

**Estudio de centelladores plásticos en el proyecto MUTE para
muongrafía de volcanes**

Rolando Calderón Ardila

Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Geofísica

Director:

Luis Alberto Núñez

Ph.D en Ciencias

Codirectores:

Alex tapia Casanova , Ph.D en Ciencia y Tecnología

Mauricio Suárez Durán, M.Sc en Física

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

Maestría en Geofísica

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

Para mi hijo, siempre debes creer ti, confía y avanza.

Agradecimientos

A mis padres y hermanos quienes siempre han creído en mi, me han apoyado y ayudado, este grado es gracias a ustedes. A mis hermosos, Alejandra y Alan David quienes han completado mi vida llenándola de alegría, dirección y motivación. A mis tutores por su orientación y ejemplo, a Hernán Asorey por creer en mi y brindarme siempre una oportunidad de crecer. A mis amigos del grupo Halley por ser mi segunda familia, en especial a Amanda Balaguera por enseñarme como trabajar en equipo, a mis colegas galácticos Chrisitan y Mauricio que siempre van al frente abriendo camino. Les debo a todos, he sido muy afortunado.

Tabla de Contenido

Introducción	14
1 Muongrafía de volcanes	16
1.1 Volcanes y actividad Ignea	16
1.2 Técnicas geofísicas para estudiar volcanes	19
1.3 Técnica de Muongrafía	20
1.4 Proyecto MuTe (Muon Telescope)	22
2 Detectores de centelleo para detección de partículas	25
2.1 Materiales centelladores	25
2.1.1 Centelladores plásticos	25
2.1.2 Centelladores orgánicos e inorgánicos	26
2.1.3 Mecanismo de centelleo	27
2.1.4 Corrimiento en la longitud de Onda	29
2.1.5 Centelladores plásticos en el proyecto MuTe	29
2.2 Fotomultiplicadores de silicio (SiPM)	31

2.2.1	Principio de operación	31
2.2.2	Eficiencia de detección de fotones	34
2.2.3	Conteos oscuros y Detección cruzada	35
2.2.4	SiPM usados en MuTe	36
3	Metodología y Resultados	38
3.1	Estudio del detector de centelleo como sistema activo	38
3.2	Metodología	40
3.3	Caja de temperatura controlada	42
3.3.1	Montaje experimental	42
3.3.2	Variación del voltaje de ruptura del SiPM con la temperatura	45
3.3.3	Determinación de un voltaje de operación	46
3.4	Caracterización de la respuesta del SiPM en el sistema activo	48
3.4.1	Metodología para obtener Histogramas de carga	50
3.4.2	Determinación y ubicación de los SPE (<i>Single Photon Equivalent</i>)	51
3.5	Atenuación de las señales en el sistema barra-fibra-SiPM	52
3.5.1	Corrimiento de la carga depositada en función de la distancia	54
3.5.2	Atenuación en el sistema activo	57
4	Conclusiones	59
4.1	Conclusiones del trabajo	59

4.2 Exposición del trabajo a la comunidad 60

Referencias Bibliográficas 62

Lista de Figuras

1	Estudio de volcanes usando Muongraffa	17
2	Anatomía de un cono volcánico	17
3	Esquema de la ubicación del detector MuTe.	21
4	Diseño del detector para el proyecto MuTe	23
5	Ejemplo de centelladores plásticos	26
6	Descripción de los dos tipos de centelladores	27
7	Espectro electromagnético, el centellador corre la longitud de onda	29
8	Espectros de emisión y de absorción	30
9	Fotomultiplicador de silicio modelo S13360-1350CS usado en MuTe	31
10	Diagrama del circuito equivalente para el SiPM	33
11	Representación esquemática del <i>crossstalk</i> en un SiPM	36
12	Espectro de sensibilidad del SiPM	37
13	Componentes de un modulo de barra centelladora	40
14	Descripción física de la detección en la barra	41

15	Imagen de la caja de temperatura controlada con un peltier	43
16	Esquema simplificado de la caja de temperatura	43
17	Tiempo de establecimiento para la caja de temperatura	44
18	Circuito del pico-ampermetro	45
19	Relación entre el voltaje de entrada y la corriente oscura	46
20	Relación entre el voltaje de ruptura del SiPM y la temperatura	47
21	Electrónica de adquisición para estudiar histogramas de carga	48
22	Representación del <i>risetime</i> (Vinogradov et al., 2015) para un pulso.	49
23	Representación de la relación entre la amplitud de los pulsos obtenidos con un SiPM y su histograma de carga.	49
24	Histogramas de carga para el ruido y las señales	51
25	Histograma de carga para diferenciar celdas activas	53
26	Montaje experimental usado para realizar detección de partículas cargadas en coincidencia	53
27	Capturas de eventos medidos en coincidencia	54
28	Pulsos representados en términos de su amplitud	55
29	Montaje usado para estimar la atenuación	56
30	Desplazamiento de la distribución de carga	56
31	Estimación del porcentaje de atenuación	57

Lista de Tablas

- 1 Características del fotomultiplicador de silicio usado en este trabajo. Los datos fueron consultados en la hoja de datos del fabricante, sin embargo algunos parámetros debe ser medidos en laboratorio antes de usar en campo. 37

Resumen

TÍTULO: ESTUDIO DE CENTELLADORES PLÁSTICOS EN EL PROYECTO MUTE PARA MUONGRAFÍA DE VOLCANES¹

AUTOR: CALDERÓN ARDILA, Rolando⁷.

PALABRAS CLAVES: Detector de partículas, Centelladores plásticos, Fotomultiplicadores de silicio, Muongrafía, Volcanes, Rayos cósmicos.

DESCRIPCIÓN:

Se presenta un estudio del sistema de detección indirecta de partículas cargadas, constituido por centellador plástico con fibra óptica embebida acoplado a fotomultiplicadores de silicio (SiPM, por sus siglas en inglés). Se estableció una metodología para diferenciar entre la respuesta del detector al paso de partículas cargadas y su ruido de fondo. Se determinó que para nuestros acoples se espera un 70% más de amplitud en cada pulso producido por partículas cargadas con respecto al ruido del centellador. También se estudió la sensibilidad del sistema a la variación de temperatura, cuantificando cómo cambia el voltaje de operación de los fotomultiplicadores de silicio usados en el detector, por cada 10°C el voltaje de ruptura del SiPM varía 0,45V.

Posteriormente se realizaron mediciones de la atenuación en la fibra óptica con barras centelladoras en coincidencia. Se pudo estimar un 11% de atenuación en el sistema cuando está acoplado. Además, se concluyó que éste estudio es necesario para cualquier sistema de detección que proponga usar éstos componentes en prototipos de telescopios de muones. Los resultados completan el trabajo del grupo de simulaciones computacionales del detector MuTe (*Muon Telescope*, por sus siglas en inglés); particularmente los resultados sirvieron para ajustar parámetros y mejorar las simulaciones.

¹Trabajo de Investigación.

⁷Facultad de Ciencias, Escuela de Física, Luis Alberto Núñez (Director), Alex Tapia Casanova (Co-Director), Mauricio Suárez Durán (Co-Director).

Abstract

TITLE: STUDY OF PLASTIC SCINTILLATORS IN THE MUTE PROJECT FOR VOLCANO MUONGRAPHY ¹

AUTHOR: CALDERÓN ARDILA, Rolando ⁷.

KEY WORDS: Particle detector, plastic scintillator, Silicon photomultipliers, Muography, Volcanoes, Cosmic rays.

DESCRIPTION:

A study of the system of indirect detection of charged particles is presented; it is constituted by plastic scintillator with an embedded optical fiber coupled to silicon photomultipliers (SiPM, for its acronym in English). A methodology was established to differentiate between the response of the detector to the passage of charged particles and their background noise. It was determined that for our couplings it is expected 70% more amplitude in each pulse produced by charged particles with respect to the noise of the scintillator. The sensitivity of the system to temperature variation was also studied quantifying how the operating voltage of the silicon photomultipliers used in the detector changes, for each 10°C the breaking voltage of the SiPM varies 0,45V.

Subsequently, attenuation measurements on the optical fiber were made with coincident scintillator bars. It was possible to estimate an attenuation of 11% in the system when it is coupled. In addition, it was concluded that this study is necessary for any detection system that aims to use these components in prototypes of muon telescopes. The results complement the work of the Computer simulations group of the MuTe detector (Muon Telescope); the results served particularly to adjust parameters and improve the simulations.

¹Research work

⁷Faculty of science, School of physics, Luis Alberto Núñez (Advisor), Alex Tapia Casanova (Co-Advisor), Mauricio Suárez Durán (Co-Advisor).

Introducción

Las investigaciones en Geofísica son realizadas generalmente con la ayuda de diferentes tipos de detectores o instrumentos. Éstos corresponden a los diferentes métodos de investigación y prospección utilizados comúnmente como: métodos geoeléctricos, gravimétricos o la técnica de magnetotelúrica. Estudiar estructuras geológicas complejas como volcanes, glaciares o represas naturales representa gran dificultad porque los diferentes métodos geofísicos tienen limitaciones. Dos de estas limitaciones son la resolución con la profundidad y el peligro derivado de técnicas invasivas.

En Colombia hay variedad de estructuras geológicas interesantes para la investigación geofísica. En particular algunos volcanes se encuentran cerca de poblaciones, como el cerro Machín([Méndez, 2001](#)) o el volcán Galeras. Durante los últimos veinte años se ha desarrollado la técnica de tomografía de muones o muongrafía, por medio de la cual, es posible construir una imagen digital en términos del contraste de densidades producto de la absorción de muones atmosféricos ([Asorey, 2012](#)).

Los muones han sido utilizados en técnicas de tomografía por su gran poder de penetración en la materia. En el caso de muones atmosféricos el flujo es mayor respecto al de otras partículas secundarias como protones o piones([Gaisser, 1990](#)). Inicialmente, la técnica fué utilizada en 1955 por E.P. George, para medir la profundidad de un túnel en Australia ([George, 1955](#)). Posteriormente, se hizo famosa gracias al experimento realizado por Luis Alvarez (premio Nobel) en 1970 ([Burkhard et al., 1970](#)), para obtener imágenes interiores en búsqueda de túneles o cámaras secretas al interior de la pirámide de Chephren en Giza.

Lamentablemente no se pudo encontrar cámaras secretas en ese entonces sin embargo en 2017 hubo éxito al usar esta técnica en pirámides (Morishima et al., 2017). Actualmente esta técnica también es usada en otras investigaciones (Tanaka et al., 2009; Lesparre et al., 2012).

Una fase importante al utilizar esta técnica es el diseño del detector, ya que existen diferentes tecnologías y posibles configuraciones de manera que pueden obtenerse mediciones con mayor o menor resolución. También pueden existir errores debido al ruido en los datos o por ejemplo la imposibilidad de distinguir el ruido de las señales útiles. Este trabajo pretende ser un avance y estudio sobre la detección de partículas, entre ellas muones orientado al proyecto MuTe¹. En este caso particular el estudio se centró en las barras centelladoras con fibras ópticas embebidas que en el caso del detector MuTe serán responsables de la detección de partículas cargadas.

El problema consiste en qué debemos conocer la respuesta del sistema compuesto por las barras centelladoras con fibra óptica y un fotomultiplicador de silicio, además determinar una estrategia para establecer el trigger, determinar si la temperatura afecta las mediciones y si existe o no atenuación en la cantidad de luz que se espera detectar.

En la siguiente sección describiremos brevemente el contexto de la aplicación en geofísica, algunos temas relevantes como lo son la descripción de la técnica de muongrafía y la física de detectores involucrada. Seguidamente, describiremos la metodología utilizada para estudiar la respuesta de las barras centelladoras y los resultados del estudio experimental.

¹Telescopio MuTe <http://halley.uis.edu.co/fuego/>

Capítulo 1

Muongrafía de volcanes

SECCIÓN 1.1

Volcanes y actividad Ignea

En este capítulo describiremos la relación entre los volcanes y las rocas ígneas, entender la composición de las rocas de estudio es importante, ya que conocer la densidad de la roca en estructuras volcánicas facilita la aplicación de la técnica de muongrafía. Las rocas sufren cambios a través del tiempo completando ciclos. Las rocas ígneas son de especial importancia ya que constituyen la mayor parte de la corteza terrestre. Cuando afloran y se enfrían producen diferentes estructuras geológicas con diferentes tipos de minerales; ahora sabemos que esto depende de la rapidez con que se enfrió la roca, produciendo al final minerales con diferente grado de cristalización. En la figura 1 observamos un ejemplo de magma que aflora en superficie, en este caso produciendo un cono volcánico en la isla de Satsuma-Iwojima en Japón.

Entender la velocidad con la que el magma aflora ayuda en la diferenciación de minerales; esto se hace teniendo en cuenta propiedades que dependen principalmente del ambiente en el cual se forma la roca. Las rocas ígneas se identifican por la textura y composición; en

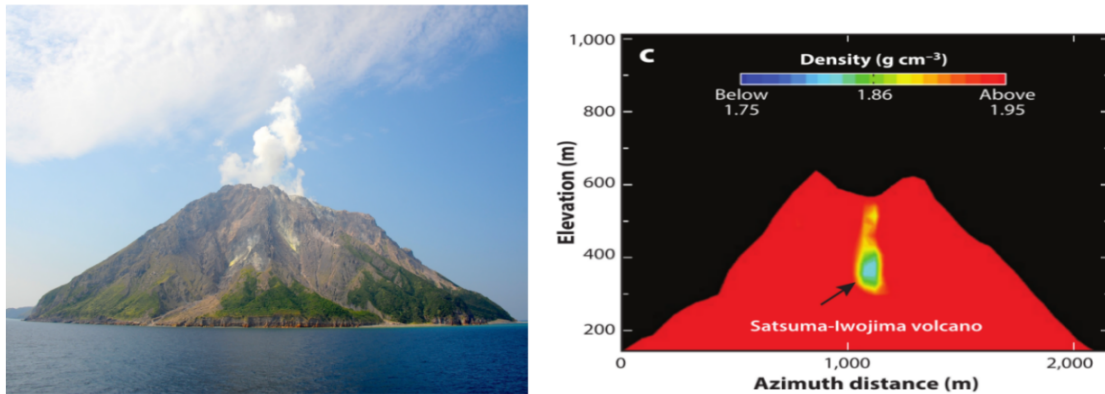


Figura 1: En la figura se observa dos imágenes del volcán Iwo-dake en la isla de Satsuma-Iwojima en Japón. Una fotografía del volcán tomada en 2014 por Hiroyuki Tanaka. A la derecha una imagen del volcán obtenida mediante la técnica de muografía (Tanaka et al., 2014).

este caso el proceso físico importante es el enfriamiento del magma. Si se da lentamente favorece la formación de cristales mas grandes y enfriamientos rápidos producen cristales mas pequeños con una textura mas desordenada denominada vítrea.

La composición de las rocas ígneas es producto de la composición del magma y también del tiempo que demora en enfriarse. Es importante entender que el ambiente donde se da la cristalización es también vital; si el magma se enfrió a gran profundidad es probable que existan gases que afecten el proceso, mientras que si las rocas son extrusivas es mas probable que hallan perdido materiales volátiles como gases y agua.

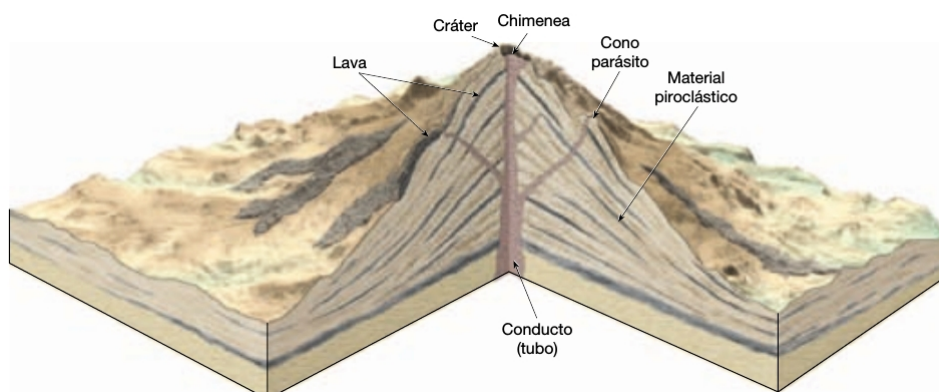


Figura 2: Anatomía de un cono compuesto (típico) (Tarbuck and Lutgens, 2002), en algunos casos en el cráter se puede observar un tapón Volcánico.

Cuando el magma asciende puede producir diferentes estructuras producto de su enfria-

miento, un tipo de estructura muy estudiada son los volcanes. Los volcanes son estructuras complejas e impredecibles que nos han acompañado desde los albores de la humanidad. A pesar de esto, aun hoy desconocemos aspectos importantes de su comportamiento como es el caso de las erupciones. La geología ha estudiado estos monstruos y su relación con las rocas ígneas, en ese punto es cuando podemos estudiar su pasado a través de los vestigios de erupciones y cambios en el tiempo geológico, esto se nos manifiesta a través de basaltos y demás actividad ígnea.

Mediante la observación y el estudio de las rocas ígneas se ha identificado que el magma, que eventualmente se convierte en lava, presenta distinta composición en presencia de gases, y que a diferentes temperaturas su viscosidad cambia. La viscosidad parece ser el parámetro que determina si el magma es capaz de fluir o por el contrario mantenerse casi inmóvil y luego, al aumentar la presión de los gases, producir explosiones violentas.

Cuando sucede una erupción, existen otras sustancias que acompañan este proceso, por ejemplo ceniza muy fina constituida principalmente por pequeños cristales vítreos, que en el caso de los seres vivos pueden causar mucho daño si esta ceniza tiene gran concentración. Esta ceniza sumada al polvo caliente son llamados materiales piroclásticos.

Otro material expulsado es por ejemplo, bombas que esencialmente es material arrojado con violencia con tamaños que oscilan desde centímetros hasta varios metros. También podemos distinguir material expulsado en la erupción por su textura y composición, a destacar la escoria y la pumita que se distinguen por tener vesículas (poros) (Tarbuck and Lutgens, 2002).

Dado que las erupciones son peligrosas para las comunidades, animales y el impacto ambiental, surge otra pregunta natural: ¿Cómo saber si hay un volcán en mi vecindario?. Al parecer los volcanes difieren en tamaño, forma, altura, inclusive hay debajo del mar. Los volcanes no son iguales y no están en cualquier parte. A destacar 2 tipos principales de volcanes, los llamados volcanes en escudo y los estrato-volcanes; los últimos son los más peligrosos ya que suelen tener erupciones más explosivas que adicionalmente, vienen

acompañadas de nubes de gas caliente y lahares.

Dependiendo del tipo de volcán la cámara magmática varía en profundidad, típicamente se encuentra asociada a una chimenea que se forma gracias a una fisura o una pluma que asciende. Si logra subir a superficie se forma una caldera que en el caso de enfriarse, algunas veces se llena con un tapón o pitón volcánico. Conocer esta descripción morfológica ayuda en la labor de ubicación y estudio.

SECCIÓN 1.2

Técnicas geofísicas para estudiar volcanes

Para estudiar un volcán no es suficiente la observación, es requerido usar técnicas geofísicas y comparar datos obtenidos mediante diferentes instrumentos. Esto permite una sinergia entre datos geológicos y datos obtenidos gracias a diferentes técnicas de prospección, por ejemplo: datos de resistividad obtenidos con métodos de geoelectrónica con arreglos tipo schlumberger o wenner. Estos arreglos permiten tener diferentes configuraciones de los electrodos y así cambiar la resolución con la profundidad, esta técnica en particular puede tener baja resolución para profundidades superiores a los 20m. La baja resolución a mayor profundidad puede afectar las interpretaciones y estimaciones de la densidad en la roca. Por esto en varios casos como el Mt. Etna([Carbone et al., 2003](#)) en Italia o el volcán Soufrière of Guadeloupe([Lesparre et al., 2012](#)) en el Caribe se complementa con datos de gravimetría.

Estas técnicas pueden ser usadas solo para monitoreo como el caso del Mt. Etna([Carbone et al., 2003](#)), donde se instalaron 70 gravímetros muy sensibles cerca del volcán estableciendo una red, de manera que, si hay variaciones locales de gravedad, pueda obtenerse indirectamente información sobre actividad del magma cerca del cráter. Otro ejemplo es el volcán Usu en Japón([Ogawa et al., 1998](#)), para el cual se realizó una reconstrucción basándose en datos obtenidos mediante la técnica de magnetotelúrica en diferentes frecuencias,

esta técnica aprovecha el campo geomagnético y sus cambios locales, estos dependen de la resistividad de la roca y puede dar información de la distribución de resistividades en profundidad.

Las anteriores técnicas mencionadas presentan algunos inconvenientes como por ejemplo qué se requiere instalar equipos sobre la superficie del volcán, o sobrevolarlo. Otro inconveniente es la interpretación de la densidad de la roca usando un solo método. En el primer caso la instalación de equipo representa peligro para los operarios de los instrumentos y la posibilidad de perder los datos en el caso de un accidente, en el segundo la necesidad de correlacionar datos con otras técnicas, como por ejemplo la muongrafía. Esta técnica permite realizar una estimación de las densidades de un perfil sin la necesidad de ser invasiva; en la siguiente sección describiremos la técnica y el proyecto MuTe.

SECCIÓN 1.3

Técnica de Muongrafía

La muongrafía de volcanes es una técnica que permite usar el flujo direccional de muones atmosféricos para estudiar de manera indirecta una estructura volcánica (Tanaka et al., 2009). En la figura 3 observamos un esquema que representa la importancia del flujo direccional en función de la distancia recorrida en roca por los muones. Como ya mencionamos un volcán es una estructura geológica que se interpreta como una sutura en la corteza terrestre, las diferencias de temperatura al interior de la tierra causan que se produzcan escapes de gases y roca fundida conocida como lava. En particular se observa que los volcanes están en lugares en presencia de convergencia de placas tectónicas y gracias a la dinámica de la corteza pueden presentar periodos de inactividad o actividad. (Parfitt and Wilson, 2009).

La muongrafía representa una oportunidad para estudiar volcanes. Si se construye una imagen digital a partir de la comparación entre: el conteo de muones realizado con un

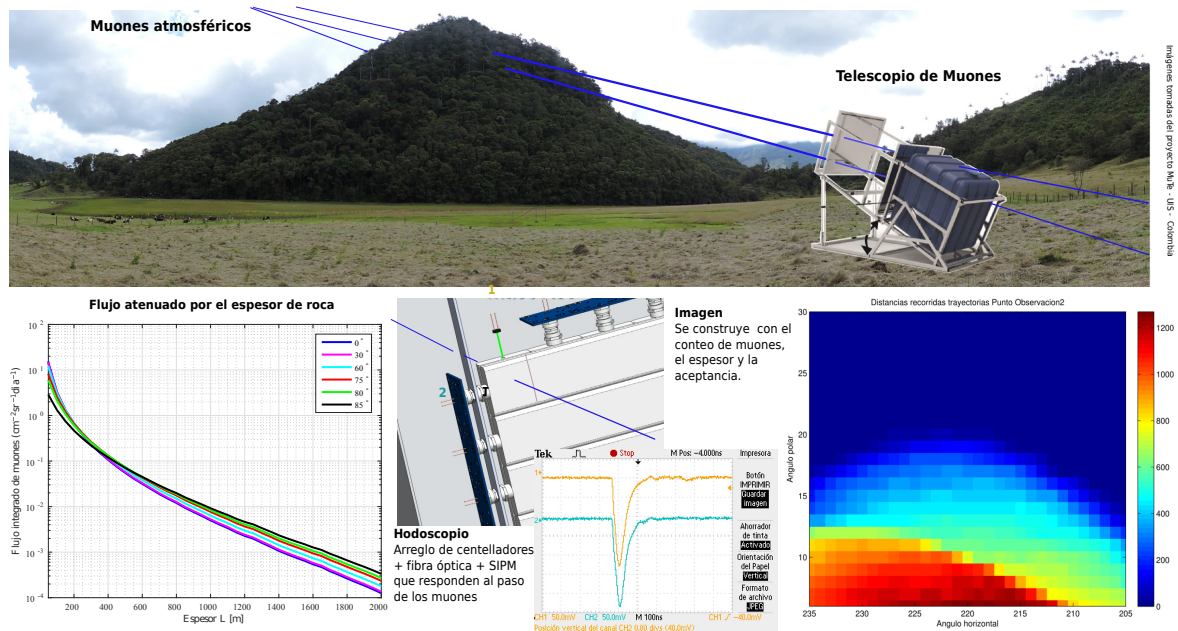


Figura 3: En esta figura se observa una representación de la ubicación del telescopio del proyecto MuTe (MuTe, 2018) cerca del domo superior del volcán Machín en Colombia y el resumen de la técnica de Muongrafía.

telescopio de muones y las distancias recorridas estimadas para los muones que atraviesan la zona observada; es posible calcular la opacidad promedio a lo largo de la trayectoria del material atravesado y como resultado de esto inferir el contraste de densidad en la imagen de la estructura.

La técnica de muongrafía ha sido utilizada en diferentes volcanes, como el Mt. Vesubio por el proyecto Mu-RAY (Ambrosi et al., 2011), este proyecto construyó un telescopio de muones usando 3 paneles constituidos de centelladores plásticos con sección transversal triangular, acoplados a fibras ópticas con fotomultiplicadores de silicio. También ha sido utilizada en Japón donde se ha desarrollado con éxito en volcanes como el Mt. Satsuma-Iwojima (Tanaka et al., 2009), el Mt. Sukuba (Nagamine et al., 1995) y el Mt. Asama (Tanaka et al., 2008), este último fue estudiado usando emulsión fotográfica.

En Italia se ha utilizado la muongrafía como técnica complementaria para estudiar el Mt. Etna (Carbone et al., 2013), donde la morfología del volcán dificultó el análisis de datos, los autores reportaron diferencias entre los modelos sintéticos y los datos medidos. Estas diferencias se explicaron como debidas a la atenuación de los muones y al ruido inherente al detector.

Para que la técnica pueda ser realizada con éxito es necesario conocer la respuesta del detector que se va a utilizar y caracterizarlo antes de realizar las mediciones. El Telescopio MuTe (MuTe, 2018) utiliza barras de sección transversal rectangular hechas de centellador orgánico, fibras ópticas de corrimiento de longitud de onda y fotomultiplicadores de silicio (SIPM) (Zappa and Andrea, 1996). El detector MuTe tiene 2 arreglos de barras centelladoras denominados paneles, cada uno está constituido por 60 barras, ver figura 4. Estos paneles están sujetos a una estructura mecánica de manera que conforman un telescopio direccional. En este trabajo se presenta el estudio de las barras centelladoras y se presenta la metodología para estudiar su respuesta.

SECCIÓN 1.4

Proyecto MuTe (Muon Telescope)

MuTe es un proyecto financiado por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (ColCiencias), que busca diseñar, construir, calibrar y poner en funcionamiento un telescopio detector de muones para medir el flujo de muones atmosféricos que atraviesan el domo superior del volcán Cerro Machin (departamento del Tolima) en Colombia. En este proyecto participan la universidad Industrial de Santander (coordinadora), la Universidad del Tolima y el Servicio Geológico Colombiano, adicionalmente cuenta con el apoyo del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México.

El detector consta de un hodoscopio compuesto por 2 paneles compuestos por barras centelladoras como se puede ver en la figura 4. Este hodoscopio está acoplado mediante una estructura mecánica a un tanque detector cherenkov en agua o WCD, ambos detectores detectarán sincronizados. Los paneles del hodoscopio pueden cambiar la distancia que los separa, gracias a esto el sistema puede variar su apertura angular acercando o alejando los paneles.

La estructura mecánica fue diseñada y ensamblada en estructura metálica, el modelo está diseñado para ser fácil de montar y trasportar. Los apoyos del sistema de elevación se realizaron con dos tubos deslizantes curvos, los cuales se perforaron para que el instrumento se mueva cada tres grados de elevación y así tener un control sobre las medidas de inclinación. Adicional al diseño mecánico se realizaron simulaciones de deformación y esfuerzos en la estructura así como también se simuló variaciones térmicas de la estructura.

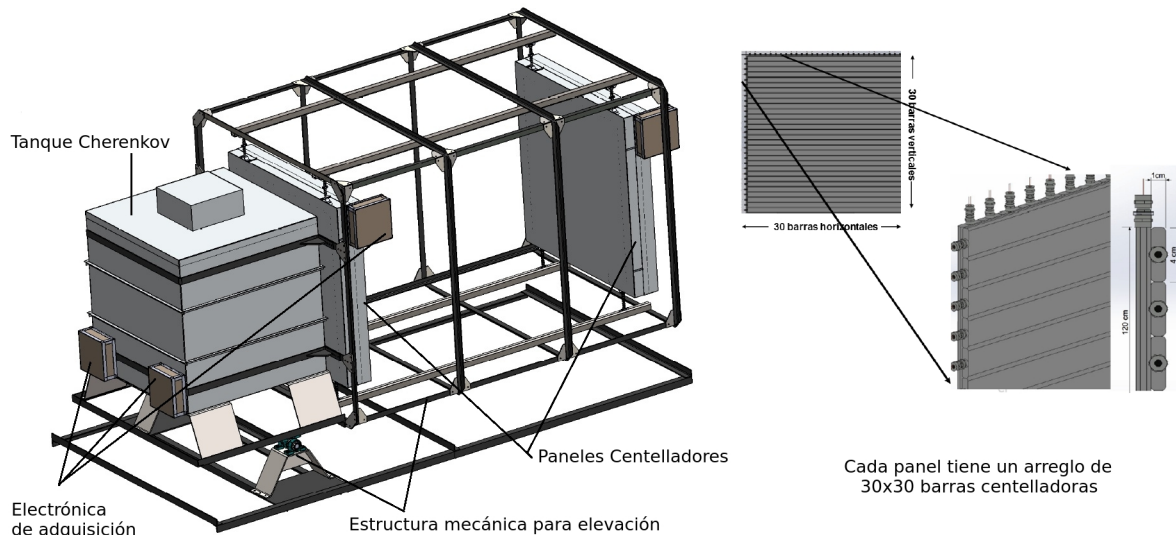


Figura 4: Diseño del detector para el proyecto MuTe en Colombia, a destacar la implementación de un tanque Cherenkov (WCD) como discriminador adicional en la detección de muones. El WCD contará con una electrónica adicional a la usada por el hodoscopio.

Además de diseñar y construir el detector es necesario conocer cómo será su repuesta al paso de partículas cargadas. Con este propósito se planteó el desarrollo de simulaciones computacionales de manera que se tenga en cuenta la física involucrada en los detectores activos tanto de centelleo como el cherenkov en agua. El desarrollo de estas simulaciones se ha llevado en paralelo con el estudio del detector pudiendo así generar una sinergia entre los grupos de trabajo que ha permitido el avance del proyecto.

Para poder realizar la técnica de muografía no es suficiente el desarrollo del detector, también es requerido estudiar el flujo direccional de muones atmosféricos. Estas partículas consideradas elementales se producen cuando rayos cósmicos interactúan con átomos en la atmósfera produciendo cascadas aéreas extensas (Abreu et al., 2010). Las cascadas están constituidas por un espectro de partículas secundarias que cambia y depende de varios factores como por ejemplo: La altura sobre el nivel del mar, la posición geográfica, la

temperatura, presión atmosférica y el ángulo de observación con respecto al cenit.

Luego de estimar el flujo de secundarios es requerido definir la configuración y posición del telescopio con respecto al objeto de estudio, en este caso un volcán. La ubicación del detector se define para calcular cual sería el flujo detectado en diferentes puntos de observación. Luego de tener un adecuado modelado del flujo de secundarios se procede a simular la Física del detector en combinación con los flujos estimados (Vesga-Ramirez, 2018). Así es posible obtener una simulación de la respuesta del telescopio, esta respuesta simulada será comparada y ajustada con la respuesta medida con el telescopio en campo. Luego de tener los datos de las mediciones en campo se realiza un modelado usando un método de inversión geofísica con un adecuado conjunto de parámetros.

El resultado será una imagen constituida a partir de valores promedio de densidad que tendrá en cuenta las trayectorias recorridas por los muones. Este proyecto además de ambicioso es pionero en América Latina y servirá de semilla para el desarrollo de tecnologías orientadas a la prospección geofísica.

Capítulo 2

Detectores de centelleo para detección de partículas

SECCIÓN 2.1

Materiales centelladores

2.1.1 Centelladores plásticos Para el propósito de este trabajo revisaremos los conceptos y un breve marco teórico sobre materiales centelladores y como estos se pueden usar con fotomultiplicadores de silicio para la detección de partículas, en este caso partículas cargadas. Estos materiales son producidos para que emitan luz cuando una partícula cargada los atraviesa y deposita energía por excitación. Existen diferentes tipos de materiales centelladores y con diferentes espectros de emisión y absorción, en la figura 5 observamos un ejemplo de centelladores plásticos con diferentes geometrías. El detector MuTe emplea barras de material centellador con sección transversal rectangular de 4cm x 1cm con un largo de 120cm, Para este caso se usan centelladores plásticos con un pico de emisión de aproximadamente 420nm.

Las razones de usar barras de material centellador en MuTe son las siguientes:

- Un sistema de detección eficiente para nuestro propósito (Muones)
- Bajo costo frente a otros sistemas de detección como por ejemplo argón líquido.
- Desempeño estable a diferentes temperaturas y fácil manejo.
- Se está utilizando en otros experimentos de muongrafía.

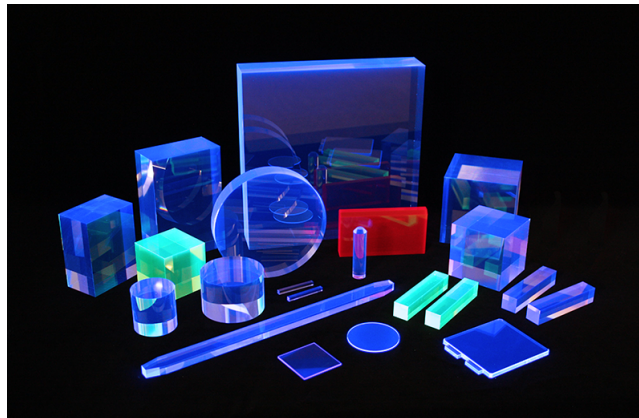


Figura 5: Los detectores de centelleo tienen como principio la generación de luz al paso de radiación ionizante. En la imagen observamos un ejemplo de centelladores plásticos sensibles a la luz ultravioleta. Imagen tomada del documento informativo de [eljentechnology](#).

Sin embargo los centelladores rectangulares no son suficientes para la detección, por esto usamos fibras ópticas y fotomultiplicadores de silicio acoplados. Para que la detección indirecta de muones sea eficiente la atenuación en cada acople es importante, así que escoger los materiales es una fase en el diseño. Una mala combinación de acoples ópticos puede dificultar el trabajo, aquí la fibra óptica que además es de material centellador será de vital importancia en el sistema integrado Barra-fibra-SiPM. Esto porque guiará los fotones hasta el fotomultiplicador de silicio y permitirá correr la longitud de onda de estos fotones hasta la zona del espectro en la cual el fotomultiplicador es más sensible.

2.1.2 Centelladores orgánicos e inorgánicos Existen dos tipos de centelladores, orgánicos e inorgánicos y en ambos casos la excitación media el proceso aunque los estados excitados son diferentes. Los centelladores inorgánicos son cristales, usualmente con una pequeña cantidad de impurezas, como por ejemplo: NaI(Tl) Ioduro de sodio, CsI(Tl) Ioduro de cesio, ambos dopados con Talio, con tiempos de respuesta del orden de los 300 ns. Los centelladores inorgánicos son centelladores más densos y tienen un rendimiento mayor. Esto

es: generan una mayor cantidad de fotones por unidad de energía depositada al paso de la partícula incidente. En un centellador inorgánico es característico su estructura electrónica de bandas, propia de una red cristalina.

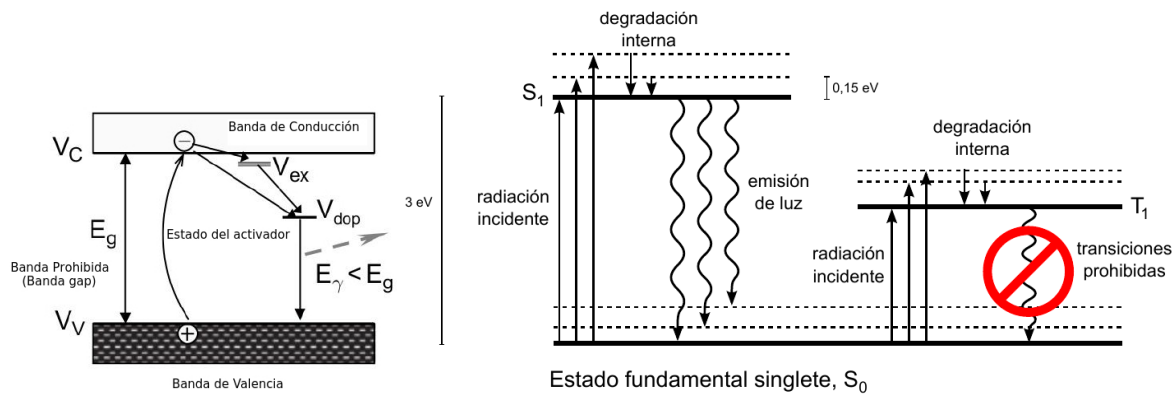


Figura 6: A la izquierda en el inorgánico, los electrones excitados pueden subir a una banda de energía mayor y luego regresar a su estado base emitiendo fotones. A la derecha una representación de niveles de energía de π -electrones en una molécula orgánica.

Los centelladores orgánicos son hidrocarburos aromáticos, compuestos que contienen átomos de carbono ligados entre si en forma de anillo. Entre los más extensamente utilizados podemos mencionar a PTP, B-PBD, PPO y POPOP. Los centelladores orgánicos se conforman como mezcla de dos o más de estos compuestos.

2.1.3 Mecanismo de centelleo Los compuestos aromáticos poseen los llamados orbitales moleculares π -*electron*, en los cuales los electrones no están asociados a un átomo en particular, sino que están deslocalizados en la molécula. La luz de centelleo se genera por transiciones entre niveles energéticos de electrones de valencia. En la figura 6b se puede ver un diagrama esquemático, donde observamos el estado fundamental, un estado excitado singlete de spin S_1 y otro triplete T_1 . El fundamental es un estado singlete y lo denotamos S_0 . Además, asociado a cada nivel electrónico, hay una estructura de subniveles energéticos de excitaciones y de modos vibracionales moleculares. La diferencia de energía entre niveles electrónicos está en el orden de los 3 eV, mientras que entre los subniveles vibracionales, es del orden de los 0,15 eV. La energía cedida por la radiación a través de ionización y excitación, hace que los electrones de valencia pueblen tanto los estados excitados electrónicos como los subniveles vibracionales, tal como está expresado por las flechas rectas en la figura

6b.

En el caso de excitaciones a estados singlete, los modos vibracionales decaen inmediatamente (en un tiempo menor a los 10 ps) al estado S_1 sin la emisión de radiación, en un proceso conocido como degradación interna. Cuando los electrones decaen tanto al estado fundamental S_0 como a sus subniveles vibracionales emite radiación en el espectro visible o cercano. Este proceso ocurre en un tiempo del orden de nanosegundos y corresponde a la fluorescencia. Cuando los electrones cambian desde S_1 a estados vibracionales de S_0 , (qué es una transición de menor energía que la requerida para el salto $S_0 \rightarrow S_1$), se emite radiación con una longitud de onda mayor, así se explica la transparencia de los centelladores a su propia radiación. Esto es así porque a temperatura ambiente prácticamente todos los electrones ocupan el estado fundamental S_0 y no sus subniveles vibracionales.

Para un estado triplete, también ocurre un proceso similar, el cual lleva a los electrones que llenan los subniveles vibracionales al estado T_1 . Mientras energéticamente las transiciones $S_0 \rightarrow S_1$ son posibles, en los estados triplete los electrones en T_0 decaen al interactuar con otros electrones en el mismo nivel energético, de manera que,



Este proceso deja una molécula en el estado T_1 , para luego decaer emitiendo radiación. La luz se emite con un cierto retardo, el cual es característico de la interacción entre moléculas excitadas y representa la componente lenta o retardada del centelleo: la fosforescencia. Así la contribución de esta componente a la luz total no es significativa. Una característica notable de estos procesos es su rapidez, con tiempos de decaimiento en el orden de unos pocos nanosegundos o menos. Por otro lado, debido a qué la luminiscencia de estos materiales es de naturaleza molecular; los centelladores orgánicos pueden tener diferentes formas sin perder sus propiedades.

2.1.4 Corrimiento en la longitud de Onda Es importante escoger la adecuada combinación de centelladores en el detector activo denominado barra centelladora. El corrimiento de Stokes¹ es un fenómeno que es aprovechado (*Stokes Shift*, su nombre en Inglés), se da, cuando los picos de absorción y emisión de un material se corren de manera que la emisión esta dada en una longitud de onda mayor. Esto sucede porque las moléculas (en este caso) pierden una pequeña cantidad de energía a través de la relajación vibratoria, así la molécula regresa al estado fundamental y se emite energía.

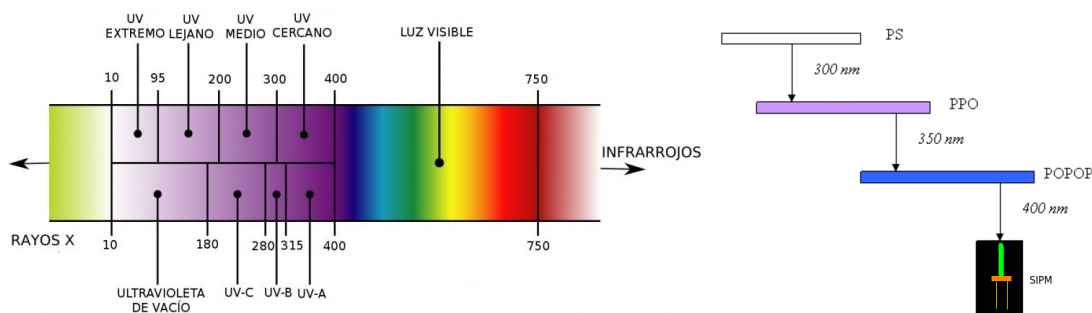


Figura 7: El centellador orgánico se produce para aprovechar el mecanismo Wavelength Shifter, de esta manera el material absorbe y reemite. La luminiscencia pasa del plástico a los dopantes hasta llegar al rango de absorción de la fibra óptica en 420 nm.

2.1.5 Centelladores plásticos en el proyecto MuTe En el proyecto MuTe usamos un centellador plástico orgánico, es fabricado por Fermilab (Pla-Dalmau, 2001)², con los dopantes: PPO [2,5-diphenyloxazole] al 1% y POPOP [1,4-bis(5-phenyloxazole-2-yl)benzene] al 0.03%, con un recubrimiento de TiO_2 para mejorar las reflexiones internas, además tiene una longitud de atenuación de 5 cm (Pla-Dalmau et al., 2001).

Fibras ópticas embebidas Además del material centellador rectangular las barras tienen en su interior fibras ópticas de corrimiento de longitud de onda o WLS (*Wavelength Shifting*, su nombre en Inglés). Estas fibras BCF99-29AMC, tienen un diámetro de 1 mm y son fabricadas por Saint-Gobain³. Se escogieron de tipo multi-revestimiento con el objeto de minimizar las pérdidas por fuga de fotones. Las BCF99-29AMC tienen un interior de PM-MA (Polimetilmetacrilato, $C_5H_8O_2$) con densidad de $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ e índice de refracción de (n

¹Una descripción completa https://en.wikipedia.org/wiki/Stokes_shift

²La referencia es Dow Styron 665W, polystyrene pellets

³<http://www.crystals.saint-gobain.com/uploadedFiles/SG-Crystals/Documents/SGC%20organics%20Brochure.pdf>

= 1,60); recubiertas con una primera capa de acrílico ($n = 1,49$) seguida de otra capa de fluor-acrílico ($n = 1,42$). Esta diferencia en n produce una reflexión interna total para los fotones que ingresan a la fibra, lo que permite transportarlos gracias a múltiples reflexiones. La figura 7 ilustra ese proceso.

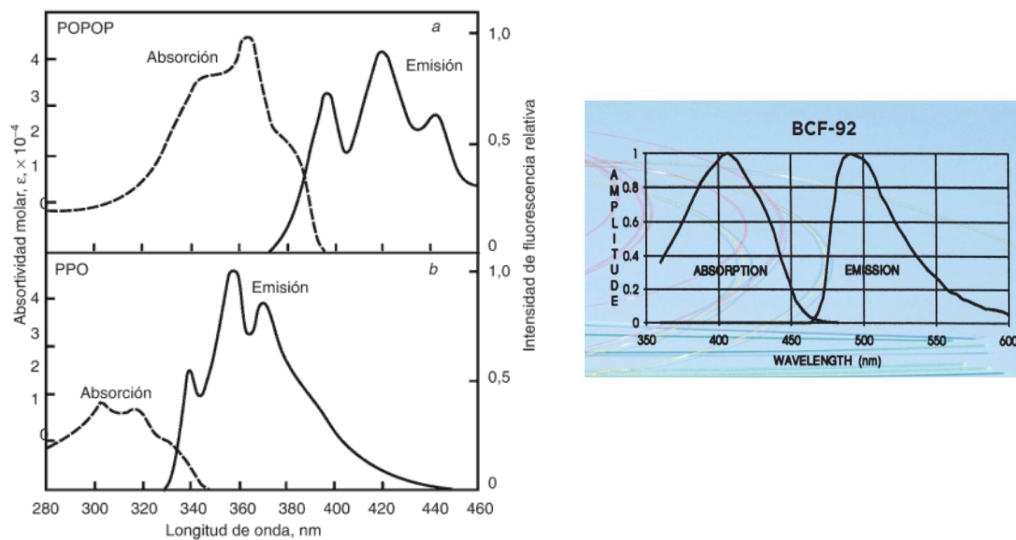


Figura 8: El mecanismo Wavelength Shifter se da a través de absorción y emisión, en la imagen observamos como los rangos de emisión coinciden con los de absorción para los dopantes en cada caso corriendo los fotones hasta el visible.

Para garantizar que los fotones que llegan hasta el recolector de luz, en este caso un SiPM, sean de la longitud de onda adecuada hay que escoger correctamente los centelladores. Así la combinación adecuada de sus dopantes, logra un continuo proceso de emisión y absorción en las longitudes de onda (λ) convenientes. En la figura 8 podemos ver los espectros de emisión y absorción de los dopantes usados en el el centellador rectangular y la fibra.

Estas WLS tienen una longitud de atenuación de más de 3,5 m, tiempo de decaimiento de 2,7 ns y un máximo de absorción y emisión de luz centrado en 410 nm y 485 nm, respectivamente (Nieto et al.,). Además, el sistema multi-revestimiento aumenta la señal en un 60% comparado con las de revestimiento sencillo (Collaboration, 2016).

SECCIÓN 2.2

Fotomultiplicadores de silicio (SiPM)

2.2.1 Principio de operación En esta sección describiremos brevemente el funcionamiento de un SiPM, estos dispositivos son fotomultiplicadores de estado sólido capaces de operar a baja tensión en comparación con los fotomultiplicadores de tubo (Lucero et al., 2015). Un SiPM consiste en una matriz de celdas de similar tamaño, donde cada una se comporta como un fotodiodo de avalancha o APD (Renker, 2006) (*Avalanche photodiode*, por sus siglas en inglés) ⁴individual. Los APD están conectados en paralelo y trabajan en modo Geiger con polarización inversa. Esto es posible solo cuando existe una tensión entre su ánodo y cátodo a la que llamaremos voltaje de operación o V_{Bias} .

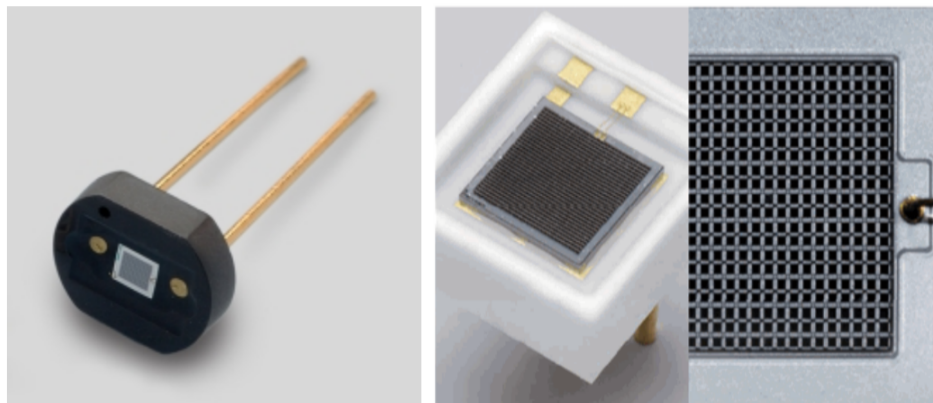


Figura 9: En la imagen observamos un fotomultiplicador de silicio modelo S13360-1350CS fabricado por Hamamatsu y usado por MuTe. A la derecha otro modelo de SiPM en el que observamos el arreglo de celdas sensibles a la luz que permite detectar fotones individuales.

El voltaje de operación debe ser alrededor del 10% al 20% por encima del voltaje de ruptura ($V_{Ruptura}$) para el correcto funcionamiento de los SiPM. Es esencialmente el voltaje mínimo requerido para pasar de un modo proporcional a un modo de trabajo Geiger. Uno de los parámetros importantes a definir cuando se trabaja con estos fotomultiplicadores es el sobrevoltaje ΔV , que se define como la diferencia de tensión entre V_{Bias} y el $V_{Ruptura}$. Dicho de otra forma, es el voltaje adicional por encima del voltaje de ruptura $\Delta V = V_{Bias} - V_{Ruptura}$.

⁴Una descripción completa https://en.wikipedia.org/wiki/Avalanche_photodiode

Para que el SiPM opere como fotomultiplicador, se crea un fuerte campo eléctrico en cada celda o fotodiodo en un pequeño volumen cerca de la superficie del detector. En esta condición, el detector se encuentra en un estado metaestable hasta que un fotón pueda producir un electrón por efecto fotoeléctrico. Debido al campo eléctrico el portador de carga es acelerado hasta producir por impacto una avalancha que al sumarse produce una corriente eléctrica. En los SiPM un solo portador de carga es suficiente para desestabilizar el detector y desencadenar una avalancha, lo que los hace muy sensibles al ruido térmico.

Las celdas en el SiPM están conectadas en paralelo, cada una a su vez está en serie con una resistencia integrada (R_q). Cuando la corriente circula se produce una caída de tensión que disminuye el campo eléctrico dentro del APD provocando la extinción de la corriente de avalancha (figura 10). La resistencia de extinción (R_q) siempre limita la corriente a medida que disminuye el voltaje aplicado al diodo, así el voltaje de polarización cae y el proceso de multiplicación se detiene. El volumen que está sometido al voltaje de polarización puede ser interpretado como un capacitor, si una avalancha desencadenada descarga la capacitancia de la celda C_c podemos definir una constante de tiempo de descarga como:

$$\tau_{cDec} = R_q \cdot C_c. \quad (2.2)$$

Simultáneamente, con la descarga, se establece una corriente que crece asintóticamente hasta ser:

$$I = \frac{(V_{Bias} - V_{Ruptura})}{R_q}, \quad (2.3)$$

donde V_{Bias} es el voltaje de polarización al que trabaja. Como resultado, podemos obtener la ganancia dividiendo la capacitancia de la celda C_c por la carga elemental (q_o) multiplicada

por el sobrevoltaje ($\Delta V = V_{Bias} - V_{Ruptura}$):

$$G = C_c \frac{(V_{Bias} - V_{Ruptura})}{q_o} \quad (2.4)$$

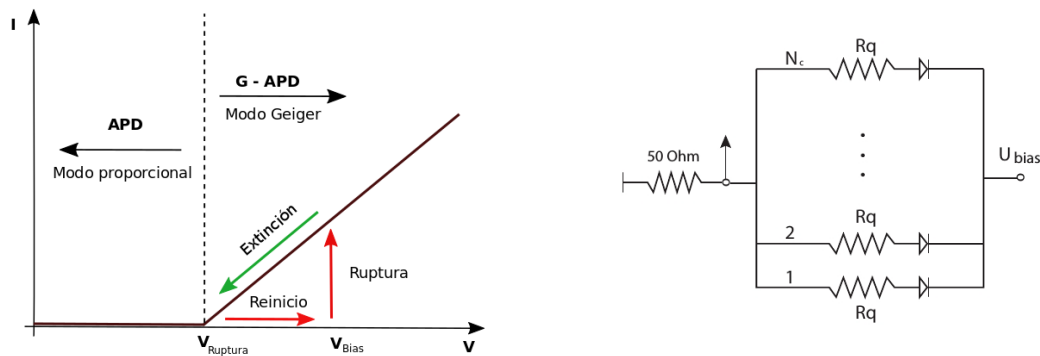


Figura 10: La figura representa un esquema del principio de funcionamiento de un SiPM. En la figura (b) observamos el diagrama del circuito equivalente para el SiPM.

Una ganancia típica para un SiPM está entre 10^5 y 10^6 , por lo que los pulsos producidos por un SiPM con celdas individuales pueden ser observados y medidos en un osciloscopio sin amplificación.

Después de la atenuación de la avalancha, el SiPM comienza a recargarse lentamente hasta que el voltaje en el dispositivo vuelve al voltaje de polarización original tal y como se muestra en la Figura 10a. Existen diferentes modelos de SiPM (Otono et al., 2008), en la figura 10b se presenta un circuito simple.

La señal generada por cada celda del SiPM cuando trabaja en modo Geiger tienen una señal con alta ganancia que esta estandarizada (S_o), esta ganancia es independiente del número de fotones que inician la avalancha. Sin embargo, dado que las celdas del SiPM están conectadas en paralelo, cuando detectan fotones forman una señal sumada que debido a la estructura multicelda, es proporcional a la suma de celdas activadas. Esto es interpretado

como fotones equivalentes, la señal total sera:

$$S_{eal} = \sum_{i=1}^n S_i \quad (2.5)$$

Gracias a lo anterior, los SiPM tienen alta eficiencia de detección de fotones ($\sim 40\%$) y una buena resolución temporal ($< 100ps$).

2.2.2 Eficiencia de detección de fotones La eficacia de detección de fotones (*PDE*, *Photon detection Efficiency*, por sus siglas en inglés) del SiPM está representada por la probabilidad de que un fotón incidente desencadene una avalancha. Depende de la longitud de onda de los fotones, voltaje de polarización y temperatura. El *PDE* para los SiPM puede ser factorizada en términos de su eficiencia cuántica (*QE*), probabilidad de avalancha (P_a) y la eficiencia geométrica (*GE*):

$$PDE(\lambda, V_{Bias}, T) = QE(\lambda) \cdot P_a(\lambda, V_{Bias}, T) \cdot GE. \quad (2.6)$$

Aquí la relación entre el área activa y el área total del SiPM es llamada eficiencia geométrica, ya que algunas partes de SiPM no son sensibles debido al área ubicada entre las celdas que es usada para la separación y la colocación de las resistencias. La *GE* es un compromiso entre la densidad de celdas y el *PDE* que debe optimizarse según la aplicación. Para los SiPMs Hamamatsu el *GE* está entre 30% y 60% ⁵.

La eficiencia cuántica es la probabilidad de que se genere un par electrón-hueco (valores típicos entre 80% y 90%). Esta probabilidad tiene una fuerte dependencia con la longitud de onda de los fotones incidentes debido a la delgada capa sensible de los SiPM.

La probabilidad de avalancha es la probabilidad de que un par electrón-hueco inicie una

⁵Ver: https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-sensors/mppc/mppc_single/mppc_for-precision-measurement/index.html

avalancha por ruptura en una celda y depende linealmente del voltaje de polarización del SiPM y de la posición donde se genera el par (Oldham et al., 1972). Existen informes (Eckert et al., 2010) sobre las mediciones PDE absolutas de diferentes tipos de SiPM para longitudes de onda entre 350nm a 1000 nm.

La eficiencia puede tener otros factores que juegan en contra como el tiempo muerto del SiPM, por ejemplo: cuando se mide a altas frecuencias el conteo de fotones puede verse afectado. Esto puede suceder porque la celda que se dispara necesita un determinado tiempo para recuperarse y su *PDE* es temporalmente menor que la de su condición de funcionamiento normal.

El PDE también depende del sobrevoltaje. Cuando el voltaje de operación es alto tiende a ser favorable (Rech et al., 2008a) pero desafortunadamente, la frecuencia de conteos oscuros, el *crosstalk* y los *afterpulses* también aumentan con el sobrevoltaje.

2.2.3 Conteos oscuros y Detección cruzada

Conteos oscuros Las cuentas oscuras o *Dark Counts* (por su nombre en inglés), son causadas por los portadores de carga en la región de las celdas debido a dos procesos principales: pares de electrón-hueco generados térmicamente y por la producción asistida por el campo de portadores de carga. La cantidad de portadores de carga generados térmicamente puede reducirse por enfriamiento del sistema.

Los conteos oscuros producidos térmicamente se reducen en un factor de aproximadamente dos por cada caída de 8°C en la temperatura (Renker and Lorenz, 2009). Los conteos oscuros podrían reducirse mejorando los procesos de producción con el objetivo de minimizar el número de centros de generación. Uno de los problemas actuales de este dispositivo es su sensibilidad a las variaciones de temperatura, este trabajo pretende determinar una relación entre el voltaje de operación y la temperatura.

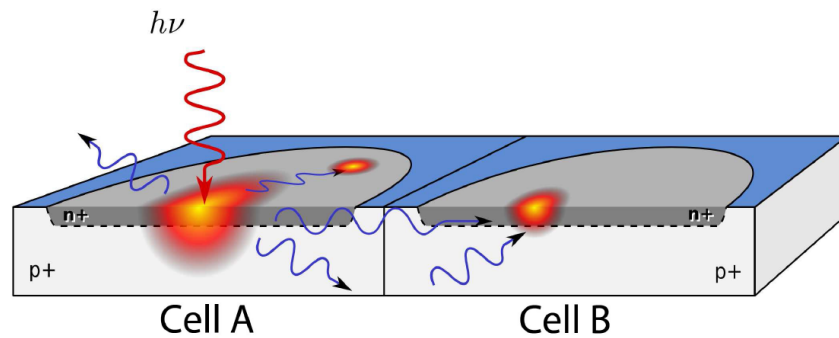


Figura 11: Representación esquemática del *crosstalk* entre dos celdas contiguas, un fotón $h\nu$ incide sobre una celda del SiPM, esto puede provocar la emisión de fotones en otra longitud de onda y afectar las celdas vecinas (Rech et al., 2008b).

Detección cruzada Durante la avalancha, se emiten 3 fotones por cada 10^5 portadores de carga que cruzan la unión p-n con energía más alta que la energía de la banda prohibida (1.14 eV) (Lacaita et al., 1993). Estos fotones se emiten isotrópamente en el SiPM y a medida que viajan hacia las celdas vecinas, pueden desencadenar más fotones o portadores de carga, esto es llamado detección cruzada o *crosstalk* óptico.

La probabilidad de *crosstalk* es proporcional al sobrevoltaje, ya que el número de fotones secundarios es proporcional a la ganancia.

En un experimento, la probabilidad de *crosstalk* se puede calcular como la relación entre los eventos con *crosstalk* (eventos por encima de 1,5 celdas o 1,5 fotopicos) dividida por el número total de conteos en el espectro de conteos oscuros (Rech et al., 2008b). El *crosstalk* se puede reducir significativamente mediante el aislamiento óptico entre las celdas, sin embargo, esto afecta la *PDE*.

2.2.4 SiPM usados en MuTe Los centelladores plásticos tienen acoplados fotomultiplicadores con el propósito de amplificar y generar una señal medible, en este caso SiPM. En el cuadro 1 observamos las características del SiPM a temperatura ambiente, de 25°C . Debido a la naturaleza de estos dispositivos el voltaje de ruptura $V_{Ruptura}$ puede cambiar a diferentes temperaturas, esto afecta la ganancia y por ende puede cambiar la sensibilidad del detector (Platino et al., 2011). Por este motivo se debe corregir el voltaje de alimentación

con cada variación de temperatura.

Sí se conoce el coeficiente de correlación entre estos parámetros, es posible hacer la corrección en la alimentación del SiPM. Esto plantea un problema experimental ya que se requiere medir a temperatura controlada; en este trabajo se planteó y elaboró un experimento controlado para solucionar este problema. En la figura 12 observamos el rango espectral, la forma y las dimensiones del SiPM usado, estos fotomultiplicadores son pequeños y fáciles manipular, los centelladores de MuTe fueron escogidos para aprovechar el pico de sensibilidad y así aumentar la probabilidad de detección.

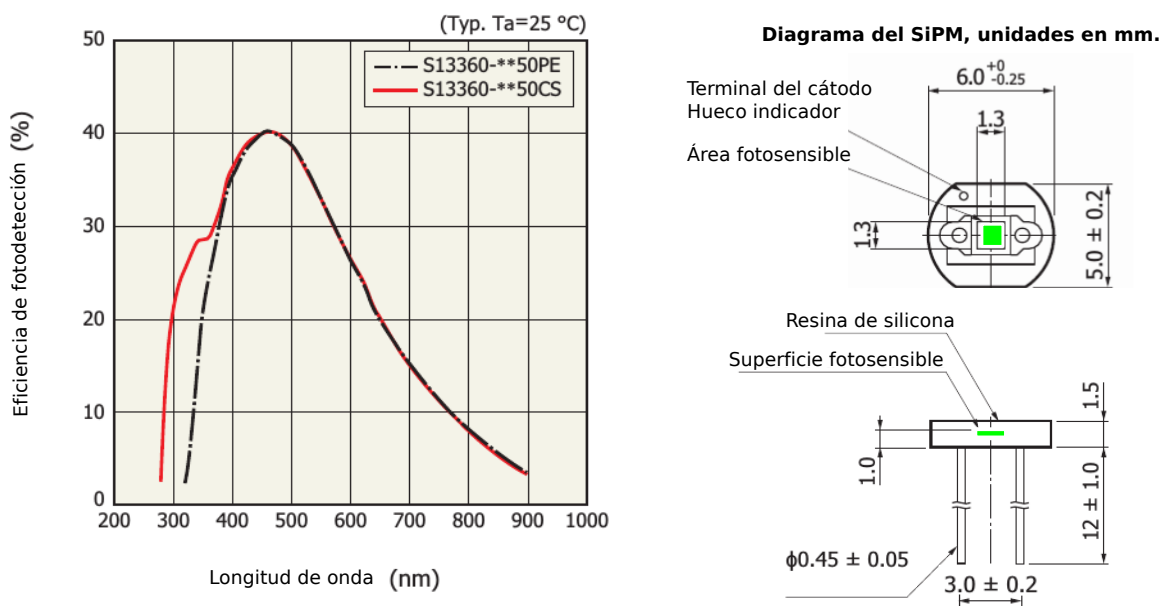


Figura 12: A la izquierda el espectro de sensibilidad del SiPM, para tener mayor eficiencia los fotones que inciden sobre el área fotosensible deben estar entre 400-500 nm. A la derecha las dimensiones en mm del SiPM usado.

Fotomultiplicador de silicio usado en MuTe		
Hamamatsu S13360-1350CS	Rango o valor	Unidades
Rango de respuesta espectral	270-900	(λ) nm
Pico de sensibilidad	450	(λ) nm
Área activa	1.3 x 1.3	mm ²
Número de celdas	667	pixel
Probabilidad de crosstalk	3	%
Voltaje de ruptura ($V_{Ruptura}$)	53±5	V
Voltaje de operación	$V_{Ruptura} + 3$	V
Eficiencia de fotodetección (PDE)	40	%
Ganancia	$1,7 \times 10^6$	

Tabla 1: Características del fotomultiplicador de silicio usado en este trabajo. Los datos fueron consultados en la hoja de datos del fabricante, sin embargo algunos parámetros debe ser medidos en laboratorio antes de usar en campo.

Capítulo 3

Metodología y Resultados

SECCIÓN 3.1

Estudio del detector de centelleo como sistema activo

Como mencionamos anteriormente los centelladores plásticos y los SiPM ([Zappa and Andrea, 1996](#)) representan una oportunidad para el desarrollo de nuevos detectores enfocados a la medición de radiación ionizante. Estos detectores pueden ser usados para diferentes aplicaciones y en cada caso es necesario conocer como es la respuesta del SiPM en el sistema activo. Conviene dividir los tipos de detectores de radiación en activos y pasivos para definir el sistema de estudio usado en este trabajo.

Un detector es llamado activo sí, necesita un sistema electrónico mientras obtiene las señales de lectura durante su funcionamiento; un ejemplo sería una cámara de ionización, un contador Geiger o un centellador. Un detector pasivo es aquel que puede ser utilizado sin necesidad de registro electrónico durante el proceso de irradiación, un ejemplo sería una placa fotográfica o radiográfica.

También podemos diferenciar los detectores teniendo en cuenta si la señal que producen

es el resultado de integrar todos los efectos de múltiples interacciones en sus componentes individuales, a estos los llamados detectores integradores. El caso contrario sería detectores que funcionan con base a las interacciones de una sola partícula individual, estos son llamados contadores. Resumiendo podemos clasificar los detectores así:

- Detectores integradores
 - Activos
 - Cámara ionización aire, ionización líquida
 - Diodo
 - Matriz activa radiografía
 - Radiografía digital
 - Calorímetro
 - Pasivos
 - Placa radiográfica, radiocrómica
 - Dosímetro TLD
 - Fósforo fotoestimulable
 - Dosímetro Fricke
 - Detectores activación
- Detectores contadores
 - Activos
 - Contador Geiger, proporcional, Diodo
 - Centellador
 - Contador semiconductor
 - Pasivos
 - Emulsión Nuclear
 - Detector de burbujas (Bubble Superheated Detector)

- o CR-39 (Policarbonato)

De acuerdo con lo anterior, en el caso del proyecto MuTe (MuTe, 2018), se usa para los paneles, detectores activos que trabajan como contadores usando centelladores. Así permite una detección indirecta de radiación ionizante (partículas cargadas). Como se mencionó antes, primero se produce luz que luego es convertida en señales eléctricas, para luego ser analizada offline. El esquema del módulo es representado en la figura 13 donde tenemos diferenciados los componentes principales de este sistema de detección.

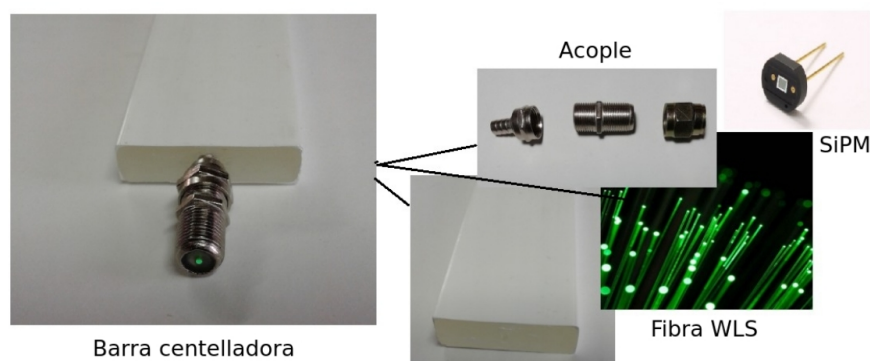


Figura 13: Fotografía de los componentes de un módulo de barra centelladora. La barra tiene una fibra óptica de corrimiento de longitud de onda (WLS) y se ajusta con un acople mecánico al fotomultiplicador de silicio (SiPM).

A continuación estudiaremos los materiales centelladores, piezas fundamentales en estos sistemas de detección. Estos materiales prometen ser parte de una nueva generación de detectores para aplicaciones en geofísica.

SECCIÓN 3.2

Metodología

Para usar el sistema de centelladores con fibra y SiPM acoplados para la detección de partículas cargadas, primero debemos definir qué vamos a estudiar y cómo lo vamos a realizar. Las preguntas a responder son: ¿Podemos mantener y trabajar los SiPM en modo geiger a cualquier temperatura? Si esto es posible; ¿Cómo podemos usar el sistema acoplado para

detectar partículas si existe un ruido de fondo? esto es importante porque si existe un ruido intrínseco, siempre tendremos falsos positivos. Para evitarlo debemos conocer nuestro sistema de detección y tener una estrategia de interpretación de los datos medidos tal que, podamos tener un discriminante.

Ahora, dado que los centelladores y los SiPM no son 100 % eficientes, existen parámetros a tener en cuenta. Por ejemplo el material de las barras es opaco a los fotones con una media de 4cm de longitud de atenuación. Entonces, para poder tener un detector de 120cm de longitud usamos fibras WLS. Surge otra pregunta ¿Las fibras pueden presentar atenuación? Sabemos que, a pesar de ser multicapa, algunos fotones pueden escapar de la guía e inclusive reflejarse en los bordes. Esto representa otro problema ya que al acoplar centelladores diferentes existirán efectos de borde relacionados con el índice de refracción de cada uno de ellos.

Además, para tener áreas de detección mayores debemos cuantificar la atenuación en estas fibras y determinar, en el caso de MuTe, si los acoples y atenuaciones serán importantes. Para responder estas preguntas debemos establecer un experimento controlado de manera que podamos ir resolviendo y cuantificando en cada paso.

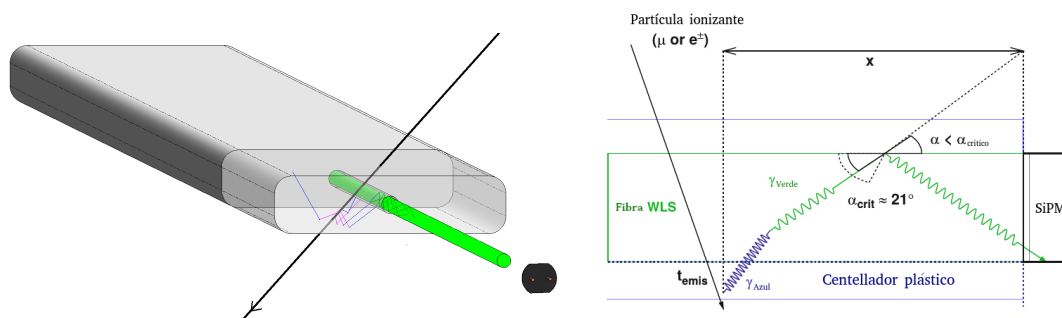


Figura 14: Representación del sistema activo de estudio; partículas cargadas como muones (μ) o electrones (e^\pm) atraviesan el plástico centellador y producen fotones.

En estos términos el primer problema que enfrentamos es que, los SiPM pueden cambiar su modo de operación si el voltaje de entrada V_{Bias} es menor al voltaje de ruptura $V_{Ruptura}$. Como estudiamos en el capítulo 4, sabemos que esto ocurre si la temperatura cambia. El problema se resume en encontrar una relación entre el voltaje de ruptura y la temperatura a la que el SiPM trabaja. Si esta relación existe, podemos tener un parámetro de ajuste para

que los SiPM trabajen siempre en modo geiger.

Para resolver la primera pregunta se desarrolló un experimento controlado donde se pueda medir la corriente de salida del SiPM a diferentes temperaturas, esto requiere que el sistema pueda mantener un valor de temperatura constante.

SECCIÓN 3.3

Caja de temperatura controlada

3.3.1 Montaje experimental Los SiPM que se usarán en MuTe son fabricados por Hamamatsu (S13360-1350CS), con un *crosstalk* alrededor del 3%. Esto es importante ya que al tener baja probabilidad de *crosstalk*, permite el acople sin cemento óptico, facilitando los montajes en campo.

Usamos una caja negra para tener un espacio aislado de luz, fue requerido para estudiar y cuantificar la respuesta de la barra centelladora con sus componentes. Para la primera parte del trabajo fue necesario una caja con temperatura controlada. Esta caja estuvo regulada por un peltier termoeléctrico TEC1-12706¹, montado en un marco de aluminio donde se ubicó el acople mecánico con el SiPM. En la figura 15 observamos el marco de aluminio sujeto al peltier y a los disipadores. Esta estructura se introdujo en una caja de madera, que sirvió para aislar térmicamente el sistema.

En la figura 16 se muestra el esquema simplificado donde el recuadro externo es la caja negra, dentro de ella, el sistema de control consistió en tener 2 sensores de temperatura, uno de control y el otro para medir la temperatura del SiPM. Desde la caja se instaló 3 salidas de datos, el control de alto voltaje para alimentar el SiPM con valores comprendidos entre 50 V hasta 60 V, un picoamperímetro para medir el *Darkcurrent* (Renker, 2006) y la

¹Descripción técnica en: <https://www.electron.com/peltier-module-hebei-tec1-12706-p357/>

temperatura. Estos datos eran leídos por un Arduino Uno([project, 2018](#)) y posteriormente impresos en pantalla mediante un IDE de desarrollo en una computadora como medio de control.

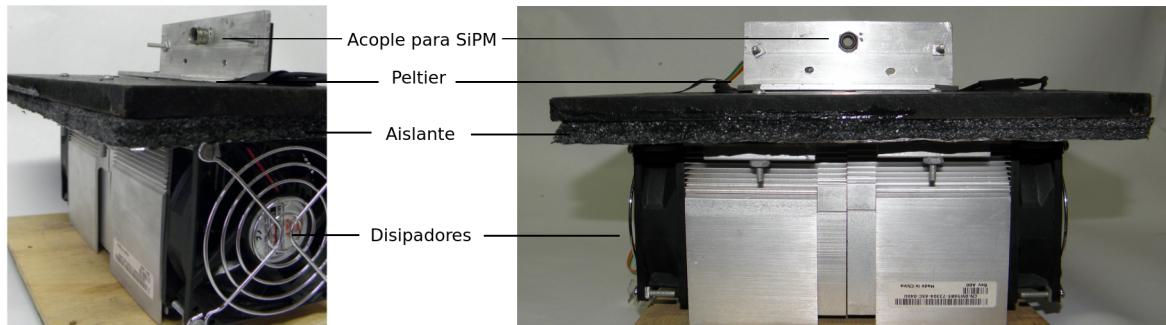


Figura 15: Fotografía de la caja de temperatura con el sistema peltier con 2 disipadores, en la parte superior estuvo el SiPM ajustado al acople usado en MuTe.

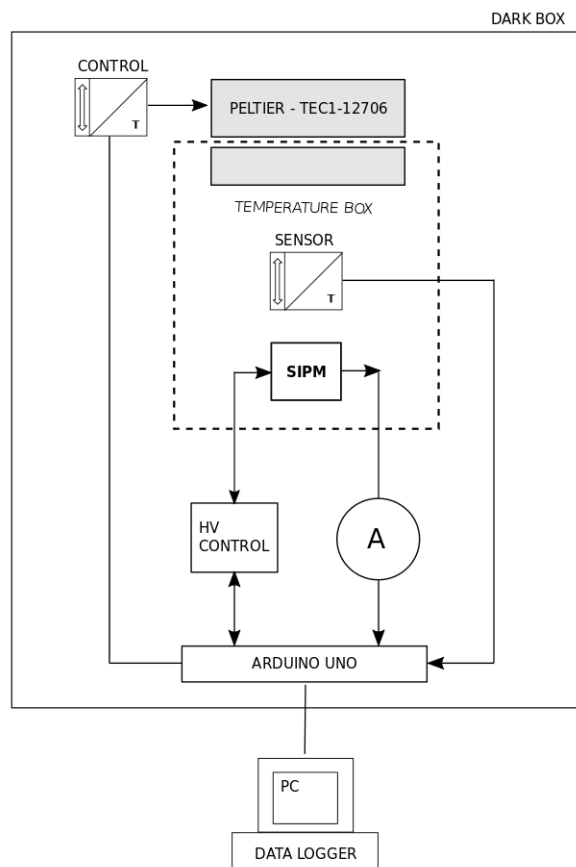


Figura 16: Esquema simplificado de la caja de temperatura usada para determinar la relación entre el voltaje de ruptura de los SiPM y la temperatura.

Tiempo de establecimiento Para definir una temperatura objetivo, se realizaron medidas del tiempo de establecimiento del sistema luego de tener el montaje de la caja con temperatura controlada. El tiempo de establecimiento se define como el tiempo que es requerido, para que la curva de respuesta del sistema alcance un rango alrededor del valor de temperatura deseado. En términos del valor absoluto es aceptable un rango alrededor del 2% al 5%, teniendo en cuenta que el valor de temperatura permanezca dentro de este.

En la figura 17 podemos observar el tiempo de establecimiento para la caja de temperatura usada en este trabajo. Inicialmente se realizaron 10 test para calibrar. Se hizo así porque se necesitaba ajustar los parámetros del código de la tarjeta Arduino ([project, 2018](#)), a valores reales de temperatura. Luego se realizó mediciones a diferentes temperaturas, particularmente a 10°C, 20°C, 40°C y 50°C. Se concluyó que, el tiempo requerido para alcanzar la temperatura objetivo estaba alrededor de los 600 s \pm 50 s para este sistema en particular. Luego de verificar el tiempo de establecimiento para la caja de temperatura se procedió a tomar las medidas de corriente dependiendo de las variaciones de voltaje que se modificaba desde la fuente. Determinar un tiempo de establecimiento fue requerido porque se necesitaba mantener una temperatura constante en cada medición.

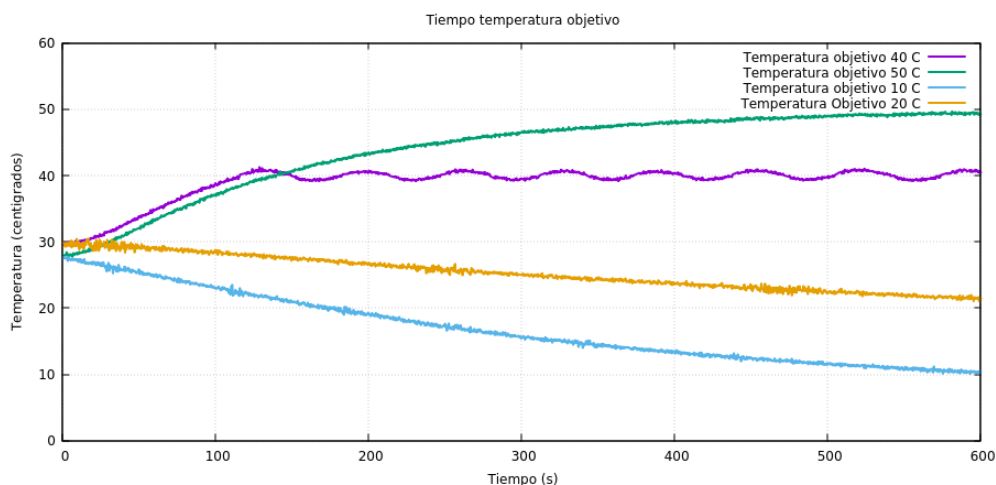


Figura 17: El tiempo de establecimiento para la caja de temperatura controlada se estimó previamente a la adquisición *Darkcurrent* con el SiPM. Gracias a estas medidas se definió una cota temporal para realizar la adquisición.

3.3.2 Variación del voltaje de ruptura del SiPM con la temperatura En el SiPM el voltaje de ruptura cambia cuando opera a diferentes temperaturas y el fabricante reporta un voltaje de operación a 25°C. Para realizar las mediciones del voltaje de ruptura del SiPM usando la caja de temperatura se desarrolló inicialmente un código para controlar la toma de datos con una tarjeta Arduino([project, 2018](#)). De manera que se pudiera censar la temperatura de tres sensores distintos para determinar la diferencia de temperatura entre el SiPM, el acople y el sensor de temperatura con el cual se hace el control de la caja negra. Luego de sincronizar la lectura de temperatura tomada por los sensores, la diferencia porcentual entre ellos fue menor al 2%.

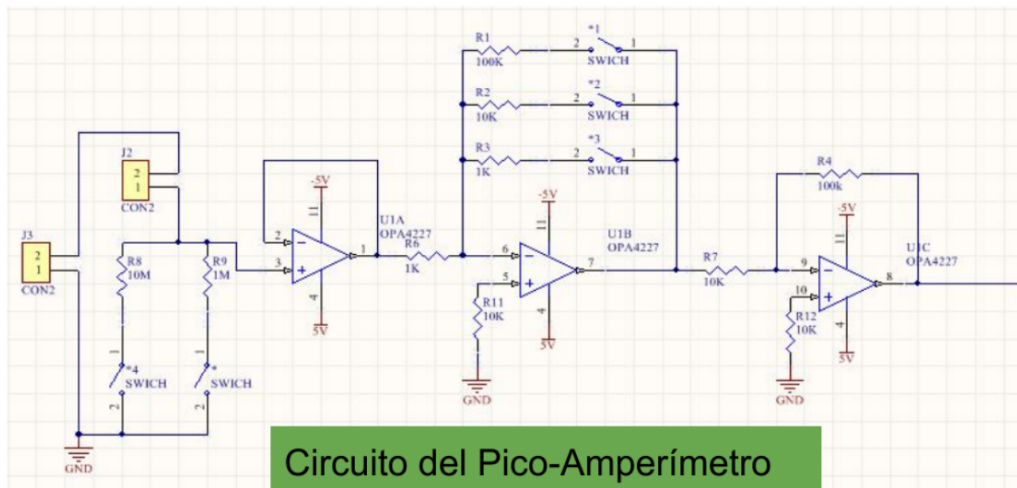


Figura 18: En el laboratorio de Halley se desarrolló un pico-amperímetro para la medición de corriente a través de los SiPM. En la imagen se observa un diagrama del circuito implementado.

Seguido se utilizó un pico-amperímetro como se muestra en la figura 18 conectado a la tarjeta Arduino para poder medir corrientes pequeñas. El circuito electrónico del pico amperímetro desarrollado consta de un OPAMP (*operational amplifier*, por sus siglas en inglés)² y 6 configuraciones que cambian en función de 3 resistencias de 1KΩ, 10KΩ y 100KΩ respectivamente; esto con el objetivo de tener un factor de conversión para la ganancia y así poder medir en un rango de corriente comprendida entre 0 y 50mA. Como está conectado a la tarjeta Arduino el circuito es alimentado con 5 y -5 V.

Seguido se montó la fuente de alimentación³ del SiPM y se imprimió en pantalla el valor

²Amplificador operacional https://en.wikipedia.org/wiki/Operational_amplifier

³Power supply starter kit <http://www.hamamatsu.com/jp/en/product/category/3100/4004/4149/index.html>

del voltaje de polarización y la corriente medida en los SiPM a oscuras, *DarkCurrent* (Renker, 2006). Con este arreglo se tomaron datos de tiempo en segundos, corriente en pA, voltaje de polarización en V y temperatura en °C.

Con la caja de temperatura calibrada y el IDE de la tarjeta Arduino montado se procedió a registrar la variación de la corriente a medida que se cambiaba el voltaje de entrada. Este cambio se realizó aumentando el voltaje de entrada desde la fuente de Hamamatsu en fracciones de 1V. Este procedimiento se realizó para 6 temperaturas distintas para las cuales el peltier mantuvo el sistema dentro del rango de establecimiento.

En la figura 19 se muestra los datos de temperatura en función del voltaje. Aquí se puede observar como cambia la pendiente a medida que varia la temperatura, esto era esperado de acuerdo con la literatura (Nepomuk-Otte et al., 2017).

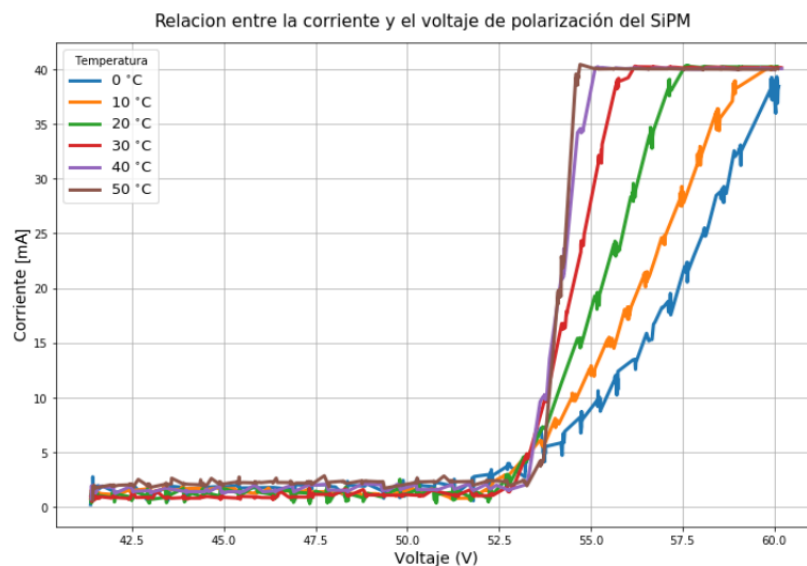


Figura 19: Relación entre el voltaje de entrada y la corriente oscura para 6 temperaturas. Luego se procedió a calcular el voltaje de ruptura para cada temperatura.

3.3.3 Determinación de un voltaje de operación Para el correcto funcionamiento de MuTe se requiere que todas las barras centelladoras estén registrando con sus SiPM en modo Geiger. Sin embargo esto no siempre será así si la temperatura del medio donde está el detector cambia, o si el mismo dispositivo agrega calor al sistema. Por esta razón se requiere la relación entre el voltaje de ruptura y la temperatura de manera que pueda

corregirse el voltaje de entrada a cada SiPM durante la toma de datos en campo.

En la figura 20 presentamos el resultado de tomar mediciones con el sistema anteriormente descrito a las temperaturas 0, 10, 20, 30, 40, 50 (°C) y su respectivos voltajes de ruptura. Con estos datos ahora es posible ajustar el voltaje de entrada de los SiPM de acuerdo a la temperatura medida en el sistema tal que el voltaje de operación este definido como:

$$V_{operacion} = V_{Ruptura} + 3V. \quad (3.1)$$

Donde el $V_{operacion}$ es el voltaje de polarización con el que se alimentan los SiPM, si el $V_{Ruptura}$ cambia, se debe proceder a aumentar o restar el voltaje para mantener el sistema en modo Geiger. Los 3V son recomendados para la correcta operación porque cada aumento en voltaje puede cambiar la ganancia y dificultar el análisis de datos posterior.

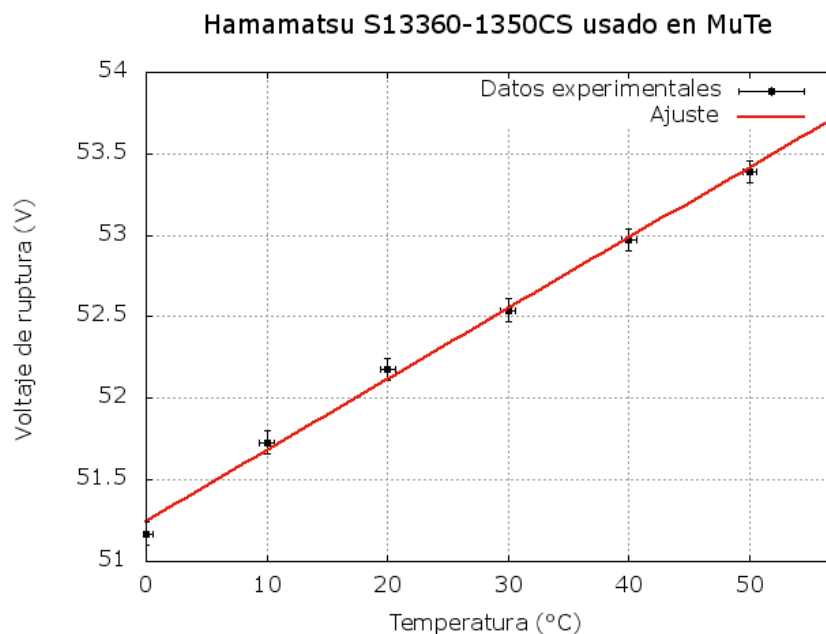


Figura 20: Este gráfico observamos la relación existente entre el voltaje de ruptura del SiPM y la temperatura a la que trabaja, esto se obtuvo experimentalmente.

SECCIÓN 3.4

Caracterización de la respuesta del SiPM en el sistema activo

Luego de estudiar como la temperatura afecta el rendimiento del SiPM, se modificó el montaje de la caja de temperatura para caracterizar la respuesta de los SiPM. La primera parte de la adquisición de los pulsos se realizó con una electrónica desarrollada para el proyecto LAGO (Haro and Arnaldi, 2016). Esta electrónica tiene una placa de desarrollo FPGA Digilent Nexys II.

El objetivo de esta parte del trabajo es tener una estrategia para contar fotones equivalentes⁴ y saber si existe atenuación en el sistema barra-fibra-SiPM. La electrónica usada es la desarrollada por la colaboración LAGO (Allard et al., 2008), la cual se puede configurar desde un computador y permite definir un trigger de disparo, umbral mínimo, voltaje e inclusive el tamaño del lote de datos.

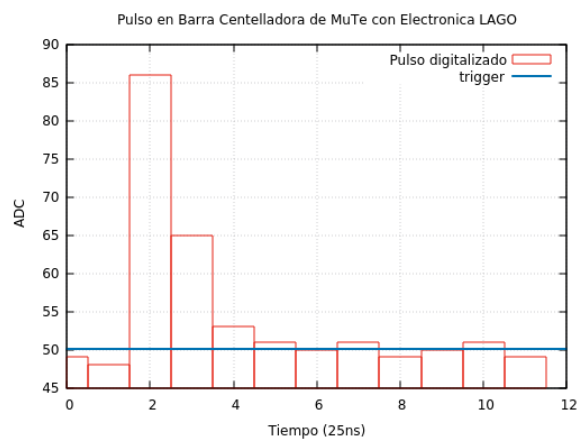
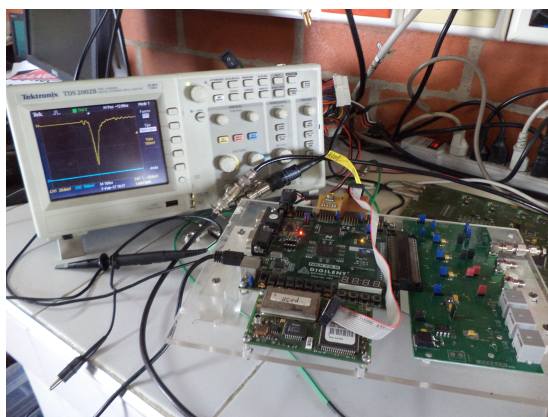


Figura 21: Imagen de la electrónica de adquisición. Esta electrónica tiene una frecuencia de muestreo de 40MHz (25 ns). A la derecha es presentado un pulso obtenido con la electrónica.

La primera parte de la adquisición consistió en montar una barra centelladora con la fibra óptica (WLS) y un SiPM. Se conectó la salida del SiPM al osciloscopio y se observaron los pulsos. La forma del pulso para estos dispositivos tiene normalmente un tiempo de subida de 10ns (*risetime*) hasta llegar a su máximo de amplitud, luego decae como dos exponenciales

⁴SPE, Single Photon Equivalent, por sus siglas en inglés.

sumadas con un tiempo de atenuación del orden de los 60 ns.

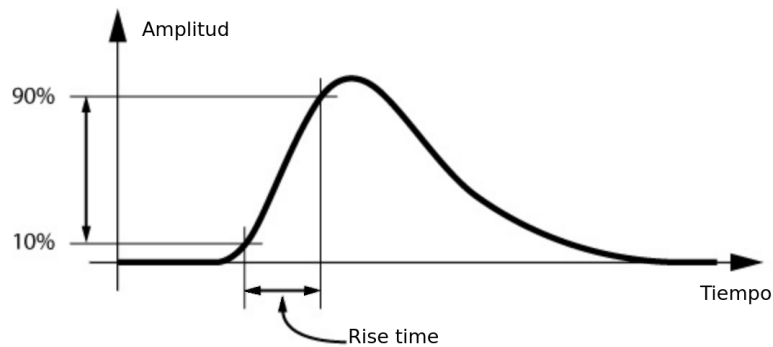


Figura 22: Representación del *risetime* (Vinogradov et al., 2015) para un pulso. Se define como el tiempo que tarda el pulso en subir desde el 10% hasta el 90% de su amplitud máxima.

Con ayuda del osciloscopio se observaron y almacenaron pulsos para identificar su amplitud. El diseño del SiPM permite diferenciar las celdas que se activan en términos de la amplitud de los pulsos. De manera que si varios fotones llegan al arreglo de celdas, el pulso será similar en su forma pero con diferente amplitud. Esto representa una oportunidad para establecer una estrategia de conteo relacionando el número de fotones con la amplitud de los pulsos medidos.

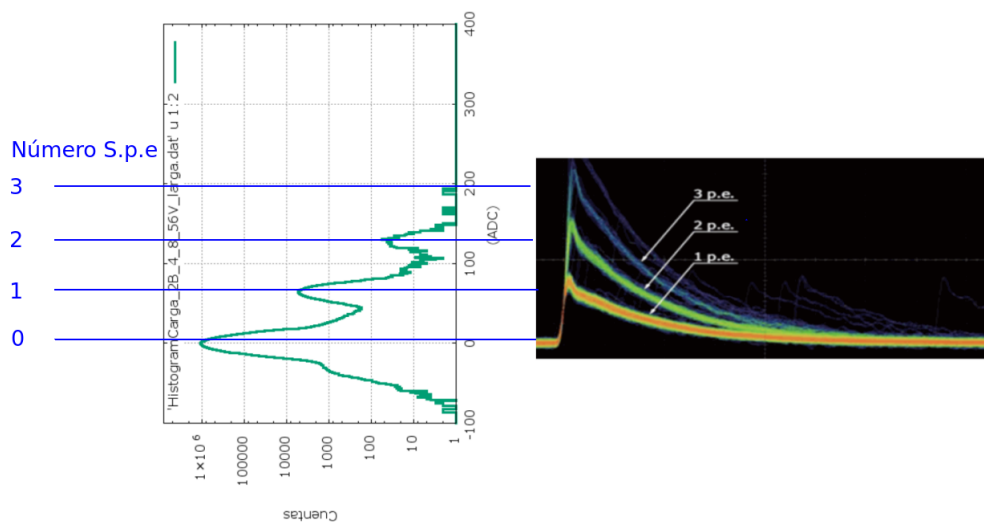


Figura 23: Representación de la relación entre la amplitud de los pulsos obtenidos con un SiPM y su histograma de carga.

La estrategia de conteo se basa en el cálculo aproximado del área del pulso de manera que podemos tener un equivalente en ADCq o unidades de carga. Al calcular un histograma de carga para un lote de datos observamos una distribución de picos que llamaremos *single photon-equivalent* o simplemente (SPE). Esto corresponde a una unidad de referencia de

cantidad de luz que está censando el dispositivo. En la figura 23 podemos observar un histograma de carga relacionado con pulsos de diferente amplitud. En este caso la línea base es llamada pedestal y está ubicado en el cero del eje horizontal. Podemos ver su ubicación en la figura 25, esto pasa porque la línea base o umbral mínimo oscila y ese ruido de menor amplitud se observa con mayor frecuencia que un pulso de un SPE. Luego, dos SPE se observan con menor frecuencia que uno y así sucesivamente. Esta secuencia sigue una distribución de poisson debido a la naturaleza aleatoria de los eventos registrados y su origen.

3.4.1 Metodología para obtener Histogramas de carga Para estimar la carga depositada por una partícula cargada que atraviesa el material centellador se debe calcular el área bajo la curva del pulso medido. Esto se puede realizar sumando los valores ADC y multiplicando por su ancho, de manera que el ancho del bin sea la unidad mínima registrada en tiempo, para estas medidas este ancho es de 25ns.

Se realizaron 30 adquisiciones en períodos de 30 minutos. Para determinar los histogramas se usó un código en bash como esta en el apéndice. Esto permitió calcular un valor de ADCq para cada pulso y luego se construyó un histograma en el cual se pudo estimar la diferencia entre máximos. De esta manera se obtuvo un valor de $\Delta Q_{ADC} \approx 64,05$ ADC. Que se calcula conociendo el valor de voltaje de 1 ADC para la electrónica de LAGO y en este caso es:

$$1ADC = 1V/1024 = 0,97mV. \quad (3.2)$$

Ahora el valor de ADC en voltios es $\Delta Q_{ADC} \approx 62,11mV$. Esto puede usarse como referencia ya que con esta electrónica, en particular, podemos ubicar fotones equivalentes individuales y expresarlos en voltios y en Coulombs sabiendo que $G = \frac{\Delta Q}{q}$ de la ecuación 2.4

3.4.2 Determinación y ubicación de los SPE (*Single Photon Equivalent*)

Es importante ubicar los SPE y estimar su valor en unidades conocidas porque debemos tener un discriminante o umbral mínimo para diferenciar el ruido del detector de las señales producidas por las partículas que depositan energía en los centelladores. Para esto es conveniente calibrar cada barra, con una fuente de luz conocida que pueda entregar estadísticamente un SPE, o conocer la respuesta con y sin los acoples. Adicionalmente, se debe estudiar la respuesta del SiPM a oscuras y sin la barra centelladora acoplada para identificar los eventos térmicos aleatorios producto del ruido del SiPM.

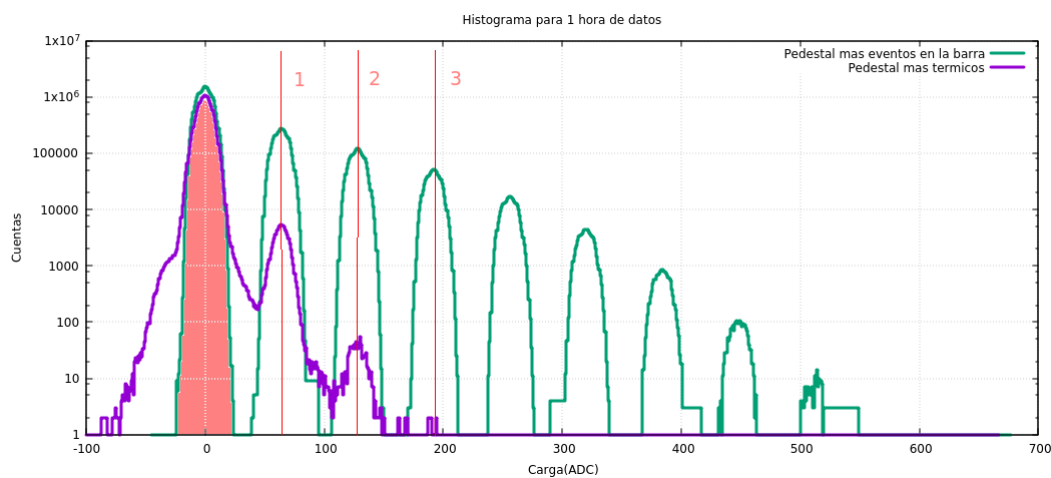


Figura 24: Este gráfico es útil para diferenciar los eventos provenientes de la barra centelladora de los eventos que forman parte del ruido de los SiPM. Se recomienda que el trigger este por encima de 3 SPEs.

Si se conoce la frecuencia del ruido térmico para el SiPM; es decir el numero de veces que se producen pulsos sin que haya un evento en el centellador, se puede calcular la probabilidad de que ocurran eventos de 1 SPE, 2 SPE, 3 SPE, etc. Esto se hace suponiendo que la distribución de carga es continua y equivalente a una distribución PDF de Poisson para los conteos oscuros. Primero se define qué los conteos térmicos son los más probables si el sistema no esta acoplado, de esta manera se calcula para el primer pico la probabilidad de cero eventos que seria $n=0$, dado que el SiPM tiene una eficiencia del 40% podemos suponer que el 60% corresponden a eventos nulos y es equivalente al pedestal; suponiendo que la media de la distribución esta en el pedestal podemos determinar el valor de μ y luego

calcular las probabilidades para los demás valores, primero definimos la distribución como

$$P_n(\mu) = \frac{\mu^n e^{-\mu}}{n!}, \quad (3.3)$$

donde n es el número de SPE, para el pedestal y los primeros dos picos podemos escribir:

$$P_0(\mu) = e^{-\mu} \quad , \quad P_1(\mu) = \mu e^{-\mu} \quad y \quad P_2(\mu) = \frac{\mu^2 e^{-\mu}}{2} \quad (3.4)$$

Conociendo la eficiencia del SiPM usado en MuTe, (alrededor del 40%) y suponiendo que la eficiencia total es 1, definimos $eff = 1 - P_0$ donde P_0 equivale al pedestal definido para eventos oscuros. En este caso $1 - 0,4 = 0,6 = P_0$ y podemos determinar μ como se ve a continuación:

$$P_0(\mu) = 0,6 = e^{-\mu} \quad \Rightarrow \quad -\ln(0,6) = \mu \quad \Rightarrow \quad \mu = 0,5. \quad (3.5)$$

De esta manera, al conocer μ para una determinada frecuencia de eventos térmicos permite ajustar la distribución y definir la probabilidad de detectar más de 3 SPE para una determinada frecuencia de eventos producidos por los centelladores.

SECCIÓN 3.5

Atenuación de las señales en el sistema barra-fibra-SiPM

La luz que se propaga dentro del centellador y la fibra WLS sufre una inevitable atenuación, algunos escapan de la guía óptica y otros simplemente son absorbidos por el material mientras son transportados hasta el SiPM.

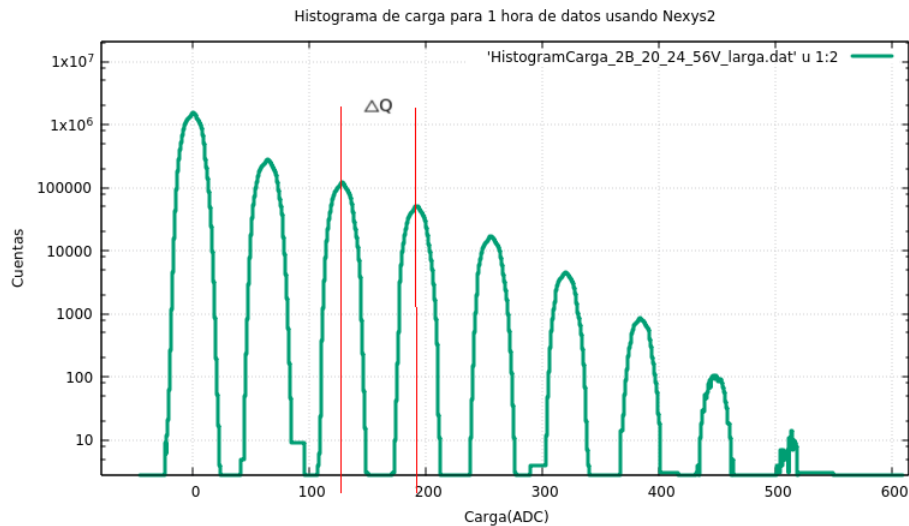


Figura 25: Podemos observar en el histograma la distribución de carga discreta debida a la naturaleza del SiPM, cada joroba en el histograma corresponde a la amplitud equivalente al número de fotones detectados.

Es importante saber si existe atenuación para las dimensiones que nuestro detector activo. Además esta información servirá para el desarrollo de las simulaciones y el análisis posterior *offline* de los datos de MuTe. El estudio de este sistema se realiza para estimar el porcentaje de atenuación en la barra, otros detectores que usan barras similares como AMIGA (Platino, 2009) dentro del Observatorio Pierre Auger en Argentina, también estiman la atenuación que se presenta en sus barras de 4 m de longitud donde la atenuación es notable (Platino et al., 2011). A pesar que las barras centelladoras usadas en MuTe son cortas y se espera poca atenuación, es necesario conocerlo.

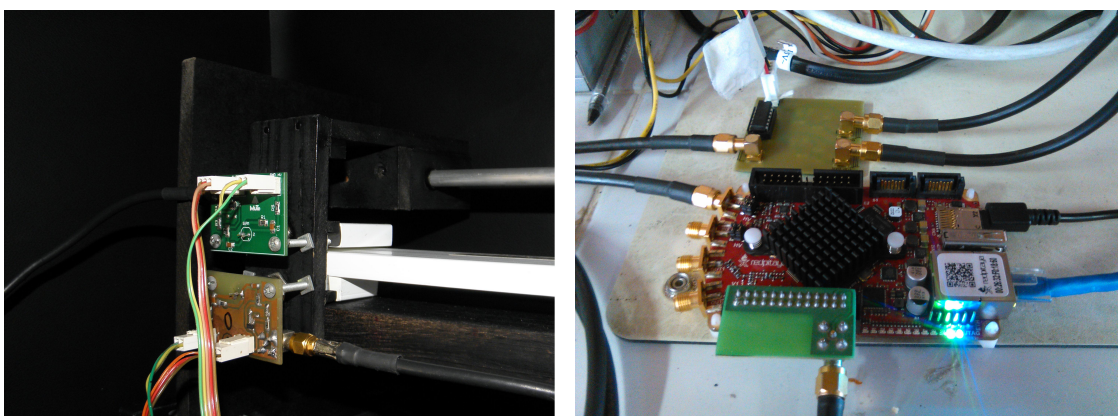


Figura 26: En la imagen el montaje experimental usado para realizar detección de partículas cargadas en coincidencia. Para realizar la adquisición se usó una RedPitaya.

Para esto se realizó un montaje de centelladores en coincidencia dentro de la caja negra como se observa en la figura 26. Se colocaron 2 centelladores acoplados sobre un marco que

se deslizaba sobre un riel. Estos centelladores trabajaban en coincidencia con el propósito de generar una señal, de disparo requerida para guardar el pulso en la barra de prueba. Este marco se ubico en diferentes posiciones a lo largo de la barra, se escogieron 3 posiciones importantes que fueron: el extremo opuesto a la ubicación del acople y el SiPM, en la mitad de la barra centelladora y en el extremo donde estuvo ubicado el SiPM.

Los centelladores pequeños que se usaron para generar la señal de disparo eran barras centelladoras mas cortas de sección transversal rectangular y tenían dimensiones de (4cm x 4cm x 1cm), además tenían fibra WLS y un SiPM cada una. Este sistema de trigger estuvo conectado a una tarjeta de desarrollo RedPitaya⁵ capaz de registrar pulsos con una frecuencia mayor a 40 Mhz(Talavera and Cazar, 2017). Antes de empezar la adquisición se revisó en un osciloscopio la llegada de pulsos y su simultaneidad temporal, ver figura 27. De esta manera tuvimos tres señales de entrada a la tarjeta y una de salida que corresponde a la barra de estudio con 120cm de largo, luego con el propósito de almacenar los pulsos medidos la RedPitaya fue programada e iniciaba desde una computadora.

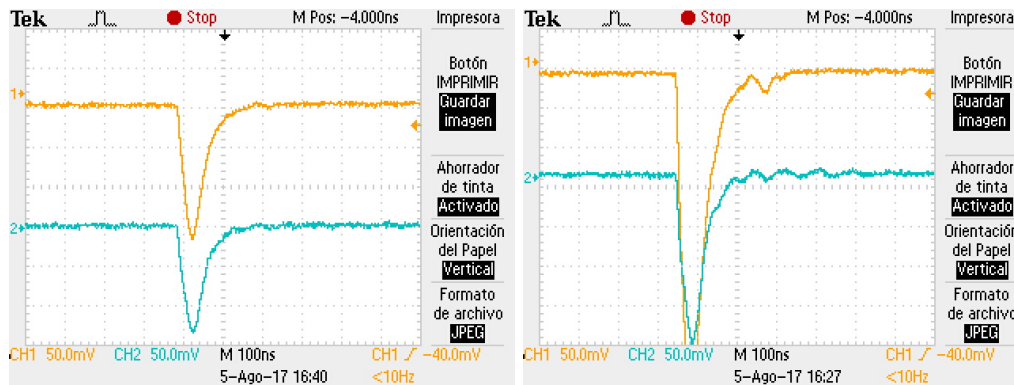


Figura 27: En las imágenes observamos dos detecciones en coincidencia con diferente amplitud. Esto se realizo para estimar el flujo.

3.5.1 Corrimiento de la carga depositada en función de la distancia

Una vez que se revisó el sistema de adquisición y se comprobó que tanto el trigger como la barra de estudio estaban operando dentro de los parámetros esperados, se procedió a tomar datos durante varios días para verificar que la frecuencia de detección no tenía fluctuaciones. Luego se tomaron 10.000 pulsos de referencia en tres posiciones de interés: en los extremos

⁵Red-Pitaya hardware project <https://www.redpitaya.com/index2>

y en el medio. Cabe aclarar que la barra solo tiene un SiPM en un extremo y en el otro la fibra fue cortada a 45° para maximizar la fuga de fotones y evitar pulsos secundarios por reflexiones en el extremo de la fibra.

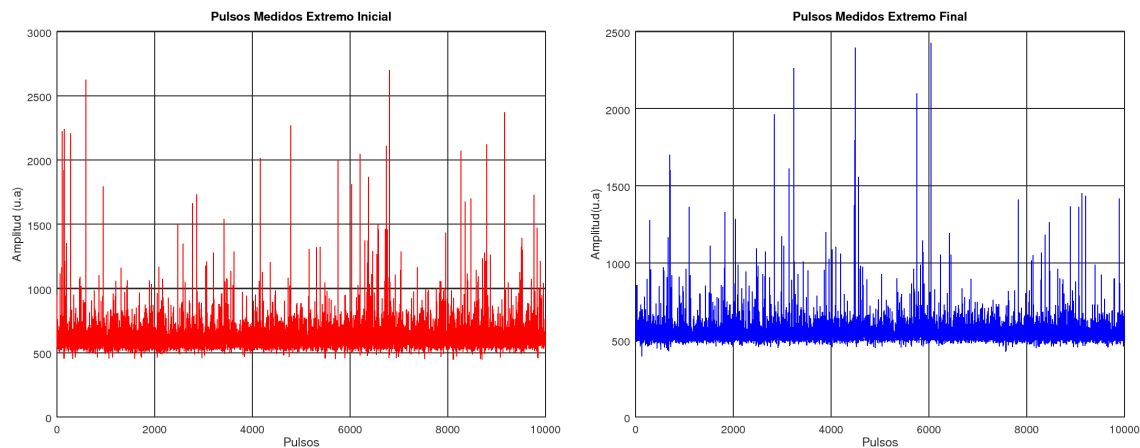


Figura 28: Las gráficas presentan 10.000 pulsos tomados en las dos posiciones opuestas en el sistema activo de detección.

Para la adquisición se programó la RedPitaya de manera que se iniciaba y almacenaba evento por evento hasta completar el número programado. En este caso el objetivo de referencia fue 10.000 y demoró entre 19 a 20 horas en detectar con 16cm^2 de área efectiva sobre el primer centellador del trigger.

En la figura 28 podemos observar dos de las adquisiciones, se presenta los pulsos apilados uno al lado del otro donde el eje vertical corresponde a la amplitud. Aquí todos los eventos almacenados corresponden a partículas que impactaron los tres centelladores en coincidencia. El espectro de estos pulsos será diferente a los adquiridos en modo de calibración ya que en este modo los eventos son aleatorios.

El trigger configurado como los tres centelladores en coincidencia mejoraba la probabilidad de que el evento medido correspondiera a una traza en la posición correspondiente. Al seguir la metodología mencionada en el capítulo anterior se puede obtener la carga depositada por evento y realizar un histograma tal que su distribución sea de poisson ⁶.

Al comparar los histogramas observamos como su valor medio se desplazo en dependencia con la posición donde se midió. Esto se esperaba y se observa en la figura 30, donde

⁶Distribución de Poisson https://en.wikipedia.org/wiki/Poisson_distribution

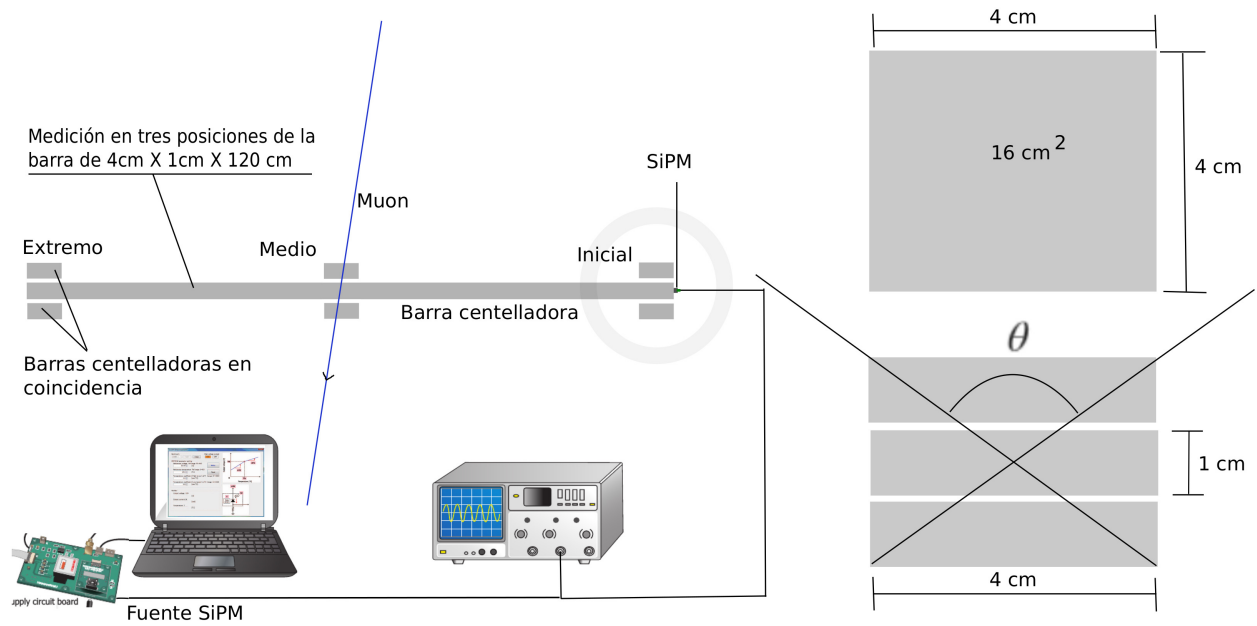


Figura 29: Representación del montaje usado para estimar la atenuación del sistema barra-fibra-SiPM.

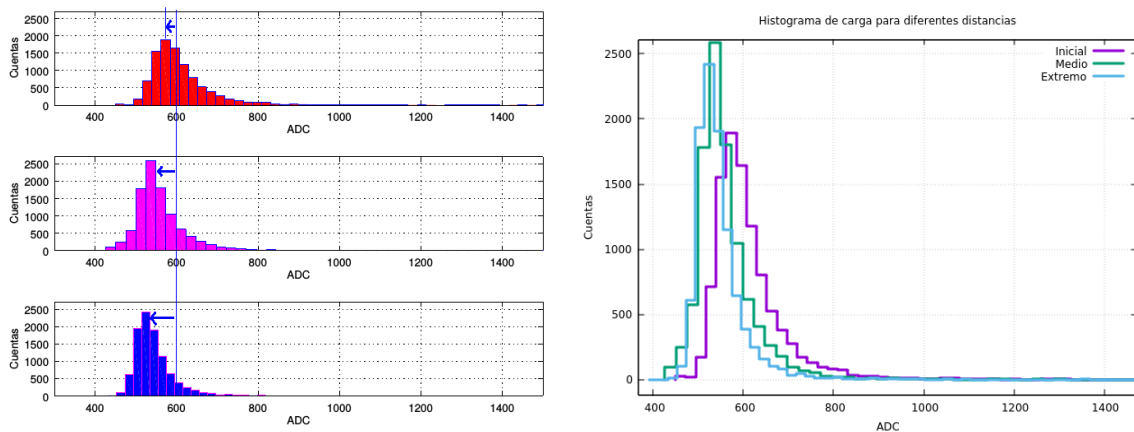


Figura 30: Desplazamiento de la distribución de carga en sentido de menor carga depositada para los eventos medidos en el extremo opuesto del SiPM.

se representan los datos con el eje horizontal en común, en los tres casos hay la misma cantidad de eventos con las mismas condiciones de medida, así se tuvo una primera aproximación de la existencia de atenuación. En la figura 29 se representa las tres posiciones para las mediciones a lo largo de la barra centelladora de 120 cm de longitud. Se almacenaron 10.000 eventos en coincidencia en cada posición. El ángulo θ para esta configuración es de $106,26^\circ$, la frecuencia de eventos por minuto que se midió experimentalmente con ayuda de un osciloscopio fue 10 ± 1 para 16cm^2 . Con estos datos se estima que, fueron detectadas $0,62\text{partículas} * \text{min} * \text{cm}^2$.

3.5.2 Atenuación en el sistema activo Con el propósito de tener referencia para las simulaciones y análisis de datos *offline* para el hodoscopio de MuTe, se planteo la necesidad de cuantificar la atenuación. Para esto usamos los pulsos de referencia calculado el pulso promedio en cada set de datos, para las tres posiciones de estudio. Se presentan los pulsos promedio, en la figura 31 son representados con un bin en el eje x de 8ns en unidades de tiempo.

Para determinar el pulso promedio, se tomó cada muestra de 10.000 pulsos como una matriz, donde cada pulso corresponde a un vector columna. Luego para cada fila se calculó el promedio y su desviación estándar σ . Seguido se graficó el pulso promedio con sus desviaciones para las tres posiciones, en la figura 31 observamos que las desviaciones son hasta del 30% de la amplitud total y se cruzan. Para un único evento sera difícil discriminar con certeza la posición de incidencia sobre la barra.

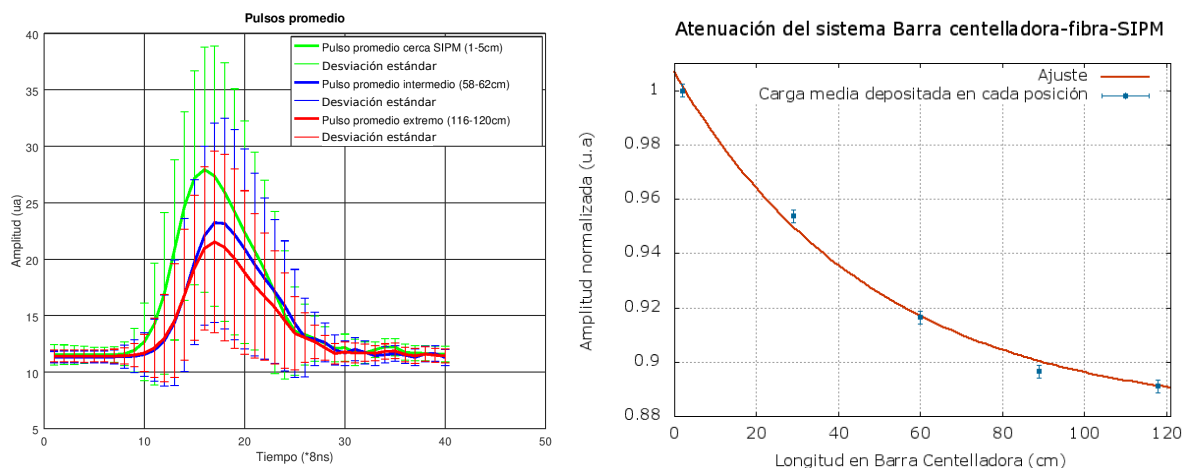


Figura 31: Se estimo un 11 % de atenuación desde el extremo de la barra centelladora hasta el extremo opuesto donde se ubica el SiPM.

La diferencia porcentual de la carga correspondiente a cada pulso promedio nos permite inferir un porcentaje de atenuación al normalizar los valores y comparar con un ajuste exponencial que coincide con una señal atenuada. La función utilizada fue $f(x) = 0,88 + a * \exp(-x * b)$ con los parámetros $a=0.126652$, $b= 0.0205653$ con un error de ± 0.003444 (2.72%) y ± 0.001065 (5.18%) respectivamente.

En este caso la diferencia entre el valor de carga media depositada en el extremo más alejado del SiPM y el más cercano es de un 11 %. Es decir, si la carga media depositada por

un muon o electrón cerca del SiPM es de 1, la carga media depositada por la misma partícula en el extremo opuesto mas alejado es 11% menor y representa la máxima atenuación en este sistema de detección activo de 120 cm de largo.

Capítulo 4

Conclusiones

SECCIÓN 4.1

Conclusiones del trabajo

- Los resultados presentados en este trabajo representan un paso necesario en el desarrollo del proyecto MuTe. En la primera parte del trabajo pudimos diferenciar y cuantificar la detección de fotones en el sistema activo. Esto fue necesario para desarrollar una metodología que pueda usarse para decidir el umbral de detección mínimo en términos del número de fotones detectados con los SiPM. En el proyecto Amiga ([Platino, 2009](#)) desarrollado para el observatorio Pierre Auger, donde se utiliza un sistema similar para contar muones en cascadas aéreas extensas se estableció un trigger en 2,5 SPE. En este trabajo se recomienda un trigger sobre los 3 SPEs, recomendable 3,5 SPE porque estaría en el valle entre 3 SPE y 4 SPE mejorando la precisión, en este trabajo en particular este valor será importante además, porque servirá para comparar, guiar simulaciones y la calibración del detector.
- Se logró obtener la relación voltaje de ruptura vs temperatura para los SiPM utilizados en MuTe. Los SiPM son afectados por la temperatura y actualmente los fabricantes

no han podido solucionar este problema, por esta razón estimar como el voltaje de ruptura cambia con la temperatura es vital para cada modelo de SiPM. El ruido térmico es una desventaja que tienen los SiPM con respecto a los fotomultiplicadores de tubo que normalmente son utilizados en sistemas similares. Nuestro resultado será usado para realizar correcciones en la alimentación de los SiPM mientras el detector opere en campo.

- Se logró estimar una atenuación del 11 % para el sistema barra-fibra-SiPM en términos de la carga media depositada. Este porcentaje es muy pequeño. La determinación de la desviación estándar para los valores medios nos permite concluir que usar la atenuación como discriminante para eventos sobre una misma barra no es conveniente. Para el caso en que dos partículas atraviesen la misma barra simultáneamente en posiciones opuestas, será imposible distinguir una de la otra dentro del tiempo de respuesta de ns en términos de energía depositada. Esto implica que el criterio para determinar eventos simultáneos sobre una barra deberá ser otra barra cruzada en coincidencia u otro método.

SECCIÓN 4.2

Exposición del trabajo a la comunidad

Este trabajo fue presentado y sometido en la escuela internacional de instrumentación en física de partículas ICFA School 2017. Esta escuela fue organizada por CERN y el comité internacional para futuros aceleradores ICFA, fue realizada en las instalaciones de la Universidad de las Ciencias Informáticas en la ciudad de la Habana en Cuba del 27 de Noviembre al 8 de Diciembre de 2017.

La escuela estuvo orientada a estudiantes de posgrado y se enmarcó en el estudio de las tecnologías actuales en detección de radiación, aplicaciones y diseño de nuevos detectores tanto para objetivos científicos como para aplicaciones tecnológicas en la industria y obras

civiles. El énfasis principal de la escuela fue la migración de tecnología.

Adicionalmente durante el desarrollo de la maestría tuve la oportunidad de participar y aportar en eventos científicos nacionales e internacionales, estos fueron:

- R. Calderón-Ardila, Simulación para Detectores Cherenkov en Agua y Centelladores Plásticos con Fibras Embebidas Usando los Códigos Geant4. III UNIANDES Particle Detector School. Bogota, Colombia Septiembre 2016.
- R. Calderón-Ardila, First Study of a Muon Telescope Using Geant4 in the MuTe Project. XV Latin American Regional IAU Meeting (XV LARIM). Cartagena de Indias, Colombia, Octubre de 2016.
- R. Calderón-Ardila, Study of the System response, Plastic Scintillator - Optical fiber - SIPM for the MuTe Project. XIV CERN ICFA School on Instrumentation in Elementary Particle Physics. LA Habana, Cuba, Noviembre de 2017.

Referencias Bibliográficas

Abreu, P et al. (2010). Update on the correlation of the highest energy cosmic rays with nearby extragalactic matter. *Astropart. Phys.*, 34:314–326.

Allard, D., Allekotte, I., Alvarez, C., Asorey, H., Barros, H., Bertou, X., Burgoa, O., Berisso, M. G., Martínez, O., and Loza, P. M. (2008). Use of water-cherenkov detectors to detect gamma ray bursts at the large aperture grb observatory (lago). *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, 595(1):70–72.

Ambrosi, G., Ambrosino, F., Battiston, R., Bross, A., Callier, S., Cassese, F., Castellini, G., Ciaranfi, R., Cozzolino, F., D'Alessandro, R., et al. (2011). The mu-ray project: Volcano radiography with cosmic-ray muons. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 628(1):120–123.

Asorey, H. (2012). *Los detectores Cherenkov del observatorio Pierre Auger y su aplicación al estudio de fondos de radiación*. PhD thesis, Universidad Nacional de Cuyo, Comisión Nacional de Energía Atómica. Argentina, Instituto Balseiro, Bariloche, Argentina.

Burkhard, J., Fakhry, A., Girgis, A., Goneid, A., Moussa, A., and Mohammed-Sharkawi, L. (1970). Search for hidden chambers in the pyramids. *Science*, 167:832–839.

Carbone, D., Budetta, G., Greco, F., and Rymer, H. (2003). Combined discrete and continuous gravity observations at mount etna. *Journal of volcanology and geothermal research*, 123(1-2):123–135.

Carbone, D., Gibert, D., Marteau, J., Diament, M., Zuccarello, L., and Galichet, E. (2013). An experiment of muon radiography at mt etna (italy). *Geophysical Journal International*, 196(2):633–643.

Collaboration, T. P. A. (2016). Prototype muon detectors for the amiga component of the pierre auger observatory. *JINST*.

Eckert, P., Schultz-Coulon, H., Shen, W., Stamen, R., and Tadday, A. (2010). Characterisation studies of silicon photomultipliers. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 620(2-3):217–226.

Gaisser, T. K. (1990). *Cosmic Rays and Particle Physics*. Cambridge University Press.

George, E. P. ((455), 1955). Cosmic rays measure overburden of tunnel. *Commonwealth Engineer*.

Haro, M. S. and Arnaldi, L. (2016). The data acquisition system of the latin american giant observatory (lago). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 820:34 – 39.

Lacaita, A. L., Zappa, F., Bigliardi, S., and Manfredi, M. (1993). On the bremsstrahlung origin of hot-carrier-induced photons in silicon devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 40(3):577–582.

Lesparre, N., Gibert, D., Marteau, J., Komorowski, J., Nicollin, F., and Coutant, O. (2012). Density muon radiography of la soufriere of guadeloupe volcano: comparison with geological, electrical resistivity and gravity data. *Geophysical Journal International*, 190(2):1008–1019.

Lucero, A., Almela, A., Suarez, F., Reyes, C., Cancio, A., Fuster, A., Gallo, F., Hampel, M., Platino, M., Videla, M., Wainberg, O., Yelos, D., and Etchegoyen, A. (2015). Analog multiplexer for testing multianode photomultipliers used in amiga project of the pierre auger observatory. *Journal of Instrumentation*, 10(09):T09004.

Méndez, R. (2001). Informe sobre la geología y estratigrafía de flujos piroclásticos asociados al volcán cerro machín. *Ingeominas, informe interno, 36p. Manizales.*

Morishima, K., Kuno, M., Nishio, A., Kitagawa, N., Manabe, Y., Moto, M., Takasaki, F., Fujii, H., Satoh, K., Kodama, H., et al. (2017). Discovery of a big void in khufu's pyramid by observation of cosmic-ray muons. *Nature*, 552(7685):386.

MuTe (2018). Proyecto muon telescope. Url <http://halley.uis.edu.co/fuego/>. [Web; accedido el 04-01-2018].

Nagamine, K., Iwasaki, M., Shimomura, K., and Ishida, K. (1995). Method of probing inner-structure of geophysical substance with the horizontal cosmic-ray muons and possible application to volcanic eruption prediction. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 356(2-3):585–595.

Nepomuk-Otte, A., Garcia, D., Nguyen, T., and Purushotham, D. (2017). Characterization of three high efficiency and blue sensitive silicon photomultipliers. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 846:106 – 125.

Nieto, D. et al. 32nd international cosmic ray conference, beijing (2011). *arXiv preprint arXiv:1109.5935*.

Ogawa, Y., Matsushima, N., Oshima, H., Takakura, S., Utsugi, M., Hirano, K., Igarashi, M., and Doi, T. (1998). A resistivity cross-section of usu volcano, hokkaido, japan, by audiomagnetotelluric soundings. *Earth, planets and space*, 50(4):339–346.

Oldham, W., Samuelson, R., and Antognetti, P. (1972). Triggering phenomena in avalanche diodes. *IEEE Transactions on electron devices*, 19(9):1056–1060.

Otono, H., Oide, H., Yamashita, S., Yoshioka, T., Yamamoto, K., Yamamura, K., and Sato, K. (2008). Study of the internal mechanisms of pixelized photon detectors operated in geiger-mode. *arXiv preprint arXiv:0808.2541*.

Parfitt, L. and Wilson, L. (2009). *Fundamentals of physical volcanology*. John Wiley & Sons.

Pla-Dalmau, A. (2001). Extruded plastic scintillator for the minos calorimeters. *Frascati Physics. Series.*, 21(FERMILAB-343):513–522.

Pla-Dalmau, A., Bross, A., and Mellott, K. (2001). Low-cost extruded plastic scintillator. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 466(3):482–491.

Platino, M. (2009). Amiga-auger muons and infill for the ground array of the pierre auger observatory. *Proceedings of the 31st ICRC, Lodz, Poland*.

Platino, M., Hampel, M., Almela, A., Krieger, A., Gorbena, D., Ferrero, A., De La Vega, G., Lucero, A., Suarez, F., and Videla, M. (2011). Amiga at the auger observatory: the scintillator module testing system. *Journal of Instrumentation*, 6(06):P06006.

project, A. (2018). Arduino uno. Url <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>. [Web; accedido el 04-02-2018].

Rech, I., Ingargiola, A., Spinelli, R., Labanca, I., Marangoni, S., Ghioni, M., and Cova, S. (2008a). Optical crosstalk in single photon avalanche diode arrays: a new complete model. *Optics express*, 16(12):8381–8394.

Rech, I., Ingargiola, A., Spinelli, R., Labanca, I., Marangoni, S., Ghioni, M., and Cova, S. (2008b). Optical crosstalk in single photon avalanche diode arrays: a new complete model. *Optics Express*, 16(12):8381–8394.

Renker, D. (2006). Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 567(1):48 – 56. Proceedings of the 4th International Conference on New Developments in Photodetection.

Renker, D. and Lorenz, E. (2009). Advances in solid state photon detectors. *Journal of Instrumentation*, 4(04):P04004.

- Talavera, B. and Cazar, D. (2017). Development of a testing environment for particle detectors used by the lago project. In *Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM), 2017 IEEE*, pages 1–6. IEEE.
- Tanaka, H., Kusagaya, T., and Shinohara, H. (2014). Radiographic visualization of magma dynamics in an erupting volcano. *Nature Communications*, 5:3381.
- Tanaka, H., Nakano, T., Takahashi, S., Yoshida, J., Takeo, M., Oikawa, J., Ohminato, T., Aoki, Y., Koyama, E., Tsuji, H., et al. (2008). Radiographic imaging below a volcanic crater floor with cosmic-ray muons. *American Journal of Science*, 308(7):843–850.
- Tanaka, H., Uchida, T., Tanaka, M., Shinohara, H., and Taira, H. (2009). Cosmic-ray muon imaging of magma in a conduit: Degassing process of satsuma-iwojima volcano, japan. *Geophysical Research Letters*, 36(1).
- Tarbuck, E. and Lutgens, F. (Book, 8a Edition 2002). *Earth: an introduction to physical geology*. Number 551 T3E2 2002.
- Vesga-Ramirez, A. (2018). Inversión geofísica a partir de datos de muongrafía volcánica para proyecto mute. Master's thesis, Facultad de ciencias, Maestría en Geofísica, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Vinogradov, S., Arodzero, A., Lanza, R., and Welsch, C. (2015). Sipm response to long and intense light pulses. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 787:148 – 152.
- Zappa, F. and Andrea, L. (1996). Solid-state single-photon detectors. *Optical Engineering*, 35:35 – 35 – 8.