técnica del SiPM MicroFC-SMTPA-60035 [23]

Según la hoja técnica del fabricante (Osemi), el SiPM funciona con un rango de voltaje de polarización entre 24.2V y 24.7 más un rango de sobrevoltaje recomendado entre 1V y 5V, trabaja con un rango espectral entre 300nm y 900nm y una longitud de onda máxima de 420 nm, sin importar el tamaño del área del silicio, su funcionamiento depende directamente al rango de voltaje con el que se polarice [23].

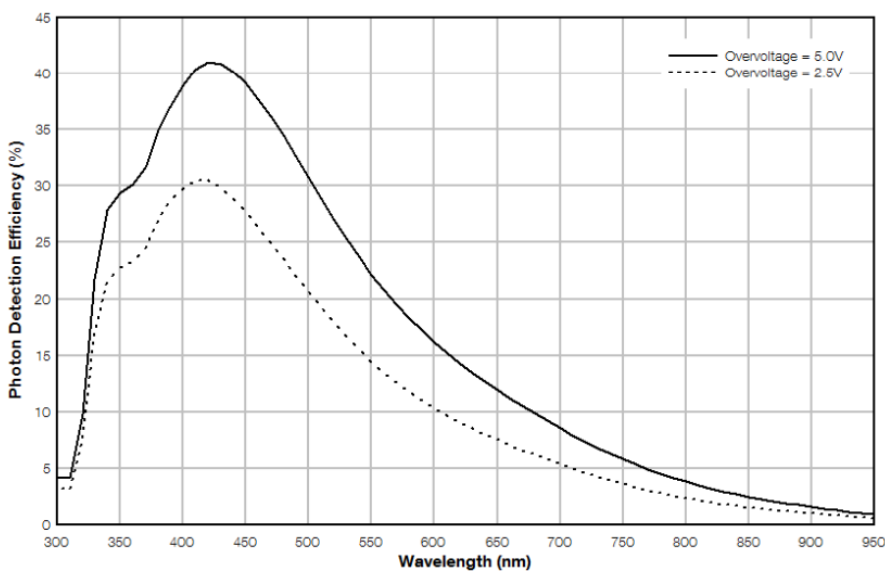


Figura 8: Gráfica de la señal del porcentaje de la eficiencia de detección de fotones con respecto a la longitud de onda

En la figura 8 se pueden observar dos curvas correspondientes a la relación del porcentaje de eficiencia de detección del SiPM con respecto a la longitud de onda en su rango espectral, se puede observar que entre los 300nm y los 900nm la eficiencia tiene su pico más alto en los 420nm, a partir de ahí, entre mayor sea la longitud de onda del espectro lumínico, la eficiencia decrece. Además, se puede apreciar que la eficiencia es directamente proporcional al sobrevoltaje de polarización aplicado ya que la línea punteada corresponde a un sobrevoltaje de 2.5V aproximadamente, mientras que la línea completa corresponde a la eficiencia con un sobrevoltaje de 5V.

Teniendo en cuenta esta información y que el polímero seleccionado (BC-408) tiene un pico de intensidad de 425nm aproximadamente según su hoja técnica, se tendría un porcentaje de eficiencia máximo de entre un 30% y un 40% dependiendo del sobrevoltaje de polarización aplicado al SiPM.

## 6.6. Amplificador Operacional

Un amplificador operacional es un dispositivo electrónico amplificador de alta ganancia acoplado de forma directa y que está compuesto por tres etapas: La etapa de entrada de la señal que contiene una resistencia con un cierto nivel de ganancia de voltaje, la etapa intermedia en la que se produce la ganancia de voltaje en un nivel mucho mayor y por último la etapa de la salida [24]. Los amplificadores operacionales para cualquier tipo de configuración funcionan principalmente con dos voltajes, uno positivo y uno negativo, a parte cuenta con dos entradas para las señales a amplificar, una inversora y una no inversora [24].

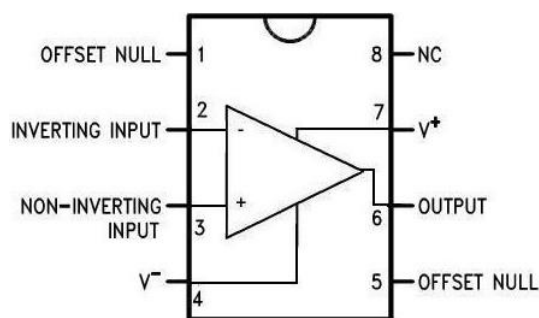


Figura 9: Encapsulado de un amplificador operacional en un circuito integrado de 8 pines [25]

Un amplificador operacional tiene un sinnfín de aplicaciones y éstas dependen de la configuración en la que el amplificador sea conectado, las configuraciones más utilizadas se presentan a continuación:

### 6.6.1. Configuración inversora

El amplificador inversor se caracteriza porque entrega en su salida una señal amplificada y desfasada 180° con relación a la señal de entrada [26].

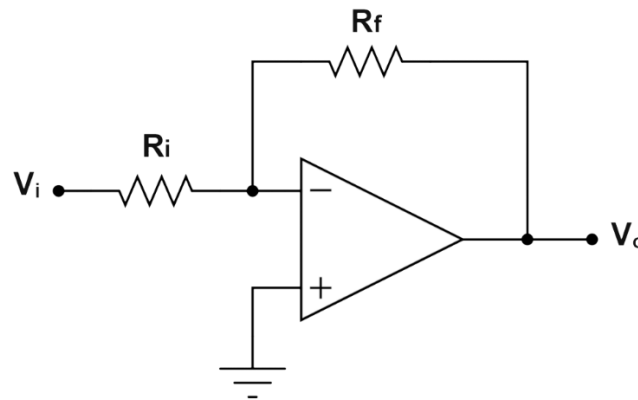


Figura 10: Circuito lineal de la configuración inversora [27]

Como se muestra en la figura 10 para la configuración inversora, la señal de entrada  $V_i$  se conecta a la entrada inversora del amplificador operacional mientras que la entrada no inversora se conecta directamente a tierra. La ganancia de amplificación se encuentra en la conexión de la resistencia de la entrada de la señal y la resistencia de retroalimentación entre la salida y la entrada inversora. La fórmula matemática para determinar el voltaje de salida es:

$$V_o = -V_i \cdot \frac{R_f}{R_i} \quad (2) [26]$$

$V_o$  = Es el voltaje de la señal de salida del amplificador

$V_i$  = Es el voltaje de la señal de entrada del amplificador

$R_f$  = Es la resistencia de retroalimentación

$R_i$  = Es la resistencia de entrada

### 6.6.2. Configuración no inversora

A diferencia de la configuración anterior, el amplificador no inversor entrega una señal de salida en fase con respecto a la señal de entrada [26].

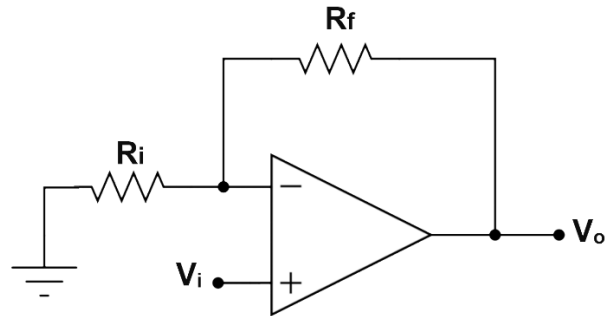


Figura 11: Circuito lineal de la configuración no inversora [28]

La conexión del amplificador no inversor es similar a la del inversor; la señal de entrada se conecta al terminal no inversor de manera directa, mientras que el terminal inversor se conecta a tierra con una resistencia de entrada. La resistencia de retroalimentación también se conecta a la entrada del terminal inversor. Su análisis matemático para el voltaje de salida es:

$$V_o = V_i \cdot \frac{R_f + R_i}{R_i} \quad (3) [26]$$

$V_o$  = Es el voltaje de la señal de salida del amplificador

$V_i$  = Es el voltaje de la señal de entrada del amplificador

$R_f$  = Es la resistencia de retroalimentación

$R_i$  = Es la resistencia de entrada a tierra

### 6.6.3. Configuración sumadora

El amplificador sumador se puede aplicar de dos formas: sumador inversor y sumador no inversor, y es un amplificador que cuenta con dos o más señales en una de sus entradas y funciona amplificando la suma de los voltajes de todas las señales de entrada [26].

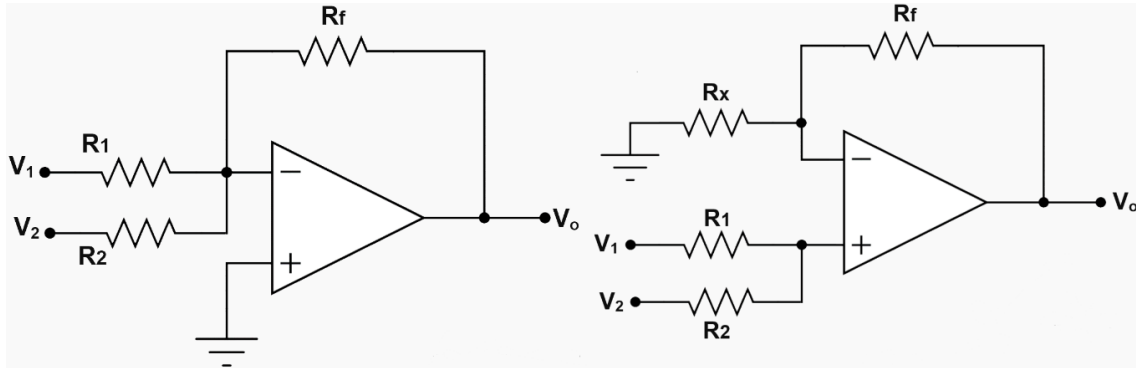


Figura 12: Circuito lineal de la configuración sumadora inversora (izquierda) y sumadora no inversora (derecha) [29]

Como se observa en la figura 12, la conexión es igual a la de la configuración inversora y no inversora respectivamente, solo que en la entrada seleccionada del amplificador se conecta más de una señal de entrada de forma paralela cada una con una resistencia de entrada correspondiente. El análisis matemático del amplificador sumador inversor se muestra a continuación:

$$V_0 = \frac{-R_f}{R_n} \sum_{i=1}^N V_i \quad (4) [26]$$

$V_0$  = Es el voltaje de la señal de salida del amplificador

$V_i$  = Es el voltaje de las señales de entrada del amplificador

$R_f$  = Es la resistencia de retroalimentación

$R_n$  = Es el valor de las resistencias de las señales de entrada (todas deben tener el mismo valor)

El análisis matemático para hallar el voltaje de salida de la configuración sumadora no inversora es:

$$V_0 = \frac{R_n + R_f}{R_n} \cdot R_x \sum_{i=1}^N V_i \quad (5) [26]$$

$V_0$  = Es el voltaje de la señal de salida del amplificador

$V_i$  = Es el voltaje de las señales de entrada del amplificador

$R_f$  = Es la resistencia de retroalimentación

$R_n$  = Es el valor de las resistencias de las señales de entrada (todas deben tener el mismo valor)

$R_x$  = Es la resistencia de la entrada a tierra, tiene el mismo valor que  $R_n$

#### 6.6.4. Configuración diferencial

El amplificador diferencial a comparación del sumador, entrega en su salida el equivalente a la resta entre las señales aplicadas a cada una de las entradas del amplificador, multiplicadas por una ganancia determinada [26].

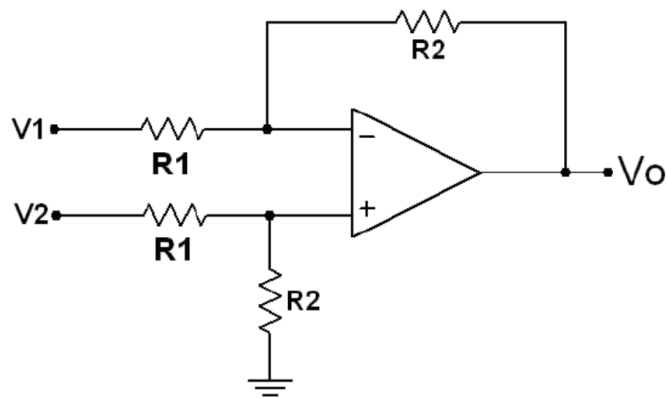


Figura 13: Circuito lineal de la configuración sumadora inversora (izquierda) y sumadora no inversora (derecha) [30]

La conexión para una configuración diferencial consiste en dos señales conectadas a cada terminal de entrada del amplificador operacional junto con una resistencia de entrada, a su vez se debe conectar una resistencia de retroalimentación a la entrada inversora y una resistencia a tierra desde la entrada no inversora. Su análisis matemático para determinar el voltaje de salida corresponde a:

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_2 - V_1) \quad (6) [26]$$

$V_o$  = Es el voltaje de la señal de salida del amplificador

$V_1$  = Es el voltaje de la señal en la entrada no inversora

$V_2$  = Es el voltaje de la señal en la entrada inversora

$R_1$  = Es el valor de las resistencias de las señales de entrada (todas deben tener el mismo valor)

$R_2$  = Es el valor de las resistencias de retroalimentación y de conexión a tierra

### 6.6.5. Circuito detector de picos

La configuración de detector de picos tiene como objetivo detectar los picos de una señal y prolongar el tiempo de los picos más altos [7].

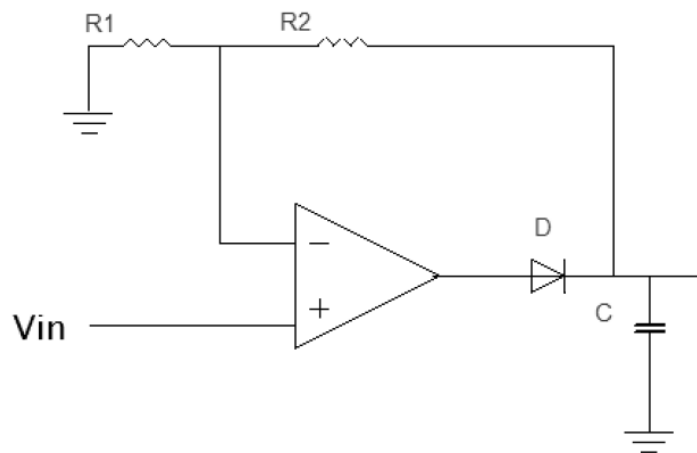


Figura 14: Circuito detector de picos [7]

Este circuito funciona de tal modo que cuando se detecta el pico más alto de una señal, es sostenido por una rampa que comienza a decaer de forma lenta hasta que el siguiente pulso de la señal se presenta. El diodo en el circuito permite que la corriente fluya únicamente en una dirección para que el condensador pueda cargarse y el condensador se carga con el objetivo de que cuando la señal de entrada caiga éste sostenga el valor máximo por un periodo corto de tiempo antes de descargarse, lo suficiente para que el nuevo pulso llegue y se pueda analizar el valor del pico [31].

### 6.6.6. Amplificador AD8001

El AD8001 es un amplificador de retroalimentación de corriente que funciona con una potencia máxima de 50mW y con una alimentación de  $\pm 5V$ , que opera a una alta velocidad lo cual le permite trabajar con señales de alta frecuencia de hasta 800MHz. Este amplificador cuenta con una baja distorsión en las

señales cuando opera, lo que permite que sea un dispositivo electrónico óptimo para circuitos convertidores AD (análogo a digital) de alta velocidad [32].

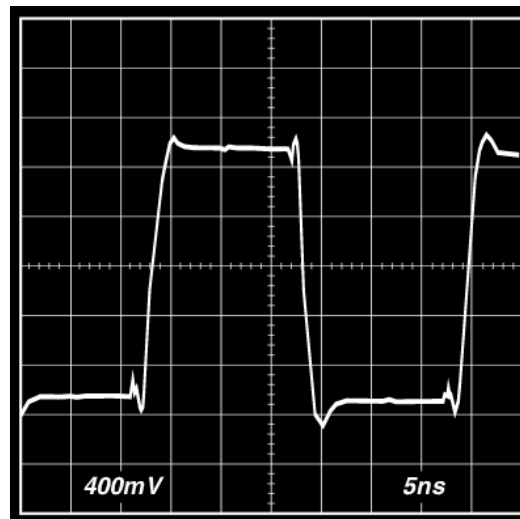


Figura 15: Respuesta transitoria del AD8001,  $G = +2$  [32]

En la figura 15 se muestra la señal de la respuesta transitoria del AD8001 con una ganancia de +2, como se puede observar, la escala en la que se encuentra es en la de 400mV por recuadro por lo que el voltaje de la salida del amplificador es de 2V.

La baja potencia que requiere este amplificador y la corriente de carga que es capaz de entregar que llega a más de 70mA hace que el AD8001 sea perfecto para implementación en aplicaciones portátiles que no requieran de fuentes de alimentación muy grandes [32].

En cuanto a las consideraciones de diseño para cualquier configuración amplificadora se necesita una meticulosa selección de componentes dependiendo de la ganancia que se quiera obtener ya que debido a la velocidad del dispositivo la conexión de resistencias y capacitores que se lleguen a necesitar deben garantizar el mínimo de filtraciones de ruido que puedan distorsionar la señal [32]. Sin embargo, la hoja técnica del AD8001 cuenta con valores recomendados para componentes necesarios en configuraciones específicas para cinco valores de ganancia estándares;  $G = -1$ ,  $G = +1$ ,  $G = +2$ ,  $G = +10$ ,  $G = +100$

Component	AD8001AN (DIP) Gain					AD8001AR (SOIC) Gain					AD8001ART (SOT-23-5) Gain				
	-1	+1	+2	+10	+100	-1	+1	+2	+10	+100	-1	+1	+2	+10	+100
R <sub>F</sub> (Ω)	649	1050	750	470	1000	604	953	681	470	1000	845	1000	768	470	1000
R <sub>G</sub> (Ω)	649		750	51	10	604		681	51	10	845		768	51	10
R <sub>O</sub> (Nominal) (Ω)	49.9	49.9	49.9	49.9	49.9	49.9	49.9	49.9	49.9	49.9	49.9	49.9	49.9	49.9	49.9
R <sub>S</sub> (Ω)	0					0					0				
R <sub>T</sub> (Nominal) (Ω)	54.9	49.9	49.9	49.9	49.9	54.9	49.9	49.9	49.9	49.9	54.9	49.9	49.9	49.9	49.9
Small Signal BW (MHz)	340	880	460	260	20	370	710	440	260	20	240	795	380	260	20
0.1 dB Flatness (MHz)	105	70	105			130	100	120			110	300	145		

Figura 16: Tabla de valores recomendados para los componentes de configuraciones amplificadoras. [32]

Para el análisis adecuado de la señal que se obtendrá con el fotomultiplicador de silicio, es necesario que sea amplificada sin que su fase sufra modificaciones, por lo que una configuración amplificadora no inversora es la indicada, además teniendo en cuenta que la amplitud de la señal generada por el fotomultiplicador está en el orden de milivoltios, es pertinente utilizar la ganancia recomendada en la hoja técnica de +100.

## 6.7. Microcontroladores

Los microcontroladores son circuitos integrados programables que tienen una muy alta escala de integración a tal punto de que contienen las mismas partes que hacen que un computador funcione como tal (Unidad de Procesamiento Central, memoria, y conexiones entrada y salida). Debido a que son dispositivos que poseen memoria, pueden llevar a cabo varios procesos lógicos que queden guardados en ella y dichos procesos son programados por el usuario del microcontrolador por medio de lenguajes de programación ensambladores [33].

Debido a la capacidad de los microcontroladores de guardar programas, la capacidad de aplicaciones de estos es casi innumerable, tanto que su uso desde su desarrollo ha venido optimizando procesos industriales, economizando materiales, espacio, tiempo de fabricación y modos de uso [33]. La aplicación de un microcontrolador cubre muchas áreas como, por ejemplo, la industria automóvil, electrodoméstica, militar, en industrias de automatización, también en la industria audiovisual y es

prácticamente una de las partes fundamentales en la robótica [33]. Básicamente a lo largo del tiempo hasta la actualidad los microcontroladores se han convertido en la base de casi cualquier proyecto tecnológico.

Así como existe una amplia cobertura de acción de los microcontroladores, existen muchos fabricantes de éstos dispositivos, entre los comercialmente más conocidos se encuentran compañías como: Atmel, Microchip, Toshiba, Simens, Intel, Hitachi, Philips y National Semiconductor, y cada uno de los microcontroladores fabricados por dichas empresas pueden ser programados con diferentes lenguajes de programación, no hay un único lenguaje, hay unos que poseen un lenguaje propio y otros que pueden ser programados a partir de bases de lenguajes de programación más comunes [33].

### ***6.7.1.ARDUINO***

Arduino es un proyecto de desarrollo de hardware y software libre para creación electrónica con código abierto, esto quiere decir que las especificaciones y esquemas de los dispositivos desarrollados por Arduino son de acceso público de tal manera que cualquier usuario podría replicarlos y modificarlos. El resultado de proyecto Arduino fue la construcción de placas de desarrollo programables que funcionan a partir de un microcontrolador de la línea ATMEL [34].

El microcontrolador que posee Arduino cuenta en su arquitectura con una interfaz de entrada y una interfaz de salida; la interfaz de entrada en la placa está conectada a diferentes periféricos de comunicación por los cuales puede llegar todo tipo de información como por ejemplo datos de sensores o imágenes de cámaras, y la función del microcontrolador es procesar toda la información que le pueda llegar para una visualización y/o la ejecución de un actuador. Lógicamente, la interfaz de salida también está conectada a diferentes tipos de periféricos en los cuales la información procesada llega y sale por medio de lo que se haya conectado a los puertos, ya sea algún tipo de visualización de datos por comunicación serial o conexión directa con una pantalla, o su llegada puede ser directamente a un actuador como por ejemplo un motor, un ventilador etc. Incluso la interfaz de salida puede ser conectada a otro microcontrolador u otra placa de desarrollo [34].

Arduino no tiene un único modelo de placa, el proyecto ha desarrollado diferentes modelos que se adecuan a las diferentes necesidades de los usuarios, existen placas de diferentes tamaños y también con diferentes características y funciones.



Figura 17: Arduino UNO [35]

En la figura 17 se observa la placa Arduino UNO, la cual es una de las comercialmente más populares, es la placa más utilizada en todo tipo de proyectos ya que gracias al microcontrolador que usa que es el ATmega328P, el cual es un microcontrolador de alto rendimiento cuyas características como por ejemplo su memoria flash, le permite realizar acciones de lectura de forma simultánea mientras que realiza acciones de escritura, a parte funciona a una frecuencia máxima de operación de 20MHz. Este microcontrolador permite que Arduino UNO pueda programarse para ejecutar acciones y tomar datos de una forma veloz para ser transmitidos a casi cualquier otro dispositivo permitiendo entradas digitales y analógicas [35].

Sin embargo, existen placas aún más completas que el Arduino UNO, el Arduino Mega, por ejemplo, usa un microcontrolador de una gama superior: el ATmega2560. Este microcontrolador posee más espacio de memoria flash y una mayor cantidad de líneas E/S de propósito general, lo que le otorga al Arduino Mega la capacidad de ejecutar una mayor cantidad de órdenes y le da un espacio de memoria mucho mayor, cosa que hace que esta placa pueda compilar códigos de programación mucho más pesados de los que un Arduino UNO podría procesar [36]. Aun así, a pesar de las ventajas que ofrece este modelo,

su tamaño no es en muchas ocasiones el más adecuado para proyectos que no requieran tanto espacio y que además requieran ser fácilmente transportados, incluso para algunos casos el Arduino UNO que es más compacto que el Mega no es tan adecuado cuando se quiere ahorrar espacio en diseño, pero como se dijo anteriormente, Arduino ofrece versatilidad en funciones y tamaños, el Arduino Nano es la placa más indicada para proyectos que no requieran de un mayor espacio y si una facilidad de ser portátiles, ésta placa funciona con el mismo microcontrolador que el Arduino UNO por lo que el Nano cumple con las mismas funciones de éste, solo varía en su puerto de conexión USB que es más pequeño [37].



Figura 18: Arduino Nano [37]

A pesar de que existen otras placas programables e incluso microcontroladores que en cuanto al criterio de diseño podrían ser más prácticos en cuanto a su tamaño, Arduino posee un entorno de programación fácil de usar y compatible con los sistemas operativos más comunes (Windows, Linux y Mac OS), y posee una gran cantidad de librerías que facilitan la programación de casi cualquier acción que se requiera hacer: programación de sensores, conversiones A/D, comunicación serial, entradas por teclado, etc. Sin contar que las placas del proyecto Arduino tienen un bajo costo y su software es gratuito, lo que lo hace accesible a prácticamente todo público [34].

Por esta razón, para la construcción de un prototipo portátil con el cual se leerán y procesarán los datos de un sensor en específico, el Arduino Nano es el dispositivo más adecuado para realizar el proceso de conversión A/D de los datos del fotomultiplicador y mostrarlos en diferentes medios de visualización.

## 6.8. Definiciones de instrumentación

### 6.8.1. Error

Para determinar el error del prototipo, es muy importante tener en cuenta en primer lugar que toda desintegración radioactiva es un proceso completamente aleatorio que está determinado por la distribución estadística de Poisson, según la cual la desviación típica de una medida real  $m$  corresponde a  $\sqrt{m}$ , sin embargo, es necesario entender que una media real nunca podrá conocerse ni determinarse a partir de un número finito de mediciones debido a la condición aleatoria de la radiación [38]. Según Nicholas Tsoulfanidis, en la práctica, si se hace una medición con  $n$  conteos, la estimación adecuada de la media real es ese mismo número  $n$  y su desviación típica será  $\sqrt{n}$ , en el caso en el que solo se haga una única medición se tiene que:

- La cantidad de conteos  $n$  de la única medición tomada será tratado como la media verdadera
- La desviación típica se da como el error típico de  $n$

El error típico relativo de un recuento  $n$  de una medición se puede determinar por medio de la siguiente ecuación:

$$\frac{\sqrt{n}}{n} = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (7) [38]$$

Entre mas número de conteos exista el error relativo disminuye.

### 6.8.2. Precisión

La precisión es la capacidad que tiene un instrumento de entregar lecturas con valores muy próximos unos de otros. La precisión no necesariamente es directamente proporcional a la exactitud, un instrumento podría tener una inexactitud de un 40% pero aun así una alta precisión al medir valores con un grado de dispersión mínimo, la precisión se determina a partir de la desviación estándar del conteo de las mediciones, para el caso de mediciones de radiación, la desviación estándar esta comprendida como la raíz cuadrada del número de cuentas [38].

$$\sigma = \sqrt{n} \quad (8) [38]$$

### ***6.8.3.Exactitud***

La exactitud es la capacidad del instrumento de dar el valor más próximo al valor verdadero de la variable medida. Para determinar la exactitud se tiene el instrumento funcionando durante de un periodo de tiempo determinado y luego se determina el límite de errores presentados en su periodo de empleo y está dada por el error relativo que se explica en la ecuación (7) [38].

## 7. Diseño metodológico

Esta investigación se centra en el diseño y en la implementación de un prototipo de un detector de muones para la posterior recolección y análisis de datos, por lo tanto, se considera una investigación de carácter cuantitativo debido a que los datos que se tomarán son numéricos y su objetivo se centra principalmente en cuantificarlos por medio de herramientas matemáticas y/o estadísticas para dar solución al problema.

El desarrollo de la metodología del proyecto se divide en cinco fases que serán necesarias para cumplir los objetivos planteados.

### Fase 1.

- Revisión del marco teórico y del estado del arte: Se realizará una investigación de la teoría necesaria y los proyectos hechos con anterioridad que tengan características similares en construcción de detectores de rayos cósmicos de bajo costo.

### Fase 2.

- Reconocimiento de las variables de medición: Se identifican las variables a medir para determinar los dispositivos electrónicos adecuados y el diagrama de bloques o circuito óptimo.
- Selección y cotización de los dispositivos electrónicos: Se realiza una lista con los dispositivos electrónicos adecuados para la adquisición, procesamiento y transmisión de los datos tomados.
- Diseño circuital: Realización del diseño del circuito del prototipo con base a los dispositivos electrónicos seleccionados,

### Fase 3.

- Ensamblaje del detector: Con los dispositivos electrónicos obtenidos se realiza la construcción del prototipo según el esquema del circuito diseñado

- Acondicionamiento de la señal del sensor: Con base a las señales del sensor, se realiza el diseño de los circuitos del acondicionamiento de la señal para que sea amplificada y filtrada para su posterior tratamiento en Arduino
- Obtención y procesamiento de la señal en Arduino: La señal que se obtiene se procesa en Arduino para la visualización de los datos y la visualización de la señal en el osciloscopio

**Fase 4.**

- Análisis de datos: Se realiza el análisis de los datos tomados con respecto a los datos teóricos de la cantidad de muones presentes en la tierra.

**Fase 5.**

- Resultados y documento final: Se realizará y presentará el documento final con la descripción de la construcción del prototipo señalando los resultados finales.

## 8. Diseño e implementación del hardware del dispositivo

Teniendo en cuenta lo descrito en el marco teórico se puede decir que básicamente la mayoría de detectores centelleadores de partículas cósmicas funcionan con el mismo principio; un material que funcione como medio centelleante en el que las partículas cósmicas al interactuar con el generaran un destello lumínico que se detecta por medio un fotomultiplicador y a su vez genera una señal eléctrica la cual se acondiciona apropiadamente para que una placa programable pueda procesarla de tal manera que los datos de la señal eléctrica puedan ser cuantificados y analizados en un ordenador u otro dispositivo.

El detector propuesto en este proyecto no es la excepción, su composición general consiste en el acople del fotomultiplicador de silicio SiPM con un polímero centelleante el cual necesita una etapa de acondicionamiento para su respectiva señal de salida, un sistema de adquisición de datos en un microcontrolador para el tratamiento y visualización de los datos adquiridos y una respectiva etapa de alimentación de todo el sistema que debe permitir que todo el dispositivo sea portátil.

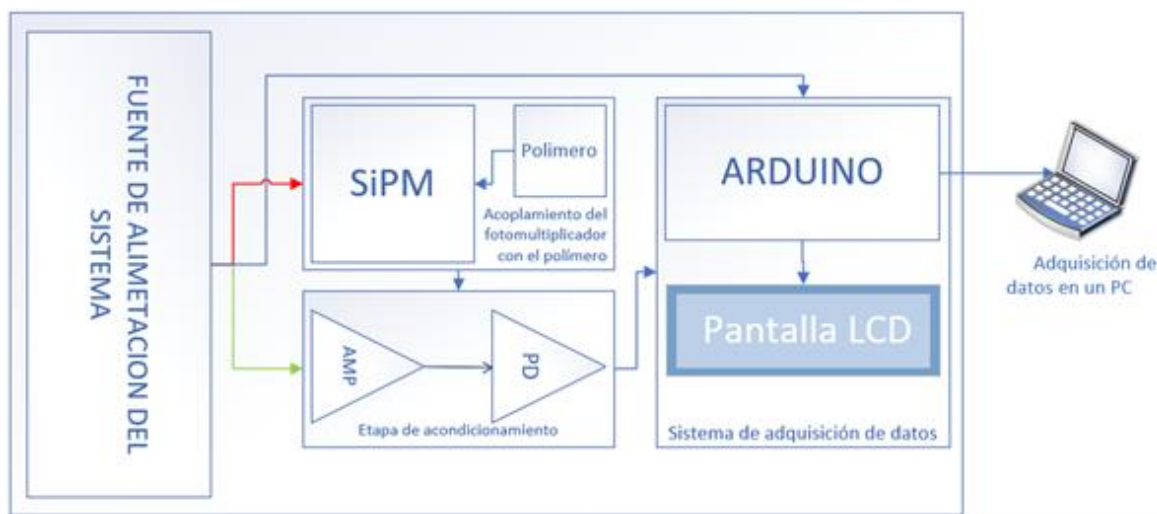


Figura 19: Diagrama de bloques del prototipo de detector de muones

Para poder determinar la batería adecuada para la fuente de energía del detector es necesario realizar el diseño y la implementación de los circuitos para la etapa de acondicionamiento de la señal, de

acoplamiento del fotomultiplicador y el cristal y la del microcontrolador para conocer la corriente total que consumirá el sistema.

### 8.1. Acoplamiento del SiPM y el polímero centelleante

Como se indicó anteriormente el polímero seleccionado es el BC – 408 de Saint – Gobain Crystals ya que su composición permite que se genere fluorescencia cuando los muones chocan con él, sin embargo para que la emisión de luz resultante pueda ser detectada adecuadamente, Saint – Gobain Crystals recomienda que todo el polímero sea cubierto con algún papel reflectante con el fin de que el fotón fluorescente que se genere cuando las partículas incidan en el plástico rebote en las paredes cubiertas de papel y haga que la duración del destello lumínico se prolongue por un poco más de tiempo para así aumentar la probabilidad y la efectividad de detección del fotomultiplicador. También se recomienda aislar completamente de la luz todo el polímero para que quede completamente oscuro en su interior, para eso debe cubrirse una segunda vez con algún material preferiblemente negro.



Figura 20: Polímero cubierto con papel aluminio



Figura 21: Polímero aislado de la luz

Como se observa en las figuras 20 y 21, el polímero fue cubierto casi en su totalidad con papel aluminio que cumple las funciones del papel reflectante dejando únicamente una sección descubierta de un área un poco mayor a la de la celda del fotomultiplicador (6mm x 6mm). Posteriormente el polímero fue cubierto una segunda vez con cinta aislante para dejar el interior del plástico completamente oscuro dejando de igual forma la pequeña área correspondiente al SiPM.

Una vez cubierto el polímero se realizó el acople con el fotomultiplicador, para eso la matriz de silicio del SiPM debía tener contacto con la parte descubierta del polímero y para evitar filtraciones de ruido y de luz, y optimizar la capacidad de detección lumínica. Para mejorar la eficiencia lumínica se utilizó un gel óptico recomendado por el vendedor del polímero entre la matriz de silicio y el polímero, por último, se fijó el SiPM con cinta aislante que asegura la sobresaturación por ruido fotónico ambiental.



Figura 22: Polímero unido al SiPM

## 8.2. Circuito para el SiPM

Después de realizar el acople entre el fotomultiplicador y el sensor se realizó el circuito para poder hacer que el SiPM funcione. La conexión para la polarización del fotomultiplicador esta descrita en la hoja técnica en donde describe a que corresponde cada pin.

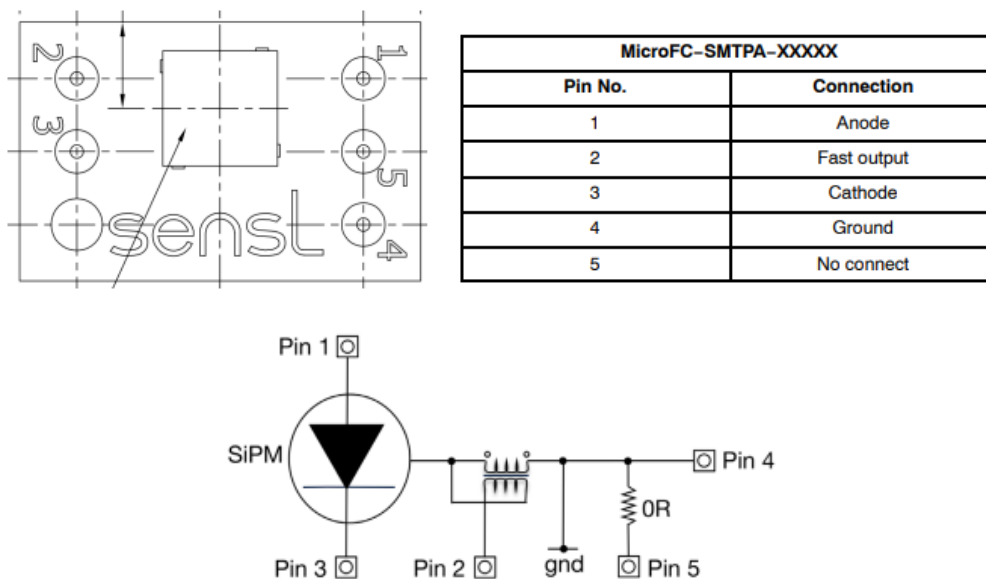


Figura 23: Esquema de pines descrito en la hoja técnica [39]

Como se mencionó anteriormente, el fotomultiplicador seleccionado fue el SiPM MicroFC-SMTPA-60035 versión 2.0 el cual tiene la matriz de silicio acoplada directamente a una tarjeta de pines la cual facilita su conexión en diferentes sistemas. Como se muestra en la figura 23, la disposición de pines corresponde a ánodo, cátodo, salida rápida, tierra y un pin libre sin conexión. De igual forma, la hoja técnica recomienda diferentes configuraciones de circuitos para la polarización del fotomultiplicador dependiendo de la matriz que se tenga y el resultado que se desee obtener.

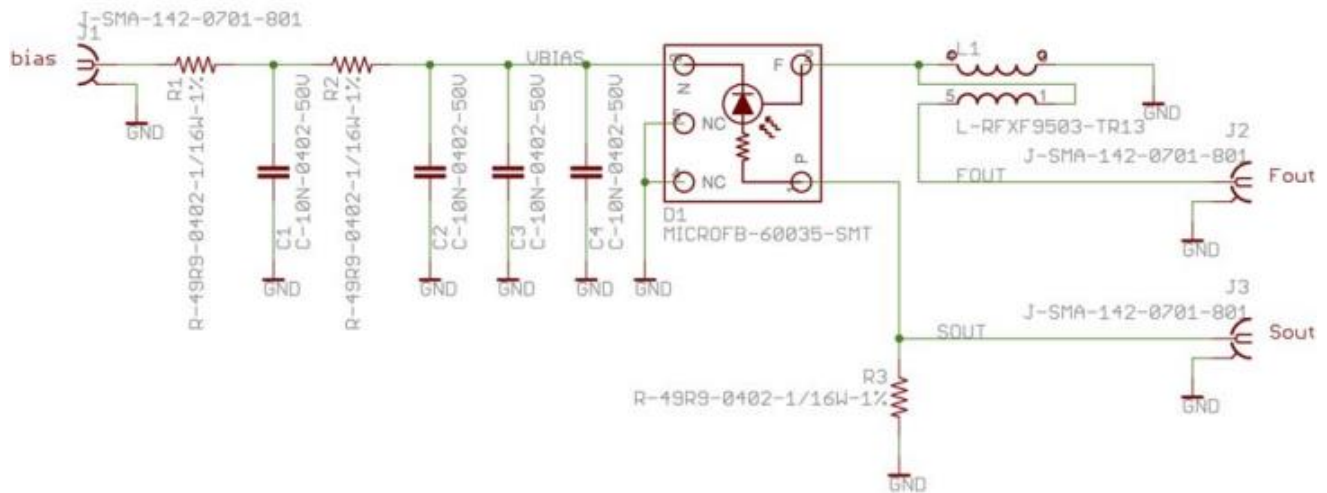


Figura 24: Circuito de conexión del fotomultiplicador según la hoja técnica de la placa versión 2.0 [40]

Para la polarización del SiPM es necesario un pequeño filtro para el voltaje de polarización el cual se introduce en el cátodo de la matriz, los pines 4 y 5 se conectan directamente a tierra, mientras que el pin 1 y el pin 2 corresponden a salidas, en este caso la salida rápida (Fout) no será utilizada, por lo que se tomara en ánodo como salida de los datos, en la salida rápida también es necesaria una resistencia para mantener el SiPM conectado a tierra cuando haya una señal de salida. Los valores de las resistencias y los capacitores también están dados en la hoja técnica, recomiendan el uso de resistencias de  $50\Omega$  y capacitores de  $10\eta\text{F}$  [41].

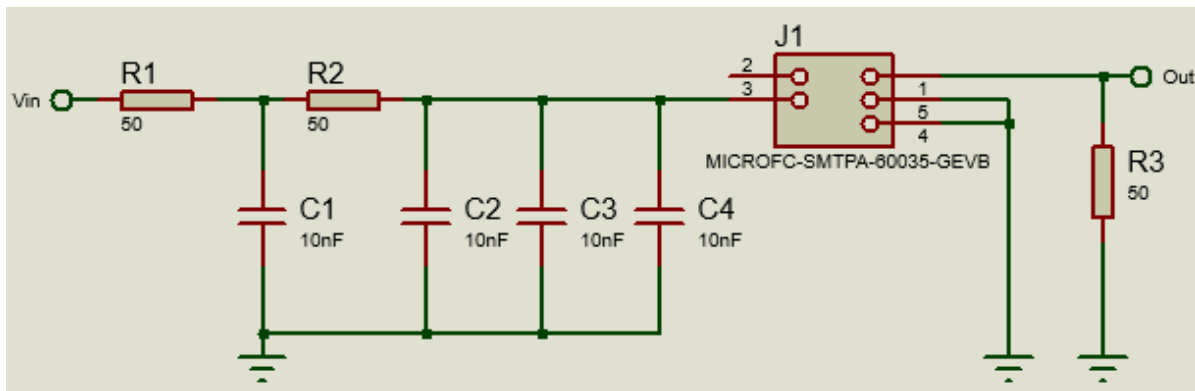


Figura 25: Circuito de conexión del fotomultiplicador diseñado en el simulador Proteus utilizando como salida el ánodo del SiPM

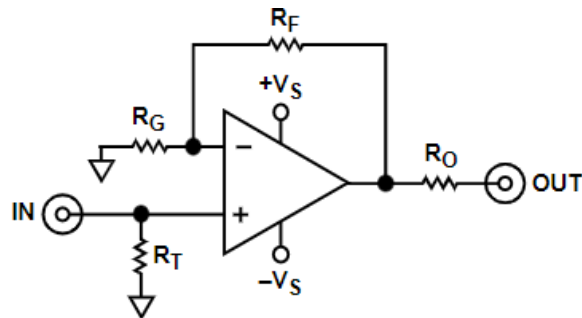
### 8.3. Etapa de acondicionamiento de la señal

Una vez polarizado el SiPM y acoplado con el polímero, se empiezan a detectar partículas y a manifestarse en la salida ánodo del fotomultiplicador en la salida rápida, sin embargo la amplitud de ésta señal se encuentra entre las decenas de milivoltios y su velocidad es tanta que no puede ser procesada directamente por el microcontrolador, por esta razón es necesario diseñar una etapa de acondicionamiento que esté compuesta por un amplificador para que la amplitud de la señal pueda ser tomada por el Arduino y por un detector de picos para prolongar la duración de cada pico de la señal a tal punto que la frecuencia del Arduino pueda leerla.

#### 8.3.1. Diseño del amplificador

El diseño del amplificador se hizo a partir de las recomendaciones dadas en la hoja técnica del AD8001; en primer lugar, se optó por una configuración de amplificación no inversora, ya que lo único que se necesita es aumentar la amplitud de la señal de SiPM sin alterar nada más en sus datos. Luego se utilizó la tabla de valores recomendada en la hoja técnica para hacer un amplificador con una ganancia de +100, si bien, se podría hacer el diseño del amplificador con una ganancia diferente, el diseño recomendado por el fabricante garantiza la mayor precisión posible y la ganancia es suficiente para que la señal de salida del

amplificador pueda ser leída por el Arduino Nano, ya que éste puede leer variaciones aproximadamente desde 5mV.



### *Noninverting Configuration*

Figura 26: Configuración no inversora descrita en la hoja técnica del AD8001 [32]

En la figura 16 descrita en el marco teórico se encuentran los valores de las resistencias recomendados para las diferentes configuraciones sugeridas, tomando en cuenta esa información, las resistencias utilizadas para esta configuración fueron:

$R_F$	1000 $\Omega$
$R_G$	10 $\Omega$
$R_T$	49.9 $\Omega$
$R_O$	49.9 $\Omega$

Tabla 1: Valores de las resistencias para la configuración no inversora

Con estos datos se seleccionaron los valores de resistencias comerciales más aproximados: 1 k $\Omega$ , 10  $\Omega$  y 51  $\Omega$ .

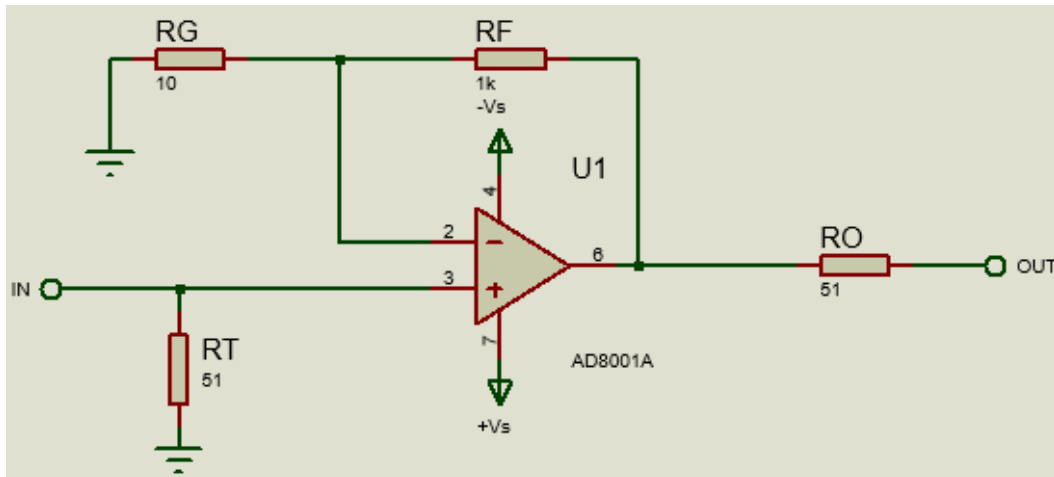


Figura 27: Diseño del amplificador no inversor en el simulador Proteus

### 8.3.2. Diseño del detector de picos

Luego de amplificar la señal para que su amplitud pueda ser detectada por el Arduino, es necesario prolongar el tiempo de los picos de la señal para que el microcontrolador pueda hacer la lectura y la conversión análoga a digital de la señal de una forma más óptima y precisa, ya que el tiempo de subida aproximado de la señal de salida se encuentra en el orden de los nano segundos. El tiempo que el circuito sostendrá los picos de la señal (tiempo de decaimiento) depende directamente del valor del capacitor y de las resistencias que se escojan para el circuito, la formula está dada por:

$$\tau = RC$$

Un tiempo de decaimiento apropiado puede estar entre 100  $\mu$ s y 500  $\mu$ s. Para un tiempo de decaimiento de 500  $\mu$ s se tomó un valor comercial de resistencias 100 k $\Omega$ , por lo que el valor correspondiente del capacitor es de 10  $\eta$ F

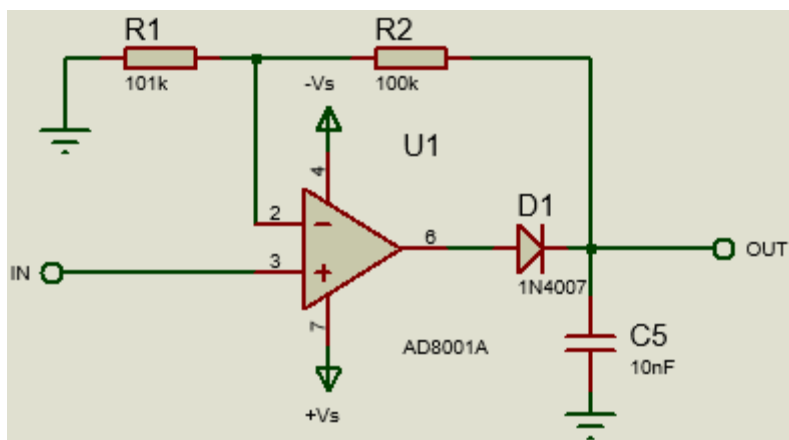


Figura 28: Diseño del detector de picos en el simulador Proteus

En la figura 28 se muestra el diseño del detector de picos, una vez diseñados ambos circuitos, la salida del amplificador debe ser conectada a la entrada del detector de picos para así completar toda la etapa de acondicionamiento de la señal.

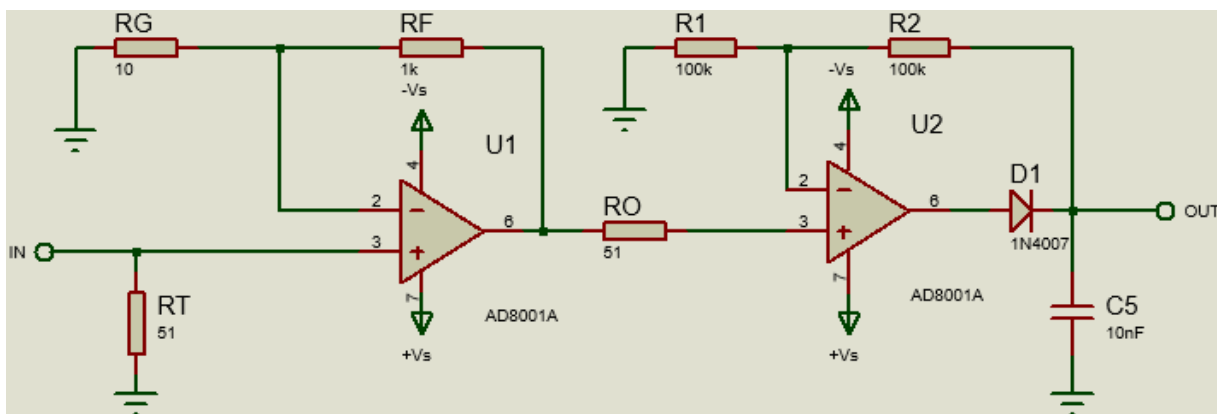


Figura 29: Diseño de la etapa de acondicionamiento de la señal en el simulador Proteus

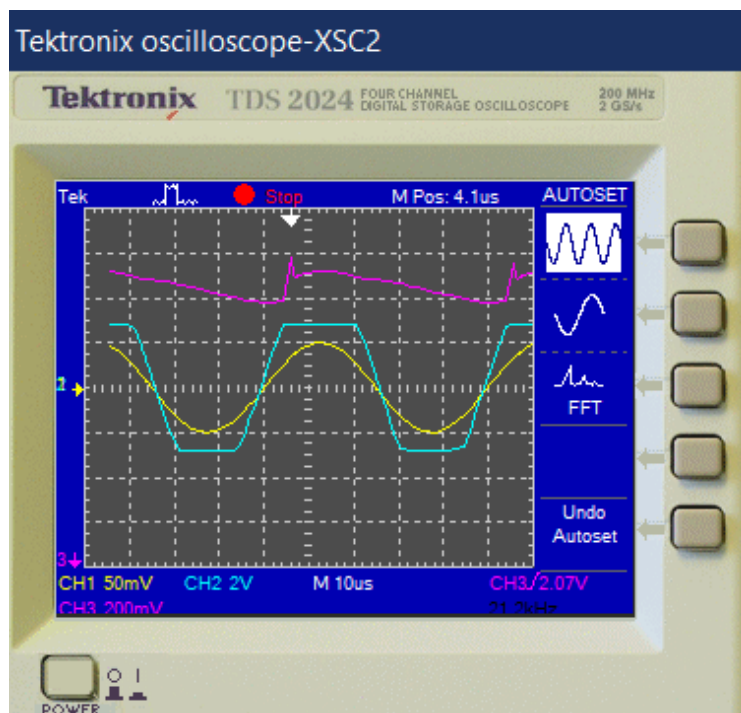


Figura 30: Simulación de las señales de entrada y salida de la etapa de acondicionamiento en el software Multisim

En la figura 30 se observa el posible funcionamiento de la etapa de acondicionamiento de la señal. El canal 1 en amarillo corresponde a la señal de entrada, en este caso se puso una señal de 50 mV, en el canal 2 en azul se encuentra la señal amplificada y en el canal 3 en rosa la señal resultante del circuito detector de picos. Como se puede observar, la señal de salida del amplificador se asemeja bastante a la señal de la figura 15, la cual corresponde a la señal de salida del amplificador según su hoja técnica, y la señal de salida del detector de picos tiene una forma de onda aproximada que se espera en la salida del circuito real ya que sostiene el pico más alto detectado y prolonga su decaimiento.

#### 8.4. Circuito del sistema de adquisición de datos

El circuito para el sistema de adquisición de datos consiste en un Arduino Nano, un display LCD y un módulo de tarjeta micro SD. El objetivo del Arduino es hacer una conversión analógica a digital de la señal resultante de la etapa de acondicionamiento para así poder visualizar la información de la señal analógica de forma numérica en el display y a su vez poder almacenar los datos en un archivo txt en una

micro SD los cuales podrán ser ingresados a un computador y observar su comportamiento en aplicaciones como Excel.

#### 8.4.1. Conexión del display LCD (Liquid-crystal display)

El dispositivo seleccionado para mostrar los datos del sistema es una pantalla LCD, la cual es una pantalla de cristal líquido que tiene funciones básicas para la visualización de datos ya que permite imprimir caracteres como números, letras y símbolos y hasta figuras programadas por el usuario. Estas pantallas cuentan con diferentes tamaños, la que se seleccionó para el prototipo es una LCD estándar de 16x2 (16 columnas y dos filas de pixeles) debido a que no ocupa mucho espacio y el contenido que se va a mostrar no es precisamente extenso.

Una de las razones por las cuales se escogió este dispositivo sobre otros fue debido a que no requiere un alto consumo de energía para su funcionamiento, sin embargo existen pantallas como las OLED las cuales tienen también un muy bajo consumo de energía y además tienen funciones de visualización mucho más avanzadas, sin embargo, debido a que el proyecto aún está en calidad de prototipo, no se necesita una pantalla con funciones muy complejas y a su vez se necesita un dispositivo que sea fácil de manipular en cuanto a programación, ya que será fácil hacer cualquier tipo de modificación cuando sea requerida.

La conexión de una LCD requiere de cuatro pines de comunicación, dos de control y cuatro más para el ajuste del brillo de la pantalla.

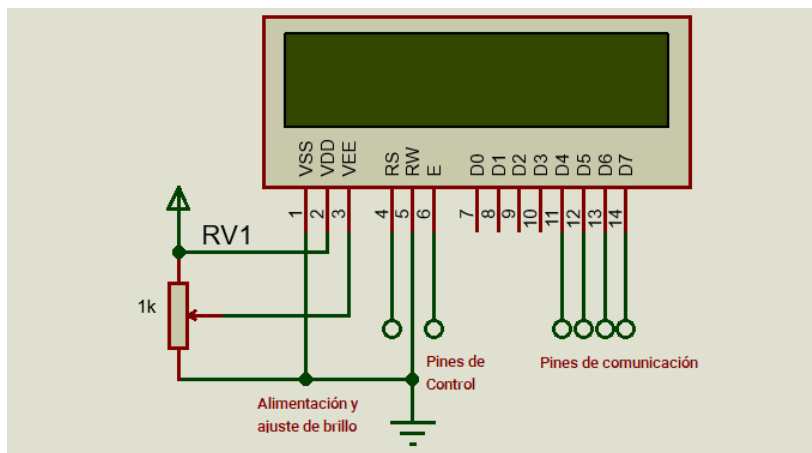


Figura 31: Circuito de conexión de una LCD

Como se muestra en la figura 31, se utiliza un potenciómetro para ajustar el brillo y el contraste de la LCD para que sus caracteres sean visibles, sin embargo, para este proyecto el potenciómetro es prescindible, en su lugar se conectó una resistencia dejando así el brillo de la pantalla fijo.

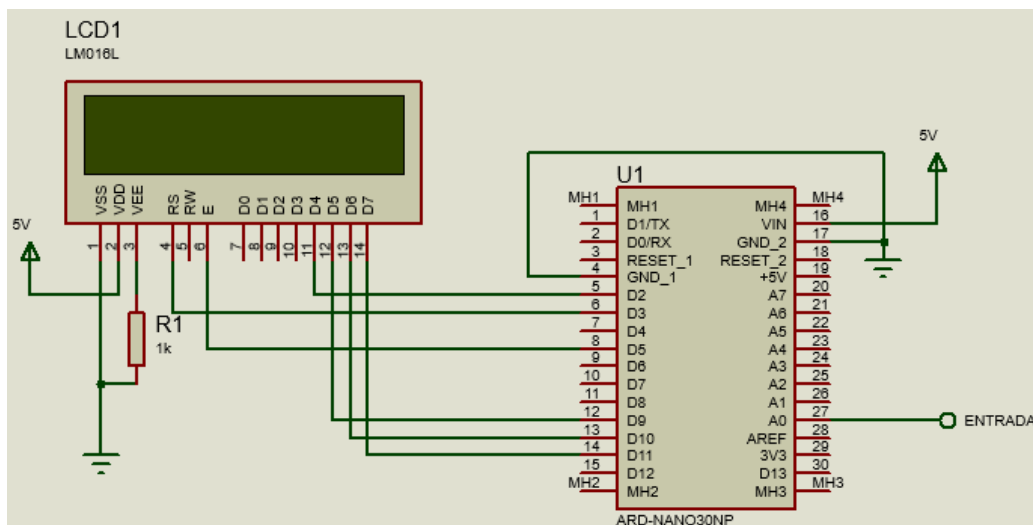


Figura 32: Diseño del circuito de adquisición y visualización de datos en el simulador Proteus

En la figura 32 se muestra el diseño final de toda la etapa de adquisición de datos, al igual que en los demás circuitos, éste estará alimentado por una fuente diseñada específicamente para el prototipo, por lo que el Arduino nano no será alimentado por medio del puerto serial que ofrece la conexión al ordenador para su programación.

### 8.5. Circuito de alimentación del sistema

A pesar de que el circuito de alimentación para el prototipo es el que va primero en el orden del diagrama de bloques, no se podía diseñar antes que los demás circuitos ya que era necesario conocer el consumo de energía de las etapas de acondicionamiento y adquisición de datos para determinar la forma óptima implementar la fuente de energía. Para este prototipo son necesarias tres salidas de voltaje diferentes, en primer lugar, el voltaje con el que se polariza el SiPM ya que como se dijo con anterioridad, se requiere un voltaje de entre 25V y 30V, en segundo lugar, una salida de fuente dual para los circuitos amplificadores

AD8001 que necesitan un voltaje simétrico de 5V y -5V y por último el voltaje para el Arduino que no puede pasar de 5V o puede sufrir daños.

Teniendo en cuenta que el voltaje mínimo requerido es de 5V se procedió a buscar una batería recargable con un valor similar, como específicamente baterías de 5V no son muy comunes se eligió una de 7.4V que es un valor comercial muy fácil de encontrar. Una vez determinado el voltaje de la batería principal se tuvo que implementar de forma imprescindible un regulador de voltaje que entregara a su salida no más de 5 voltios, ya que si el Arduino o los amplificadores recibían directamente los 7.4V se quemarían casi instantáneamente.

Para el circuito de regulación de voltaje se utilizó un transistor LM7805, el cual es un regulador de voltaje lineal a 5V y 1ª, la selección de este regulador se basó principalmente en que tiene un muy bajo costo y debido a ello es bastante popular y se utiliza para muchos circuitos y proyectos.

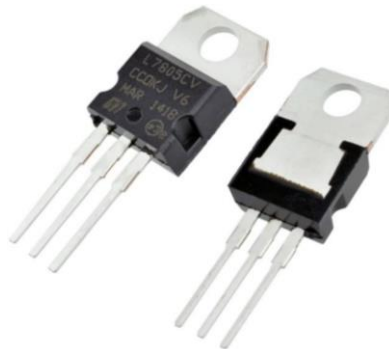


Figura 33: Regulador de voltaje LM7805 [39]

En las características técnicas de este regulador se encuentran factores como: rango de voltaje de entrada de entre 7V y 30V, voltaje de salida fija de 5V y corriente de salida 1ª [39]. Estas características lo hacen el regulador más apropiado ya que a parte del voltaje de entrada y de salida que recibe, cuenta con una corriente de salida de 1ª lo que es más que suficiente para el prototipo como tal.

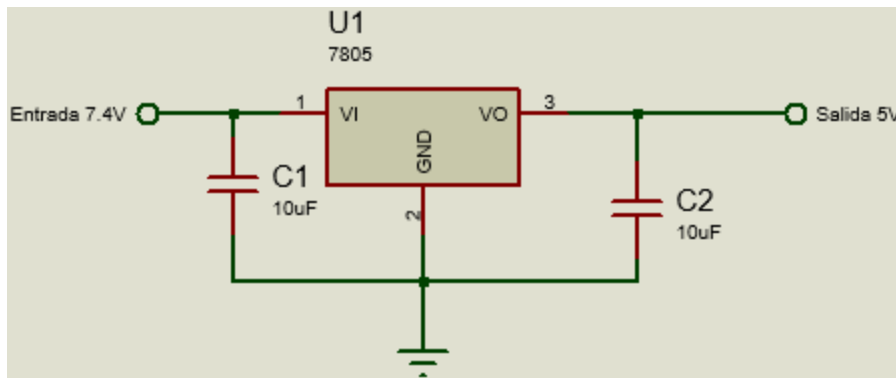


Figura 34: Circuito del regulador de voltaje en el simulador Proteus

Una vez realizado el circuito para regular el voltaje de la batería, se realizó el circuito para polarizar el fotomultiplicador; según recomienda Spencer N. Axani en su manual de construcción de un detector de muones [40] para poder generar el voltaje de polarización del SiPM es necesario utilizar un convertidor elevador DC-DC, si bien es un circuito que se puede diseñar desde cero, existen módulos ya implementados con un tamaño compacto que son más prácticos y a su vez más precisos a la hora de utilizarlos, por lo que para la polarización del SiPM se utilizó un módulo XL6009 elevador de voltaje DC de 5V a 35V, el cual es un módulo fácil de conseguir y de un bajo costo también.



Figura 35: Modulo convertidor DC-DC Boost XL6009 [41]

Las características técnicas de este convertidor elevador Boost son: voltaje de entrada de 3V a 32V, voltaje de salida de 5V hasta 35V, una corriente máxima de entrada de 5<sup>a</sup> y una corriente de salida máxima de 3<sup>a</sup> [41]. Como este módulo no tiene una salida de voltaje fija, tiene un trimmer, un dispositivo electrónico

variable similar al potenciómetro el cual es el que permite variar el voltaje de salida girando un pequeño tornillo que tiene.

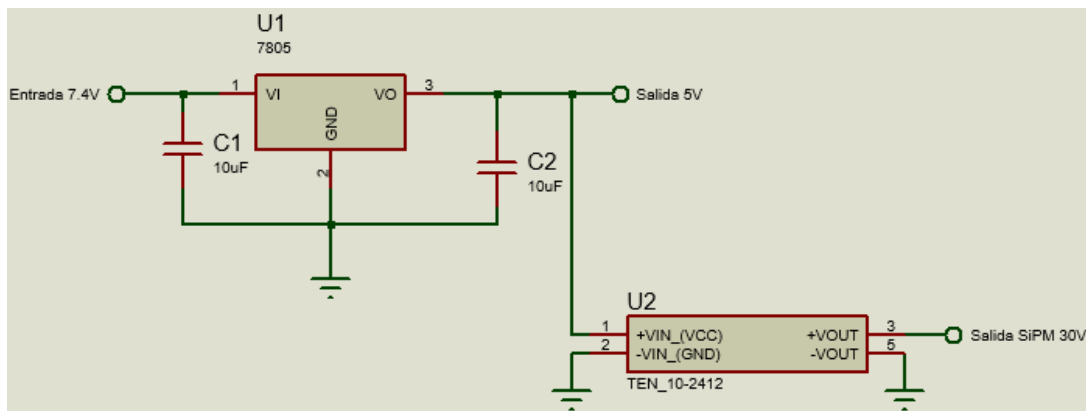


Figura 36: Circuito con el módulo elevador DC-DC

La figura 36 muestra la conexión del módulo convertidor elevador, como se puede notar, es una conexión bastante sencilla ya que el circuito como tal viene ensamblado en el módulo y solo es necesario conectar los dos pines de voltaje de entrada negativo y positivo para poder obtener la salida deseada.

Para la fuente simétrica de +5V y -5V necesaria para los amplificadores, se partió también del voltaje de salida del LM7805, a partir de ese voltaje hacer el diseño de un circuito para una fuente simétrica no es mayor complicación, aun así teniendo en cuenta que la prioridad es un circuito lo más compacto y a su vez seguro posible, se optó por un módulo que recomienda Luis Enrique Machado Carvajal en su tesis de grado de la Escuela Politécnica Nacional de Ecuador [7] el circuito integrado es el DPU01L-05.

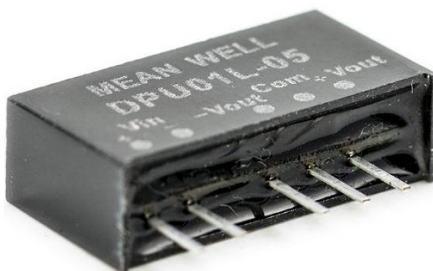


Figura 37: Módulo DPU01L-05 [42]

El DPU01L-5 es un módulo regulador de tipo convertidor DC-DC que recibe un voltaje de entrada y entrega en su salida valores simétricos de voltaje positivo y negativo equivalentes a su voltaje de entrada.

Específicamente, esta referencia tiene como características técnicas la capacidad de operar en un rango de 4.5V y 5.5V y entregar voltajes simétricos en el mismo rango ( $\pm 4.5V$  y  $\pm 5.5V$ ), además este módulo tiene consigo un sistema de protección con cortocircuitos [42], lo cual es muy útil debido a que los circuitos integrados empleados en la etapa de acondicionamiento de la señal son especialmente propensos a quemarse en el menor caso de un corto o una sobrecarga.

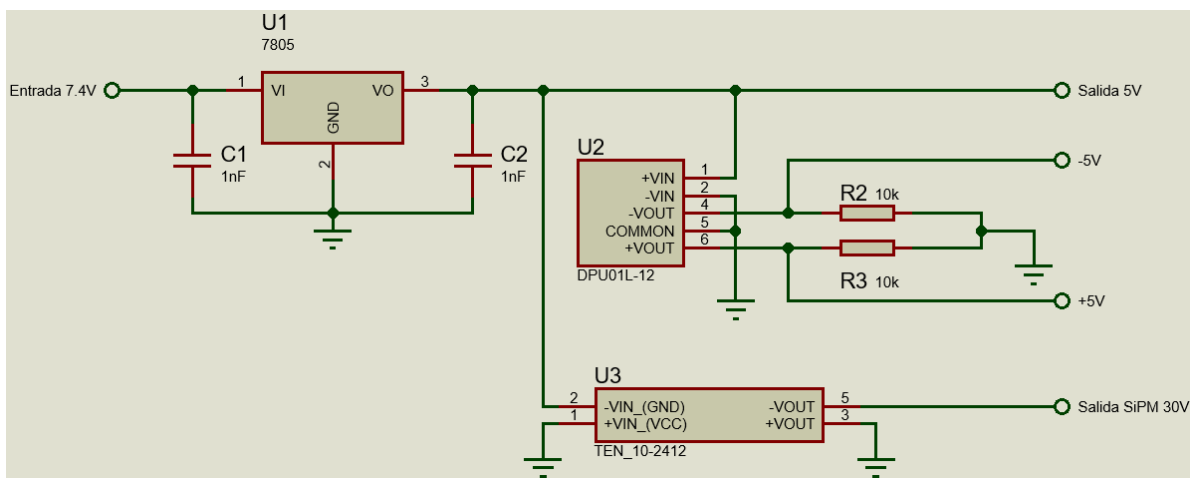


Figura 38: Diseño completo de la fuente de alimentación del prototipo

La figura 38 muestra el diseño final de toda la etapa de alimentación del prototipo, la conexión del DPU01L-05 es relativamente similar a la conexión del módulo elevador, la única diferencia es que a la salida de los voltajes simétricos es necesario conectar una resistencia a tierra.

Los voltajes resultantes de la fuente diseñada corresponden a: 30V para el fotomultiplicador de silicio, +5V y -5V para los amplificadores AD8001 y por último los 5V que salen del regulador de voltaje van dirigidos al Arduino nano.

Una vez hecho esto lo último fue la selección de la batería, para ello fue necesario tener en cuenta varias cosas: la batería debe ser recargable ya que el bajo costo en el prototipo es uno de los objetivos, debido a lo anterior, el costo de la batería debe ser accesible y por último debe contar con una intensidad que permita que el equipo esté en funcionamiento durante muchas horas consecutivas; una batería de lipo podría cumplir con las características técnicas necesarias ya que se pueden encontrar de 3000mAh hasta

más, lo cual daría un tiempo de funcionamiento del dispositivo muy grande, aun así su precio no es del todo económico, razón por la cual se seleccionaron dos baterías de litio 18650 de 3.7V y 2600mAh cada una, las dos baterías conectadas en serie generan un voltaje total de 7.4V y mantienen los 2600mAh, un poco menos que lo que ofrecen las baterías de lipo pero no es una diferencia muy grande.

### 8.6. Diseño y montaje de los circuitos impresos

Para el diseño de las placas de los circuitos impresos se utilizó la herramienta ARES de Proteus, como la reducción de ruido es esencial para el funcionamiento del prototipo, en el diseño de todos los circuitos impresos se procuró hacerlos de la forma más compacta posible, además la conexión de tierras se hizo bastante grande ocupando el espacio sobrante de las placas para poder tener una referencia grande y dispersar lo mejor posible señales basuras.

#### *Diseño del circuito impreso de la fuente*

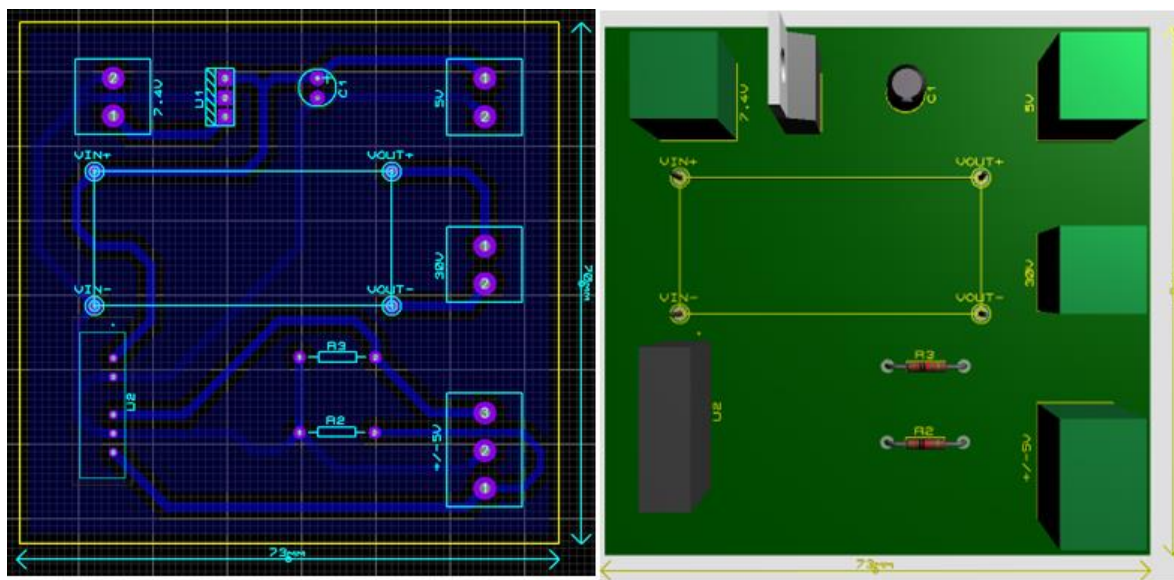


Figura 39: Diseño del circuito impreso de la fuente de alimentación

La placa del circuito de la fuente como se puede notar en la figura 39, cuenta con la única entrada de conexión de las baterías de litio y con tres salidas las cuales están marcadas con el voltaje al que corresponden, las dimensiones de este circuito impreso quedaron de 7.3cm x 7cm.

### 8.6.1. Diseño del circuito impreso del fotomultiplicador de silicio

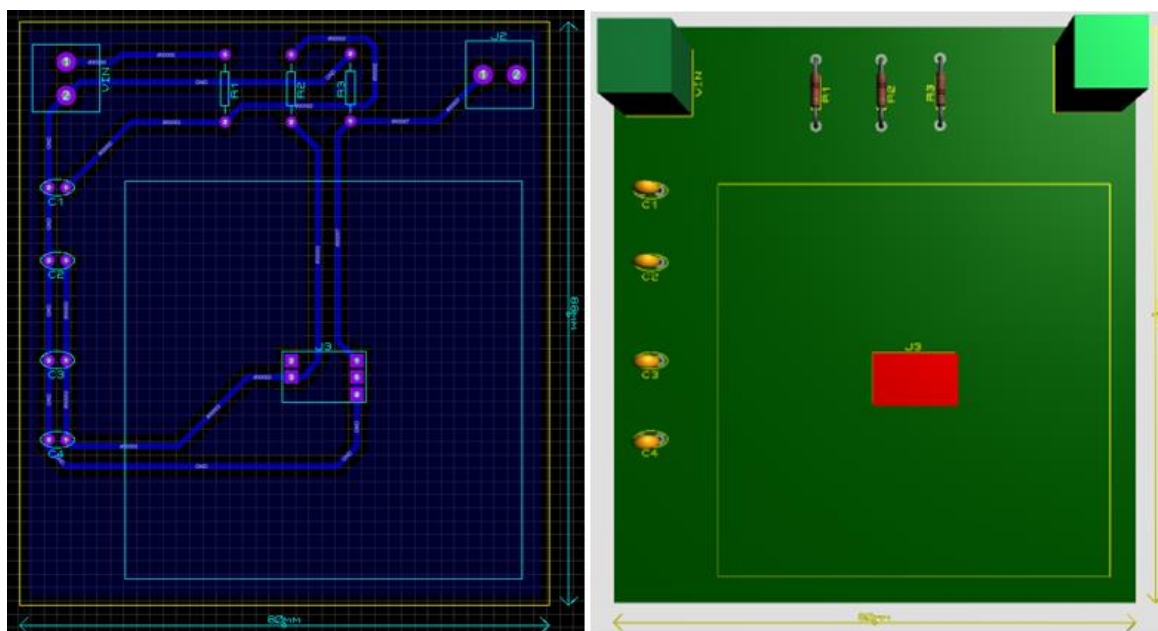


Figura 40: Diseño del circuito impreso para la polarización del SiPM

Inicialmente, se hizo el diseño una placa únicamente para el fotomultiplicador, lo que se ve en la figura 40 es únicamente el circuito propuesto por la hoja técnica del SiPM, la razón de esto fue principalmente aislar y proteger el chip de cualquier otra fuente de tensión no deseada que pudiera resultar quemándolo ya que entre sus precauciones está una alta sensibilidad a la estática.

### 8.6.2. Diseño del circuito impreso de la etapa de acondicionamiento de la señal

Antes de determinar el diseño del circuito impreso de esta etapa del amplificador, fue necesario seguir una recomendación hecha por el fabricante del amplificador AD8001 que no se había tomado en cuenta con anterioridad, esta recomendación indica que antes de conectar los amplificadores a cualquier

circuito impreso es necesario implementar un filtro de desvió de suministro de tensión justo antes de polarizar los amplificadores.

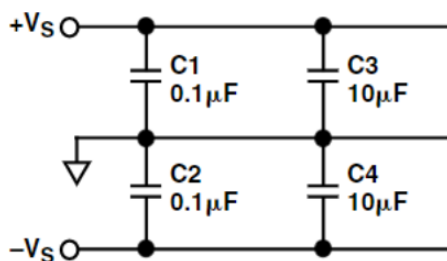


Figura 41: Filtro indicado en la hoja técnica del AD8001 [32]

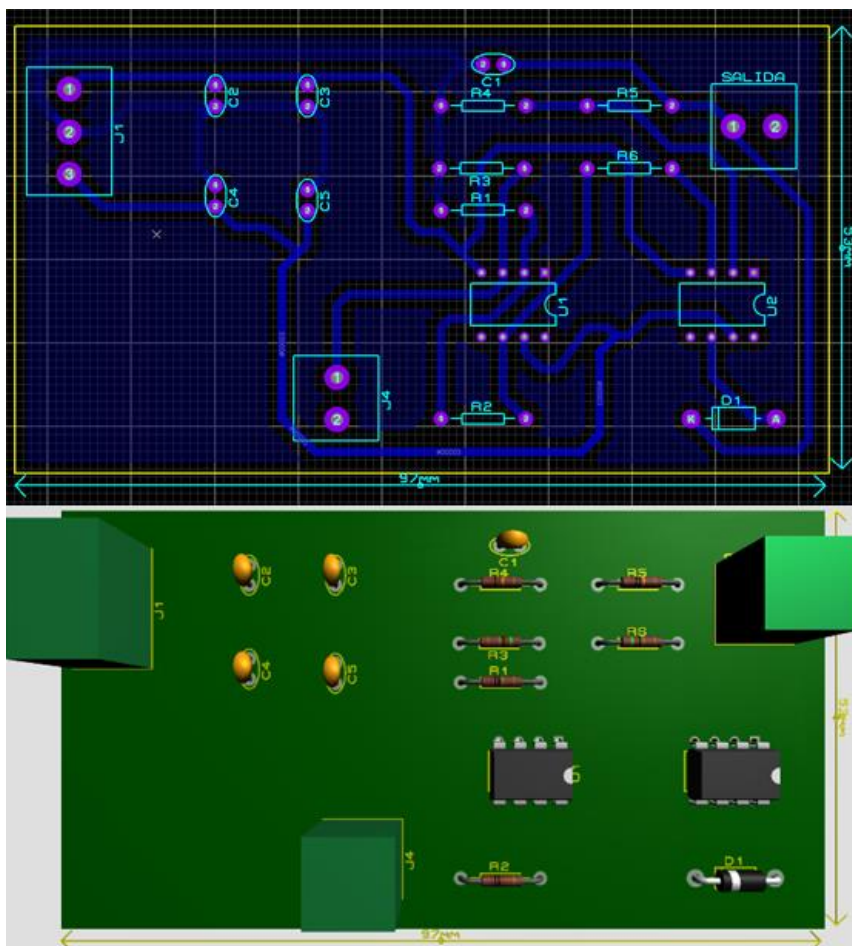


Figura 42: Diseño del circuito impreso de la etapa de acondicionamiento

En la figura 42 se observa cómo se implementó el filtro de condensadores para evitar que los voltajes de polarización lleguen directamente a los amplificadores, el objeto de este filtro es proteger los

amplificadores de una posible elevación de la tensión o de la intensidad, y también para filtrar señales de ruido que pueden entrar a los amplificadores por sus pines de polarización.

### 8.6.3. Diseño del circuito impreso de la etapa de adquisición de datos

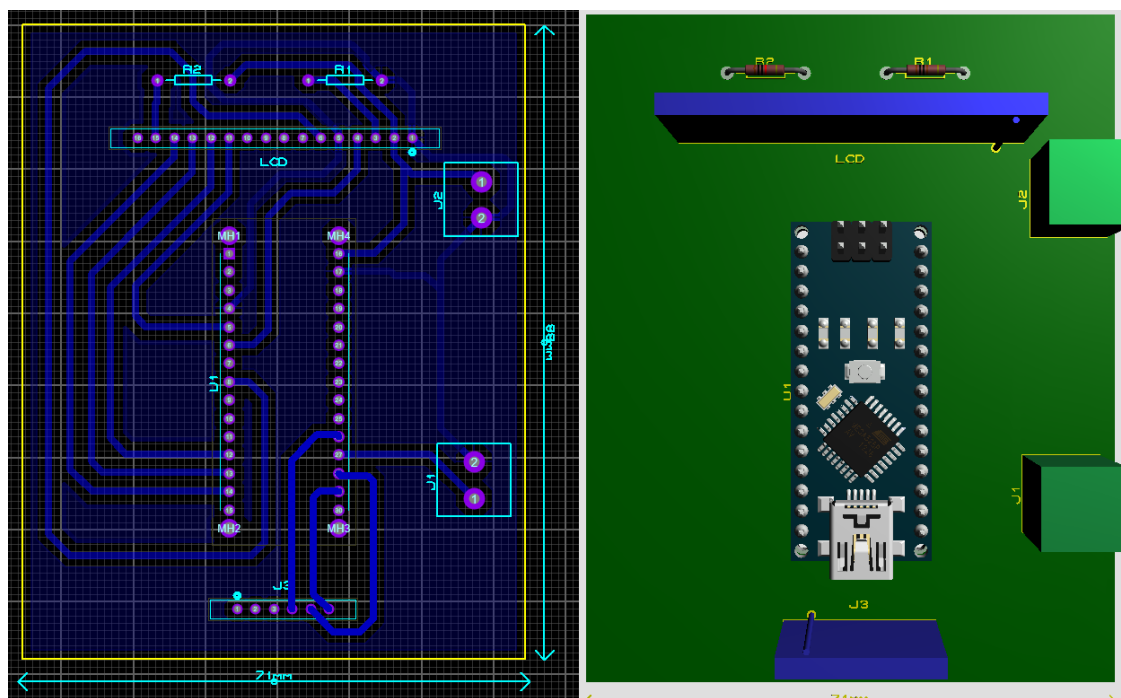


Figura 43: Diseño del circuito impreso para la adquisición de datos

Este es el último circuito que constituye al prototipo, consta de un Arduino nano, una LCD y un módulo para micro SD y como tal el sistema de adquisición y visualización de datos se obtendrá ya realizando un algoritmo de programación en el Arduino.

## 8.7. Pruebas de los circuitos de hardware del prototipo

Antes de iniciar con la programación de Arduino para la adquisición de datos fue necesario probar que los circuitos diseñados con anterioridad funcionaran correctamente. En primer lugar, utilizando el multímetro se verificó el funcionamiento del circuito de la fuente de alimentación y después de comprobar que es seguro conectar los otros circuitos a la fuente, se hizo un test del funcionamiento del circuito de

acondicionamiento con una señal entregada por un generador de señales antes de conectar el fotomultiplicador para verificar primero que la amplificación es coherente con la ganancia esperada.

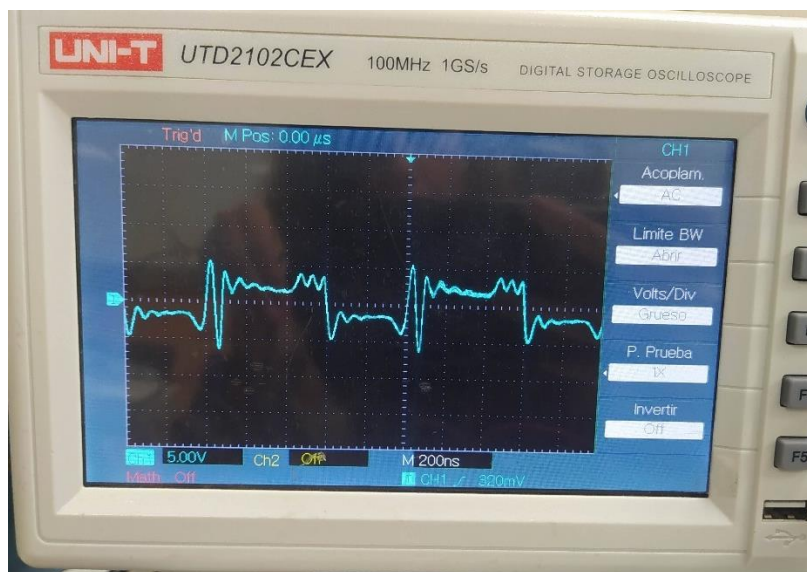


Figura 44: Señal de salida del osciloscopio del amplificador

Como se puede apreciar, la señal de salida del circuito es coherente con las señales de salida según la hoja técnica. Posteriormente se conectó la salida del SiPM polarizado a la entrada del circuito de acondicionamiento de la señal.

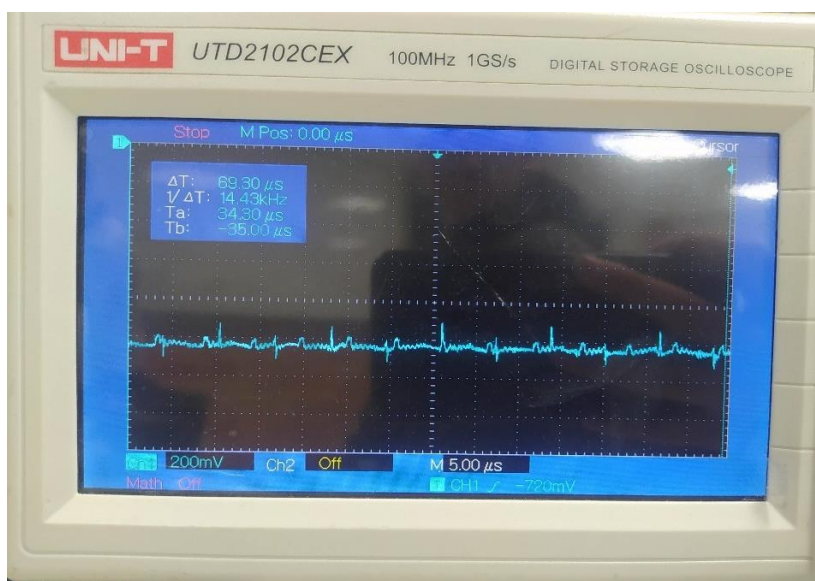


Figura 45: Señal de salida de la etapa de acondicionamiento con la señal del SiPM aplicada

A pesar de que los circuitos de alimentación y de acondicionamiento presentaban un funcionamiento correcto, la salida de la señal del sensor después de su respectivo acondicionamiento no mostraba datos muy coherentes, ya que la amplitud de la señal no sobrepasaba 100mV, estaba invertida y los picos que se mostraban no tenían una forma de onda contundente teniendo en cuenta que la señal era tomada directamente de la salida del detector de picos. Debido a esta señal poco útil y que ya se habían probado los circuitos anteriores, el error existente debía estar puntualmente en el circuito de polarización del SiPM, y debido a que las pruebas de continuidad demostraban que no existían errores de conexión y las pruebas de continuidad del SiPM no mostraban que existiera un corto, se procedió a hacer una revisión de la hoja técnica de nuevo.

La hoja técnica del fotomultiplicador indica que es un dispositivo sensible al ruido, y debido a que se dejó un circuito a parte únicamente para su polarización, la señal del sensor entra a la etapa de acondicionamiento por medio de un alambre de cobre calibre 22 AWG, dicho cable puede generar interferencia y ensuciar la señal, además en los artículos y proyectos citados previamente no separan el SiPM de los demás circuitos, justamente para no perder información de la señal dejan el montaje de tal forma que no exista mucha distancia entre el SiPM y las demás etapas, por lo que fue necesario unir los circuitos de polarización del SiPM y del acondicionamiento de la señal

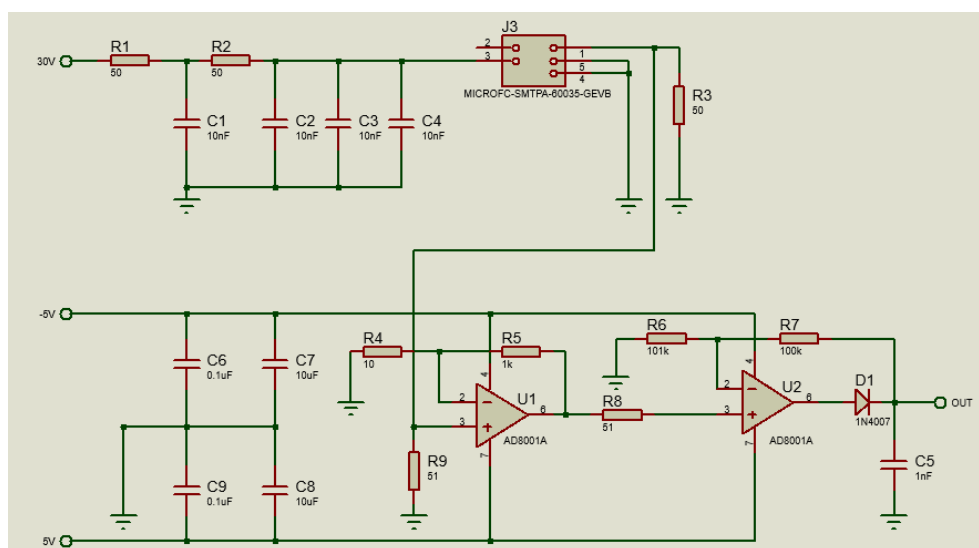


Figura 46: Circuito de polarización del SiPM y circuito de acondicionamiento de señal acoplados



Figura 47: Diseño del circuito impreso

Después de implementar el nuevo circuito impreso se volvió a tomar la señal de salida del osciloscopio y el resultado fue completamente diferente que en los circuitos anteriores.

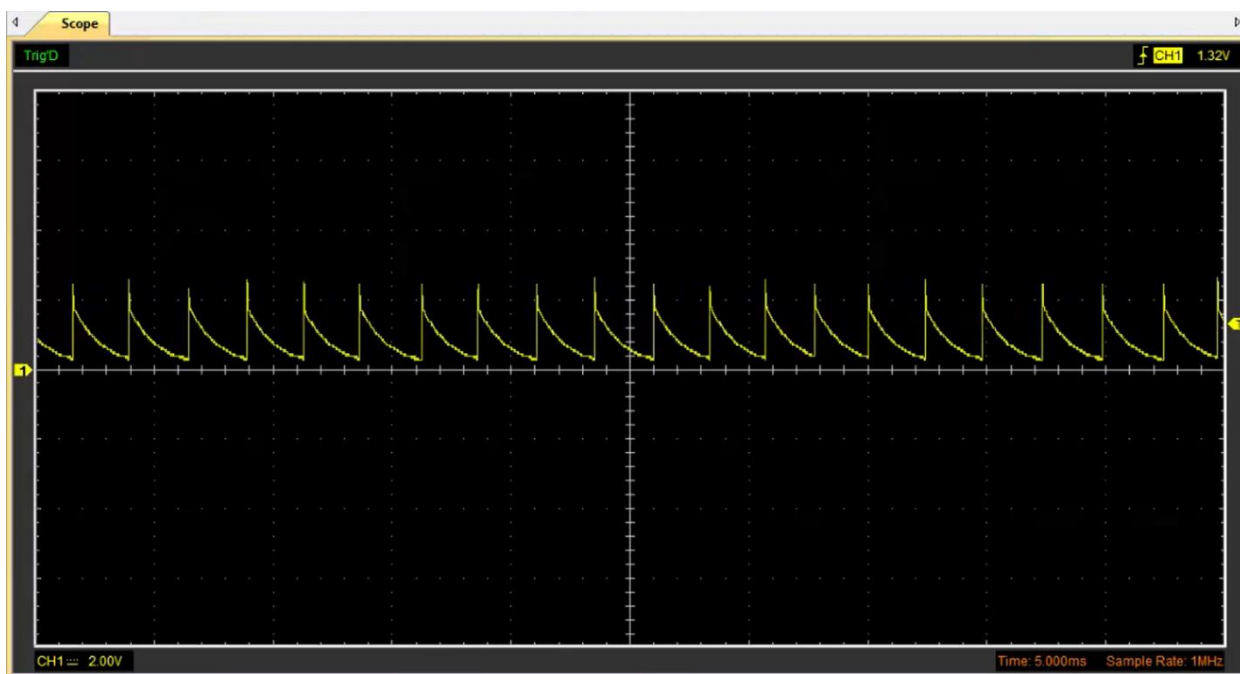


Figura 48: Señal de salida de la etapa de acondicionamiento del detector

La diferencia del funcionamiento entre el circuito de la figura 47 y los de las figuras 40 y 42 es total, en primer lugar es evidente que hubo una amplificación considerable de la señal ya que como se ve, la escala del osciloscopio se encuentra en 2V por división, por lo que la amplitud de la señal alcanza a llegar poco más arriba de los 2V, además la forma de onda es más consecuente con el hecho de que la señal paso por un circuito detector de picos, y esa forma es bastante similar a formas de onda obtenidas en otros proyectos.

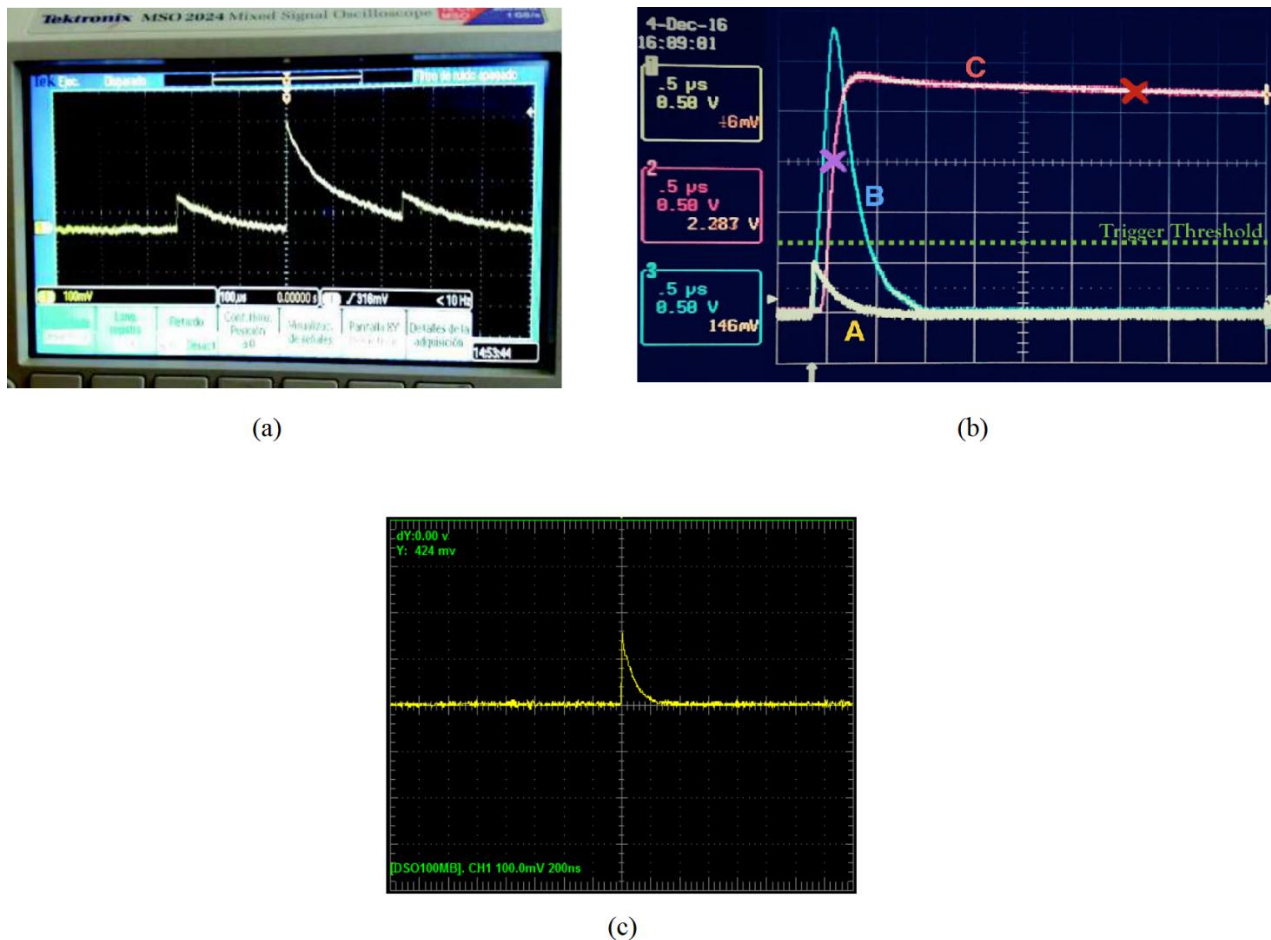


Figura 49: Comportamiento de las señales de salida de detector de muones de diferentes proyectos. (a) [7], (b) [40], (c) [43].

La figura 49 es un conjunto de imágenes tomadas de algunas de las tesis y artículos que se han referenciado en el presente proyecto, en la que se puede apreciar que las tres señales comparten formas de onda muy similares y que también coinciden con la señal obtenida con el desarrollo de este prototipo. En

la figura 49 (b) se observan tres señales diferentes, la señal A corresponde a la señal de salida del SiPM sin pasar por algún acondicionamiento de señal, la B a la señal amplificada y la C la señal de salida en un detector de picos que se implementó en ese experimento también. Si esa señal se compara con la obtenida en este experimento, la única señal que coincidiría sería la A, sin embargo, teniendo en cuenta que la escala de tiempo en la figura 49 (b) se encuentra en  $5\mu\text{s}$  y la escala de tiempo de la figura 48 se encuentra en  $5\text{ms}$  es lógico que la señal C no se vea con su forma de onda completa.

Ahora, a pesar de que son señales muy similares tanto las referenciadas como la obtenida de los circuitos diseñados, no son del todo iguales, esto se debe a ciertas diferencias que existen entre todos los detectores implementados las cuales son: diferentes polímeros centelleantes, diferentes referencias de fotomultiplicadores, diferente determinación de tiempo de decaimiento en los circuitos detectores de picos y sobre todo, las diferentes localizaciones en las que se tomaron los datos, por lo que se puede tomar la señal obtenida como una señal funcional para la detección de partículas.

## **9. Programación de los algoritmos de adquisición y visualización de datos**

Ya que el funcionamiento del hardware del dispositivo fue comprobado al obtener una señal de salida congruente con respecto a anteriores experimentos documentados, se continuó con la programación en el Arduino Nano para poder leer la información de la señal de manera numérica.

Para ello primero fue necesario comprender que representaba la señal análoga obtenida, por lo que se recurrió de nuevo a la hoja técnica en donde se explica que el punto más alto antes de un decaimiento de la señal corresponde a una partícula detectada, en pocas palabras cada pico que se genere corresponde a una partícula y teniendo en cuenta que en menos de un segundo se pueden generar más de 20 picos, sería inútil hacer un contador de partículas periódico ya que al generarse tantas en tan poco tiempo los datos variarían de tal forma que no podrían observarse bien en la pantalla LCD y como tal no daría un número útil de cuantas partículas se detectan ya que sería un conteo infinito; por esa razón se implementó un algoritmo de conteo de partículas por segundo.

### 9.1. Algoritmo programado en Arduino



Figura 50: Diagrama de flujo de la primera parte del código de Arduino

El algoritmo de Arduino consta de una inicialización de la pantalla LCD y del módulo micro SD, una configuración de conversión análoga a digital, el conteo resultante de los datos convertidos a digital por segundo y una salida de datos por medio de la LCD y el almacenamiento de los mismos en un archivo txt. La estructura inicial de este algoritmo se puede apreciar en la figura 51, donde primero se incluye las librerías de la LCD y del módulo microSD que el software Arduino trae por defecto, para luego declarar las variables a utilizar en el código, entre las variables se encuentra una variable para la lectura análoga de

la señal, una para el conteo de picos y la variable trigger para filtrar de manera digital picos indeseados de la señal; posteriormente se hace la configuración del timer del Arduino para generar una interrupción de 1 segundo para que los datos mostrados sean los datos tomados por segundo, tanto de conteo de picos como de voltaje, para luego hacer la configuración de la salida de los datos. Una vez programado todo esto, se inicializa el bucle infinito en el cual se determinarán los datos que se mostrarán.

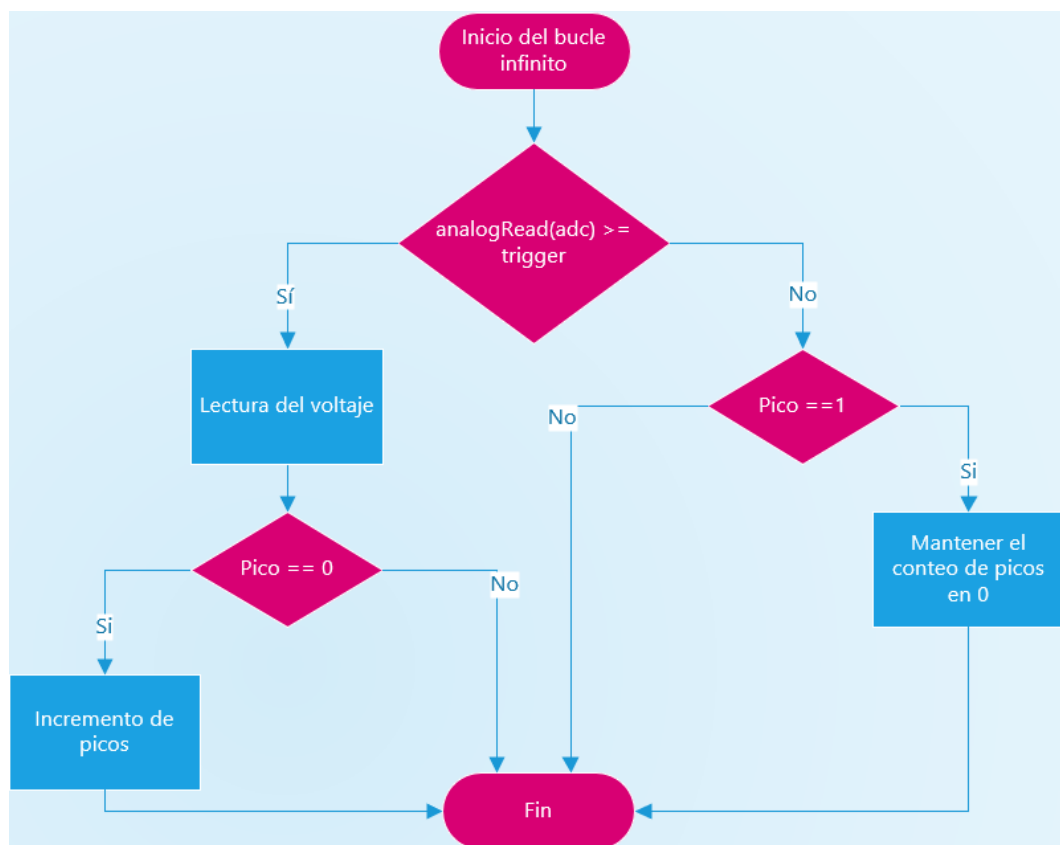


Figura 51: Diagrama de flujo de la segunda parte de la programación de Arduino

Una vez iniciado el bucle infinito, se programó la primera condición, en la que se pregunta si la lectura del puerto análogo es igual o mayor al trigger seleccionado, si es el caso el siguiente paso es hacer la lectura del voltaje de los picos tomados y continuar con un segundo condicional el cual pregunta si la variable picos es igual a cero, si es igual a cero se inicia el incremento de picos, de lo contrario se repite el condicional. En caso de que la lectura del puerto análogo no supere o iguale el valor del trigger, se despliega otro condicional con el fin de mantener en ese caso el valor de la lectura en 0, por lo que la condicional

pregunta si la variable pico es igual a un valor que no sea cero, si es el caso inmediatamente el valor de la variable pico cambia a cero. Si de lo contrario la variable pico ya se encuentra en cero se repite el condicional.

Debido a que posteriormente se configuró la interrupción del programa a 1 segundo, el bucle infinito estará funcionando únicamente durante un segundo, antes de reiniciarse completamente, gracias a esto cada segundo se tendrá un rate diferente.

```
#include <LiquidCrystal.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#define CS_PIN 10

LiquidCrystal lcd(7, 6, 5, 4, 3, 2);
File archivo;
int adc = A0;
int valorsensor = 0;
int valorajustado = 0;
int trigger = 620;
int pico = 0;
int totalPicos = 0;
int old = 0;
unsigned long lastSensorReadTime = 0;
int timer1_counter = 3036; |
```

Figura 52: Librerías y variables del Arduino.

En la figura 52 se muestra la primera parte del código de adquisición de datos, las librerías necesarias para la LCD y para escribir datos en la microSD y la declaración de variables, la creación del archivo txt de en la microSD, la variable para la conversión AD, para el trigger, el conteo de picos y la configuración del timer.

```
void setup()
{
  lcd.begin(16, 2);
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Iniciando tarjeta");

  if (!SD.begin(CS_PIN))
  {

    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Inicialización fallida");
    while (true);
  }

  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Inicialización completa");

  if (SD.exists("Rate.txt"))
  {
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Rate.txt creado");
  }
}
```

Figura 53: Configuración de la microSD

En el void setup, se configuró en primer lugar la inicialización de la microSD, los mensajes de inicialización completa o fallida se mostrarán en la LCD y dependerán de si existe una tarjeta microSD insertada en la ranura o no, si la tarjeta esta insertada se creará un archivo txt nombrado Rate en el cual se van a escribir los datos leídos.

```
lcd.begin(16, 2);  
lcd.clear();  
noInterrupts();  
  
TCCR1A = 0;  
TCCR1B = 0;  
  
TCNT1 = timer1_counter;  
TCCR1B |= (1 << CS12);  
TIMSK1 |= (1 << TOIE1);  
  
interrupts();
```

Figura 54: Configuración del timer

Como se indicó en el diagrama de flujo, antes de hacer la lectura y escritura de los datos, se debe configurar uno de los timers del microcontrolador para que dichas operaciones se ejecuten cada segundo, para el Arduino nano se configuró el timer1 a partir de su hoja técnica y de su recomendación estándar descrita por los mismos desarrolladores del microcontrolador. También la LCD se limpia después de los mensajes de inicialización de la tarjeta microSD para mostrar los datos del rate de partículas por segundo.

```

ISR(TIMER1_OVF_vect)
{

    TCNT1 = timer1_counter;
    Serial.println(totalPicos);
    archivo = SD.open("Rate2.txt", FILE_WRITE);
    if(archivo)
    {
        archivo.println(totalPicos);
        archivo.close();
    }
    else
    {
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("Error abriendo Rate2.txt");
    }

    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Rate = ");
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print("de muones/s");
    lcd.setCursor(10, 0);
    lcd.print(totalPicos);

    totalPicos=0;
}

```

Figura 55: Escritura de datos por segundo en el txt y en la LCD

Una vez configurado el timer, se debe programar la escritura de los datos dentro de su funcionamiento para que sea una escritura por segundo, en primer lugar, se escriben los datos del rate de partículas determinado por la variable “totalPicos” en el txt generado en la configuración inicial de la microSD, luego esos mismos datos se imprimen en la LCD que tiene el mensaje “Rate de muones/s”, la variable “totalPicos” se iguala a cero cuando no se detecta un voltaje válido.

```
void loop()
{
  if (analogRead(adc) >= trigger)
  {
    if(pico == 0)
    {
      valorsensor = analogRead(adc);
      pico++;
    }
  }
  else
  {
    if(pico == 1)
    {
      pico = 0;
      totalPicos++;
    }
  }
}
```

Figura 56: Conversión AD y conteo de picos

En el void loop se configuró únicamente la lectura análoga a digital, en la que se incluye un condicional que indica que si el valor del voltaje leído por el puerto análogo es igual o mayor a un trigger específico se inicie el conteo de picos y se almacenen en la variable “totalPicos”, de lo contrario no se almacenará ningún valor en la variable y se mantendrá en cero.



Figura 57: Datos del prototipo mostrados en la LCD

La variable del trigger hace la función de un filtro digital de la señal obtenida de todo el circuito diseñado en el capítulo anterior para eliminar la mayoría de señales de ruido generadas, la determinación del valor de dicho filtro se debe determinar poniendo a prueba el dispositivo.

## 10. Pruebas y resultados

### 10.1. Pruebas iniciales

Para poder seleccionar un valor de trigger adecuado para el prototipo es necesario poner a prueba el dispositivo y observar los datos que se presenten. En las primeras pruebas se obtuvieron una serie de resultados bastante inestables, se realizaron más o menos cuatro pruebas con un trigger diferente cada una seleccionado al azar por aproximadamente una hora cada uno. Estas pruebas iniciales fueron tan inestables que no se encontró en ninguna de ellas ninguna coincidencia.

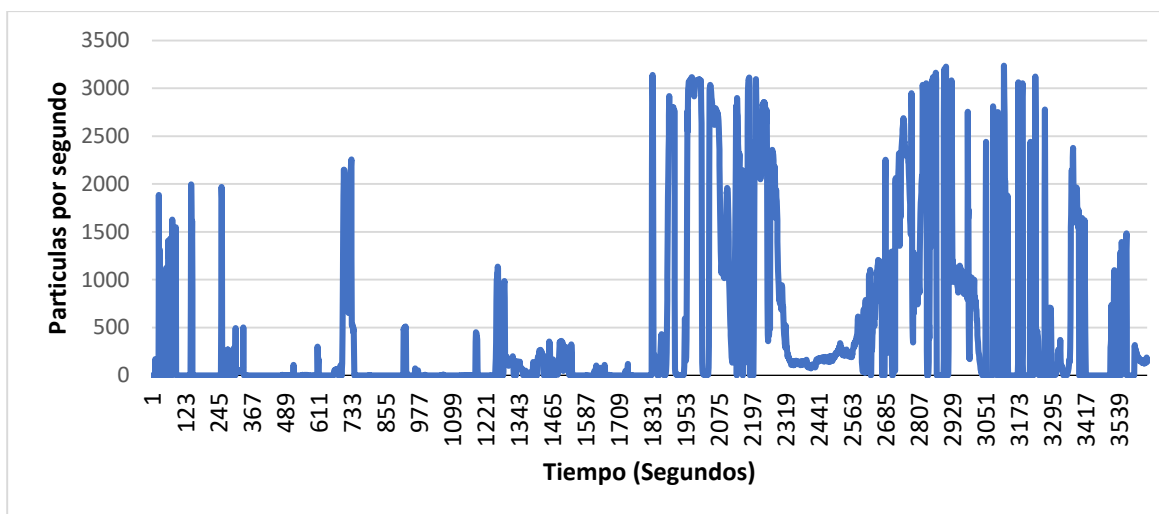


Figura 58: Grafica del rate de partículas en función del tiempo, primer txt almacenado en la microSD

La figura 58 corresponde a la gráfica en función del tiempo de la primera toma de datos del prototipo en un periodo de tiempo en el que se generaron más de 3553 conteos por segundo. La caída y subida del conteo de partículas en este caso específicamente dependió de la exposición del polímero centelleante a la luz, una pequeña sombra sobre el circuito generaba que el conteo de partículas bajara prácticamente a cero mientras que una exposición casi total a la luz solar subía el conteo a más de 3000. Básicamente lo que esto mostró es que el fotomultiplicador de silicio estaba detectando destellos de luz generados por la interacción de partículas con el polímero, sin embargo, mostró una gran dependencia a los

niveles de luz solar presente, y además el conteo elevado de picos se podía presentar también por la presencia de algún ruido existente en el circuito que fue diseñado anteriormente.

Aunque estas pruebas pudieron demostrar que existía un funcionamiento entre el polímero y el fotomultiplicador, los datos que se registraron no demostraron un funcionamiento aceptable del prototipo debido a su clara inestabilidad y dependencia hacia la luz. Esta dependencia podría existir gracias a diferentes factores, uno de ellos el aislamiento a la luz total del polímero, por lo que el acople entre el SiPM y el plástico centellador se desconectó del circuito para poder buscar alguna fuga de luz, la cual se encontró en un pequeño orificio de no más de 1mm situado en la placa de conexión del SiPM. El agujero se cubrió con cinta aislante, y se reforzó el aislamiento de la luz en la parte de los pines de conexión del fotomultiplicador y se conectó de nuevo para tomar un nuevo paquete de datos.

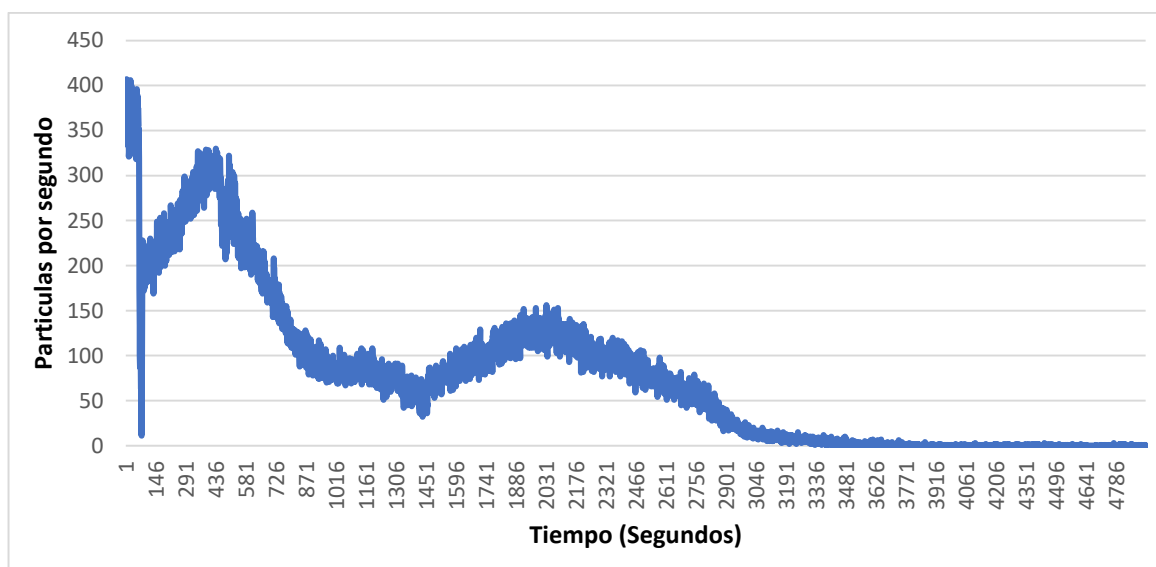


Figura 59: Grafica del rate de partículas en función del tiempo, primer txt almacenado en la microSD sin la fuga de luz

Una vez sellada la fuga de luz del polímero, el resultado de los datos se vio un poco más estable en la figura 59, el conteo bajó a menos de 500 partículas por segundo con un trigger 1.8V. El valor del rate fue un poco más coherente con respecto a la frecuencia de salida de la señal del fotomultiplicador, aun así, la variación del conteo no fue lo suficientemente estable ya que después de determinado tiempo las cuentas

cayeron a cero completamente, por esta razón se aisló todo el circuito de la luz, no solamente el polímero, guardándolo en una caja negra.

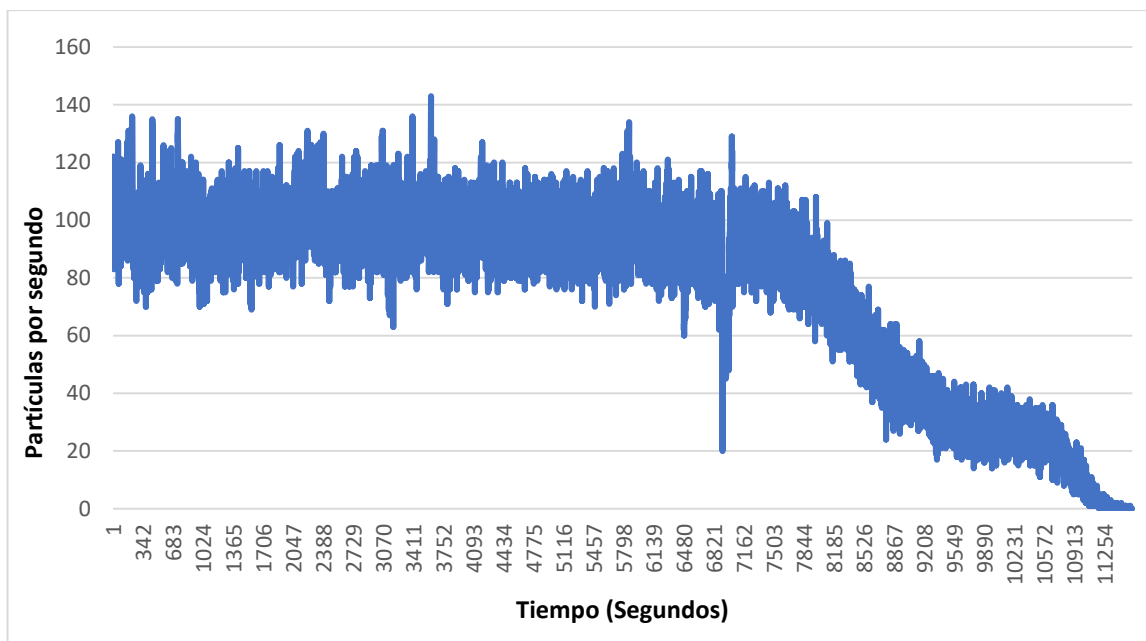


Figura 60: Rate en función del tiempo almacenado en la microSD, con el circuito aislado de la luz

Con el circuito guardado en la caja negra, se dejó funcionando por un rango de tiempo aún mayor, y los datos se tomaron aproximadamente desde las once de la mañana, poco después de los datos tomados de la figura 59. El comportamiento en función del tiempo que se puede ver es que por aproximadamente dos horas el conteo se mantuvo relativamente estable, pero después de los 6700 segundos el conteo presentó de nuevo un comportamiento decreciente hasta llegar a cero. El decaimiento coincidió parcialmente con la nubosidad del cielo, para poder considerar esto como un factor apreciable en la variación del conteo de partículas, se tomaron nuevamente datos en un intervalo de tiempo similar sin aislar el circuito de la luz y dejándolo en un espacio abierto solo, dependiendo únicamente de la condición climática del día.

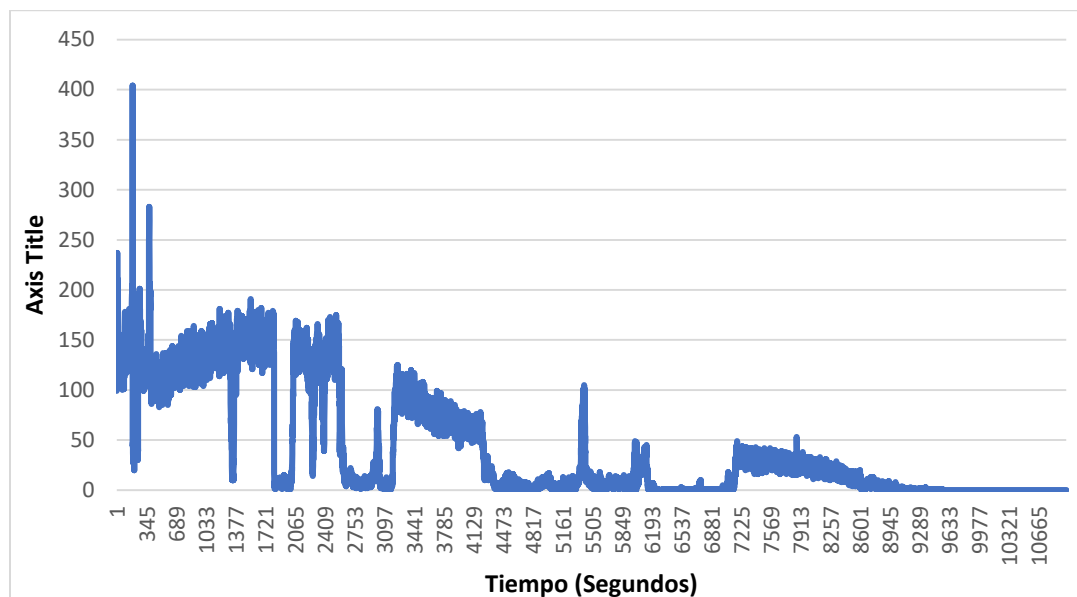


Figura 61: Grafica del rate de partículas en función del tiempo dejando el circuito a la luz txt almacenado en la microSD

Los datos de la figura 61 se tomaron en un rango de tiempo cercano al anterior, se puede observar una tendencia inicial de un comportamiento similar a la de la figura 59, sin embargo, las caídas del conteo se presentaron con más frecuencia. Ya que estos datos fueron tomados después del mediodía, el clima se encontraba algo nublado y la luz solar no tenía la misma intensidad que en la mañana.

Al dejar el circuito a la exposición de la luz natural, la dependencia de esta en el resultado de los datos se hace más intensa, pero si se ve una pequeña alteración cuando hay clima nuboso, aun así la tendencia de los datos indica que sin luz natural no hay una detección de datos, lo cual estaría enfocando el funcionamiento del prototipo en detección de radiación solar y no de partículas cósmicas ya que los rayos cósmicos están presentes tanto de día como de noche, pero al mismo tiempo se evidencia que entre más aislado de la luz este el circuito del prototipo, la dependencia de la luz merma considerablemente.

Por esta razón, el circuito del dispositivo se guardó en su encapsulado el cual también es una caja negra y se sellaron todas sus posibles fugas de luz y se dejó el sistema en funcionamiento por doce horas seguidas para observar su comportamiento desde las nueve de la mañana hasta las nueve de la noche y los factores que podrían afectar el conteo como la intensidad de la luz, el clima nuboso y en la noche.

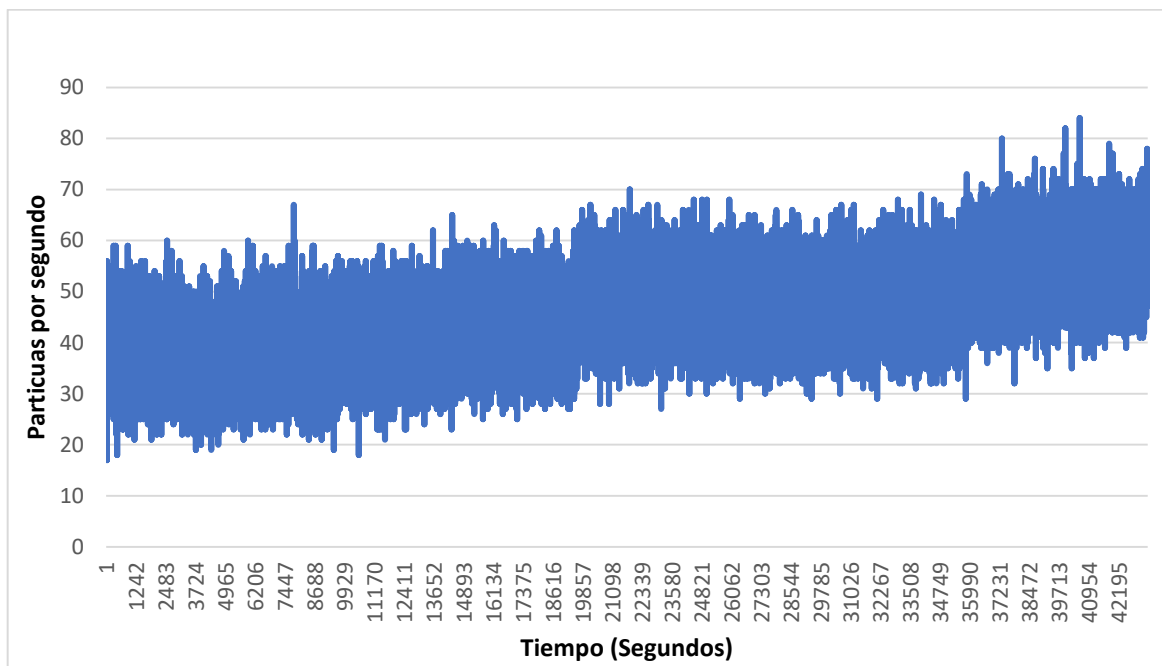


Figura 62: Grafica de datos tomados durante 12 horas

En la gráfica 62 se ven los datos tomados durante aproximadamente 12 horas con el circuito aislado en su totalidad de la luz. Para estos datos se tomó un trigger diferente también al azar en el que el conteo de partículas no superó las 90 por segundo.

Lo que se puede ver en la gráfica es que no hay caídas del rate como en las anteriores pruebas y hay un notable crecimiento de partículas conforme atardece hasta la noche, además de que se trata de mantener una diferencia de 40 partículas por segundo en todo el tiempo en el que se tomaron los datos. El aislamiento aplicado al circuito generó una mayor estabilidad además de eliminar la dependencia de la exposición de la luz y menos alteraciones con respecto a la nubosidad del clima, aunque ese factor no desapareció completamente, pero no generó una variación tan radical.

Para observar mejor el comportamiento del dispositivo en el día y en la noche, se tomaron más datos con diferentes triggers en el día y en la noche.

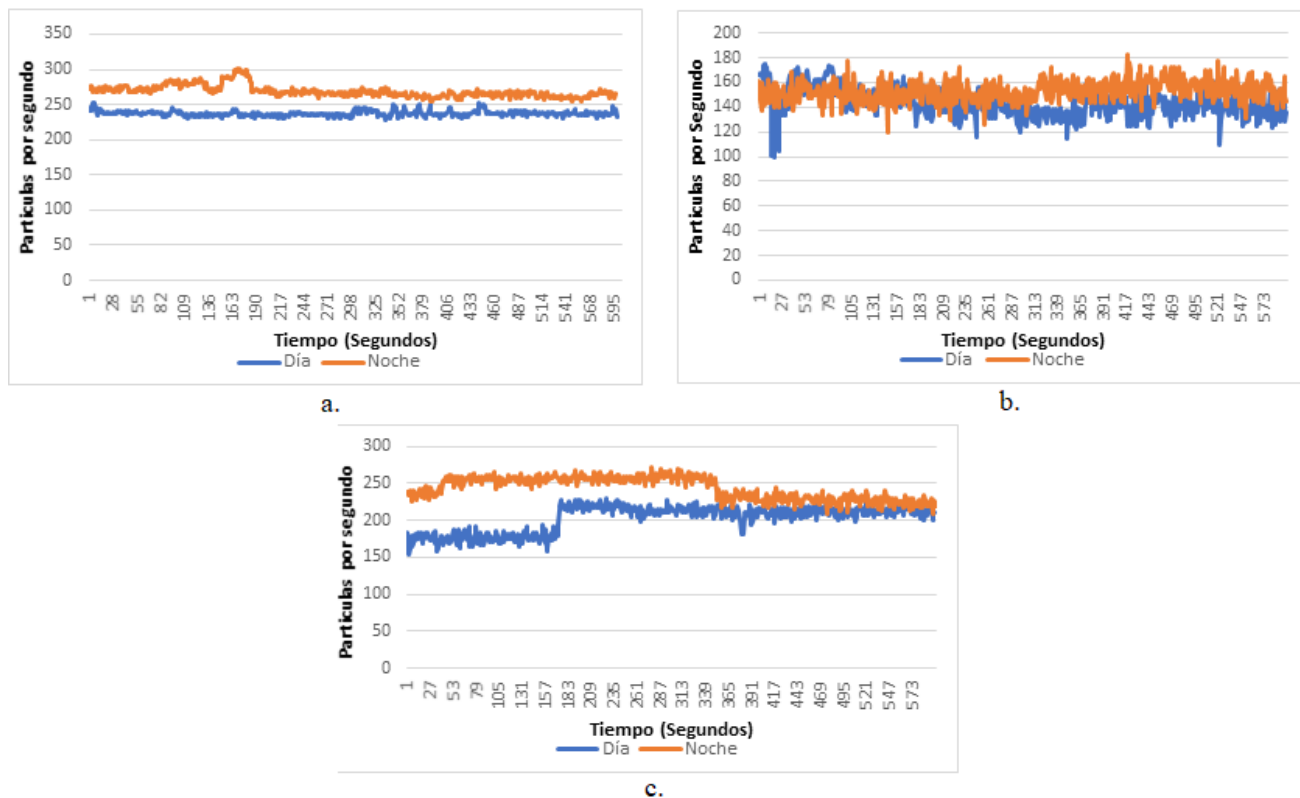


Figura 63: Rate tomado en el día y en la noche con un trigger de: 2.6V (a), 2.7V (b), 2.8V (c)

Los datos de la figura 63 se hicieron en un intervalo de tiempo mucho más corto, reduciendo la cantidad de datos de más de 40000 a no más de 600 y se tomaron los datos dos veces en las mismas configuraciones de trigger, una lectura en la mañana y una lectura en la noche para observar sus variaciones, en la figura 63a se utilizó un trigger de 2.6V, en la 63b un trigger de 2.7V y en la figura 63c un trigger de 2.8V.

El resultado fue algo sorprendente debido a lo que se estaba esperando, ya que si se mantuvo el crecimiento de partículas de noche presentado en los datos de la figura 62 sin importar la configuración de trigger seleccionada lo que descartó una dependencia del trigger en el comportamiento del dispositivo. Sin embargo, como inicialmente se presentaba una disminución del conteo con la ausencia de luz, no se esperaba que hubiera un crecimiento del conteo en la noche una vez hermetizado el dispositivo contra la luz.

La razón de este curioso fenómeno se puede deber a muchas cosas, aun así, una de las razones a que esto suceda es muy probable que sea que en el prototipo únicamente no se están detectando muones, hay más de una partícula presente ahí; las características del fotomultiplicador y del polímero centelleante indican que el muon no es la única partícula posible de detectar. Ahora, es muy importante tener en cuenta que los muones no son partículas cósmicas primarias, son componentes de estas, y según las simulaciones obtenidas en un estudio hecho en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, las partículas cósmicas primarias que pueden llegar a las coordenadas de la ciudad de Tunja son los protones y los núcleos de helio [45], estudio que corroboraría que el prototipo no está detectando únicamente muones ya que no se ha aplicado algún filtro o algoritmo que pueda discriminar cada partícula que le llega.

## **10.2. Calibración del prototipo**

Las pruebas iniciales del dispositivo se realizaron para comprobar si el prototipo presentaba un funcionamiento que pudiera considerarse acertado con lo que teóricamente podría esperarse; sin embargo las pruebas se hicieron con filtros digitales o triggers seleccionados aleatoriamente, sin ninguna justificación en específico aún, por lo que ninguno de los datos obtenidos con anterioridad pueden considerarse como equivalentes a un conteo verdadero de partículas ya que a pesar de que el comportamiento del conteo de datos mostro variaciones congruentes con las condiciones físicas del entorno en el que estaba el prototipo, muchos de los datos no son más que filtraciones de ruido en los circuitos. Para poder suprimir la mayor parte de señales espurias filtradas en la señal, debe determinarse el valor más adecuado del trigger en la programación de Arduino. Para poder seleccionar un valor de trigger funcional es necesario conocer el valor real de la cantidad de partículas por segundo que el dispositivo tiene la capacidad de detectar.

Como se ha descrito antes, las partículas que se desean medir por lo menos en su mayoría son muones y no hay una fuente existente de muones terrestre y para poder conocer el valor real de muones por segundo es necesario usar un dispositivo industrial con una calibración certificada, equipo que actualmente no existe en el departamento, por lo que la única opción sería tomar el valor de muones teórico o simulado

que puede estar presente específicamente en la ciudad de Tunja. Sin embargo, un dato teórico no es suficiente para poder determinar una calibración adecuada, razón por la que es importante tener en cuenta que los muones no son las únicas partículas detectables para el prototipo; como ya se mencionó con anterioridad, las propiedades del polímero centelleante seleccionado permite no solo la interacción de los muones sino también de partículas como: rayos-x, rayos alfas, betas, gammas, muones, protones, neutrones, entre otras; y en consecuencia el fotomultiplicador detecta los destellos lumínicos generados por estas partículas también, por esta razón podría realizarse una calibración a partir de fuentes de rayos gamma y un detector calibrado de estas partículas.

Para llevar a cabo la calibración del detector se utilizaron seis fuentes de radiación diferentes y una cámara de ionización ubicada en el laboratorio de energías nucleares de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC).



Figura 64: Fuentes de rayos gamma, de izquierda a derecha: Sodio 22, elemento desconocido, cobalto 60, estroncio 90, cesio 137 y kriptón 85



Figura 65: Cámara de ionización perteneciente al laboratorio de la UPTC

En la figura 64 están las diferentes fuentes de radiación que fueron utilizadas para la calibración del prototipo, y en la 65 se muestra la cámara de ionización que se encuentra en la UPTC.

Una cámara de ionización es un instrumento medidor que permite realizar el conteo de partículas de algunas fuentes de radiación y su funcionamiento consiste en introducir la fuente en un pequeño tubo el cual consta de un ánodo y un cátodo en el cual se emite un gas que ioniza las partículas de la fuente de radiación en conjunto con un voltaje generando un campo eléctrico que separa a los iones y electrones de la radiación enviando los electrones al ánodo y los iones al cátodo [45].

Las cámaras de ionización son utilizadas por la Oficina Internacional de Pesas y Medidas para medir radionucleidos emisores de rayos gamma para establecer un estándar uniforme en las mediciones de radioactividad en el mundo [45], son detectores que ofrecen una gran precisión y exactitud en cuanto a detección de radiación en fuentes. La cámara de ionización utilizada para calibrar el prototipo de este proyecto permite hacer conteo de partículas en diferentes intervalos de tiempo, puede hacerse el conteo de un minuto hasta diez, en este caso, se hizo el conteo de partículas de cada una de las fuentes seleccionadas en un minuto.

<b>Fuente</b>	<b>CPM (Cuentas por minuto)</b>	<b>CPS (Cuentas por segundo)</b>
Cesio 137 (Partícula beta)	765	13
Cobalto 60 (Partículas gamma)	78	1,3
Desconocida (Partículas gamma)	7238	121
Estroncio 90 (Partículas beta)	1005	13
Kriptón 85 (Partículas beta)	2472	41
Sodio 22 (Partículas beta)	273	5

Tabla 2: Datos de la cámara de ionización

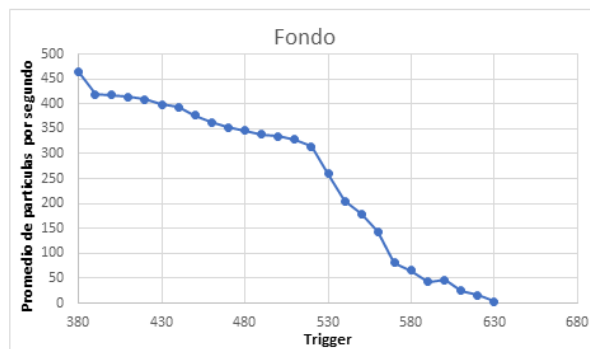
En la tabla 2 se muestran los valores de las partículas por minuto tomadas por la cámara de ionización con cada fuente y una estimación de las partículas por segundo que se obtuvo dividiendo el valor de cada CPM en 60. Las pruebas con cada fuente en el prototipo se hicieron con diferentes configuraciones de trigger, en primer lugar, se tomó un valor inicial de 380 (1.85V) con el que se hizo una medida de fondo, es decir se tomaron datos sin exposición a alguna fuente durante un intervalo corto de tiempo que fue de 10 minutos, en el cual se recogieron aproximadamente 600 datos, después en el mismo intervalo de tiempo se tomaron datos con cada una de las fuentes expuestas con anterioridad. Esta toma de datos se repitió con el mismo intervalo de tiempo con un trigger de 390 (1,9V), luego con uno de 400 (1.95V) y así sucesivamente hasta llegar a un valor de 630 (3,1V). En total, se tomaron 26 conjuntos de datos, cada uno con una configuración de trigger diferente y cada conjunto con siete txt correspondientes al fondo y a las fuentes.

fuentes\trigger	380	390	400	410	420	430	440	450	460	470	480	490
fondo	464,3	419,8	418	414	408,5	399,1	393,8	376,7	363,6	353,2	346,5	339,2
Cesio 137	533	471,5	446,9	442	442	432,9	428	418,8	407	399,8	386,5	381,6
Cobalto 60	477,3	550,8	438,6	427,3	420,6	419	408	389,1	375,9	365,8	362,6	354,3
Descinocida	496,6	477,1	465,6	468,2	460,8	452,5	444,5	422,6	409,6	393,1	386,9	381,3
Estroncio 90	504,2	470,7	484,6	482	480	467,8	465,5	434,7	430,2	427	423,3	415,9
Krypton	488,1	454	423,5	416,1	408	400	404,9	388,4	374	369,1	350,2	350,2
Sodio 22	482,8	449,2	447	444,2	438,5	431,3	423,4	405,2	393,1	386,5	375,2	378,6

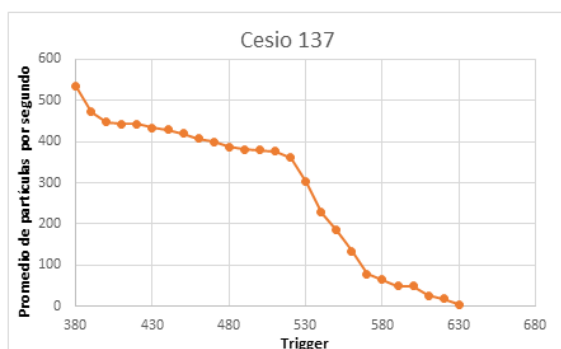
	500	510	520	530	540	550	560	570	580	590	600	610	620	630
	335,5	328,1	314,7	259,9	205	179,1	144,1	80,6	65,8	43,1	46,27	25,5	15,6	3,7
	379,3	376,2	361,1	302,8	227,5	184,6	133,5	78,6	64,9	48,7	49,9	27	18,2	5,4
	353	333,3	325,8	271,2	213,2	183,9	143,7	86,9	72,1	50,3	49,3	25,8	18	7,4
	362,3	361,7	364	304,2	244	196,2	156,3	101,7	79,5	56,6	57,2	30,4	19	8,4
	412,6	394,7	384	327,3	247,2	207,2	172,8	95,6	71,9	54,5	57,3	32,9	21,7	7,2
	350,3	349,9	329,7	303,1	218,3	176,9	139,4	71,4	61,9	48,1	47,4	27	17,8	4,5
	369,1	363,6	346,7	258,6	217,6	192,2	154,2	89,8	69,7	53,8	52,7	32,1	16,7	7,2

Tabla 3: Promedio de las cuentas por segundo tomadas para cada fuente con cada trigger

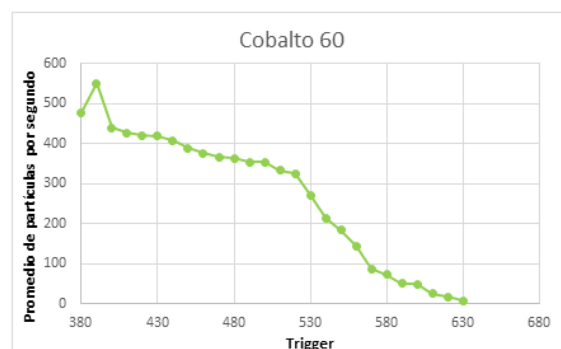
Ya que por cada configuración de trigger se realizaron siete tomas de datos, el total de archivos txt generados fue de 182, y cada uno de esos archivos con aproximadamente 600 datos, por esta razón, el siguiente paso fue sacar el promedio de los datos de cada archivo y organizarlos como se muestra en la tabla 3. Sin importar el valor del trigger aplicado en la programación, se evidenció el aumento de partículas por segundo con respecto al fondo cuando el prototipo se veía expuesto a las diferentes fuentes de rayos gamma, lo que demostró el funcionamiento correcto del prototipo.



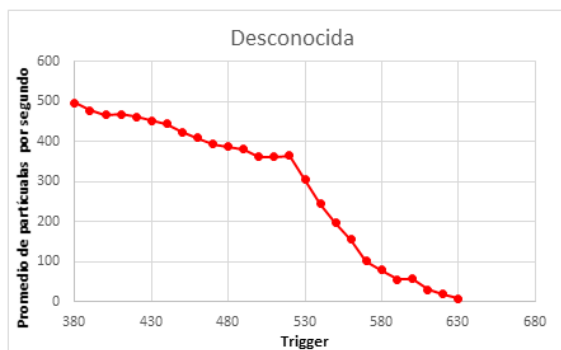
a.



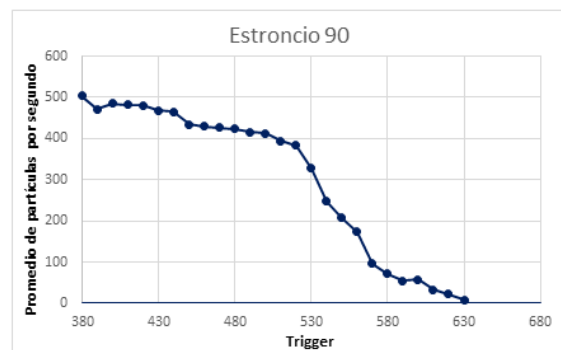
b.



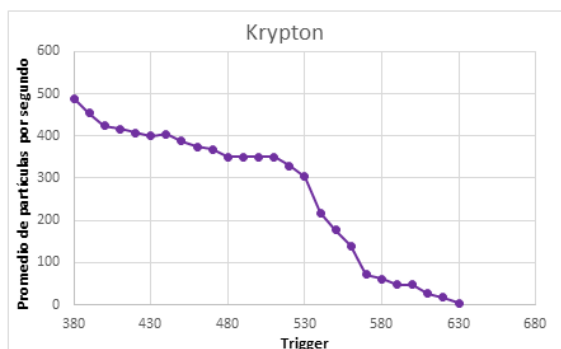
c.



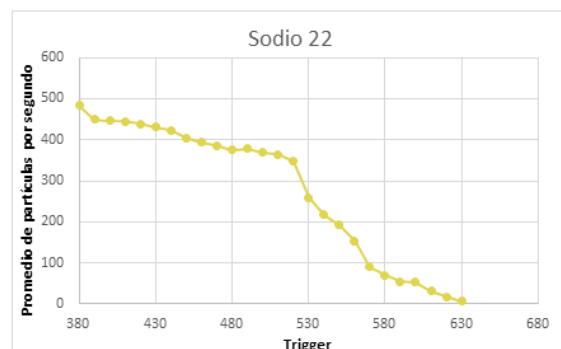
d.



e.



f.



g.

Figura 66: Gráfica del promedio de partículas por segundo tomadas en función de cada trigger de prueba, (a) fondo, (b) cesio, (c) cobalto, (d) fuente desconocida, (e) estroncio, (f) kriptón y (g) sodio.

En la figura 66 se puede observar mucho mejor el comportamiento del funcionamiento del prototipo, se puede apreciar incremento del conteo de partículas por segundo con las diferentes fuentes y además se evidencia según la forma de las gráficas que independientemente de las fuentes que se utilizaron, la forma de cada una tiende a tener un comportamiento muy similar con la forma del fondo. Esto demuestra la trazabilidad del dispositivo y se muestra una estabilidad que no se presentaba en las primeras pruebas del funcionamiento del detector, ya que al ser en cada caso 26 puntos y cada uno el resultado de un promedio de 600 datos no se presenta un comportamiento caótico de la respuesta del dispositivo, Estas gráficas demuestran la estabilidad del detector en diferentes campos de radiación.

Una vez comprendido el funcionamiento del prototipo, se seleccionó el trigger más conveniente para obtener el conteo de partículas más acertado posible, para ello se tomó el valor promedio de cada fuente que más coincidiera con el valor estimado de la cámara de ionización para establecer un rango de trigger posible.

<b>Fuente</b>	<b>Cámara de ionización CPS</b>	<b>Rango de trigger de calibración</b>	<b>Prototipo CPS</b>
Cesio 137	13	620 (3V)	18,2
Cobalto 60	1,3	630 (3,1V)	7,4
Desconocida	121	560-570 (2,75V - 2,8V)	156,6-101,7
Estroncio 90	17	620 (3V)	21,7
Kriptón 85	41	600 (2,93V)	47,4
Sodio 22	5	630 (3,1V)	7,2

Tabla 4: Comparación de los datos de la cámara de ionización con las configuraciones de trigger

El rango del trigger que se aproxima más a los datos de partículas por segundo estimados en la cámara de ionización se encuentra entre 600 y 620 sin contar los valores de 560 a 570 que solo se consideran en la fuente desconocida, por lo que no se tomarán en cuenta para establecer el trigger más conveniente.

Para poder seleccionar un valor entre los tres posibles es necesario en primer lugar identificar cual de todos los resultados es el más alejado al del conteo de partículas según la cámara de ionización, en este caso son las cuentas del cobalto y las cuentas del fuente desconocida; ambas fuentes son emisoras de rayos

gamma, mientras que las otras fuentes son emisoras de rayos beta, gracias a esto se puede determinar que el prototipo es más propenso a detectar betas que gammas, por lo que para la selección del trigger se descartó también el resultado con la fuente de cobalto. Aun así, aunque los datos que más presentan coincidencia con los de la cámara de ionización corresponden a las fuentes de rayos betas, los datos del prototipo sobrestiman los datos tomados en la cámara, por lo que cualquier valor comprendido en un rango de 620 y 630 es un valor adecuado para definir como trigger en el algoritmo del Arduino, para las pruebas finales se dejó el trigger en 620 ya que de todos los datos tomados, el trigger de 620 es el que mostró los resultados mas congruentes con los datos de la cámara de ionización

. La razón por la que no se recomienda utilizar un valor menor a 630 es porque con un trigger mayor a 630 el conteo de partículas es tan bajo que no puede ser tomado en cuenta.

### **10.3. Resultados**

Una vez seleccionado el valor del trigger ya es posible observar los datos de la medida del fondo correspondiente al trigger elegido, ya que, en términos teóricos e ideales, el conteo de partículas de fondo correspondería al conteo total de muones ya que los datos fueron tomados sin que el dispositivo estuviera siendo expuesto a ninguna de las fuentes de radiación usadas.

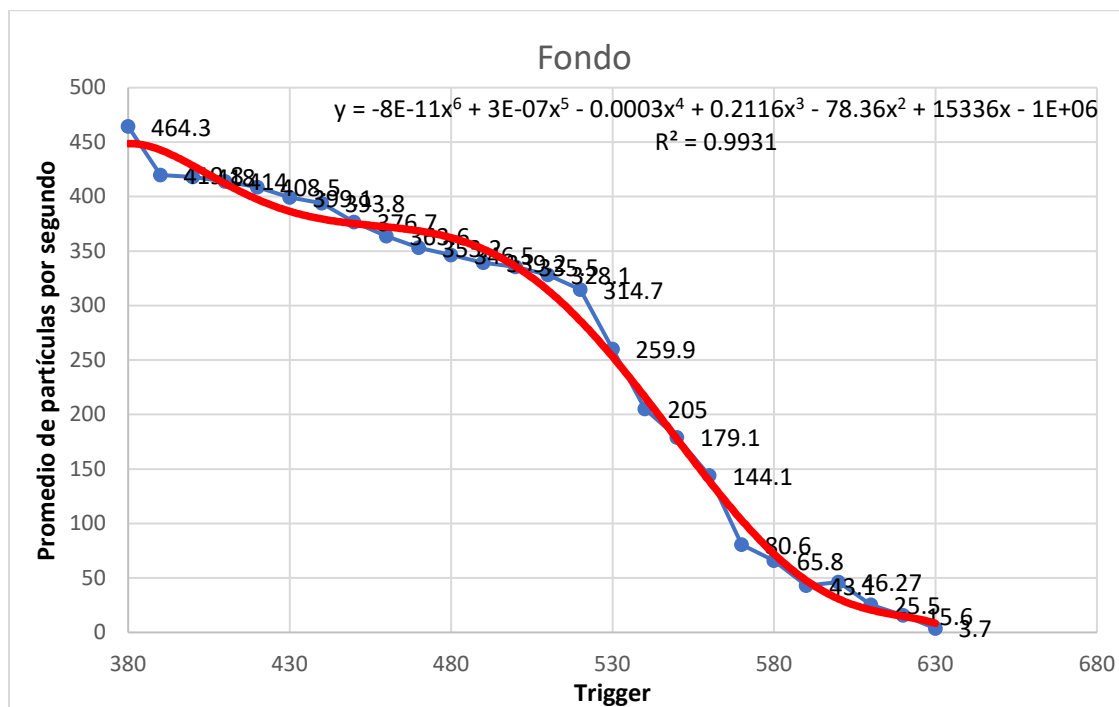


Figura 75: En azul, grafica del comportamiento del fondo en función de trigger, en rojo curva de calibración

Lo que se muestra en la figura 75 es una curva de calibración que se le aplicó a los datos del fondo, ya que las partículas por minuto contadas deberían corresponder a los muones o al menos gran parte de ellas, la curva de calibración debería entregar una función de grado seis en la que se debe reemplazar el valor del trigger seleccionado para poder estimar la cantidad de datos que deberían existir con esa configuración.

La curva de calibración corresponde a un polinomio de grado seis que fue generado al realizar un ajuste de la curva de los datos, encontrando una función correspondiente a la forma de los datos por medio de una estimación estadística realizada con el parámetro de correlación que indica que un ajuste es correcto siempre y cuando la función correspondiente se acerque a 0,99, el parámetro de correlación para la del polinomio fue de 0,993.

$$y = -8E-11x^6 + 3E-07x^5 - 0,0003x^4 + 0,2116x^3 - 78,36x^2 + 15336x - 1E+06 \quad (14)$$

La ecuación 14 es la ecuación de la curva de calibración, en la cual el valor de  $y$  es igual al promedio de partículas por segundo tomadas en el fondo y  $x$  es igual al valor del trigger que se le quiera asignar, en este

caso, el valor de  $x$  debe ser reemplazado en la ecuación por 620, para tener una extrapolación polinómica del número de cuentas esperado.

$$y = 14,8$$

El valor del promedio de las cuentas por segundo interpoladas es de 14,8, con esto se evidencia que el funcionamiento del detector muestra una fuerte dependencia hacia la configuración del trigger que se le asigne, en la calidad de prototipo en la que se encuentra, su modo de calibración está dependiendo principalmente del trigger al ser el único filtro digital que puede aplicarse, ya que está suprimiendo señales con una amplitud menor a 3V, para que una partícula pueda ser contable debe generar una amplitud mayor a 3V.

### ***10.3.1. Error y precisión del dispositivo***

Como se explicó en la sección 6.8.1, el error de un detector de radiación se determina a partir del cociente de 1 y la raíz cuadrada del número de cuentas:

$$\frac{1}{\sqrt{n}} = \frac{1}{\sqrt{14.8}} = 0,259$$

El error relativo del orden de Poisson del detector es de 0,259.

La precisión del prototipo según la ecuación (8) es igual a:

$$\sigma = \sqrt{n} = \sqrt{14.8} = 3,847$$

El dispositivo presenta una imprecisión de 3,847 cuentas.

### ***10.3.2. Exactitud del dispositivo***

Aunque la ecuación para determinar la exactitud es la misma del error relativo, para saber realmente si el dispositivo es exacto es necesario comparar sus datos con datos ideales o con un dispositivo patrón, con en este caso no se tiene ninguna de las dos, la comparación de datos se hizo en base a los datos adquiridos en un experimento realizado en Italia, en el cual se realizó una simulación con un software de alta precisión

de la cantidad de partículas cósmicas que pueden contarse por segundo en un metro cuadrado dependiendo de la altura sobre el nivel del mar.

El artículo citado fue Detection of gamma-ray bursts in the 1 GeV–1 TeV energy range by ground-based experiments, publicado en el año 2000 por Silvia Vernetto en el Instituto di Cosmogeofisica del C.N.R de Italia, en donde se toman medidas de rayos cósmicos en la tierra con el objetivo principal de medir rayos gama pero habiendo una discriminación de gran parte de las partículas que llegan a la tierra, el método de medida es tomar un rate de partículas por metro cuadrado por medio de una forma de detección que consiste en una matriz de ducha de aire, lo cual permite detectar partículas en áreas extensas de entre 1m<sup>2</sup> y 5m<sup>2</sup> [10]

En el experimento de Vernetto se muestra una gráfica que corresponde a una simulación en el software CORSIKA, el cual es un programa que permite hacer simulaciones de alta precisión de las cascadas atmosféricas generadas por la interacción de rayos cósmicos en la atmosfera terrestre, la gráfica de la simulación muestra las cascadas atmosféricas generadas por protones y núcleos de helio, proporciona una proporción de la cantidad de varias partículas cósmicas medidas por segundo por metro cuadrado en función de la altura sobre el nivel del mar [10]

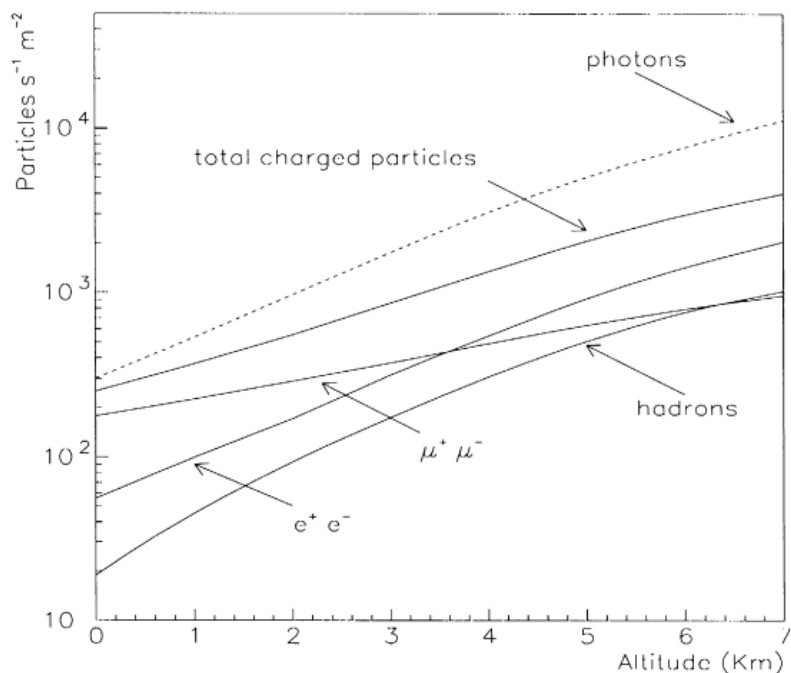


Figura 76: Grafica de la simulación de cascadas atmosféricas generada por el software CORSIKA [10]

En la gráfica se pueden observar 5 comportamientos de partículas en un área determinada con respecto a la altura sobre el nivel del mar: Comportamiento de electrones ( $e^\pm$ ), muones ( $\mu^\pm$ ), hadrones, protones y una media del total de partículas cargadas, si se toma en cuenta esta grafica se tendría que ya que Tunja se encuentra exactamente a 2822 metros sobre el nivel de el mar, el rate de muones por segundo por metro cuadrado esperado sería aproximadamente de 250, sin embargo los datos del simulador corresponden a un área de medición total de  $1m^2$ , mientras que en el prototipo diseñado se tiene un área de detección únicamente de  $5cm \times 5cm$  que es el área de polímero centelleante, así que para poder estimar un trigger tomando como referencia los datos de la figura 76, es necesario hacer una proporción para determinar el rate estimado en un área de  $25cm^2$ , esto define que  $25cm^2$  es el total de 0.25% de  $1m^2$ , por lo que sacándole el 0.25% al rate estimado de 250, se estaría obteniendo un conteo de 0.63 partículas por segundo, debido a que no alcanza a ser ni una partícula por segundo, se hizo una extrapolación en donde el rate quedo 7,7 partículas por segundo.

Según los datos de la simulación realizada Vernetto, la componente muónica estimada para Tunja se encuentra en un promedio de 7,7 partículas por segundo, pero como se mencionó anteriormente, el prototipo esta detectando mas de un tipo de partículas, por lo que el valor de 14,8 es la suma de todas las componentes de partículas que tiene la capacidad de detectar, es por esta razón que la cantidad de partículas detectada sobrepasa por prácticamente el doble de la estimación esperada de muones.

## 11. Conclusiones y perspectivas

- El funcionamiento principal del prototipo consiste en la detección de partículas por medio de centelleos de luz por lo que mantener el circuito completamente aislado de la luz es absolutamente necesario, ya que como se evidenció, cualquier filtración de luz afecta directamente al fotomultiplicador de silicio generando una clara inestabilidad y disparando el conteo de partículas. Gran parte de la estabilidad del prototipo es directamente proporcional a la hermetización de la electrónica.
- El prototipo diseñado presenta una alta sensibilidad al ruido eléctrico debido a los amplificadores y al fotomultiplicador seleccionado, el tamaño de las tierras y la distancia de conexión entre componentes puede significar una filtración de ruido y por consiguiente la alteración completa del conteo de partículas por segundo, el uso de cables con aislamiento de ruido para la transmisión de datos de la etapa analógica a la etapa de conversión AD es indispensable.
- La calibración actual del prototipo depende únicamente del algoritmo de Arduino ya que por el momento la única forma de suprimir las señales espurias presentes en la electrónica del sistema es por medio de una especie de filtro digital el cual es el trigger, esto se debe a que el origen de dichas señales se debe a más de un factor, como ruido térmico, ruido eléctrico, pequeñas filtraciones de luz que se presenten, entre otras.

- A pesar de que el prototipo está dirigido a la detección de muones, fue posible hacer detección de partículas gamma, beta (donde presento una capacidad de detección de rayos beta que de rayos gamma) y también de electrones, por lo que también es posible que detecte partículas alfas y neutrones. Sin embargo, el conteo de partículas que realiza el prototipo es la suma de todas las partículas presentes que tenga capacidad de detectar, para realizar una discriminación para determinar el tipo de partícula por separado se requiere un estudio más minucioso de la señal que no es el objetivo de esta tesis.
- Ya que no se tiene acceso a un dispositivo patrón ni una fuente de muones terrestre manipulable y que no es posible aun realizar una separación de las partículas que se detectan, la calibración del prototipo tuvo que hacerse a partir de fuentes disponibles de las otras partículas que también están en la capacidad de detección del dispositivo, la determinación de la precisión, exactitud y del error del detector es una estimación.
- Según el decaimiento de partículas generado por el clima nublado, sería posible posteriormente utilizar el detector de muones para predicciones climáticas, claro cuando tenga una calibración mucho más precisa que la que se tiene actualmente, y realizando un análisis de las señales mucho más intensos que permitan determinar un porcentaje de decaimiento según la concentración nubosa.

## 12. Referencias

[1] López, J.C, (2021, abril), Xalaka, Radiación cósmica: qué es, de dónde procede y qué nos protege de ella. Disponible en línea en <https://www.xataka.com/espacio/radiacion-cosmica-que-donde-procede-que-nos-protege-ella>

[2] Latin American Giant Observatory (LAGO). (2010), Geographical Distribution and Altitudes of LAGO Water Cherenkov Detectors. Disponible en línea en <http://lagoproject.net/sites.html>

[3] Benzinger, B. Jawerh, N. (2018, octubre) IAEA (International Atomic Energy Agency), Rayos cósmicos para medir los niveles de humedad del suelo. Disponible en línea en <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/rayos-cosmicos-para-medir-los-niveles-de-humedad-del-suelo#:~:text=Los%20neutrones%20que%20llegan%20a,y%20adaptarse%20al%20cambio%20clim%C3%A1tico.>

[4] Latin American Giant Observatory (LAGO). (2010), Disponible en línea en <http://lagoproject.net/>

[5] Comisión Nacional de Energía Atómica, Laboratorio de Detección de Partículas y Radiación. (2016), El Latin American Giant Observatory (LAGO), Disponible en línea en <https://labdpr.cab.cnea.gov.ar/lago.php>

[6] Sansalone, A. Pérez Bertolli, C. (2019, julio), Diseño y caracterización de un detector de muones combinado: Water Cherenkov y paletas centelladoras, Universidad de Buenos Aires. Recuperado de [http://lagoproject.net/publications/Informe\\_final\\_laboratorio\\_6\\_y\\_7\\_.pdf](http://lagoproject.net/publications/Informe_final_laboratorio_6_y_7_.pdf)

[7] Machado Carvajal, L.E. (2018, febrero), Construcción de un Detector de Muones Portátil para el Laboratorio de Astropartículas de la Escuela Politécnica Nacional, Escuela Politécnica Nacional. Recuperado de <file:///C:/Users/Mar%C3%ADa/Documents/Mar%C3%ADa/2022/Documentos%20de%20Tesis/CD-8540.pdf>

[8] Duarte Carrasco, J.A. Diseño e Implementación de un Sistema de Adquisición de Datos para Muones, Universidad de los Andes. Recuperado de <file:///C:/Users/Mar%C3%ADa/Documents/Mar%C3%ADa/2022/Documentos%20de%20Tesis/u830846.pdf>

[9] Marcolin, N. (2010, enero), Revista Pesquisa, Los Enigmas del Espacio. Disponible en línea en <https://revistapesquisa.fapesp.br/es/los-enigmas-del-espacio/>

[10] Vernetto, S. (2000, marzo), Detection of gamma-ray bursts in the 1 GeV-1 TeV energy range by ground-based experiments, Astroparticle Physics, Vol 13.

[11] Instituto de Tecnologías en Detección y Astropartículas (ITeDA), ¿Qué son los rayos cósmicos?, tomada de <https://www.iteda.cnea.gov.ar/?q=node/28>

[12] Carvajal Parra, J.P. (2020), Implementación de un detector Cherenkov acoplado a un telescopio de muones para el estudio de muones atmosféricos, Universidad de los Andes. Disponible en línea en <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/50728/23890.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[13] MuTe, Detectores Cherenkov de agua. Tomada de <https://halley.uis.edu.co/fuego/el-proyecto-mute/conceptos-fisicos-y-de-deteccion/detectores-cherenkov-de-agua/>

[14] Pierre Auger OBSERVATORY, (2018), Detectores de Superficie. Disponible en línea en <https://visitantes.auger.org.ar/index.php/detectores-de-superficie/>

[15] Connor, N. (2020, marzo), Radiaton Dosimetry, ¿Qué es el detector Cherenkov vs el detector de centelleo? Disponible en línea en <https://www.radiation-dosimetry.org/es/que-es-el-detector-cherenkov-vs-el-detector-de-centelleo-definicion/>

[16] Guachalla Alarcón, N. Yáñez Pagans, S. Calle García, C. (2016, junio), Resultados del taller "Instrumentación en física de partículas elementales" como parte del proyecto escaramujo en La Paz – Bolivia, Revista Bolivariana de Física, vol.29. Disponible en línea en [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1562-38232016000200001](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1562-38232016000200001)

[17] Barradas Solas, F. (2011, septiembre), Física experimental de partículas en el instituto, Centro Nacional de Física de Partículas, Astropartículas y Nuclear. Disponible en línea en [https://www.i-cpan.es/concurso2/docs/premio\\_experimentos.pdf](https://www.i-cpan.es/concurso2/docs/premio_experimentos.pdf)

[18] Saint – Gobain Crystals, Scintillation Materials. Disponible en línea en <https://www.crystals.saint-gobain.com/radiation-detection-scintillators>

[19] Saint – Gobain Crystals, BC-400, BC-404, BC-408, BC-412, BC-416 General Purpose. Disponible en línea en <https://www.crystals.saint-gobain.com/radiation-detection-scintillators/plastic-scintillators/bc-400-bc-404-bc-408-bc-412-bc-416>

[20] Piatek, S. (2016, octubre), Hamamatsu Corporation & New Jersey Institute of Technology, what is an SiPM and how does it work? Disponible en línea en <https://hub.hamamatsu.com/us/en/technical-notes/mppc-sipms/what-is-an-SiPM-and-how-does-it-work.html>

[21] Newark, MICROFC-30050-SMT-TR1, Fotomultiplicador Silicio (SiPM), Serie-C, 3mmx3mm, 50µm/2668 Microceldas, 420nm, CWDFN-4. Tomado de <https://www.newark.com/es/onsemi/microfc-30050-smt-tr1/sipm-ic-50um-cwdfn-4/dp/82AC2983>

[22] AdvanSin, (2014), Introduction to SiPMs, Basic SiPM Structure and Operation. Tomada de [up{ }189{ }1411030571.pdf](http://up{ }189{ }1411030571.pdf) (advansid.com)

[23] Onsemi (2022, febrero), Silicon Photomultipliers (SiPM), Low-Noise, Blue-Sensitive C-Series SiPM Sensors, Rev. 9, Disponible en línea en <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/microc-series-d.pdf>

[24] Rashid, H. M. (1999), Circuitos Microelectrónicos análisis y diseño, Universidad de Florida

[25] Carrod electrónica, LM741CN. Tomada de: <https://www.carrod.mx/products/lm741-amplificador-operacional>

[26] Pertence Jr., A. (1991), Amplificadores Operacionales y Filtros Activos: Teoría, Proyectos y Aplicaciones Prácticas, Madrid

[27] Google Imágenes. Tomada de:  
[https://www.google.com/search?q=amplificador+inversor&rlz=1C1ONGR\\_esCO990CO990&sxsrf=ALiCzsargqj4w2ecL2CZc8gY4tjiuqkXsA:1658697566144&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwj3eD5uZL5AhX7RzABHfiQCdcQ\\_AUoAXoECAEQAw&biw=767&bih=712&dpr=1.25#imgrc=J5sYfGwxIsVwEM](https://www.google.com/search?q=amplificador+inversor&rlz=1C1ONGR_esCO990CO990&sxsrf=ALiCzsargqj4w2ecL2CZc8gY4tjiuqkXsA:1658697566144&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwj3eD5uZL5AhX7RzABHfiQCdcQ_AUoAXoECAEQAw&biw=767&bih=712&dpr=1.25#imgrc=J5sYfGwxIsVwEM)

[28] Google imágenes. Tomada de:  
[https://www.google.com/search?q=amplificador+no+inversor&rlz=1C1ONGR\\_esCO990CO990&sxsrf=ALiCzsbmqQNb0eRH5T46GUNf8lh4ZpSYJg:1658698041460&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiI37Pcu5L5AhWMRjABHYZ-AJEQ\\_AUoAXoECAEQAw&biw=767&bih=712&dpr=1.25#imgrc=WbczjqotctCzxM](https://www.google.com/search?q=amplificador+no+inversor&rlz=1C1ONGR_esCO990CO990&sxsrf=ALiCzsbmqQNb0eRH5T46GUNf8lh4ZpSYJg:1658698041460&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiI37Pcu5L5AhWMRjABHYZ-AJEQ_AUoAXoECAEQAw&biw=767&bih=712&dpr=1.25#imgrc=WbczjqotctCzxM)

[29] Google imágenes. Tomada de  
[https://www.google.com/search?q=sumador+inversor&rlz=1C1ONGR\\_esCO990CO990&sxsrf=ALiCzsb4g9sBWHnp-1Um1n\\_768w2\\_p0rhA:1658710872564&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwi3k-DC65L5AhWBUjABHTVLCRwQ\\_AUoAXoECAEQAw&biw=1536&bih=722&dpr=1.25#imgrc=kTaq2Rm4hmSIMM](https://www.google.com/search?q=sumador+inversor&rlz=1C1ONGR_esCO990CO990&sxsrf=ALiCzsb4g9sBWHnp-1Um1n_768w2_p0rhA:1658710872564&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwi3k-DC65L5AhWBUjABHTVLCRwQ_AUoAXoECAEQAw&biw=1536&bih=722&dpr=1.25#imgrc=kTaq2Rm4hmSIMM)

[30] Google imágenes. Tomada de

[https://www.google.com/search?q=amplificador+diferencial&tbm=isch&ved=2ahUKEwjNwdOT7Jb5AhWSXTABHQHqAK4Q2-cCegQIABAA&oq=amplificador+diferencial&gs\\_lcp=CgNpbWcQAzIECCMQzIFCAAQgAQyBQgAEIAEMgUIABCABDIFCAAQgAQyBQgAEIAEMgUIABCABD0ECAAQQzoGCAAQHhAIOgcIABCxAxBDOggIABCABBCxA1CPBVj9HGD2HmgAcAB4AIABkwGIAfcUkgEFMTAuMTWYAQCgAQGqAQQnd3Mtd2l6LWltZ8ABAQ&sclient=img&ei=4QTgYo3NCpK7wbkPgdSD8Ao&bih=712&biw=767&rlz=1C1ONGR\\_esCO990CO990#imgrc=peneZqq4zU4deM](https://www.google.com/search?q=amplificador+diferencial&tbm=isch&ved=2ahUKEwjNwdOT7Jb5AhWSXTABHQHqAK4Q2-cCegQIABAA&oq=amplificador+diferencial&gs_lcp=CgNpbWcQAzIECCMQzIFCAAQgAQyBQgAEIAEMgUIABCABDIFCAAQgAQyBQgAEIAEMgUIABCABDIFCAAQgAQyBQgAEIAEMgUIABCABD0ECAAQQzoGCAAQHhAIOgcIABCxAxBDOggIABCABBCxA1CPBVj9HGD2HmgAcAB4AIABkwGIAfcUkgEFMTAuMTWYAQCgAQGqAQQnd3Mtd2l6LWltZ8ABAQ&sclient=img&ei=4QTgYo3NCpK7wbkPgdSD8Ao&bih=712&biw=767&rlz=1C1ONGR_esCO990CO990#imgrc=peneZqq4zU4deM)

[31] Es.jf-parede, Detector de picos simple para detectar y mantener niveles de voltaje pico. Disponible en línea en <https://es.jf-parede.pt/simple-peak-detector-detect>

[32] ANALOG DEVICES (1999), 800Mhz, 50mW Current Feedback Amplifier, AD800. Disponible en línea en <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/48366/AD/AD8001.html>

[33] Cucho, Z. Orihuela, F. Sánchez, R. Rodríguez, L. (2007), Microcontroladores, Pontificia Universidad Católica del Perú.

[34] Arduino, ¿Qué es Arduino? Disponible en línea en: <https://arduino.cl/que-es-arduino/>

[35] Arduino, Arduino UNO. Disponible en línea en: <https://arduino.cl/arduino-uno/>

[36] Arduino, Arduino Mega. Disponible en línea en: <https://arduino.cl/arduino-mega-2560/>

[37] Arduino, Arduino Nano. Disponible en línea en: <https://arduino.cl/arduino-nano/>

[38] Tsoufanidis, N. (1995), Measurement and Detection of Radiation, second edition, Taylor & Francis, Washington DC, USA.

[39] Geek Factory, LM7805 regulador de voltaje a 5V 1A TO-220, <https://www.geekfactory.mx/tienda/componentes/reguladores-de-voltaje/lm7805-regulador-de-voltaje-5v-1a-to-220/>

[40] Axani, S. N. Frankiewicz, K. Conrad, M.J. (septiembre, 2018), CosmicWatch: The Desktop Muon Detector, Estados Unidos.

[41] Electronilab, Convertidor DC-DC Elevador XL6009 Boost, <https://electronilab.co/tienda/convertidor-dc-dc-elevador-xl6009-boost/>

[42] Meanwell, SIP Package DC-DC Unregulated Converter, SPU01 & DPU01 series, (mayo, 2022), <https://www.meanwell-web.com/content/files/pdfs/productPdfs/MW/DPU01/SPU01,DPU01-spec.pdf>

[43] PhysicsOpenLab, (marzo, 2023), SiPM & Plastic Scintillator, <https://physicsopenlab.org/2016/03/31/sipm-plastic-scintillator/>

[44] Terashima, Y. (junio, 1960), Solar Modulation of Primary Cosmic Rays, Departamento de Ciencia Nuclear de la Universidad de Kioto, Kioto,

[45] Pérez Ríos. A.J, (2017), Simulación de Cascadas Producidas por Rayos Cósmicos Usando Variables Locales, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja.