



**ANALISIS DEL DESEMPEÑO DE UN
PREAMPLIFICADOR IMPLEMENTADO PARA LA
RESPUESTA DE UN SIPM EN EL MARCO DEL
EXPERIMENTO DUNE**

MILLER FABIAN SANTOS JIMENEZ

20441619201

HANS ANTHONY LÓPEZ CÉSPEDES

20441716509

**UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO
PROGRAMA INGENIERÍA MECÁNICA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA, ELECTRÓNICA
Y BIOMÉDICA**

VILLAVICENCIO, COLOMBIA

2023

**ANALISIS DEL DESEMPEÑO DE UN
PREAMPLIFICADOR IMPLEMENTADO PARA LA
RESPUESTA DE UN SIPM EN EL MARCO DEL
EXPERIMENTO DUNE**

MILLER FABIAN SANTOS JIMENEZ

20441619201

HANS ANTHONY LÓPEZ CÉSPEDES

20441716509

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Electrónico

Director (a):

Ing. Luis Fernando Castañeda Melo

Línea de Investigación:

Nombrar la línea de investigación en la que se enmarca el trabajo de grado.

Grupo de Investigación:

Nombrar el grupo en caso de que sea posible

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Electrónica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Villavicencio, Colombia

2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado
_____Cump
le con los requisitos para optar
Al título de _____.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Villavicencio, 10 11 2023

Dedicado a mi familia

Agradecimientos

Primeramente, agradecido con mi familia. Fueron ellos quienes no solamente me proporcionaron los recursos económicos que todo este proceso conlleva, sino que también se llenaron de paciencia en tiempos difíciles. A veces perdemos el impulso y las ganas de continuar, pero sin importar que mi vida académica se hubiera opacado, nunca me negaron la opción de estudiar.

También quiero agradecer la entrega de Javier Castaño y Luis Castañeda, quienes siempre demostraron pasión por su labor de enseñar y desarrollar las aptitudes de un estudiante. Un agradecimiento muy especial y personal para el Ing. Luis Fernando Castañeda. La realidad es que, sin su insistencia, supondría que no es una tarea que deban realizar los docentes, como llamar a los estudiantes para preguntar por su estado emocional y motivarlos a terminar su carrera. Pienso que esto debería ser una tarea de la parte psicológica de bienestar universitario, pero NO. Como decimos vulgarmente, el Ing. se puso la 10 y siempre estuvo muy pendiente de mi proceso. A pesar de haber perdido la pasión por estudiar ingeniería, él hizo que ese sentimiento volviera a nacer en mí durante todo el proceso del trabajo integral de grado.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	10
ABSTRACT.....	11
INTRODUCCIÓN	12
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
2. JUSTIFICACIÓN	16
3. OBJETIVOS	18
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	18
3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	18
4. MARCO TEORICO	19
4.1. FOTOMULTIPLICADORES DE SILICIO (SIPM)	19
4.2. VENTAJAS DE LOS FOTOMULTIPLICADORES DE SILICIO	20
4.4. EXPERIMENTO DE NEUTRINOS SUBTERRÁNEOS PROFUNDOS (DUNE).	21
5. DISEÑO METODOLOGICO	23
5.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	23
5.2. FASES METODOLÓGICAS	23
5.3. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	25
5.4. RESULTADOS ESPERADOS	25
6. ANALISIS DE RESULTADOS	26
6.1. SIMULACIÓN DEL CIRCUITO CON LOS PARÁMETROS Y CONDICIONES ESTABLECIDOS EN EL ARTÍCULO “DISEÑO DE AMPLIFICADOR FRONTAL CRIOGÉNICO PARA GRANDES MATRICES DE	

SIPM EN EL SISTEMA DE DETECCIÓN DE FOTONES DUNE FD1-HD”, PARA LA VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS REPORTAOS.	26
6.2. DISEÑO DEL PCB (HIGH DENSITY INTERCONNECTS) CON ESTÁNDARES IPC PARA EL ESTABLECIMIENTO DE LAS CONDICIONES Y PARÁMETROS A TENER EN CUENTA.	31
6.3. PROTOTIPADO DEL CIRCUITO DE ADQUISICIÓN Y ADECUACIÓN DE SEÑAL PARA VALORACIÓN DE SU FUNCIONAMIENTO.	35
6.4. REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE SU APLICABILIDAD.	39
6.4.1. Análisis del comportamiento de la señal de salida al someter el circuito amplificador a fuertes variaciones de temperatura.....	44
6.4.2. Análisis y tratamiento de los datos obtenidos	46
7. CONCLUSIONES.....	48
8. RECOMENDACIONES.....	49
9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	50

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Mediciones de temperatura con el mini termómetro LCD	44
---	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de diseño del amplificador	28
Figura 2. Señales de respuesta y entrada del circuito pre-amplificador.....	30
Figura 3. Tabla de códigos de huellas imperial y métrico	31
Figura 4. Clasificación de nodos.....	32
Figura 5. Diseño final del circuito amplificador.....	34
Figura 6. Placa de cobre y base aislante de vidrio	35
Figura 7. Componentes THS4531 y BFP640.....	35
Figura 8. Conectores de entrada y salida.....	36
Figura 9. Diseño de mascara de soldadura y serigrafía superior.	36
Figura 10. Baqueta Post proceso de sumersión en acido.	37
Figura 11. Prototipo del circuito amplificador.	38
Figura 12. Montaje final del circuito protegido con acrílico	38
Figura 13.Planta de caracterización de SiPM	39
Figura 14. Respuesta del SiPM en el circuito amplificador.....	41
Figura 15.Montaje del circuito completo	41
Figura 16. Señal emitida por la respuesta del SiPM.....	42
Figura 17. Señalización grafica de las señales emitidas	43
Figura 18. Señales de salida y entrada en las variaciones de temperatura	46
Figura 19. Formación de cristales de hielo en la placa	46
Figura 20. Análisis de las señales en el programa Matlab	47

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo analizar el desempeño de un preamplificador implementado para la respuesta de un SiPM en el marco del experimento DUNE, para su ejecución se empleó una metodología cuantitativa, descriptiva bajo un enfoque experimental, para su desarrollo se llevaron a cabo cuatro fases la primera consistió en la simulación del circuito con los parámetros establecidos, la segunda fase abarco el diseño del PCB, la tercera fase se basó en el prototipado del circuito y la cuarta fase la realización de pruebas de funcionamiento. Para lo cual se emplearon como elementos el amplificador operacional THS4501 y un Transistor BFP22, los resultados arrojaron que el prototipado obtenido El prototipado obtenido en este proyecto permitió que se adquiriera una placa con montaje SMD capaz de recepcionar cualquier tipo de señal de respuesta de un fotomultiplicador de silicio con sensibilidad y resolución optima que permitió detectar eventos pequeños como el fotón y lograr filtrar la señal eliminando así el sobre muestreo del SiPM y el rizado y turbulencias de la señal de entrada. Se concluye que el prototipado obtenido en este proyecto permitió detectar eventos pequeños como el fotón y lograr filtrar la señal eliminando así el sobre muestreo del SiPM y el rizado y turbulencias de la señal de entrada.

Palabras claves: SiMP, fotomultiplicadores de silicio, temperaturas, amplificador y transistor.

ABSTRACT

The objective of this research was to analyze the performance of a preamplifier implemented for the response of a SiPM within the framework of the DUNE experiment. For its execution, a quantitative, descriptive methodology was used under an experimental approach. For its development, four phases were carried out. The first consisted of the simulation of the circuit with the established parameters, the second phase covered the design of the PCB, the third phase was based on the prototyping of the circuit and the fourth phase the performance of functional tests. For which the THS4501 operational amplifier and a BFP22 transistor were used as elements, the results showed that the prototype obtained The prototype obtained in this project allowed the acquisition of a board with SMD assembly capable of receiving any type of response signal from a photomultiplier silicon with optimal sensitivity and resolution that allowed detecting small events such as photons and filtering the signal, thus eliminating oversampling of the SiPM and ripple and turbulence of the input signal. It is concluded that the prototyping obtained in this project allowed us to detect small events such as the photon and to filter the signal, thus eliminating the oversampling of the SiPM and the ripple and turbulence of the input signal.

Keywords: SiMP, silicon photomultipliers, temperatures, amplifier and transistor.

INTRODUCCIÓN

Los fotomultiplicadores de silicio por sus siglas en inglés (SiPM) o también conocidos como fotodiodos de avalancha en modo Geiger (Geiger-mode Avalanche Photo-Diodes, GAPDs) son dispositivos fotodetectores que se caracterizan por tener una alta sensibilidad y poseer ventajas relacionadas a su alta eficiencia de fotodetección, insensibilidad al alto campo magnético, excelente resolución de tiempo, bajos niveles de consumo y voltaje de polarización y son sensores de bajo costo [1], [2].

Por lo tanto, todas estas características lo han convertido en el dispositivo de preferencia a implementar en las tecnologías potenciales de fotodetectores siendo gran aplicación en requerimientos de alta frecuencia, ultra baja intensidad luminosa y en aplicaciones de partículas y física nuclear ya que permiten una construcción simplificada del detector, especialmente en aplicaciones con restricciones geométricas severas dado que al ser de un tamaño pequeño facilitan su acoplamiento [3].

Los fotomultiplicadores de silicio operados a temperaturas criogénicas son actualmente los que mayor se están utilizando en la nueva generación de experimentos de neutrinos que se ejecutan con un área sensible muy grande como los Darkside y DUNE ya que permiten operar a temperaturas criogénicas con ruido adaptable y disipación de potencia, ayudando a minimizar el burbujeo en el líquido y optimizar el rendimiento con respecto al número de SiPMs operados en paralelo [4]. Así mismo tienen la capacidad de revertir estos cambios durante muchos ciclos térmicos [5].

Por lo tanto, teniendo en cuenta todas las ventajas y propiedades que poseen este tipo fotodetectores y su gran utilización en investigaciones se planteó implementar un preamplificador de la respuesta del SiPM para temperatura criogénica, el objetivo general de la investigación consiste en implementar un preamplificador de adquisición y adecuación de la señal y respuesta de un SiPM, para el cual se utilizara una metodología experimental, cuantitativa y descriptiva. La investigación

se llevará en cabo los laboratorios de la Universidad Antonio Nariño sede Villavicencio el cual cuenta con laboratorios de detectores (LabDet) en el Centro de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas (CICBA).

Para la ejecución inicialmente se plantea el problema de la investigación, la causas que justifican su realización, se explican conceptos relacionados a la temática y se analizan algunas prácticas para obtener una mayor comprensión del tema a desarrollar. El trabajo investigativo se llevó a cabo cuatro fases la primero consistió en simular el circuito con los parámetros establecidos en el artículo, la segunda se basó en diseñar PCB (High density interconnects) con estándares IPC, la tercera fase fue prototipar el circuito de adquisición y adecuación de señal y la cuarta fase consistió en realizar las pruebas de funcionamiento. Finalmente se plantean los resultados obtenidos, las conclusiones de la investigación y las recomendaciones para futuros proyectos.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Universidad Antonio Nariño sede Villavicencio cuenta con el Laboratorio de Detectores (LabDet) el cual se encuentra adscrito al Centro de Investigación en Ciencias Básicas y aplicadas (CICBA) y al grupo de investigación de sistemas complejos y con la colaboración de la Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica participa en la colaboración internacional DUNE específicamente en la medición de procesos que involucran interacción con neutrinos en argón líquido.

A través de esta colaboración internacional la UAN ha venido desarrollando en su laboratorio de detectores la electrónica analógica para la adquisición de datos mediante SiPM. Los SiPM son fotomultiplicadores de silicio que contiene dispositivos fotodetectores semiconductores que integran altas cantidades de microcélulas idénticas e independientes las cuales son capaces de detectar señales de muy baja intensidad en donde su capacidad de respuesta se limita a un solo fotón [6].

En la UAN sede Villavicencio se han venido desarrollando proyectos de investigación relacionados con los SiPM, inicialmente se empezó en el 2014 con la investigación enfocada a los detectores de radiación y partículas en la ciudad de Bogotá, en la sede UAN circunvalar. Posteriormente el estudio de los SiPM continuo en el 2020 con el trabajo titulado 'Diseño e implementación de un control de temperatura para una planta de caracterización de fotomultiplicadores de silicio' [7]. así mismo se siguió en el 2021 en la misma línea de investigación con el proyecto titulado "Sistema de control automático de temperatura para una plataforma de caracterización de SiPM" [8]. Actualmente en el 2022 se está realizando la investigación titulada "Caracterización de la ganancia SiPM MPPC S13360-6025CS" [9].

De esta manera, se evidencia que la universidad ha venido trabajando y mejorando todo lo relacionado a la sublínea del estudio de detectores de radiación, con base en esto surge el problema de investigación, dado que el proyecto investigativo "Caracterización de la ganancia SiPM MPPC S13360-6025CS" requiere para su

desarrollo un circuito de pre- amplificación que cumpla ciertos estándares, dichos estándares coinciden con los establecidos en el artículo.

Por lo tanto, teniendo en cuenta lo anterior el presente trabajo investigativo propone llevar a cabo una actualización de los resultados obtenidos en el artículo científico, para ello se plantea realizar una réplica del artículo con todas las condiciones iniciales que plantea la investigación para corroborar que los resultados e información que proporciona sean verídicos. Posteriormente se llevará a cabo la réplica empleando las mismas condiciones pero previo a la adquisición de datos se utilizará un sistema de pre-amplificación en el cual se utilizará un amplificador operacional THS4531 para garantizar el perfil y caracterización de la señal del SiPM.

De esta manera, el desarrollo de este proyecto investigativo permitirá que a través de diversas pruebas experimentales se pueda ratificar la información proporcionada en el artículo y a su vez servirá de base para el trabajo investigativo “Caracterización de la ganancia SiPM MPPC S13360-6025CS” dado que las condiciones en las que se trabajaran cumplen con los requerimientos necesarios para suplir la necesidad de su investigación, lo que permitirá que las réplicas que se ejecuten se implementen en dicho trabajo investigativo.

2. JUSTIFICACIÓN

La Universidad Antonio Nariño en su línea de investigación relacionada a física de partículas ha llevado a cabo diversas colaboraciones internacionales en las cuales han surgido proyectos como RD51-CERN, NEXT Experiment, DUNE, entre otros. Esto ha generado la existencia de los laboratorios de detectores (LabDet), dado que la universidad tiene la responsabilidad y el compromiso de crear ambientes que fomenten la investigación y permitan llevar a cabo ensayos o experimentos que ayuden a caracterizar y desarrollar herramientas de aplicación como los SiPM [9].

En este sentido, llevar a cabo investigaciones relacionadas a esta línea de investigación de los SiPM permitirá que la universidad desarrolle nuevos proyectos y adquiera una mayor experiencia en el manejo y dominio de los fotomultiplicadores de silicio, así como también obtenga más reconocimiento internacional por las diversas investigaciones que ha desarrollado en ese campo de estudio.

Los SiPM tienen aplicaciones en diversos campos científicos esto se debe a que tienen una alta eficiencia cuántica, insensibilidad a los campos magnéticos, pueden detectar fotones individuales incidentes ya que al ser consistentes en múltiples uniones de silicio hace que los sensores pueden ser utilizados en experimentos de física de partículas o emplearse en biofotónica o equipos de diagnósticos por imágenes de medicina nuclear [8], [10].

Así mismo, los fotomultiplicadores de silicio se caracterizan por medir no solo fotones individuales si no también hasta del orden de mil simultáneamente, son muy rápidos ya que permiten obtener mediciones en un tiempo de 10 ps (pico segundos), operan a bajos voltajes de polarización, son compactos y tienen una mayor eficiencia, por ende dada sus características de ultra sensibilidad y rapidez son los más utilizados en ciencia básica y desarrollo tecnológico [11].

De igual manera, emplear los SiPM en un amplificador permitirá integrar las cargas que se reciben, facilitara leer la información del detector sin que se presente una saturación del voltaje y coadyuvara a evitar la acumulación de cargas ya que limitan

la corriente y detienen el proceso de avalancha para devolver al diodo un voltaje de operación superior a la tensión de ruptura [10], [12].

Es así como llevar a cabo esta investigación, ayudara a determinar e identificar el comportamiento de los fotomultiplicadores de silicio al implementar un preamplificador, lo cual permitirá que se obtengan resultados que ayuden a establecer su eficiencia, ventajas y aplicabilidad. De esta manera, este proyecto investigativo servirá de base para la investigación “Caracterización de la ganancia SiPM MPPC S13360-6025CS”, ya que proporcionará toda la parte experimental y definirá las condiciones en las cuales deben manejarse e implementarse los SiPM con preamplificador.

De igual manera, la realización de este proyecto permitirá corroborar la veracidad de los datos y su aplicabilidad en los sistema de detección de fotones simulado en un sistema preamplificador de detectores en la UAN, para dar continuidad a los proyectos desarrollados con anterioridad en investigación de Adquisición de señal en SiMP.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar el desempeño de un preamplificador implementado para la respuesta de un SiPM en el marco del experimento DUNE.

3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Simular el circuito con los parámetros y condiciones establecidos en el artículo “Diseño de amplificador frontal criogénico para grandes matrices de SiPM en el sistema de detección de fotones DUNE FD1-HD”, para la validación de los resultados reportados.
- Diseñar PCB (High density interconnects) con estándares IPC para el establecimiento de las condiciones y parámetros para tener en cuenta.
- Prototipar el circuito de adquisición y adecuación de señal para valorar su funcionamiento.
- Realizar pruebas de funcionamiento para la determinación de su aplicabilidad.

4. MARCO TEORICO

4.1. FOTOMULTIPLICADORES DE SILICIO (SiPM)

Un preamplificador es aquel que se encarga de ofrecer una supresión mejorada del ruido de modo común y permiten leer la doble cantidad de información de la señal, por lo general se utilizan en entornos exigentes que abarcan grandes gradientes de temperatura de alrededor de 4K y largas distancias en la transmisión de las señales. Se caracterizan por ser subsistemas de gran potencia en donde los más conocidos son clase A, AB, B, C, D y F se pueden usar combinaciones de diferentes clases para lograr un aumento en su eficiencia, estos se utilizan o se diseñan según el fotomultiplicador de silicio (SiPM) [13].

Los fotomultiplicadores de silicio (SiPM), son considerados la última generación de detectores de estado sólido en tecnología de silicio dedicados a la detección de luz visible [14]. La composición de un SiPM se basa principalmente en una matriz formada de pequeñas celdas sensitivas a las cuales se les conoce como microceldas y en encuentran conectadas en paralelo. En donde cada microcelda contiene un fotodiodo de avalancha y una resistencia de enfriamiento, en la que cada SiPM tiene el mismo tamaño rectangular el cual puede ir desde $10\mu\text{m}$ a $100\mu\text{m}$, contenidas en una pieza de silicio que puede variar de 1mm^2 a 6mm^2 , significando una contención de cientos hasta cientos de miles de microceldas [15]. Tiene como función la detección de fotones y entre sus ventajas se encuentran que tiene una alta ganancia a bajo voltaje de polarización, sin envejecimiento debido a la fuerte exposición a la luz y la insensibilidad a los campos magnéticos. La ganancia típica de los SiPMs oscila alrededor de 10^6 mientras que el voltaje de funcionamiento es inferior a 100 V [16]. Entre sus características más importantes se encuentran las siguientes:

- Fill Factor: es el área de separación entre el área sensible del dispositivo y el área total del mismo, el cual permite que las celdas se mantengan separadas entre sí para que se pueda efectuar el aislamiento óptico y eléctrico [17].

- Eficiencia en la detección de fotones: tiene la función de detectar fotones a través de la ecuación $PDE(\lambda, V) = \eta(\lambda) \times \varepsilon(V) \times F$, en donde $\eta(\lambda)$ = eficiencia cuántica del silicio; $\varepsilon(V)$ = probabilidad de iniciación de avalancha por encima de la tensión de ruptura; F= factor de llenado [17].
- Ancho de banda: tienen la función de activar las microceldas en un tiempo de descarga y recuperación de 100ns y con una velocidad de conteo de 10MHz [18].
- Rango dinámico: es el que se encarga de los niveles de señal óptica y de proporcionarle al detectora una adecuada salida [18].
- Cuentas oscuras: son pulsos que se presentan de forma involuntaria en escasos de luz, se originan por la generación térmica de portadores que son difíciles de distinguir durante los disparos que resultan de la absorción de un fotón [17].
- Crosstalk: Son fotones secundarios que se detectan por otras celdas del SiPM y provocan su disparo [17]. Se calcula mediante la ecuación

$$P_{Crosstalk} = \frac{N_{1,5 PE}}{N_{0,5 PE}}$$

4.2. VENTAJAS DE LOS FOTOMULTIPLICADORES DE SILICIO

Los fotomultiplicadores de silicio (SiPM), en los últimos 20 años se han vuelto muy populares debido a la rápida evolución que han tenido. Estos fotodetectores dentro de sus ventajas tienen la facilidad de combinar y mejorar las características de un tubo fotomultiplicador (PMT), dado que incrementa su alta ganancia en 10^6 . Así mismo, se caracterizan por su alta sensibilidad a bajos niveles de luz y electrónica de lectura simple con los beneficios de los fotodiodos como compacidad, robustez, operación de bajo voltaje, insensibilidad a los campos magnéticos y tolerancia a la exposición a la luz ambiental. Los SiPM más comunes operan en la banda visible del espectro, logrando una eficiencia máxima de fotodetección (PDE) que puede ser superior al 50%, que es mucho mejor que lo que pueden ofrecer los PMT estándar. Otra característica única de los SiPM es su excelente resolución de un solo fotoelectrón. Los SiPM se emplean en diferentes campos de investigación como la

física de altas energías, la astrofísica, la biofísica, la física cuántica y se han utilizado o considerado para varias aplicaciones como la imagen médica, la comunicación óptica o la tecnología LIDAR entre otras [19].

4.3. DESVENTAJAS DE LOS FOTOMULTIPLICADORES DE SILICIO

Dentro de las principales desventajas que presentan los SiPM se encuentra su limitado tamaño físico, dado que los SiPM comerciales rara vez están disponibles en tamaños mayores a 6x6 milímetro. Por lo cual esto se convierte en una fuerte limitación a la hora de construir grandes experimentos/cámaras o en cualquier aplicación en la que la luz que se debe detectar se distribuya sobre una superficie relativamente grande. Los SiPM más grandes rara vez se producen, principalmente porque su capacitancia aumenta con el tamaño, lo que se traduce en una enorme degradación de la relación señal-ruido (SNR) y la resolución de tiempo. Otra limitación para producir SiPM más grandes es que la tasa de conteo oscuro (DCR) aumenta linealmente con el área [19].

Así mismo, otras desventajas diferentes a su tamaño se relacionan con la lenta caída de la señal de fotodetección aun cuando se manejan pulsos de excitación cortos, sus rangos dinámicos son limitados, presentan fuerte influencia de los darkcounts y sus parámetros son directamente proporcionales con la temperatura. Además, una desventaja importante es que se dañan fácilmente en entornos de irradiación complejos lo que provoca un deterioro del rendimiento y una reducción de la vida útil [20].

4.4. EXPERIMENTO DE NEUTRINOS SUBTERRÁNEOS PROFUNDOS (DUNE).

Es un experimento que se llevó a cabo en la Instalación de Investigación Subterránea de Sanford en donde se construyeron neutrinos, con un detector cercano en Fermilab y un detector lejano para detectar neutrinos a 1.300 km de distancia en Fermilab, cerca de Chicago. El detector lejano constó de cuatro módulos, cada uno con una masa fiducial de 10 kt de argón líquido, ubicados a 1,5 km bajo tierra en el Centro de Investigación Subterránea de Sanford [21].

El acelerador de inyectores principal de Fermilab proporciona un haz de protones correspondiente a una energía de 120 GeV, que a su vez genera un haz de neutrinos de banda ancha de energía que oscila entre 100 MeV y 8 GeV con un pico de 2,5 GeV. A continuación, este haz de neutrinos se hace viajar 1300 km hacia el Centro de Investigación Subterránea de Sanford (SURF), donde se encuentra con una Cámara de Proyección de Tiempo de Argón Líquido (LArTPC) [22].

La energía depositada por los productos de las interacciones de neutrinos se detectó de dos maneras: ionización derivada por un campo eléctrico aplicado a los electrodos de recogida, formando una cámara de proyección de tiempo (TPC), y luz de centelleo [21].

El propósito de llevar a cabo este tipo de experimentos se basó en estudiar exhaustivamente las oscilaciones de neutrinos, probar la violación de CP en los leptones, identificar el orden adecuado de las masas de neutrinos, buscar nuevos neutrinos y la descomposiciones de protones [22].

5. DISEÑO METODOLOGICO

5.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación se enmarca en el tipo experimental dado que en este proyecto se crea un ambiente en donde se alteran una o más variables al mismo tiempo y se vigila estrictamente cada cambio que se produce en el ambiente creado en donde el investigador evalúa la forma y razón por la que sucede el fenómeno en particular [23].

Así mismo, según sus características es una investigación de tipo descriptiva ya que busca establecer y describir la presencia y características del fenómeno sin vincularlo con otros factores [24].

Dentro del enfoque se enmarca en el tipo cuantitativo, dado que se obtendrán y analizarán datos estadísticos para determinar la relación entre variables [25]. Se caracteriza por ser objetiva y deductiva, dado que su desarrollo abarca procesos experimentales medibles que permiten establecer proyecciones o relaciones entre una o varias poblaciones mediante datos estadísticos que se obtienen a través de una muestra seleccionada para el estudio, su alcance es poder determinar las relaciones de causa-efecto que se pueden presentar con el propósito de explicar de manera cuantitativamente las diferentes actividades humanas de forma predictiva que permitan reducir los factores de riesgo o error y otorgarle validez a los resultados a través de un análisis cuantitativo que lo soporte [26].

5.2. FASES METODOLÓGICAS

El proyecto consistió en implementar un preamplificador para la respuesta de un SiPM en el marco del experimento DUNE, para su desarrollo se llevaron a cabo las siguientes fases:

FASE I: Simulación del circuito con los parámetros y condiciones establecidos en [1], para la validación de los resultados reportados

Descripción: se estableció el circuito y los componentes en un simulador para reconocer los parámetros condicionales de funcionamiento y establecer un

ambiente de trabajo para el circuito implementado de tal forma que se reconozcan los rangos de funcionamiento en variables tales como: frecuencia, slew rate, máximos y mínimos de tensión eléctrica de las señales de entrada y salida, ancho de banda, CMRR, y demás similares que cobren importancia a lo largo del desarrollo de la propuesta.

Requerimientos: simulador de circuitos, artículo científico.

Resultados: parámetros de funcionamiento y aplicación del circuito

Duración: 3 semanas

FASE II: Diseñar PCB (High density interconnects) con estándares IPC para el establecimiento de las condiciones y parámetros para tener en cuenta

Descripción: De acuerdo con los resultados de la simulación, se conseguirá una PCB con estandarización IPC que satisfaga los rangos de las variables o parámetros de funcionamiento del circuito.

Requerimientos: simulador de circuitos, software de diseño de PCBs, parámetros de funcionamiento y aplicación del circuito

Resultados: PCB implementada cumpliendo parámetros de funcionamientos y aplicación del circuito

Duración: 4 semanas

FASE III: Prototipar el circuito de adquisición y adecuación de señal para valorar su funcionamiento

Implementar el circuito en PCB. Se hará la instalación de dispositivos, conectores y demás elementos de circuito necesarios para el primer arranque del amplificador y posteriormente realizarle pruebas de desempeño.

Requerimientos: PCB implementada cumpliendo parámetros de funcionamiento y aplicación del circuito, equipos de soldadura.

Resultados: Prototipo del amplificador

Duración: 2 semanas

FASE IV: Realizar pruebas de funcionamiento para la determinación de su aplicabilidad.

Descripción: Estudiar el desempeño del amplificador implementado en PCB para pruebas reales de funcionamiento en laboratorio. Reporte de resultados.

Requerimientos: Prototipo del amplificador, plataforma de caracterización de SiPM del LabDet-Villavicencio.

Resultados: Amplificador listo para ser usado en adquisición de señales de SiPM.

Duración: 7 semanas

5.3. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

Se dará continuidad al trabajo que el profesor Luis Fernando Castañeda Melo y sus anteriores estudiantes han realizado previamente, con el fin de lograr capturar la señal de un SiPM de la plataforma de caracterización con control de temperatura e interfaz gráfica que se encuentra en el LabDet-Villavicencio.

5.4. RESULTADOS ESPERADOS

Con el desarrollo de esta investigación se esperan obtener los siguientes resultados, después de haber culminado las diferentes fases propuestas en la metodología:

A. Ubicación dentro de las líneas de trabajo del programa

Este proyecto se sitúa en el área de ciencias naturales exactas y aplicadas, específicamente la línea de física de partículas en la sublínea de detectores de radiación y partículas.

B. Usuarios directos y formas de utilización de los resultados del proyecto

El proyecto va a aportar al desarrollo del proceso estándar de caracterización del SiPM, beneficiando al LabDet Villavicencio optimizando sus procesos de investigación y desarrollo, lo cual impactará directamente el avance de trabajo del CICBA en el área de investigación y aplicación del detector SiPM

6. ANALISIS DE RESULTADOS

6.1. SIMULACIÓN DEL CIRCUITO CON LOS PARÁMETROS Y CONDICIONES ESTABLECIDOS EN EL ARTÍCULO “DISEÑO DE AMPLIFICADOR FRONTAL CRIOGÉNICO PARA GRANDES MATRICES DE SIPM EN EL SISTEMA DE DETECCIÓN DE FOTONES DUNE FD1-HD”, PARA LA VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS REPORTADOS.

Para llevar a cabo el diseño del circuito se tomaron los parámetros y condiciones establecidos en el artículo de Brizzolari et al., (2016), en donde para llevarlo a cabo inicialmente se tomo una fuente de alimentación de 3,3 V para su función y una corriente de alimentación que vuelva a 0 V. Con respecto a la conexión a tierra esta se empleo solo como potencial de referencia y blindaje sin que condujera corrientes de CC. Como dispositivo de entrada 1 se tomó un transistor bipolar de heterounión (HBT) de silicio-germanio (SiGe) de Infineon BFP640ESD, dado que su construcción proporciona baja resistencia a la dispersión de la base y ruido de bajo voltaje aun cuando se utilicen corrientes de polarización bajas o se trabaje con temperaturas criogénicas [27].

Para proteger la terminal base de una polarización inversa accidental se utilizó un diodo Schottky SB01-15C y se emplearon dos capacitadores de 100 nF y dos 1 nF para derivar a tierra el emisor Q1 y como condensadores se emplearon cerámicos de multicapa con dieléctrico C0G siendo uno de 202 nF a tierra el cual se ubico a una distancia cercana de los pines del emisor. Así mismo, se implementó un Texas instruments THS4531A para la segunda etapa de ganancia del AHBT, un amplificador operacional U1 que utiliza tecnología BiCMOS y que permite su funcionamiento adecuado aun a temperaturas criogénicas. Para las resistencias se eligieron aquellas con películas metálicas y con rangos de temperatura de 25 ppm/C [27].

En cuanto al divisor de voltaje este se formó por RP1 y RP2 con los cuales se permitió definir el voltaje de $V_C=V_{CC3}=1.1$ V at el negativo de entrada de U1 en

donde va conectado el colector de Q1. Para el caso de la temperatura criogénica se tomó a inp como nodo de entrada y se maneja a 1V la VBE de Q1, mientras que para purgar una corta corriente entre la base y emisor se emplea una resistencia de 20 k Ω , la cual a su vez desencadena un voltaje mediante una resistencia de retroalimentación de 13 k Ω llevando el nodo de salida outn a 1,65V igual a VCC2. Por su parte la salida del THS4531A se maneja a 1,65V y la corriente de polarización de Q1 se determinó por resistencia RC a IC= 0,4 mA, mientras que la corriente continua consumida por el THS4531A se maneja a una temperatura criogénica de 0,2 mA, los divisores de voltajes del circuito se emplearon a 0,1 mA y la corriente CC consumida por el amplificador se tomó alrededor de 0,7 mA, lo cual generó un gasto de energía de 2,4 Mw por A IC=0,4 mA y el HBT expone un ruido blanco de voltaje de 0,37 nV/pHz [27].

Dentro del diseño se tuvo en cuenta que el HBT al tener una temperatura Lar de (87K) su transconductancia fuera de 50 mA/V y efectuara una ganancia de CA de 30, lo cual permitiera que el ruido de U1 se hiciera insignificante. La razón por la cual el divisor de voltaje se unió entre Q1 y U1, fue para que preservar una impedancia equilibrada en las entradas de U1, esto con el fin de mejorar el rechazo del ruido y las interferencias de las fuentes de alimentación, siendo este igualmente el mismo motivo por el cual también la entrada de voltaje de modo común de salida VOVM de U1 se filtro a tierra con 100nf. En cuanto a la etapa de salida del THS4531A se emplearon resistencias de cargas de 50 Ω y oscilaciones lineales en el amplificador de 1,5 - 1,6V, debido a que valores mayores ocasionan distorsión de la señal [27].

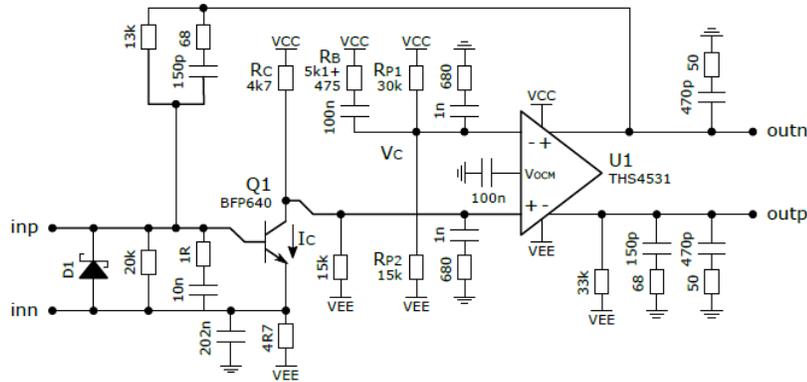


Figura 1. Modelo de diseño del amplificador

Fuente: Brizzolari et al, 2022.

Una vez definido el diseño se procedió a ejecutar la simulación del circuito, para ello inicialmente se emplearon plataformas como Proteos, Ni multisim, LiveWare y Ordcad. Sin embargo, inicialmente no fue posible llevar a cabo la simulación dado que los componentes que este conlleva como THS4531 (Amplificador operacional diferencial) y el Transistor de radio frecuencia (BFP640) son relativamente nuevos en el mercado y ningún simulador de los antes mencionados cuenta con estos componentes. Por lo cual, fue necesario realizar un ajuste y emplear componentes con características similares para poder llevar a cabo la simulación, para lo cual se utilizaron como reemplazo el THS4501 para el amplificador operacional THS4531 y BFP22 para el transistor BFP640 los cuales permitieron evaluar y confirmar la funcionalidad de la configuración diseñada para el pre-amplificador operacional.

La señal de entrada: Para evaluar el circuito Preamplificador esta señal es emitida por un generador de funciones denominado XFG1, donde se declara una señal de entrada con frecuencia de 999.0 Khz, un voltaje Pk a Pk (pico a pico) de 2.610 Voltios, tal como se muestra en la figura 1 y se declara un ciclo de trabajo del 50% (señal fucsia que se observa en la figura 3).



Figura 1. Condiciones de entrada del generador de funciones

Fuente: base de datos de la investigación

Señal de salida:

Para la señal de salida se interpretaron los datos con el osciloscopio Tektronix XSC1.

En reemplazo al transistor RF (BFP640) = Q1 en la simulación se utilizó el transistor BFP22, el circuito tiene dos señales de entrada IntP e IntN que van directamente en paralelo al diodo D1 y también tiene dos señales de salida OutP y OutN que salen del nodo que conecta C8 y C10, tal como se muestra en la figura 2.

El amplificador tiene un comportamiento diferencial por lo cual tenemos dos salidas con comportamiento similar a diferencia de sus amplitudes, la señal amarilla corresponde a OutP, la señal azul corresponde a OutN y la señal Fucsia es la entrada del generador de funciones, tal como se muestra en la figura 3.

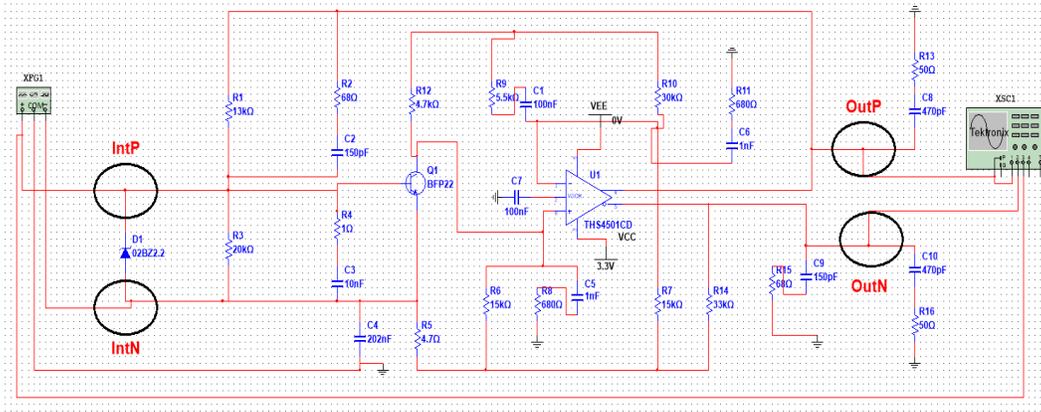


Figura 2. Simulación del preamplificador

Fuente: base de datos de la investigación

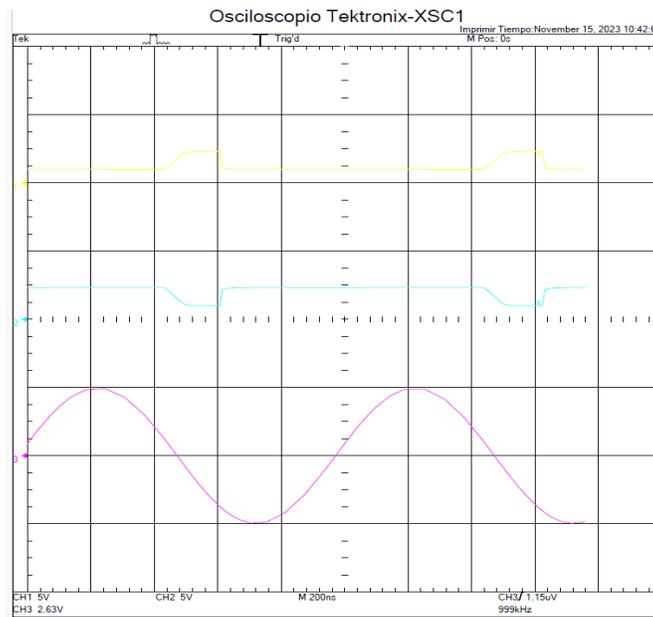


Figura 2. Señales de respuesta y entrada del circuito pre-amplificador.

Fuente: base de datos de la investigación

6.2. DISEÑO DEL PCB (HIGH DENSITY INTERCONNECTS) CON ESTÁNDARES IPC PARA EL ESTABLECIMIENTO DE LAS CONDICIONES Y PARÁMETROS A TENER EN CUENTA.

Antes de llevar a cabo el diseño del PCB y posicionar sus elementos electrónicos se declararon las huellas de cada componente, para su aplicabilidad se utilizaron las huellas encontradas en el mercado nacional para agilizar el prototipado del circuito por ende, en capacitores y resistencias se usó la huella *0805* Código imperial y en código métrico se utilizó 2012, tal como se muestra

Imperial code	Metric code
01005 -	0402
0201 -	0603
0402 -	1005
0603 -	1608
0805 -	2012
1008 -	2520
1206 -	3216
1210 -	3225
1806 -	4516
1812 -	4532
2010 -	5025
2512 -	6332

Figura 3. Tabla de códigos de huellas imperial y métrico

Fuente: base de datos de la investigación.

Una vez definido las huellas se procedió a emplear el software de simulación NI Multisim, el cual para su adecuado funcionamiento exige tener una simulación funcional que no arroje errores ni advertencias. Teniendo en cuenta esta característica, se utilizó la simulación efectuada anteriormente con los componentes de reemplazo de THS4531 y BFP640.

Estos componentes se situaron a 4 mm de distancia entre cada uno y se situaron por conveniencia de conexión para evitar el uso de puentes electrónicos que pudieran generar señales indeseadas en el circuito, así mismo los condensadores que iban conectados al pin emisor del transistor BFP640 se ubicaron lo más cerca posible para evitar la generación de inductancias. Posteriormente se realizó el ruteado de la PCB entre componente y componente del cual resultaron 18 nodos.

En donde los componentes utilizados fueron R: resistencia, C: condensador, D: diodo, J1: terminal de entrada del circuito, Q1: transistor BFP640, J3: terminal de alimentación del circuito, J2: terminal de salida del circuito, U1: THS4531, Terminal 1: base, Terminal 2: emisor, Terminal 3: Colector, Terminal 4: emisor, Terminal 5: Vout salida negativa del circuito, terminal 6: Vs alimentación negativa del amplificador operacional, Terminal 8: Vin voltaje de entrada. Los resultados de los 18 nodos se presentan a continuación:

Nodo	Nodo	Nodo	Nodo	Nodo	Nodo	Nodo	Nodo	Nodo	Nodo
0	1	2	3	4	5	6	7	8	
C4, Terminal 2 R8, Terminal 1 R11, Terminal 2 C7, Terminal 2 R13, Terminal 2 R15, Terminal 1 R16, Terminal 1	R15, Terminal 2 C9, Terminal 2	R2, Terminal 1 C2, Terminal 1	R1, Terminal 1 C2, Terminal 2 R3, Terminal 2 R4, Terminal 2 J1, Terminal 1 D1, Terminal 1 Q1, Terminal 1	R1, Terminal 2 U1, Terminal 4 R2, Terminal 2 C8, Terminal 2 J2, Terminal 1	R3, Terminal 1 C3, Terminal 2 C4, Terminal 1 R5, Terminal 2 J1, Terminal 2 D1, Terminal 2 Q1, Terminal 2 Q1, Terminal 4	R4, Terminal 1 C3, Terminal 1	R8, Terminal 2 C5, Terminal 2	C1, Terminal 1 R9, Terminal 1	
9	10	11	13	12	14	15	16	17	
R11, Terminal 1 C6, Terminal 1	C1, Terminal 2 U1, Terminal 1 R7, Terminal 2 R10, Terminal 1 C6, Terminal 2	U1, Terminal 8 R6, Terminal 2 C5, Terminal 1 R12, Terminal 1 Q1, Terminal 3	R13, Terminal 1 C8, Terminal 1	U1, Terminal 2 C7, Terminal 1	U1, Terminal 3 R9, Terminal 2 R10, Terminal 2 R12, Terminal 2 J3, Terminal 3	R16, Terminal 2 C10, Terminal 2	U1, Terminal 5 R14, Terminal 2 C9, Terminal 1 C10, Terminal 1 J2, Terminal 2	U1, Terminal 6 R5, Terminal 1 R6, Terminal 1 R7, Terminal 1 R14, Terminal 1 J3, Terminal 1	

Figura 4. Clasificación de nodos

Fuente: base de datos de la investigación.

Para el nodo 0, como se muestra en la figura 4, se observa que contiene 8 componentes de los cuales 5 tuvieron conexiones en la terminal 2 que fueron C4, R11, R13, C7 y J3, y 4 componentes se conectaron a la terminal 1 que correspondieron a R8, R15 y R16. Mientras que para el nodo 1, solo se conectaron dos componentes la resistencia R15 y el condensador C9, ambos en la terminal 2. En cuanto al nodo 2, se visualiza que se conectaron dos componentes que correspondieron el R2 y C2 ubicándose ambos en la terminal 1. Con respecto al nodo 3, se conectaron 7 componentes que correspondieron a 3 resistencias que fueron R1 en la terminal 1, R3 y R4 en la terminal 2, un condensador C2 en la terminal 2, además también se conectó un componente a la entrada del circuito que fue J1, otro se conectó en el diodo que correspondió a D1 y uno se conectó al transistor BFP 640 el cual fue Q1 ambos para la terminal 1.

Para el nodo 4, se observa conexión en 5 componentes que correspondieron a la resistencia R1 en la terminal 2 y la terminal de salida del circuito J2 en la terminal 1, la resistencia R2 y el condensador C8 en la terminal 2 y el Amplificador THS4531 U1 en la terminal 4. Entre tanto en el nodo 5, se conectaron 8 componentes los cuales correspondieron para la terminal 1 la resistencia R3 y el condensador C4 y para la terminal 2 la conexión se dio en C3, R5, J1, D1 y Q1, mientras que para la terminal 4 solo se conectó un componente siendo Q1.

Por otro lado en el nodo 6, solamente se conectaron dos componentes siendo R4 y C3 ambos en la terminal 1. De igual manera en el nodo 7, se conectaron dos componentes los cuales fueron R8 y C5 ambos establecieron conexión en la terminal 2. En el caso del nodo 8, de igual manera se conectaron dos componentes los cuales correspondieron a C1 y R9 haciendo ambos conexión en la terminal 1.

Al analizar al nodo 9, se observa conexión en los componentes R11 y C6 ambos en la terminal 1. Con relación al nodo 10, se observa se estableció conexión entre 5 componentes que correspondieron a U1 y R10 para la terminal 1; C1, R7 y C6 que se conectaron en la terminal 2. Para el nodo 11, se analiza que los componentes que se conectaron correspondieron a U1 en la terminal 8, R6 en la terminal 2, C5 y R12 en la terminal 1 y Q1 en la terminal 3. En cuanto al nodos 12, se analiza que se conectaron los componentes U1 en la terminal 2 y el condensador C7 en la terminal 1. En cuanto al nodo 13, igualmente se conectaron solo dos componentes los cuales fueron R13 y C8 ambos para la terminal 1. Por su parte en el nodo 14, se visualiza conexión en 5 componentes que correspondieron a U1 y J3 para la terminal 3, R9, R10 y R12 en la terminal 2. Con respecto al nodo 15, observa que se conectaron dos componentes en la terminal 2 que correspondieron a R16 y C10. Mientras tanto en el nodo 16, la conexión se estableció en 5 componentes U1 en la terminal 5, R14 y J2 en la terminal 2 y C9 -C10 en la terminal 1. Así mismo en el nodo 17, se observa conexión en 6 componentes los cuales correspondieron a U1 en la terminal 6, R5, R6, R7, R14 y J3 se conectaron en la terminal 1.

Una vez confirmada, la funcionalidad del circuito se procedió a exportar la información de NI Multisim a Ni Ultiboard, el cual es un apartado de diseño de placas

6.3. PROTOTIPADO DEL CIRCUITO DE ADQUISICIÓN Y ADECUACIÓN DE SEÑAL PARA VALORACIÓN DE SU FUNCIONAMIENTO.

Para llevar a cabo el prototipado del circuito se utilizaron resistencias y condensadores SMD, una baquela virgen de 1.2 mm de espesor con una sola capa de cobre y una base aislante de fibra de vidrio, tal como se muestra en la figura 24.

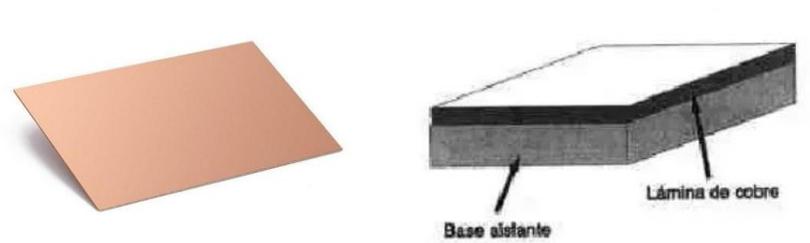


Figura 6. Placa de cobre y base aislante de vidrio

Fuente: base de datos de la investigación

Posteriormente a la placa se conectaron en la ubicación Q1 el transistor BFP 640 el cual posee entre sus características tecnología de germanio de silicio f_T de 70 GHz, figura de ruido $F= 1,3$ dB a 6 GHz, tensión colector-emisor y de la base del colector de 13V y disipación de potencia de 200mW, así como también se conectó en la posición U1 el amplificador operacional THS4531 el cual cuenta con una tensión de 2,5 V a 5,5 V, con corrientes de 250 μ A. Estos componentes se presentan en la figura 25.

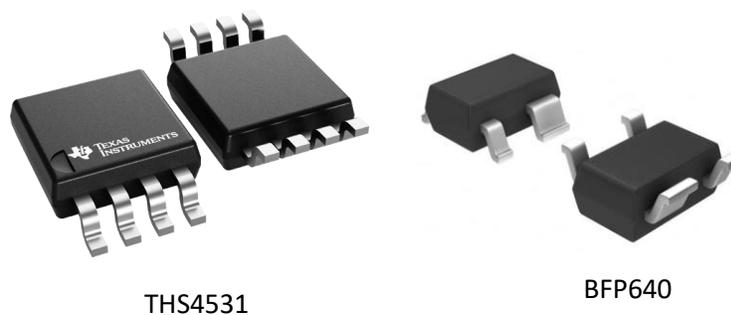


Figura 7. Componentes THS4531 y BFP640

Fuente: base de datos de la investigación

Posteriormente se conectaron las entradas y salidas del circuito, sin embargo, según condiciones específicas de la planta fue necesario adaptar los puentes entrada a la planta SiPM y para ello se utilizaron 3 conectores BNC macho mientras que la alimentación del circuito se utilizó un conector JST donde el Rojo= VCC (Voltaje de corriente continua positivo), Negro= GND (tierra) y el Amarillo= VEE, (Voltaje negativo). Como se muestra en la figura 26.



Conector macho Conector JST

Figura 8. Conectores de entrada y salida

Fuente: base de datos de la investigación

Una vez identificados los elementos que componen el circuito amplificador, se procede a imprimir el diseño de pistas, serigrafía y máscara de soldadura superior directamente desde la NI Ultiboard, las cuales se observan en la figura 27.

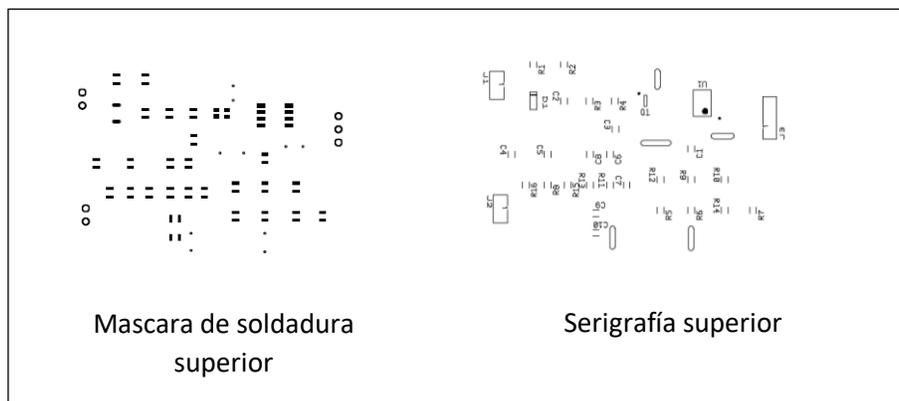


Figura 9. Diseño de mascara de soldadura y serigrafía superior.

Fuente: base de datos de la investigación

Posteriormente las dos capas tanto de pistas y serigrafía son impresas en papel propanol, mientras que la capa de mascarar de soldaduras son impresas en acetato. Seguidamente la baquela se somete a un proceso de limpieza con el fin de eliminar imperfecciones que dificulten el plasmado de la capa de pistas a la capa de cobre. Una vez realizado esto, el papel propanol con la capa de pistas se envuelve con la baquela por el lado de cobre y se induce en calor para transferir la tinta negra a la capa de cobre, luego se vierte en ácido nítrico al 50 % de concentración con el objetivo de levantar todo aquello que no esté pintado de negro de la capa de cobre, obteniendo el resultado que se observa en la figura 28.

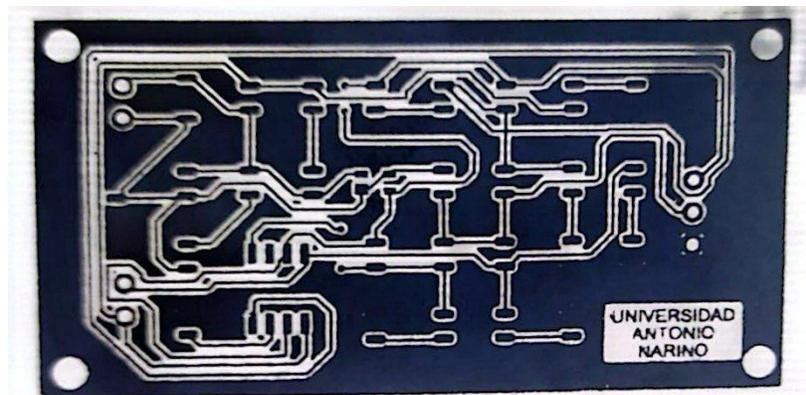


Figura 10. Baquela Post proceso de sumersión en acido.

Fuente: base de datos de la investigación

Después de este proceso se aplica pintura antisolder sobre la PCB con el fin de salvaguardar los caminos de cobre de óxido o algún corto que pueda ocurrir por unión de polaridades opuestas, la pintura antisolder solamente es solidificada por luz ultravioleta por lo cual la placa con la pintura antisolder y la capa de máscaras de soldadura entran en una caja de curado.

La serigrafía superior es plasmada encima del antisolder repitiendo el proceso de calor nombrado al inicio.

Una vez se tiene la baquela totalmente curada en antisolder se procede a soldar cada componente, para esta soldadura se empleó pistola de calor a una

temperatura aproximada de 400 C, la placa resultante de todo este proceso se puede ver en la figura 11.

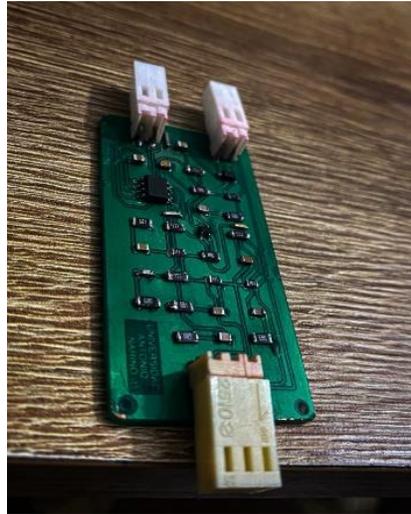


Figura 11. Prototipo del circuito amplificador.

Fuente: base de datos de la investigación

Obtenido el diseño de la placa final, con el fin de facilitar las conexiones a la planta de pruebas, se emplea un acrílico para que actúe como medio de protección de la integridad del circuito y ayude en la conexión de los conectores BNC, lo anterior se muestra en la figura 12.

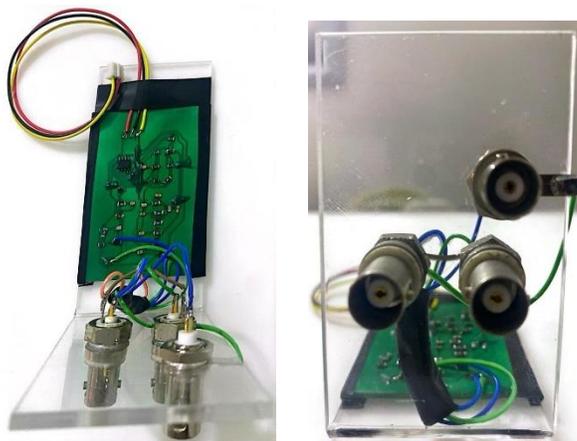


Figura 12. Montaje final del circuito protegido con acrílico

Fuente: base de datos de la investigación

6.4. REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE SU APLICABILIDAD.

Para la realización de las pruebas es importante indicar que se tomó la planta de caracterización de SiPM modelada por Ríos (2021), la cual se basó en un modelo es una instalación de celdas de peltier que se dividieron en dos grupos, en el primero se instalaron celdas con cara caliente en dirección hacia el SiPM y en el segundo grupo se colocaron caras con celdas frías en dirección al SiPM. La planta cuenta con 4 sensores LM335 los cuales se caracterizan por ser de alta precisión siendo estos S4 y S2 para la adquisición de datos durante el proceso de calentamiento y S3 y S1 para el proceso de enfriamiento, tiene una caja de aislamiento de 25 x 20 x 15 cm, tiene dos disipadores ventilador un Cpu 6 Tubos y otro Cpu de 4 tubos, también cuenta con 4 conectores BNC hembra aislados de masa, conectores de panel hembra de 4 de tres pines y 4 de dos pines (conectores tipo blazing) y elementos de anclaje como tornillos y tuercas. Los análisis de los sensores se trabajaron mediante el programa MatLab en donde a través de un código se permite hacer la representación visual tipo grafica de las curvas en distintas entradas de la estabilización de la temperatura para una variación de voltaje [8]. La planta empleada se presenta en la figura 13.

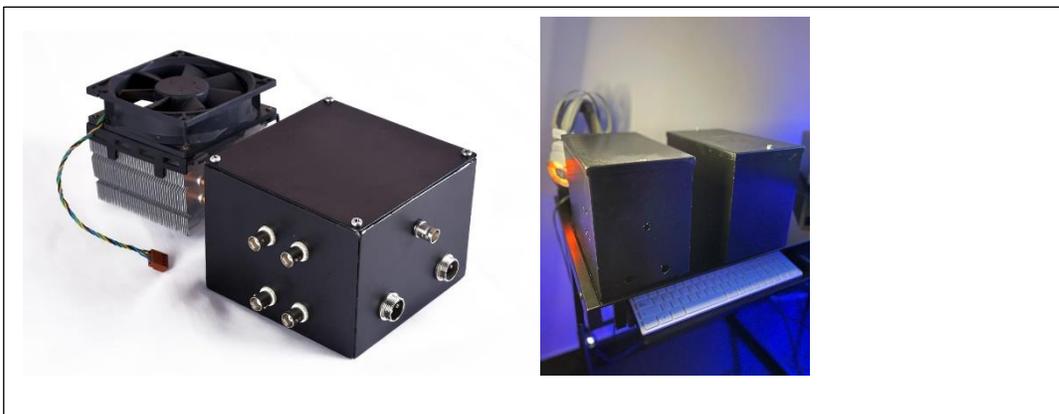


Figura 13. Planta de caracterización de SiPM

Fuente: Ríos (2021)

Así mismo, además de la planta para llevar a cabo la realización de las pruebas se emplearon un osciloscopio, un generador de funciones, fotomultiplicadores de silicio, dos fuentes de voltajes, multímetro, termocuplas y nitrógeno líquido. De igual manera para garantizar la validez y fiabilidad de los resultados se analizaron que tanto la planta como el circuito contaran con las siguientes características:

- **Estabilidad:** esto indica que en ambos elementos no se presentaran perturbaciones que alteraran o afectaran significativamente la señal por ruido o interferencias externas.
- **Buena calidad de detección:** cuando se utilizan SiPM para detectar eventos o partículas, la ausencia de perturbaciones es un indicativo para la detección de señales de buena calidad, lo cual es esencial en la espectroscopia de fotones únicos.
- **Entorno controlado:** garantizar un entorno con poca interferencia externa que garantice obtener una señal limpia.
- **Precisión de medición:** La ausencia de perturbaciones puede sugerir una precisión en las mediciones, lo que es crucial en aplicaciones científicas o de investigación.

Teniendo en cuenta todos estos aspectos y los materiales se procedió a la puesta en marcha de la prueba.

El proceso inicia mediante el generador de funciones quien se encarga de enviar una señal cuadrada que contiene información relacionada a la frecuencia: 999.000khz, voltaje: 2.610 V y ciclo útil 20%. Este generador de funciones se encuentra directamente conectado a un bombillo led, el cual emite un haz de luz y en este punto comienza la función de los fotomultiplicadores de silicio que son quienes tienen el papel de receptores de estos haz de luz, para ello se encuentra alimentados por una fuente en serie con un valor de 57,4 V. Para la obtención de los resultados la respuesta del SiPM se conecta al osciloscopio para que la señal se pueda leer en la pantalla, esta se muestra a través de una señal amarilla. Para seguir alimentado el circuito amplificador se conecta una fuente de alimentación en

serie con 3 Voltios a VCC, 0 Voltios a Vee, para obtener de esta misma fuente el GND, mientras que en la caja negra la cual proporciona la respuesta de salida del SiPM se conecta directamente con la entrada J1 del circuito amplificador y de ahí procede a pasar por el circuito dando como respuesta una señal atenuada. Lo anterior se logra visualizar en la figura 14, en donde el equipo de abajo es el generador de funciones y el de arriba corresponde al osciloscopio. Mientras que en la figura 15 se observa el montaje completo de la planta y el circuito.

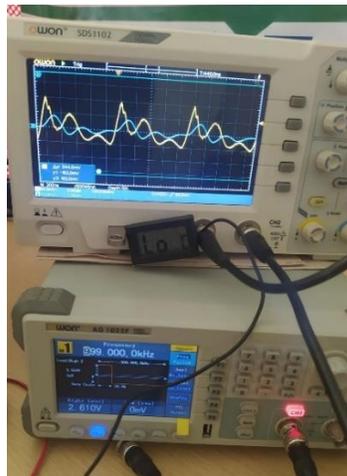


Figura 14. Respuesta del SiPM en el circuito amplificador

Fuente: base de datos de la investigación



Figura 15. Montaje del circuito completo

Fuente: base de datos de la investigación

La información que proporciona el osciloscopio indica una señal amarilla que concierne a la repuesta del SiPM sin pasar por el filtro del circuito amplificador y una señal azul que es la respuesta del SiPM una vez filtrada por el circuito, tal como se observa en la figura 16. Esta señal captada indica una disminución significativa del ruido que se obtiene obtenido por turbulencias que se pueden desarrollar o desencadenar en la recepción de fotones emitidas por el LED al SiPM.

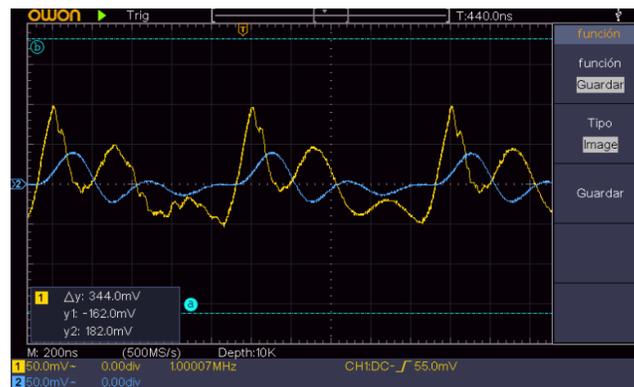


Figura 16. Señal emitida por la respuesta del SiPM

Fuente: base de datos de la investigación

La señal amarilla obtenida como respuesta del SiPM, según lo que se visualiza en la figura 17, se analiza que presenta tres picos. El primero al cual se le denomina fotópico o pico principal indica un valor elevado en el momento que el foto Gamma incidente transfiere su energía al electrón detector, el segundo pico que se le conoce como borde o canto Compton señala la energía máxima impartida a un electrón en una interacción Compton, el motivo por el cual el canto Compton no es abrupto se relaciona con dos factores uno es debido a que los electrones del detector se encuentran libres y el otro se asocia a las limitaciones de resolución del detector. El tercer pico que se le denomina back scattering, corresponde a la energía de los fotones que son retrodispersados en el medio circundante y reingresan al detector.

Al analizar la señal azul emitida se observa en la figura 16, que en el pico 1 se presenta una atenuación con un valor aproximado de 60 mV, se determina que la señal de entrada se encuentra en 99,6093 mV y que refleja un valor mínimo de

entrada de -58.5937 mV (Pk). Mientras que la señal de salida arrojo un valor máximo (41.0756 mV (Pk)), mínimo (-25.3906 mV (Pk)), una atenuación en voltaje máximo por un valor de (-58.5937 mV (Pk)) y en el valor mínimo una atenuación de (-33.2031 mV (Pk)).

Por otro lado, el círculo en rojo señala momento en el cual el pico se sitúa dentro del fotópico y el coptom y esto se produce debido a que los fotones colisionan por segunda vez en el SiPM. Sin embargo, posteriormente este dato es corregido por el filtro amplificador y su corrección se señala en el pico encerrado de color verde, entre tanto en el círculo azul se señalan las perturbaciones que son suprimidas por el circuito, mientras que la curva señalada en el círculo amarillo indica como se van reduciendo y eliminando las perturbaciones de ruido indeseado que se presentan en la señal de entrada y por último el círculo morado señala el pico en el cual se suprimen las perturbaciones en la señal de entrada, tal como se muestra en la figura 17.

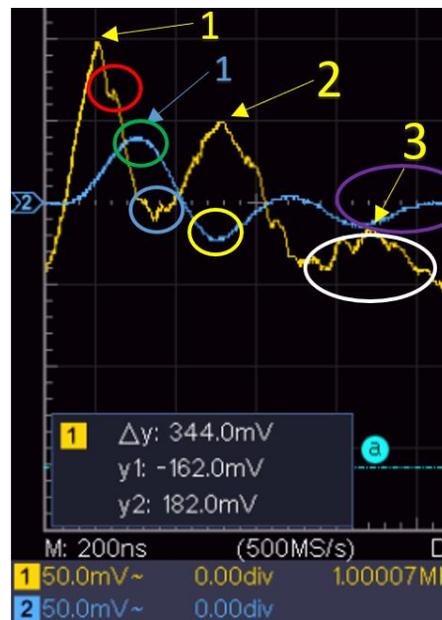


Figura 17. Señalización grafica de las señales emitidas

Fuente: base de datos de la investigación

6.4.1. Análisis del comportamiento de la señal de salida al someter el circuito amplificador a fuertes variaciones de temperatura.

El circuito pre- amplificador después de haber sido sometido a pruebas se sometió a fuertes cambios de temperatura para los cuales se empleó nitrógeno líquido, una base de aluminio en la cual se colocó el circuito con una breve elevación para evitar que el nitrógeno pasara por encima de la PCB y ocasionara un corto circuito, también se emplearon dos termómetros, un multímetro en modo medición de temperatura con una termocupla tipo K, un mini medidor de temperatura y humedad (Termómetro e Higrómetro).

Teniendo definido los elementos a utilizar, se procedió a llevar la temperatura del circuito a temperaturas criogénicas, inicialmente el nitrógeno líquido se encuentra a una temperatura de 195.8°C y se pretendía llevar la placa a una temperatura de 196°C , para la cual en un principio se pretendía tomar el registro de temperaturas con el multímetro y termocupla tipo K, sin embargo, los resultados que arrojaba eran datos ilógicos y esto se debía a que las termocuplas no tienen la capacidad para llevar a cabo variaciones de temperaturas tan bajas. Por lo tanto, teniendo en cuenta la falencia de este equipo, se optó por utilizar para la toma de temperatura un mini termómetro (LCD) que toma hasta -50°C , y se tomaron 20 datos con temperaturas desde -50°C hasta 26°C , los cuales se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Mediciones de temperatura con el mini termómetro LCD

Datos de temperatura	T ($^{\circ}\text{C}$)
Medición 1	-50
Medición 2	-45
Medición 3	-40
Medición 4	-35
Medición 5	-33.7
Medición 6	-29
Medición 7	-21.7

Medición 8	-15
Medición 9	-13.8
Medición 10	-12
Medición 11	-5
Medición 12	-1
Medición 13	0.2
Medición 14	2
Medición 15	8.1
Medición 16	15.9
Medición 17	17
Medición 18	21.6
Medición 19	24.8
Medición 20	26.

Fuente: base de datos de la investigación

A través del osciloscopio se capturaron 10.000 muestras para cada temperatura en la señal de salida y para la señal de entrada no se evidenciaron cambios de temperatura por ende sus valores se mantuvieron constantes. Para el análisis de señal por las variaciones de temperatura se utilizó una señal de referencia DC lógico de un único valor, para poder realizar comparaciones entre el comportamiento de la señal de salida con referencia a la señal de entrada. Los resultados arrojaron que la señal de salida (línea azul), a una menor temperatura presenta un Offset hacia el eje vertical Y positivo, mientras que a mayor temperatura la señal se desplaza hacia Y negativo, no obstante la forma y comportamiento de la señal no se ve afectada sino que solo se observa un desplazamiento, en la primera imagen la temperatura marca el valor de “Lo” y esto se debe a que la temperatura que marca el mini termómetro no es soportada por él ya que se encuentra por debajo de los -50°C , tal como se refleja en la figura 18. Además cuando el circuito alcanza temperaturas por debajo de los -50°C se logra observar la formación de cristales de hielo alrededor de la placa, lo cual se visualiza en la figura 19.

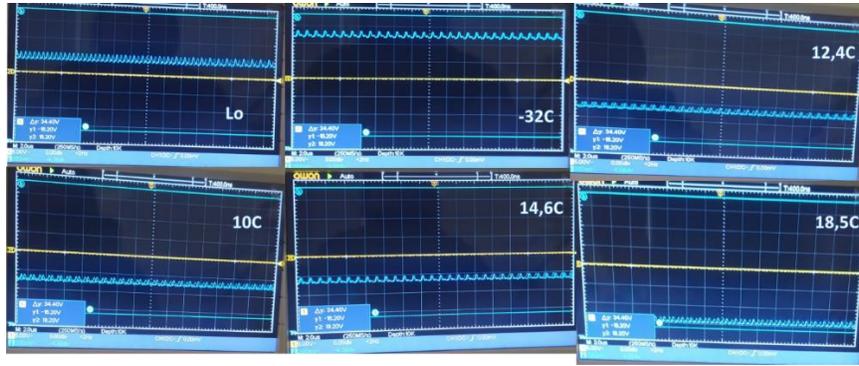


Figura 18. Señales de salida y entrada en las variaciones de temperatura

Fuente: base de datos de la investigación

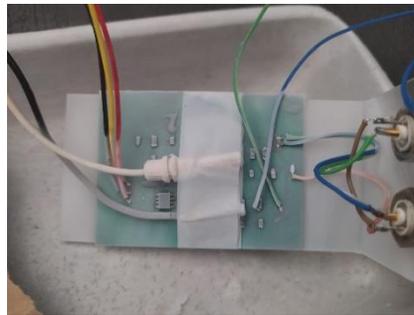


Figura 19. Formación de cristales de hielo en la placa

Fuente: base de datos de la investigación

6.4.2. Análisis y tratamiento de los datos obtenidos

Los datos extraído del osciloscopio se organizaron a través del programa estadístico Excel y su tratamiento se llevo a cabo mediante Matlab el cual es una plataforma que permite la programación y cálculo numérico para el análisis de datos, desarrollo de algoritmos y creación de modelos. De esta manera, las 20 muestras obtenidas anteriormente con un intervalo de 10.000 valores aproximadamente, se grafico cada señal recolectada para obtener una señal idéntica a la obtenida experimentalmente, este procedimiento funciono para las 20 muestras captadas resultando así 20 señales. Por medio de Matlab se calculó el promedio permitiendo identificar el valor de 0.5 como el promedio donde la señal se mantiene a pesar de las leves variaciones, todo lo anterior se muestra en la figura 20.

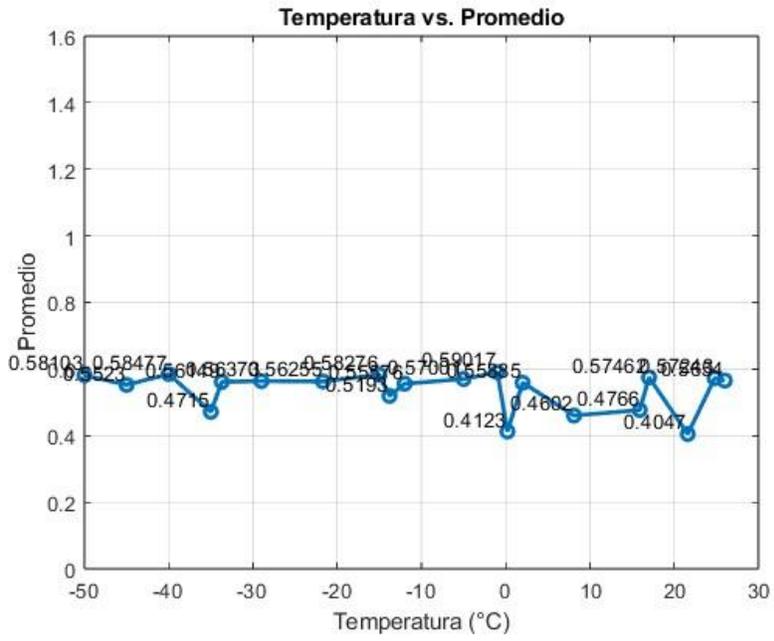


Figura 20. Análisis de las señales en el programa Matlab

Fuente: base de datos de la investigación

7. CONCLUSIONES

Durante el desarrollo de este trabajo investigativo se logró determinar que para poder llevar a cabo la simulación en plataformas como Proteos, Ni multisim, LiveWare y Ordcad, es necesario utilizar componentes con características similares por lo cual deben reemplazarse por un amplificador operacional THS4501 y un Transistor BFP22, ya que estos permitieron confirmar la funcionalidad de la configuración diseñada en el preamplificador operacional.

El prototipado obtenido en este proyecto permitió que se adquiriera una placa con montaje SMD capaz de recepcionar cualquier tipo de señal de respuesta de un fotomultiplicador de silicio con sensibilidad y resolución optima que permitió detectar eventos pequeños como el fotón y lograr filtrar la señal eliminando así el sobre muestreo del SiPM y el rizado y turbulencias de la señal de entrada.

Así mismo, en este proyecto se usaron SMD debido a que no hay integrados que tengan las prestaciones como ancho de banda, respuesta, inmunidad al ruido etc., necesarios para poder llevar a cabo el circuito, además, se emplearon también estos SMD ya que es la tecnología que se usa para eléctrica de alto nivel, se evidenció que una de sus mayores ventajas es que las resistencias tienen una mayor respuesta en frecuencia.

Además se concluye, que mediante equipos como el multímetro y termocupla tipo K, no es posible llevar a cabo variaciones de temperaturas por debajo de -50°C , dado que no tienen dicha capacidad. Por ende, para manejar este tipo de temperaturas es necesario emplear un mini termómetro (LCD) ya que a través de este se pueden manejar temperaturas desde -50°C hasta 26°C que permitan el funcionamiento del circuito.

Por lo tanto, se concluye que por la falta de equipos de medición se tuvo que acotar la temperatura de muestreo, ya que no fue posible tomar medidas por temperaturas por debajo de -50°C , sin embargo dentro de ese rango se tomaron muestras del comportamiento de la señal en respuesta a las bajas temperaturas a las que fueron enfrentados los componentes que componen la placa.

Los resultados que se obtuvieron de la señales permitieron concluir que a una menor temperatura se presenta un Offset hacia el eje vertical Y positivo, mientras que a mayor temperatura la señal se desplaza hacia Y negativo, sin embargo esto no afecta el comportamiento de la señal sino que solamente causa un desplazamiento.

8. RECOMENDACIONES

Según lo desarrollado en esta investigación se recomienda un sistema de control para la adquisición de datos y la parte de muestreo que se encuentre directamente conectado a los cambios de temperatura y pueda permitir hacer captura de los datos con mayor exactitud en un rango de temperatura específico.

Se sugiere la implementación del circuito amplificador, en una PCB de dos capas para eliminar los puentes externos.

Se recomienda que para someter la placa a variaciones de temperatura se cuente con los equipos adecuados que tenga un medidor de temperatura incluido en el mismo y la garanticen la fiabilidad de los datos.

Se sugiere tener Termómetros que cuenten con el rango de medición criogénico (-200C – 25C) .

9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] J. Yebras, *Uso de fotomultiplicadores de silicio para medidas de alta velocidad y baja intensidad luminosa*, Universidad Complutense de Madrid, 2015.

- [2] R. Preghenella, M. Alexeev, P. Antonioli, C. Baldanza, L. Barion, M. Chiosso, M. Contalbrigo, F. Cossio, S. Dalla, G. Dellacasa, D. Falchieri, R. Malaguti, M. Mignone, L. Pio, N. Rubini y S. Vallarino, «A SiPM-based optical readout system for the EIC dual-radiator RICH,» *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2022.
- [3] D. Grzonka, P. Bergmann, T. Hahnrahts, P. Kulesa, W. Parol, T. Sefzick, J. Ritman y M. Zielinski, «A large area efficient trigger scintillator with SiPM read out,» *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 1041, 2022.
- [4] P. Carniti, A. Falcone, C. Gotti, G. Pessina y F. Terranova, «A 0.22 nV/, 4.5 mW/channel cryogenic amplifier for large arrays of SiPMs in liquid Argon,» *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 1045, 2022.
- [5] A. Falcone, A. Andreani, S. Bertolucci, C. Brizzolari, N. Buckanam, M. Capasso, C. Cattadori, P. Carniti, M. Citerrio, K. Francis, N. Gallice, A. Gola, C. Gotti, I. Lax, P. Litrico, A. Mazzi, M. Mellinato, A. Montanari y V. Zutshi, «Cryogenic SiPM arrays for the DUNE photon detection system,» *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 985, 2021.
- [6] M. Agulló, *Evaluación de los fotomultiplicadores de silicio (SiPM) como alternativa a los fotomultiplicadores de tubo de vacío (PMT) en un Front-End Integrado para aplicaciones PET*, Universidad Politécnica de Valencia. Master en Ingeniería de Sistemas Electrónicos, 2019.

- [7] P. Baquero, *Diseño e implementación de un control de temperatura para una planta de caracterización de fotomultiplicadores de silicio*, Villavicencio: Universidad Antonio Nariño, 2018.
- [8] V. Ríos, *Diseño e implementación de un control de temperatura para una planta de caracterización de fotomultiplicadores de silicio*, Villavicencio : Universidad Antonio Nariño, 2021.
- [9] M. Suarez y H. González, *Caracterización de la Ganancia del SiPM MPPC S13360-6025CS*, Villavicencio : Universidad Antonio Nariño , 2022.
- [10] R. Barraza, *ASIC Multicanal con control de ganancia para la lectura de detectores SiPM*, Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, 2021.
- [11] F. Izraelevitch, *Implementación de fotomultiplicadores de silicio en aplicaciones espaciales.*, Universidad Nacional de San Martín, 2018.
- [12] P. Sola, *Aplicación de SiPM en detectores de centello de NaI (TI);retos y oportunidades*, Universidad de Zaragoza, 2019.
- [13] M. Biroth, P. Achenbach, E. Downie y A. Thomas, «A low-noise and fast pre-amplifier and readout system for SiPMs,» *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 787, 2015.
- [14] N. Dinu, «8 - Silicon photomultipliers (SiPM),» *Photodetectors*, 2016.
- [15] J. Duarte, *Diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos para muones*, Universidad de los Andes, 2019.
- [16] B. Bi, S. Zhang, Z. Cao, L. Yin, L. Ma, C. Wang, T. Montaruli, D. Della y M. Heller, «Performance of SiPMs and pre-amplifier for the wide field of view Cherenkov telescope array of LHAASO,» *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 899, 2018.

- [17] M. Rolf, *Optoelectrónica con Fotomultiplicadores de Silicio para Detectores de Rayos C3smicos*, Doctorado en ingenieria. Menci3n procesamiento de se1aas e imagenes, 2018, p. 46.
- [18] M. Argull3, *Evaluaci3n de los fotomultiplicadores de silicio (SIPM) como alternativa a los fotomultiplicadores de tubo vacio (PMT) en un Front-End integrado para aplicaciones PET*, (Universidad Polit3cnica de Valencia) Master en ingenieria de sistemas electr3nicos, 2015, pp. 10-11.
- [19] D. Guberman, C. Wunderlich, G. Barillar, J. Cortina, A. Paghi, R. Paoletti y A. Rugliancich, «Photo-Trap: A low-cost and low-noise large-area SiPM-based pixel,» *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 1057, 2023.
- [20] F. Gu, Y. Liu, X. Sun, Y. Xu, D. Zhang, Z. An, K. Gong, X. Li, X. Wen, h. Xiong, F. Zhang, C. Wang y G. Qu, «Achieving significant performance recovery of SiPMs' irradiation damage with in-situ current annealing,» *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 1053, 2023.
- [21] D. Cussans y Dune, «Timing and synchronization of the DUNE neutrino detector,» *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 958, 2020.
- [22] K. Deepthi, S. Goswami y N. Nath, «Challenges posed by non-standard neutrino interactions in the determination of δCP at DUNE,» *Nuclear Physics B*, vol. 936, 2018.

- [23] V. A. C. N. Guevara Gladys, «Metodologías de investigación educativa (descriptivas, experimentales, participativas, y de investigación-acción). .,» *Revista Recimundo*, vol. 4., pp. 163-173, 2020.
- [24] J. Veiga, E. fuente y M. Zimmermann, «Modelos de estudios en investigación aplicada: conceptos y criterios para el diseño.,» *Medicina y seguridad del trabajo*, vol. 54, nº 21, 2008.
- [25] P. Cadena, R. Rendón, J. Aguilar, E. Salinas, F. d. I. Cruz y D. Sangerman, «Métodos cuantitativos, métodos cualitativos o su combinación en la investigación: un acercamiento en las ciencias sociales,» *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, vol. 8, nº 7, 2017.
- [26] Fundación Universitaria del Área Andina, «Investigación cuantitativa,» 2018. [En línea]. Available: <https://digitk.areandina.edu.co/bitstream/handle/areandina/3544/Investigaci%C3%B3n%20cuantitativa.pdf?sequence=1>.