



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Perfecta combinación entre Energía e Intelecto



Diseño e Implementación de la electrónica de discriminación y registro de un telescopio de muones portátil para el estudio de rayos cósmicos atmosféricos

Presentado ante:
Comité de Trabajos de Grado E³T

Por:
Karen Juliet Forero Gutiérrez
Jose Luis Salamanca Coy

Universidad Industrial de Santander
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Bucaramanga, 2017

ELABORADO POR:	REVISADO POR:	APROBADO POR:
<hr/> <p>Karen Juliet Forero Gutiérrez <i>Estudiante de Ingeniería Electrónica</i> <i>Código UIS: 2112870</i></p>	<hr/> <p>M.Sc. Jesús Peña Rodríguez <i>Director del trabajo de grado</i></p>	<p>Comité de trabajos de grado E³T Acta no. _____ del _____ de _____ de 2017 código del trabajo: _____</p> <hr/> <p>Evaluator designado por el comité</p>
<hr/> <p>José Luis Salamanca Coy <i>Estudiante de Ingeniería Electrónica</i> <i>Código UIS: 2130538</i></p>	<hr/> <p>Ph.D. Luis Alberto Núñez de Villavicencio Martínez</p> <hr/> <p>M.Sc. Jaime Guillermo Barrero <i>Codirectores del trabajo de grado</i></p>	

Universidad Industrial de Santander (UIS) Documento Confidencial

Ni la totalidad ni parte de este documento puede reproducirse, almacenarse o transmitirse por algún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopias, grabación magnética o electrónica o cualquier medio de almacenamiento de información y sistemas de recuperación, sin permiso escrito de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.

Este es un documento interno de la UIS. Al recibirlo no podrá pasarlo a persona alguna excepto las que se le indique en la lista de distribución autorizada por la UIS. Cualquier persona externa a la UIS que utilice la información en este documento asume la responsabilidad por su empleo.

Índice General

1. Objetivos	2
1.1. Objetivo General	2
1.2. Objetivos Específicos	2
2. Alcances	2
3. Justificación	4
4. Cronograma de Actividades	4
5. Recursos e infraestructura	5
5.1. Recursos humanos	5
5.2. Recursos Materiales e Infraestructura	5
6. Reseña Bibliográfica	7
6.1. Rayos Cósmicos	7
6.2. Muongrafía y los muones	7
6.3. Hodoscopios	7
6.4. Materiales Centelladores	8
6.5. Detectores de Centelleo	8
6.6. Foto detectores de alta sensibilidad (Foto multiplicadores de Silicio - SiPM)	8
6.7. Estado del arte	8
6.7.1. Proyecto Mu-Ray	8
6.7.2. Proyecto DIAPHANE	8
Referencias	9

Índice de figuras

1.	<i>Esquema del proyecto</i>	3
2.	<i>Cronograma</i>	4
3.	<i>Hodoscopio con dos planos de detección</i>	7

Índice de tablas

1.	Funciones de los miembros del proyecto.	5
2.	Costos del recurso humano.	5
3.	Recursos materiales disponibles	6
4.	Recursos materiales por adquirir	6
5.	Costos totales aproximados para el proyecto	6

FICHA DE RESUMEN

Título:	Diseño e implementación de la electrónica de discriminación y registro para un Telescopio de muones portátil para el estudio de rayos cósmicos atmosféricos.
Director:	M.Sc. Jesús Peña Rodríguez ¹ , jesus.pena@correo.uis.edu.co
Primer Co-director:	Ph.D.Luis Alberto Núñez de Villavicencio Martínez ² , lnunez@uis.edu.co
Segundo Co-director:	M.Sc. Jaime Guillermo Barrero Perez ³ , jbarrero@uis.edu.co
Autores:	Karen Juliet Forero Gutiérrez ⁴ , karen.forero1@correo.uis.edu.co Jose Luis Salamanca Coy ⁵ , jose.salamanca@correo.uis.edu.co
Modalidad:	Trabajo de investigación
Duración:	8 meses
Entidades Interesadas:	<ul style="list-style-type: none">- Universidad Industrial de Santander (UIS).- Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica Telecomunicaciones (E3T).- Grupo de Investigación en Relatividad y Gravitación, (GIRG).

OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar la electrónica de discriminación y registro para un telescopio de muones portátil para el estudio de rayos cósmicos atmosféricos.

DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

Este proyecto tiene como objetivo la construcción de un detector de centelleo portátil e independiente para determinar la trayectoria de una partícula que incide sobre el mismo, con el fin de ser utilizado en aplicaciones de muongrafía. Este detector, también llamado hodoscopio, se construye configurando planos de detección multipíxel; los planos se ubican paralelamente sobre el mismo eje de coordenadas con posibilidad de variar la distancia entre los mismos. Su funcionamiento y resolución temporal de detección dependen mayormente del sistema electrónico de discriminación y registro de eventos. Por lo tanto, se propone el diseño de dicho sistema, teniendo en cuenta criterios de bajo consumo y bajo costo en su manufactura.

¹Estudiante de Doctorado en Ciencias Físicas.

²Profesor Titular UIS.

³Profesor Titular UIS.

⁴Estudiante de Ingeniería Electrónica Código: 2112870

⁵Estudiante de Ingeniería Electrónica Código: 2130538

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Diseñar e implementar la electrónica de discriminación y registro para un telescopio de muones portátil para el estudio de rayos cósmicos atmosféricos.

1.2. Objetivos Específicos

1. Establecer mejoras de distribución física de un panel centellador al diseñar las tarjetas impresas (PCB) en las que funcionan los fotomultiplicadores de silicio (SiPM), además de analizar las características del diseño electrónico y la señal eléctrica que determina presencia de partículas cargadas en cada una de las barras centelladoras que conforman el panel.
2. Diseñar y construir una interfaz analógica que permita discriminar las señales correspondientes a partículas cargadas mediante la conversión de la señales eléctricas provenientes de los paneles centelladores en cambios de nivel digital.
3. Diseñar una interfaz digital que entregue un arreglo de datos con información asociada a eventos de partículas cargadas, tiempo de ocurrencia del evento y datos relevantes de ubicación, presión atmosférica y temperatura.

2. Alcances

Con el presente proyecto de investigación se entregará un diseño implementado de un instrumento que permita realizar muongrafía. El instrumento será un detector de centelleo formado por doce barras de plástico centellador distribuidas en dos paneles y organizadas en dos planos X-Y de tres barras que forman 9 píxeles. La luz generada por la interacción de una partícula cargada con cada una de las barras es recolectada por una fibra óptica, la cual en uno de sus extremos esta acoplada a un fotomultiplicador de silicio (SiPM) que convierte la señal lumínica en una señal eléctrica. Posteriormente, un sistema electrónico acondiciona, discrimina, digitaliza y registra los eventos asociados a estas partículas que atraviesan el instrumento. Estos datos junto con el tiempo de ocurrencia, geolocalización del detector, presión atmosférica y temperatura, se agruparán en un archivo con formato de alta portabilidad y se entregarán para su posterior análisis. El alcance de este proyecto de investigación está limitado a la entrega del sistema electrónico que permita generar el archivo de datos, este archivo no será analizado ni interpretado por los autores.

En la Figura 1 se muestra el esquema general del proyecto con el alcance resaltado en naranja. El proyecto parte de un panel centellador construido previamente en el grupo, del panel se obtienen seis señales eléctricas que determinan presencia de partículas cargadas en cada una de las barras centelladoras que lo conforman. Los autores se encargarán de construir el panel restante siguiendo guías especificadas en el grupo de investigación.

El objetivo específico número uno se asocia a las tarjetas de circuito impreso en las que funcionan los fotomultiplicadores de silicio que se encuentran dentro de un panel centellador. El reto para este primer objetivo es optimizar el ensamblaje de la electrónica que se encuentra dentro de los paneles, disminuyendo el tiempo de conexión y mejorando la distribución del cableado de alimentación. Dentro de este objetivo se incluye el diseño de las tarjetas de circuito impreso, su ensamblaje y pruebas de funcionamiento; además de un análisis del diseño electrónico para determinar parámetros de la señal eléctrica que se va a tratar en la siguiente etapa (señal de color rojo en la Figura 1).

A partir de allí comienza el objetivo específico número dos, en donde se pretende desarrollar una interfaz (rectángulo de color verde en la Figura 1) que permita discriminar la amplitud de las

señales eléctricas provenientes de los dos paneles centelladores mediante señales binarias (señal azul en la Figura 1) que indiquen presencia o ausencia de partículas cargadas que atraviesan los píxeles del detector usando un umbral de detección. En este proyecto se proporciona la herramienta física para realizar variaciones en dicho umbral pero no se determina el umbral óptimo para el detector.

El reto para el objetivo específico número dos es convertir eventos con duración del orden de centenas de nanosegundos y variaciones de nivel de milivoltios, en cambios de nivel digital (señal binaria). Estos cambios de nivel digital deben ser compatibles con los niveles lógicos de tensión en las entradas de la siguiente etapa, que corresponde a la interfaz digital; adicionalmente el tiempo de bit no debe superar el orden de centenas de nanosegundos para evitar aumentar el tiempo muerto del detector.

El objetivo específico número tres se refiere a la interfaz digital (Rectángulo de color rosa en la figura 1) que inicia con las señales binarias que entrega la interfaz analógica (señales azules en la Figura 1), estas señales ingresan a la FPGA y se concatenan con una estampa temporal reconstruida usando la señal PPS (*Pulse per second*) de un GPS y el reloj interno de la FPGA, teniendo una sensibilidad temporal del orden de decenas de nanosegundos. Posteriormente esta trama de bits es transmitida hacia una Raspberry Pi 2 para ser almacenada junto a otros parámetros de interés para el funcionamiento del instrumento (temperatura, presión atmosférica y geolocalización). El reto para este tercer objetivo se encuentra, en principio, en la transmisión de los datos desde la FPGA hacia la Raspberry Pi, ya que se debe describir un protocolo que permita minimizar el tiempo de transmisión y priorizar el almacenamiento de eventos. Posteriormente, el reto continua en la sincronización temporal entre FPGA y Raspberry Pi, teniendo en cuenta que el tiempo de transmisión de datos puede afectar el registro del tiempo de ocurrencia de cada evento si la sincronización temporal es inexacta.

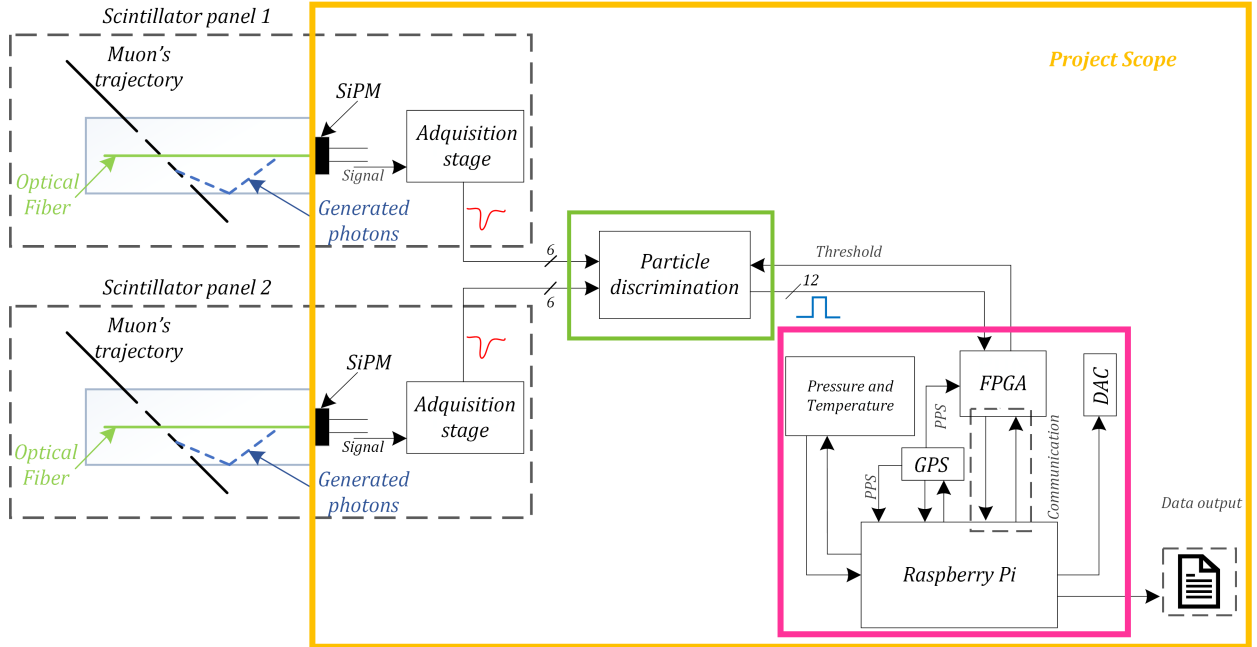


Figura 1: Esquema general con énfasis en el alcance del proyecto propuesto

El cumplimiento de los objetivos será medido mediante actividades y entregables asociados, tanto al objetivo general como a los objetivos específicos. En la sección 4 se muestran los entregables principales que se plantearon para el proyecto y las fechas para su ejecución.

3. Justificación

La muongrafía es una técnica no invasiva, con múltiples aplicaciones, que consiste en la generación de imágenes a partir del flujo de muones atmosféricos que atraviesan diversos materiales [1]. Los muones son partículas cargadas negativamente que tienen 200 veces la masa del electrón [2, pag 262] y tienen la capacidad de atravesar grandes estructuras.

Esta técnica se puede aplicar en varios campos, algunos como, la búsqueda de reservorios geotérmicos, la identificación de materiales radiactivos en contenedores [3], la exploración de la estructura interna de: plantas nucleares [4], hornos metalúrgicos, pirámides en busca de cámaras ocultas [5], volcanes para monitorear la evolución temporal de las cámaras magmáticas [6] y represas para el rastreo de fisuras e incluso el monitoreo de CO₂ en la sub- superficie de la tierra [7].

Actualmente, existen varios detectores que realizan tomografía de muones [8] [9], estos instrumentos típicamente están conformados por paneles centelladores de gran volumen y peso, un sistema electrónico complejo, costoso y de consumo energético considerable. Además, su ensamble requiere una alta complejidad logística para su transporte, instalación y puesta en funcionamiento, lo cual se convierte en un gran obstáculo para que dichos detectores puedan ser instalados en lugares remotos o de difícil acceso.

En base a lo anterior, en este proyecto se plantea el diseño y la construcción de un instrumento portátil que posibilite la caracterización del comportamiento del flujo de muones que atraviesan diferentes estructuras en lugares de difícil acceso, con bajo consumo energético, alta versatilidad en su transporte e instalación y electrónica de bajo costo.

4. Cronograma de Actividades

Este proyecto tendrá una duración aproximada de 8 meses de trabajo sin incluir posibles retrasos de naturaleza humana, de instrumentación y demoras externas que pueden afectar el comportamiento en tiempo del presente proyecto. En la Figura 2, se muestra el cronograma con los entregables principales y su duración aproximada en semanas; en azul se aprecian las actividades que se han completado.

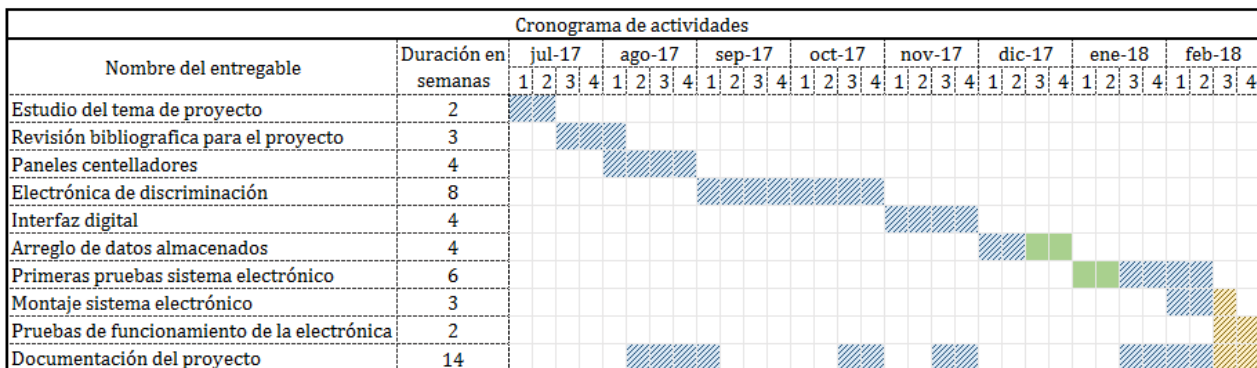


Figura 2: Cronograma: mostrando los entregables principales, el color azul indica que las actividades ya están finalizadas y el verde es corresponde al periodo de vacaciones.

5. Recursos e infraestructura

5.1. Recursos humanos

Función	Descripción
Director	Aprueba documentación. Instruye en el uso óptimo de recursos e infraestructura. Orienta el trabajo.
Primer codirector	Aprueba recursos e infraestructura. Establece y revisa patrones de documentación.
Segundo codirector	Asesora el proyecto. Establece y revisa patrones de documentación.
Autores	Estudiantes de Ingeniería Electrónica que investigan, documentan y desarrollan el proyecto.

Tabla 1: Funciones de los miembros del proyecto.

Nombre	Función	Horas por semana	Costo por hora	Total	Fuente monetaria
Jesus Peña	Director	2	\$150.000	\$9'600.000	COLCIENCIAS
Luis Nuñez	Primer codirector	2	\$350.000	\$22'400.000	UIS
Jaime Barrero	Segundo codirector	2	\$190.000	\$12'160.000	UIS
Karen Forero	Autor	40	\$15.000	\$ 19'200.000	Recursos propios
Jose Salamanca	Autor	40	\$15.000	\$ 19'200.000	Recursos propios

Tabla 2: Costos del recurso humano.

5.2. Recursos Materiales e Infraestructura

El Grupo de Investigación en Relatividad y Gravitación dispone de un laboratorio dedicado para la instrumentación electrónica dotado de la infraestructura necesaria estimada para el presente proyecto. Allí se encuentran disponibles los materiales e instrumentos esenciales descritos en la Tabla 3 y se cuenta con la posibilidad de adquirir los elementos resumidos en la Tabla 4, los costos asociados se estudian con el fin de analizar el valor real del proyecto.

Cantidad	Descripción	Costos
1	Laboratorio dotado con: Osciloscopios, fuentes, generador de señales, multímetros	\$13'200.000*
1	Barometric Pressure Sensor Breakout - BMP180	\$40.000
1	Venus GPS with SMA Connector	\$150.000
2	Caja metálica oscura para panel centellador	\$400.000
12	Barras centelladoras	\$300.000
2	Fibra óptica [metros]	\$50.000
12	Acoples opto - mecánicos	\$20.000
12	Hamamatsu MPPC S13720-1325CS (SiPM)	\$ 2'000.000
1	Caja oscura para pruebas con aislamiento lumínico	\$200.000
1	Raspberry pi 2 Model B	\$190.000
-	Componentes electrónicos generales	\$ 300.000

Tabla 3: Recursos materiales disponibles

Cantidad	Descripción	Costos
1	FPGA	\$250.000
24	Amplificadores operacionales pertinentes	\$288.000
15	Cable coaxial [metros]	\$19.500
48	Conectores SMA (plug in-line and jack receptacle)	\$ 300.000
-	Componentes discretos SMD pertinentes	\$ 80.000
-	Tarjetas de circuito impreso	\$ 400.000

Tabla 4: Recursos materiales por adquirir

* El costo del laboratorio se calcula teniendo en cuenta el alquiler de laboratorio con dos osciloscopios en \$15.000 la hora, usándolo durante 22 semanas de pruebas presentes en el proyecto.

Descripción	Costos
Recursos humanos	\$82'560.000
Recursos materiales disponibles	\$16'850.000
Recursos materiales por adquirir	\$ 1'337.000
Total	\$ 100'747.000

Tabla 5: Costos totales aproximados para el proyecto

6. Reseña Bibliográfica

El propósito de esta sección es presentar la información necesaria para contextualizar el proyecto, revisar el estado del arte en materia de hodoscopios y las referencias que han sido seleccionadas.

6.1. Rayos Cósmicos

El estudio de la radiación cósmica aporta valiosas herramientas para avanzar en la comprensión de la dinámica del universo. Para este proyecto se estudiará el comportamiento del flujo de rayos cósmicos secundarios. Para mayor información el lector puede dirigirse a [10, cap. 2].

6.2. Muongrafía y los muones

La muongrafía es una técnica de construcción de imágenes basada en mediciones de la absorción de muones atmosféricos dentro de la materia. Gracias a su gran poder penetrante, el flujo de muones atmosféricos permite la inspección de cuerpos grandes que con técnicas convencionales sólo pueden ser estudiados superficialmente con resoluciones del orden de unos pocos cientos de metros. En las referencias, el lector puede documentarse sobre la muongrafía y sus aplicaciones en: [9] [11] [12] [3] [5] [7]

El muón es una partícula elemental de la familia de los leptones, con una vida media cercana a los 2.2 ms lo que permite que viaje algunos km antes de decaer. Para mayor información sobre los muones, su origen y proceso de decaimiento diríjase a: [2, cap.6 y cap. 12] [10, cap. 4]. Y para mayor información sobre partículas y su clasificación [13, pag. 25-72].

6.3. Hodoscopios

Un hodoscopio es un dispositivo que traza el camino de una partícula cargada mediante un grupo de subdetectores de partículas que proporcionan una información posicional y direccional precisa. En la Figura 3 se muestra un hodoscopio con dos planos de detección. En las referencias: [14], [15], [10, cap. 2] el lector puede encontrar mayor información.

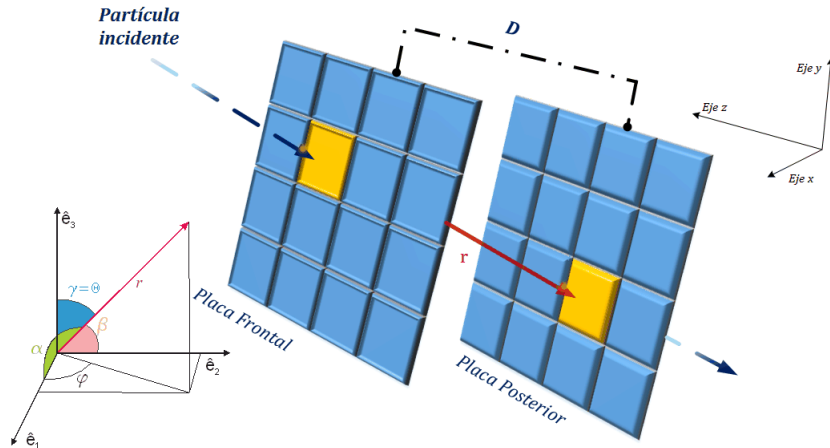


Figura 3: Hodoscopio con dos planos de detección, el mapeo en cada plano (pixel amarillo) y la dirección de la partícula que es determinada usando el vector r (color vino) y los ángulos que este forma con el detector mostrados como α , β y γ en el eje de coordenadas donde e_1 , e_2 y e_3 , son los vectores unitarios en las direcciones de los ejes X , Y y Z , respectivamente. Los ángulos, cenital θ y azimutal φ serán los que finalmente determinan la dirección de la partícula. D es la distancia entre paneles que influye en el ángulo de aceptación del detector.

6.4. Materiales Centelladores

Un material centellador es aquel que centellea (exhibe luminiscencia) al ser atravesado por radiación ionizante. El material absorbe parte de la energía incidente y la reemite en forma de luz, típicamente en el espectro visible o en los alrededores del mismo. Mayor información en las referencias: [16] [17] [18] [19] [20]

6.5. Detectores de Centelleo

La función de un centellador es doble: primero, generar luz causada por la excitación de sus moléculas; y, segundo, debe transferir esta luz ya sea directamente o a través de una guía de luz a un receptor óptico (fotomultiplicador, fotodiodo, etc.). Para mayor información puede dirigirse a: [21] [22].

6.6. Foto detectores de alta sensibilidad (Foto multiplicadores de Silicio - SiPM)

El SiPM (*silicon photomultiplier*) pertenece a la familia de los MPPCs (*multi-pixel photon counter*). Es un dispositivo opto-semiconductor que usa múltiples píxeles con diodos de avalancha APD (*avalanche photodiode*) operados en modo Geiger. En el caso de la presente propuesta, el MPPC que se usará es el S13360-1350CS de Hamamatsu [23] Para mayor información sobre los SiPM el lector puede revisar las referencias [24] [25] [26].

6.7. Estado del arte

A continuación se presenta un breve recorrido por dos proyectos con gran trayectoria en la muongrafía. Existen otros proyectos que pueden ser de interés para el lector y que puede revisar en las referencias [27] [12] [3] [4] [7].

6.7.1. Proyecto Mu-Ray

El mayor objetivo de la colaboración MU-RAY es la construcción de un telescopio de muones con una resolución angular elevada, adquisición de datos en tiempo real y área activa (AA) amplia, que sea capaz de funcionar en las zonas aledañas a un volcán. Para mayor información, el lector puede dirigirse a las referencias [9] [6] [1] [28].

6.7.2. Proyecto DIAPHANE

DIAPHANE es el primer proyecto europeo de tomografía aplicada a la volcanología. Comenzó en 2008 con la colaboración de tres instituciones francesas: IPG Paris, IPM Lyon y Géosciences Rennes para promover la muongrafía en las comunidades científicas *French Earth Science y Particle Physics*. Los primeros objetivos del proyecto fueron realizar elecciones tecnológicas para el telescopio de muones y definir un diseño adecuado para las condiciones geográficas difíciles de los volcanes en las Antillas. Para mayor información, el lector puede dirigirse a las referencias: [8] [22] [11].

Referencias

- [1] P. Noli, F. Ambrosino, L. Bonechi, A. Bross, L. Cimmino, *et al.*, “Muography of the Puy de Dôme,” *ANNALS OF GEOPHYSICS*, vol. 604401, no. 1, 2017.
- [2] F. Halzen, A Martin, *Quarks and leptons*. New York, USA: John Wiley and Sons, 1984.
- [3] G. Jonkmans, V. Anghel, C. Jewett, and M. Thompson, “Nuclear waste imaging and spent fuel verification by muon tomography,” *Annals of Nuclear Energy*, vol. 53, no. Supplement C, pp. 267 – 273, 2013.
- [4] J. Perry, M. Azzouz, J. Bacon, K. Borozdin, E. Chen, *et al.*, “Imaging a nuclear reactor using cosmic ray muons,” *Journal of Applied Physics*, 2013.
- [5] L. W. Alvarez, J. A. Anderson, F. El Bedwei, J. Burkhard, A. Fakhry, A. Girgis, *et al.*, “Search for Hidden Chambers in the Pyramids,” *SCIENCE*, no. 167, pp. 832–839, 1970.
- [6] A. Anastasio, F. Ambrosino, D. Basta, L. Bonechi, M. Brianzi, *et al.*, “The MU-RAY detector for muon radiography of volcanoes,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 732, pp. 423–426, 2013.
- [7] V. A. Kudryavtsev, N. J. Spooner, J. Gluyas, C. Fung, and M. Coleman, “Monitoring subsurface co2 emplacement and security of storage using muon tomography,” *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 11, no. Supplement C, pp. 21 – 24, 2012.
- [8] N. Lesparre, D. Gibert, and J. Marteau, “Bayesian dual inversion of experimental telescope acceptance and integrated flux for geophysical muon tomography,” *Geophysical Journal International*, vol. 188, no. 2, pp. 490–497, 2012.
- [9] F. Ambrosino, A. Anastasio, D. Basta, L. Bonechi, M. Brianzi, *et al.*, “The mu-ray project: Detector technology and first data from mt. vesuvius,” vol. 9, pp. C02029–C02029, 02 2014.
- [10] M. Spurio, *Particles and Astrophysics*. Versoix, Switzerland: Springer, 2015.
- [11] D. Gibert, K. Marteau-Bazouni, and J. Marteau, “Radiographier les volcans avec les rayons cosmiques,” *Reflats de la Physique*, no. 32, pp. 14 – 18, 2013.
- [12] S. Riggi, V. Antonuccio-Delogu, M. Bandieramonte, U. Becciani, A. Costa, P. L. Rocca, P. Massimo, C. Petta, C. Pistagna, F. Riggi, E. Sciacca, and F. Vitello, “Muon tomography imaging algorithms for nuclear threat detection inside large volume containers with the muon portal detector,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 728, no. Supplement C, pp. 59 – 68, 2013.
- [13] P. data group, *Review of particle physics*. California,USA: Regents of the University of California, 2010.
- [14] J. M. Blasco, *Contribuciones al procesamiento hardware de la señal para detectores de radiación de alta resolución espacial con lectura por matriz de fotodiodos: diseño de un prototipo funcional basado en FPGA*. PhD thesis, Departamento de Ingeniería Electrónica. Universidad de Valencia, 2013.
- [15] D. Sierra *et al.*, “Cálculo de parámetros para el telescopio de muones, mute-uis.” Reporte-Halley-UIS-MuTe-001-2016., 2016.

- [16] C. Leroy and P. Rancoita, *Principles of radiation interaction in matter and detection*. Toh Tuck Link, Singapore: World Scientific, 2012.
- [17] G. F. Knoll, *Radiation detection and measurement*. USA: John Wiley and Sons, 4 ed., 2010.
- [18] J. B. Birks, D. W. Fry, L. Costrell, and K. Kandiah, *The Theory and Practice of Scintillation Counting*. London, England: Elsevier, 1964.
- [19] A. Pla-Dalmau, A. Bross, and V. Rykalin, “Extruding plastic scintillator at fermilab,” vol. 1, pp. 102 – 104 Vol.1, 11 2003.
- [20] A. Pla-Dalmau, A. D. Bross, and K. L. Mellott, “Low-cost extruded plastic scintillator,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 466, no. 3, pp. 482–491, 2001.
- [21] C. Grupen, B. Schwartz, *et al.*, *Particle Detectors*. Cambridge, USA: C. Grupen and B. A. Schwartz, 2 ed., 2008.
- [22] J. Marteau, D. Gibert, N. Lesparre, F. Nicollin, P. Noli, and F. Giacoppo, “Muons tomography applied to geosciences and volcanology,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 695, no. Supplement C, pp. 23 – 28, 2012. New Developments in Photodetection NDIP11.
- [23] Hamamatsu Photonics K.K, *MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) S13360 series datasheet*.
- [24] V. Golovin and V. Saveliev, “Novel type of avalanche photodetector with geiger mode operation,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 518, no. 1, pp. 560 – 564, 2004. Frontier Detectors for Frontier Physics: Proceedin.
- [25] P. Buzhan *et al.*, “An advanced study of silicon photomultiplier,” *ICFA Instrum. Bull.*, vol. 23, p. 28, 2001.
- [26] Hamamatsu Photonics K.K, *Handbook Si APD, MPPC*.
- [27] A. Clarkson, D. Hamilton, M. Hoek, D. Ireland, J. Johnstone, R. Kaiser, T. Keri, *et al.*, “Geant4 simulation of a scintillating-fibre tracker for the cosmic-ray muon tomography of legacy nuclear waste containers,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 746, no. Supplement C, pp. 64–73, 2014.
- [28] F. Beauducel, A. Bross, S. Buontempo, L. D’Auria, Y. Déclais, *et al.*, “The mu-ray project: Summary of the round-table discussions,” *Earth, Planets and Space*, vol. 62, pp. 145–151, Feb 2010.