

TESIS DOCTORAL

Doctorado en Ingeniería
Mención Procesamiento de Señales e Imágenes

Título:

“Optoelectrónica con Fotomultiplicadores de Silicio para Detectores de Rayos Cósmicos”

Autor: Ing. Matías Rolf Hampel

Director de Tesis: Dr. Ing. Manuel Platino

Codirector: Dr. Alberto Etchegoyen

Buenos Aires - 2018

Agradecimientos

En primer lugar quisiera agradecer a mis directores Manuel Platino y Alberto Etchegoyen por su dedicación y aportes en este trabajo, por sus contribuciones en cuanto a mi formación y sus consejos. Asimismo, por haberme brindado la oportunidad en lo laboral y profesional de desarrollarme en la ciencia.

A mis amigos y colegas de ITeDA, tanto del presente como del pasado, quienes generan y generaron del lugar de trabajo un ambiente familiar y cordial que hace que todo investigador quiera formar parte de esta institución.

Al personal del Observatorio Pierre Auger por su ayuda incondicional durante los períodos de instalación y puesta en marcha de este gran proyecto que es AMIGA.

A la UTN, Institución que me ha formado académicamente en la carrera de Ingeniería Electrónica, a sus profesionales, secretarias y colegas por todo el apoyo.

Al CONICET, Institución que me ha otorgado una beca doctoral para que pueda desarrollar esta tesis.

A mis padres por haberme educado de la manera que lo hicieron, por todos sus sabios consejos, su apoyo y aliento durante toda mi vida. A mi hermana por su paciencia, calidez y apoyo incondicional. A mis familiares por su apoyo y por estar siempre presentes. A Lara por entenderme y acompañarme, por su apoyo infinito, por su paciencia, dedicación y por iluminar cada día de mi vida. A Sandra, Cata y Valentín por todo su apoyo y estar siempre presentes. A mis amigos por ser de fierro, compartir tantos buenos momentos y darme siempre su apoyo.

Optoelectrónica con Fotomultiplicadores de Silicio para Detectores de Rayos C3smicos

Resumen

El proyecto AMIGA (“Auger Muon and Infill for the Ground Array”) es una extensi3n del Observatorio Pierre Auger y sus objetivos principales son mejorar la discriminaci3n entre part3culas primarias de diferente composici3n qu3mica y la detecci3n de lluvias de part3culas con un umbral de energ3a m3s bajo que el utilizado en el dise1o original de Auger.

Este trabajo se centra en el detector de muones de AMIGA, m3s espec3ficamente en el desarrollo de la electr3nica de adquisici3n para los contadores de muones reemplazando el sistema de fotodetecci3n por una nueva tecnolog3a basada en fotomultiplicadores de silicio (SiPMs).

Se presentar3 la selecci3n del fotodetector y de la electr3nica de adquisici3n. Se exponen las diversas pruebas de concepto en la que se mostrar3n las capacidades del sistema de detecci3n seleccionado y se propondr3 una versi3n de pre-producci3n de la electr3nica.

Se presentar3 el m3todo desarrollado para la calibraci3n tanto de los SiPMs, c3mo del detector.

Se expondr3n las pruebas realizadas en el laboratorio para la caracterizaci3n del sistema de conteo propuesto, la instalaci3n de las electr3nicas de pre-producci3n en la estaci3n del detector de superficie *Kathy Turner* con las respectivas pruebas realizadas y los primeros an3lisis de datos del detector.

Optoelectrónica con Fotomultiplicadores de Silicio para Detectores de Rayos C3smicos

Abstract

The AMIGA project ("Auger Muon and Infill for the Ground Array") is an extension of the Pierre Auger Observatory and its main objectives are to improve the discrimination between primary particles of different chemical compositions and the detection of cosmic ray showers with a lower energy threshold than the original Auger design.

This work is focused on the AMIGA muon detector, more specifically in the development of the acquisition electronics for the muon counters, replacing the current photodetector with a new technology based on silicon photomultipliers (SiPMs).

The selection of the photodetector and the acquisition electronics for the AMIGA muon counters will be presented, as well as the different tests in which the capabilities of the selected detection system are shown. A pre-production version of the electronics will be proposed.

The method developed for the calibration of the SiPMs and the detector using the designed electronics will be presented.

Also the laboratory tests for the characterization of the proposed counting system are presented, the installation of the pre-production electronics in the surface detector station Kathy Turner, the respective tests performed in the field and the first data analysis of the detector.

Índice general

Resumen	v
Abstract	VII
1. Rayos Cósmicos	1
1.1. Introducción	1
1.2. Espectro de Energía	3
1.3. Cascadas Atmosféricas Extendidas	5
2. Observatorio Pierre Auger	9
2.1. Introducción	9
2.2. Detector de Superficie	9
2.2.1. Niveles de Disparo del Detector de Superficie	11
2.3. Detector de Fluorescencia	12
2.4. Expansión del Observatorio Pierre Auger	13
2.4.1. HEAT (High Elevation Auger Telescopes)	14
2.4.2. AMIGA (Auger Muon and Infil for the Ground Array)	15
3. Fotomultiplicadores de Silicio	19
3.1. Introducción	19
3.2. Principio de Operación	19
3.3. Características de los SiPMs	23
3.3.1. Factor de Relleno (Fill Factor)	23
3.3.2. Ganancia	23
3.3.3. Eficiencia de Fotodetección	23
3.3.4. Cuentas Oscuras (Dark Counts)	24
3.3.5. <i>Crosstalk</i>	24
3.3.6. Afterpulsing	25
3.3.7. Linealidad y Rango Dinámico	25
3.3.8. Dependencia con la Temperatura	26
4. Sistema Propuesto para los Contadores de Muones de AMIGA	27
4.1. El Contador de Muones de AMIGA	27
4.2. Diseño Mecánico del Módulo Contador de Muones	28
4.3. Actualización del Sistema de Detección	29
4.3.1. Especificaciones del Sistema de Detección	30

4.3.2.	Selección del SiPM	31
4.3.3.	Selección de la Electrónica de Adquisición	32
Front-end	33
Back-end	37
4.4.	Electrónica de Pre-Producción	38
5.	Calibración del Sistema de Conteo	45
5.1.	Calibración de los SiPMs	45
5.1.1.	Diseño Experimental para la Calibración de los SiPMs	45
5.1.2.	Medición del Valor Medio del Pico de Tensión del Fotón Equivalente	46
5.1.3.	Medición de la Tensión de Ruptura	48
5.1.4.	Ajuste de los Canales Individuales	50
5.2.	Calibración del Detector	51
5.2.1.	Selección de la Estrategia de Conteo	51
6.	Mediciones de Laboratorio	55
6.1.	Introducción	55
6.2.	Montaje Experimental	55
6.2.1.	Instrumento de Medición <i>PIPA</i>	55
6.2.2.	Sistema de Disparo	56
6.3.	Pruebas del Prototipo del Sistema de Detección	58
6.3.1.	Fotones Detectados en Función de la Distancia de Impacto	61
6.3.2.	Ancho Temporal de las Señales Digitales	63
6.3.3.	Eficiencia del sistema de detección	64
6.4.	Pruebas de la Electrónica de Pre-Producción	66
6.4.1.	Ancho Temporal de las Señales Digitales	66
6.4.2.	Eficiencia del sistema de detección	67
6.4.3.	Probabilidad de Sobre-Conteo por Radiación de Fondo	68
6.4.4.	Distribución del Tiempo de Arribo para una Misma Partícula	69
7.	Mediciones con los Detectores Instalados	71
7.1.	Instalación en <i>Kathy Turner</i>	71
7.2.	Calibración de los Módulos Contadores de Muones	72
7.3.	Selección del Punto de Disparo para la Adquisición	75
7.4.	Tasa de Pulsos de Fondo en los Detectores	77
7.4.1.	Obtención de la Tasa de Pulsos de la Radiación Ambiente	78
7.4.2.	Probabilidad de Sobre-Conteo	80
7.5.	Análisis de Canales con Fallas	81
7.6.	Comparación entre Detectores	82
7.6.1.	Conteo de Muones	83
Corrección por Apilado de Impactos	84
Sincronización Temporal del MD con el SD	84

7.6.2. Análisis de los Datos	85
7.6.3. Estabilidad Temporal	88
8. Conclusiones y Trabajo Futuro	91
8.1. Contribuciones de esta Tesis	91
8.2. Líneas de Trabajo Futuro	96
Bibliografía	99

Índice de figuras

1.1. Fotografía de la región central de una cascada atmosférica extendida de un rayo cósmico casi vertical, detectada por el arreglo de cámaras de descarga de $7\text{ m} \times 5\text{ m}$ de la universidad de Leeds. Se puede observar que cerca del centro de la fotografía la densidad de partículas secundarias es mayor. A medida que aumenta la distancia a ese punto, la densidad de partículas disminuye.	2
1.2. Espectro de rayos cósmicos en función de la energía cinética de la partícula primaria medido por distintos experimentos. Se puede observar que el espectro a partir de energías superiores a $\sim 10^9\text{ eV}$ sigue una ley de potencias bastante uniforme, con tan sólo pequeñas variaciones. Extraído de [8]	3
1.3. Espectro de rayos cósmicos ampliado. Se pueden observar las regiones en el espectro de energía donde ocurren pequeños cambios en el índice espectral. Extraído de [9]	4
1.4. Ejemplo de cascada atmosférica extendida y sus características más importantes: distribución longitudinal y lateral. Extraída de [11].	6
1.5. Esquema del desarrollo de una cascada atmosférica extendida. Un rayo cósmico primario interactúa con el núcleo de una molécula atmosférica, resultando en una cascada de partículas que se dividen en tres canales: el hadrónico, el piónico / muónico y el electromagnético. Adaptada de [12].	7
2.1. Mapa con la ubicación de los detectores del Observatorio Pierre Auger. En este se encuentran resaltados las posiciones de los diferentes detectores que posee el Observatorio.	10
2.2. Esquema de los componentes principales de una estación del detector de superficie en el campo.	11
2.3. Edificio de fluorescencia "Los Morados". En su interior se encuentran seis telescopios cubriendo un campo de observación que va de $\sim 1,7^\circ$ hasta $\sim 30,3^\circ$ en elevación y 180° en azimut.	13
2.4. A la izquierda se puede observar una fotografía de uno de los 24 telescopios que conforman el detector de FD. A la derecha se observa un esquema del telescopio.	14
2.5. Fotografía del telescopio HEAT en el cerro Coihueco.	15

2.6.	Mapa del sitio donde se encuentra AMIGA. Los puntos rojos son las posiciones de las estaciones que conforman el arreglo de ingeniería. Los puntos azules son las estaciones que llevarán asociado un contador de muones. Los puntos anteriores son las estaciones que conforman el <i>infill</i> . Los puntos violeta son las estaciones del arreglo principal del SD perimetrales al <i>infill</i> . El punto naranja indica la posición del edificio de FD del cerro Coihueco y la extensión HEAT. Las líneas verdes representan las proyecciones a nivel del suelo del campo de observación del FD y las líneas negras son las del detector HEAT. . . .	16
2.7.	Instalación de tres módulos contadores de muones en una posición del <i>infill</i> . Se puede observar en el centro de cada módulo el tubo de acceso a la electrónica.	16
2.8.	Fotografía de una posición del arreglo de ingeniería. Se puede observar un tanque detector del SD y los cuatro tubos de acceso de los módulos contadores de muones asociado a éste.	17
2.9.	Esquema de las siete posiciones de la UC. Se encuentra resaltada la posición 1764 llamada <i>Kathy Turner</i>	18
3.1.	Vista ampliada de un SiPM modelo S12572-100C de la empresa Hamamatsu. Se puede observar el arreglo de celdas idénticas de forma cuadrada.	19
3.2.	Circuito equivalente de un SiPM. Cada celda está constituida por un fotodiodo de avalancha (APD) trabajando en modo Geiger con un resistor (R_Q) en serie.	20
3.3.	Esquema de la Juntura p-n y campo eléctrico en un APD. Extraída de [29].	21
3.4.	Modelo eléctrico equivalente aproximado de una sola celda.	21
3.5.	Pulso de corriente teórico que se produce en el disparo de una celda. Extraída de [29].	23
3.6.	Una ilustración de las diversas maneras en que los fotones secundarios se pueden propagar a celdas vecinas produciendo <i>crosstalk</i> óptico. Extraída de [32].	25
4.1.	Esquema de una posición del <i>infill</i> . Se pueden observar 4 módulos contadores de muones (30 m^2 totales) asociados a una estación del SD. Los módulos contadores de muones se encuentran dispuestos en forma de "L" para minimizar posibles errores sistemáticos producto del arribo de muones altamente inclinados.	27
4.2.	Vista interna de un módulo en donde se aprecian las barras centelladoras, las fibras ópticas que salen de ellas dirigiéndose al adaptador óptico del módulo.	28

4.3. En la fotografía de la izquierda se puede observar el proceso de pulido de las fibras ópticas. En la fotografía de la derecha se puede observar el adaptador óptico pulido.	29
4.4. Fotografía de dos módulos contadores de muones de 10 m^2 fabricados en el laboratorio de mecánica del Instituto de Tecnología en Detección y Astropartículas (ITeDA). Se puede observar que ambos módulos poseen apliques de telgopor que le brindan de una protección adicional contra las rocas que se utilizarán para el blindaje.	30
4.5. Superposición de 5000 trazas (tensión en función del tiempo) de cuentas oscuras de cada modelo de SiPM bajo prueba. Todas las mediciones fueron realizadas con el mismo amplificador y a una temperatura de 25°C . El valor de sobretensión se ajustó al valor recomendado por el fabricante.	31
4.6. Esquema interno del ASIC CITIROC.	35
4.7. Circuito esquemático del conformador de señal FSB.	36
4.8. Ejemplo de la reducción temporal de los pulsos de una señal para mejorar la resolución de pulsos consecutivos.	36
4.9. Función de corrección de la fuente de alta tensión C11204-01.	37
4.10. Esquema de la electrónica de pre-producción.	39
4.11. Dibujo mecánico del arreglo de SiPMs modelo S13361-2050NE-08 SPL.	40
4.12. Fotografía de la placa que contiene el arreglo de 64 SiPMs utilizada en el sistema de detección del contador de muones de AMIGA.	40
4.13. Fotografías de las celdas internas de un pixel del arreglo de SiPMs S13361-2050NE-08 SPL. A la izquierda se encuentra una ampliación de 20 veces y a la derecha una ampliación de 50 veces. Las celdas de los SiPMs del arreglo son de $50\ \mu\text{m}$ de lado.	41
4.14. Fotografía de la placa del <i>front-end</i> del sistema de detección de los contadores de AMIGA.	42
4.15. Fotografía de la placa del <i>back-end</i> del sistema de detección de los contadores de AMIGA.	43
5.1. Medición de la frecuencia de pulsos digitales de un SiPM en función del valor del nivel de discriminación impuesto por el <i>10-bit DAC</i> . El valor DC_{level} corresponde a la componente de tensión continua presente a la entrada del discriminador introducida por el <i>fast shaper</i> . Se encuentran indicadas las regiones de los <i>plateau</i> , como así el valor D_{max}	47
5.2. Valor absoluto de la derivada de la función de supervivencia en la región de la transición del primer al segundo <i>plateau</i> . En rojo se observa el ajuste gaussiano de los puntos, del cual se obtiene el valor D_{max}	47
5.3. Comportamiento ideal de la ganancia de un SiPM en función de la tensión de polarización V_{BIAS}	48

5.4.	Medición de la tensión media del pico del PE para cuatro SiPMs en función de la tensión V_{BIAS} .	49
5.5.	Medición de la tasa de pulsos digitales de un SiPM para diferentes niveles de discriminación del DAC <i>10-bit DAC</i> . La curva en rojo es la medición en la cual el SiPM estaba acoplado al detector y la azul cuando el SiPM no se encontraba acoplado al detector. Ambas mediciones fueron realizadas a 25°C y con $\Delta V = 3,75\text{ V}$.	52
6.1.	Disposición de fibras en el adaptador óptico y ubicación de los centelladores en el interior del perfil estructural rectangular de aluminio del instrumento de medición <i>PIPA</i> .	56
6.2.	A la izquierda se muestra una fotografía del extremo de la <i>PIPA</i> en donde se encuentra el adaptador óptico y en donde se coloca la electrónica a medir. A la derecha se muestra una fotografía del extremo contrario de la <i>PIPA</i> con su tapa descubierta para poder observar el interior del perfil.	56
6.3.	A la izquierda se muestra una fotografía de los dos detectores de centelleo utilizados en el telescopio de muones. Se pueden observar los conectores del tipo SMB utilizados para la polarización del SiPM y su salida de señal. También se encuentra el conector para el sensor de temperatura interno. A la derecha se muestra una fotografía de la estructura de soporte en forma de C del telescopio de muones.	58
6.4.	Fotografía del telescopio de muones montado en el instrumento de medición <i>PIPA</i> .	58
6.5.	Esquema de la electrónica.	59
6.6.	Fotografía del Kit de desarrollo del ASIC CITIROC.	60
6.7.	Fotografía del soporte de POM con los cuatro SiPMs S13081-050CS. Este posee las dos espinas metálicas de alineación con el adaptador óptico. En la parte inferior se observa al sensor de temperatura LM94021 utilizado para la medición de la temperatura de los SiPMs bajo prueba.	61
6.8.	Superposición de las trazas (tensión en función del tiempo) de los pulsos del SiPM amplificados de 1000 disparos generados por eventos de muones. Las mediciones se realizaron a una temperatura de 25°C y $\Delta V = 3,75\text{ V}$.	62
6.9.	Número medio de fotones detectados por el impacto de un muon en el detector en función de la distancia de fibra, para dos sobretensiones: $\Delta V = 3\text{ V}$ y $\Delta V = 3,75\text{ V}$. El valor medio de fotones detectados por el fotodetector producto del impacto de una partícula no es uniforme a lo largo del detector debido a la atenuación de la fibra óptica. Las barras de error sólo se deben a errores estadísticos de la media. Todas las mediciones fueron realizadas a 25°C .	62

- 6.10. Ambos gráficos muestran el histograma de ancho temporal de 1000 trazas de pulsos digitales a la salida del discriminador del CITIROC. Las barras de color rojo corresponden a las trazas que no tienen un pulso a la salida digital. En el histograma izquierdo (derecha) el telescopio de muones se colocó a 430 cm (130 cm) de fibra. Todas las mediciones fueron realizadas a 25°C. 63
- 6.11. Medición de eficiencia para dos ΔV diferentes. El valor estimado de la eficiencia integrada es: 97 % para $\Delta V = 3 V$ (puntos rojos) y 98 % para $\Delta V = 3,75 V$ (puntos azules). Las líneas verticales representan errores estadísticos suponiendo una distribución binomial y los corchetes representan los errores sistemáticos causados por los falsos disparos del telescopio de muones. 64
- 6.12. Eficiencia en función del ancho temporal mínimo del pulso digital a la salida del discriminador del CITIROC. 65
- 6.13. Ambos gráficos muestran el histograma de ancho temporal de 1000 trazas de pulsos digitales adquiridos con el FPGA a 320 MHz. En el histograma izquierdo (derecha) el telescopio de muones se colocó a 480 cm (180 cm) de fibra. Todas las mediciones fueron realizadas a 25°C. 66
- 6.14. Medición de la eficiencia para los tres canales con centellador del instrumento PIPA a una distancia de 4,8 m en función de la variación del nivel de discriminación entorno al nivel de 2,5 PE calculado. El valor de sobretensión durante la medición fue de $\Delta V = 3,5 V$ 67
- 6.15. Eficiencia del canal 2 de las 8 electrónicas instaladas en la posición KT de la UC. Todas las electrónicas se configuraron con un $\Delta V = 3,5 V$ y el nivel de discriminación en 3,5 PE. 68
- 6.16. Probabilidad de sobre-conteo por radiación de fondo en una ventana temporal de $1 \mu s$ en función de la variación del nivel de discriminación entorno al nivel de 2,5 PE calculado. 69
- 6.17. Medición de la distribución de la diferencia temporal de las señales que deja una misma partícula al atravesar dos centelladores apilados para dos distancias de fibra diferentes. 70
- 7.1. La fotografía de la izquierda muestra al adaptador óptico de un módulo contador de muones y la fotografía de la derecha muestra la instalación de la placa con el arreglo de 64 SiPMs en el módulo. 71
- 7.2. La fotografía de la izquierda muestra la instalación de la placa del *front-end* y la de la derecha la instalación del *back-end* y cableado final del módulo. 71
- 7.3. La fotografía de la izquierda muestra el cerramiento del recinto donde se encuentra la electrónica del módulo contador. La fotografía de la derecha muestra la colocación de los bloques de poliestireno expandido. 72

7.4. La fotografía de la izquierda muestra el relleno del tubo de acceso con las bolsas de tierra. La fotografía de la derecha muestra el tubo de acceso con su tapa exterior.	72
7.5. Esquema de los 8 módulos contadores de muones instalados en la estación de SD <i>Kathy Turner</i>	73
7.6. Valores medio del pico de un PE para cada canal de la electrónica del módulo 108 de <i>Kathy Turner</i> en función de la tensión configurada de la fuente de alta tensión. A la izquierda se encuentran los valores obtenidos para los 32 canales del CITIROC 1 y a la derecha los obtenidos para los 32 canales del CITIROC 2.	73
7.7. Histograma de los valores de las tensiones de ruptura virtuales de los 64 SiPMs de la electrónica 108 de <i>Kathy Turner</i>	74
7.8. Medición de la tasa de pulsos en función del valor del nivel de discriminación de la electrónica 108. A la izquierda se puede observar las 64 curvas de cada canal para el intervalo de interés de los valores del nivel de discriminación. En azul se encuentran graficados los canales correspondientes al CITIROC 1 y en rojo los correspondientes al CITIROC 2. A la derecha se encuentran graficadas las curvas de los valores medios obtenidos para cada CITIROC, en azul el CITIROC 1 y en rojo el CITIROC 2.	74
7.9. La gráfica azul corresponde al período 2016-10-28 al 2016-11-06 cuya posición de disparo fue colocada en el bin 1024. La gráfica roja corresponde al período 2016-12-02 al 2016-12-08 cuya posición de disparo fue colocada en el bin 1648.	76
7.10. El gráfico de la izquierda es la medición de la tasa de pulsos totales adquirida por la electrónica del módulo contador de muones 108 de la posición de SD <i>Kathy Turner</i> para el período 2017-02-16 al 2017-03-08 con el nivel de discriminación en 3,5 PE. A la derecha se encuentra la medición de la temperatura del arreglo de SiPMs de dicha electrónica para el mismo período.	77
7.11. El gráfico de la izquierda indica la medición de la tasa de pulsos totales adquirida por la electrónica del módulo contador de muones 108 de la posición de SD <i>Kathy Turner</i> para el período 2017-04-09 al 2017-04-29 con el nivel de discriminación en 2,5 PE. A la derecha se encuentra la medición de la temperatura del arreglo de SiPMs de dicha electrónica para el mismo período.	78
7.12. Coeficiente de correlación entre la temperatura del SiPM y $TP_{rad\ amb}$ calculada para diferentes valores de la constante A	79
7.13. Tasa de pulsos $TP_{rad\ amb}$ obtenida con el método descripto.	80
7.14. Gráfico de tasa de pulsos térmicos al nivel de 2,5 PE y de la probabilidad de sobre-conteo por pulsos térmicos en función de la temperatura para la electrónica del módulo 108 de la estación de SD de <i>Kathy Turner</i>	81

- 7.15. Espectrograma de los 64 canales de la electrónica del módulo 103 de la estación de *SD Kathy Turner*. 82
- 7.16. Histogramas de la cantidad de unos por cada bin temporal de 3,125 ns. A la izquierda los datos del MD no se encuentran sincronizados con el SD y la derecha los datos se encuentran sincronizados. 84
- 7.17. Número de muones contados por el módulo m108 de 10 m² en función del número de muones contados por el módulo m106 de 5 m² para cada evento del período 01-04-2017 al 31-06-2017. En línea punteada se encuentra la relación entre la sumatoria de los números totales de muones contados por cada módulo. 87
- 7.18. Número de muones contados por el MC del lado sur del detector de superficie *Kathy Turner* en función del número de muones contados por el MC del lado norte para cada evento del período 01-04-2017 al 31-06-2017. En línea punteada se encuentra la relación entre la sumatoria de los números totales de muones contados por cada MC. 88
- 7.19. Tasa de pulsos promedio para los 32 canales del CITIROC N°2 del módulo 101 de la posición de *SD Kathy Turner*. En azul se encuentra la medición realizada a 25,5 °C el 22-10-2016 y en rojo la misma medición realiza a 30,8 °C el 13-12-2017. 90
- 8.1. En rojo se encuentra la medición de la tasa de pulsos promedio por canal cuando la electrónica del módulo 102 de la estación de *Phill Collins* no se encontraba acoplada al detector, en azul se encuentra la medición de la tasa de pulsos promedio por canal cuando la electrónica se encontraba acoplada al detector. Se puede observar los valores de la tasa de pulsos para los niveles 0,5, 1,5 y 2,5 PE de ambas mediciones. 97

Índice de cuadros

4.1. Características principales, obtenidas de las hojas de datos de Hamamatsu, de los tres modelos de SiPM bajo prueba: S12571-100C [43], S12572-100C [44] and S13081-050CS.	32
4.2. Características principales, obtenidas de las hojas de datos de Hamamatsu, del arreglo de 64 SiPMs utilizado en AMIGA: S13361-2050NE-08 SPL.	41
6.1. Resultados de la medición de eficiencia para diferentes valores de sobretensión y nivel de discriminación para tres canales de la electrónica bajo prueba a una distancia de 4,8 m de fibra.	67
7.1. Valores de configuración de los niveles de discriminación (10-bit DAC) para las 8 electrónicas instaladas en <i>Kathy Turner</i> para dos niveles diferentes de discriminación (2,5 PE y 3,5 PE).	75
7.2. Valores de <i>crosstalk</i> medio de las ocho electrónicas instaladas en los módulos de la estación de SD <i>Kathy Turner</i>	75
7.3. Probabilidad de sobre-conteo por fondo para una ventana temporal de $1 \mu\text{s}$ para los 8 detectores instalados en la estación de SD <i>Kathy Turner</i> para el período 2017-04-09 al 2017-04-29. El nivel de discriminación se encontraba en 2,5 PE.	80
7.4. Probabilidad de sobre-conteo por fondo para una ventana temporal de $1 \mu\text{s}$ para los 8 detectores instalados en la estación de SD <i>Kathy Turner</i> para el período 2017-02-16 al 2017-03-08. El nivel de discriminación se encontraba en 3,5 PE.	81
7.5. Recuento total de los muones detectados por el contador de muones para el período 01-01-2017 al 31-03-2017.	85
7.6. Relación entre los detectores, utilizando para el conteo de muones la sincronización de los datos con el SD en conjunto con el recorte de la ventana temporal y aplicando la corrección por <i>pile-up</i> para el período 01-01-2017 al 31-03-2017.	86
7.7. Recuento total de los muones detectados por el contador de muones para el período 01-04-2017 al 31-06-2017.	86

- 7.8. Relación entre los detectores utilizando para el conteo de muones la sincronización de los datos con el SD, en conjunto con el recorte de la ventana temporal y aplicando la corrección por *pile-up* para el período 01-04-2017 al 31-06-2017. 87
- 7.9. Valores de configuración de los CITIROCs de las ocho electrónicas de los módulos contadores de muones de *Kathy Turner* para que el nivel de discriminación se encuentre en 2,5 PE. Estos valores fueron obtenidos a partir de los datos de dos calibraciones diferentes, una realizada al momento de la instalación de la electrónica y la otra un año y tres meses después. 89

Lista de acrónimos

AMIGA	A uger M uon and I nfill for the G round A rray
PMT	P hoto M ultiplier T ube
SiPM	S ilicon P hoto M ultiplier
UHECR	U ltra H igh E nergy C osmic R ays
CMBR	C osmic M icrowave B ackground R adiation
KASCADE	K arlsruhe S hower C ore and A rray D etector
EAS	E xtensive A ir S hower
SD	S urface D etector
FD	F luorescence D etector
LS	L ocal S tation
HEAT	H igh E levation A uger T elescope
ADC	A nalog to D igital C onverter
FPGA	F ield P rogrammable G ate A rray
CDAS	C entral D ata A cquisition S ystem
GPS	G lobal P ositioning S ystem
TH	T hreshold T rigger
ToT	T ime over T hreshold
MoPS	M ultiplicity of P ositive S tep T rigger
ToTd	T ime over T hreshold d econvolved
MD	M uon D etector
MC	M uon C ounter
WLS	W avelength S hifting
UC	U nitary C ell
APD	A valanche P hotodiode
PDE	P hoton D etection E fficiency
PVC	P olicloruro de V inilo
ITeDA	I nstituto de T ecnología en D etección y A stropartículas
ASIC	A pplication S pecific I ntegrated C ircuit
CITIROC	C herencov I maging T elescope I ntegrated R ead O ut C hip
DAC	D igital to A nalog C onverter
RAM	R andom A ccess M emory
LPDDR	L ow P ower D ouble D ata R ate
UDP	U ser D atagram P rotocol
PCB	P rinted C ircuit B oard
ESTEC	E uropean S pace R esearch and T echnology C entre

ESA	European Space Agency
PE	Photon Equivalent
FWHM	Full Width Half Maximum

Dedicado a mi familia.

Capítulo 1

Rayos Cósmicos

1.1. Introducción

Probablemente el origen del estudio de los rayos cósmicos se encuentre en las investigaciones del físico francés Charles Agustin Coulomb, quien en 1785 realizó tres publicaciones sobre electricidad y magnetismo en la *France's Royal Academy of Sciences*. En su tercer trabajo describió un experimento con una balanza de torsión, en el cual mostró que el dispositivo se descargaba de forma espontánea. Coulomb asoció este efecto a la acción del aire en lugar del aislamiento defectuoso.

A fines del siglo XIX comenzó el estudio de la ionización del aire. Fue el físico británico Charles T. R. Wilson, quien observó que sin importar cuán bien aislados estuvieran sus electroscopios de fuentes de radiación, éstos se descargaban. Wilson dedujo que la causa de este efecto era debido a la radiactividad natural de la Tierra.

Theodor Wulf planteó la hipótesis de que si la radiación provenía de la Tierra, esta debía decrecer con la altura. Esto lo llevó a realizar mediciones en la torre Eiffel en 1910 con la finalidad de medir la tasa de ionización a diferentes altitudes. Tras realizar las mediciones encontró que el conteo disminuía aproximadamente a la mitad, cuando lo esperado a 330 m de altura era que la radiación sea prácticamente despreciable, refutando así la suposición de la radiación natural de la Tierra como única fuente del fenómeno estudiado [1].

En 1911 y 1912 el físico austriaco Victor Hess realizó una serie de vuelos en globo para medir la radiación en la atmósfera. Descubrió que los niveles de radiación se mantenían prácticamente constantes hasta 1100 m de altura y comenzaban a aumentar significativamente por encima de los 2000 m. Este estudio sentó la primera evidencia de que la radiación ingresaba a la atmósfera terrestre desde el espacio. El 7 abril de 1912 realizó un ascenso a 5300 m de altura durante un eclipse solar. Observó que la ionización de la atmósfera no se reducía durante el eclipse, concluyendo que la radiación no provenía del sol, sino que debía provenir de más lejos en el espacio [2]. A este tipo de radiación el físico estadounidense R. A. Millikan le dio el nombre de "rayos cósmicos".

En 1938, el f3sico franc3s Pierre Victor Auger not3 que dos contadores Geiger-M3ller separados varios metros uno del otro detectaban el arribo de part3culas exactamente al mismo tiempo. Esta observaci3n le permiti3 a Auger proponer la existencia de cascadas extendidas de part3culas subat3micas secundarias [3] que se produc3an por la colisi3n del rayo c3smico primario con las mol3culas de aire de la atm3sfera. La medici3n de la cascada de part3culas secundarias tambi3n permiti3 una primera estimaci3n de la energ3a de las part3culas primarias, llegando a observarse cascadas con energ3as superiores a 10^{15} eV.

En la figura 1.1 se aprecia la regi3n central de una cascada similar a alguna de las que pudo haber observado Auger en sus experimentos pioneros, obtenida en un detector de descarga de 35 m^2 montado en la Universidad de Leeds en Inglaterra [4]. Es importante observar que la densidad de puntos disminuye conforme aumenta la distancia de la regi3n central de la cascada, caracterizada por la mayor densidad de part3culas. Al mismo tiempo, el tama3o de los puntos aumenta, lo cual constituye un claro indicador de la dispersi3n lateral de las part3culas en la cascada.

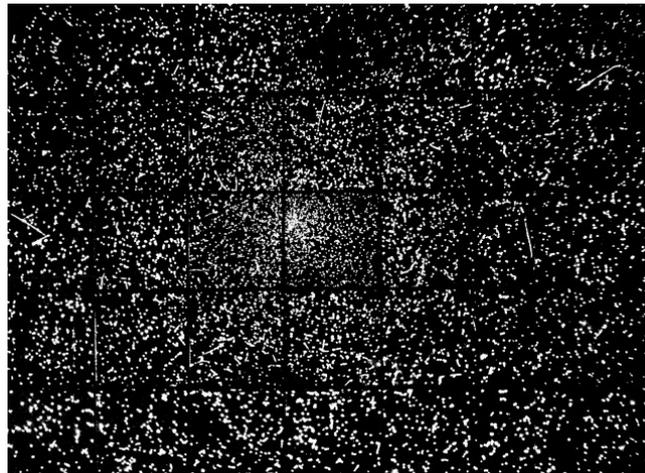


FIGURA 1.1: Fotograf3a de la regi3n central de una cascada atmosf3rica extendida de un rayo c3smico casi vertical, detectada por el arreglo de c3maras de descarga de $7 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ de la universidad de Leeds. Se puede observar que cerca del centro de la fotograf3a la densidad de part3culas secundarias es mayor. A medida que aumenta la distancia a ese punto, la densidad de part3culas disminuye.

A partir de la d3cada del '50 comenzaron a construirse observatorios de rayos c3smicos compuestos por arreglos de detectores a cierta distancia uno de otro, lo que permiti3 extender el estudio de part3culas primarias con energ3as superiores a 10^{18} eV. A partir de estas energ3as, los rayos c3smicos se denominan "Rayos C3smicos de Ultra Alta Energ3a" (UHECR por sus siglas en ingl3s *Ultra High Energy Cosmic Rays*). Adem3s de la energ3a, con estos experimentos se comenz3 a estudiar la direcci3n de arribo del rayo c3smico primario y su composici3n qu3mica.

En 1965, Penzias y Wilson [5] descubrieron la radiaci3n c3smica de fondo de microondas (CMBR por sus siglas en ingl3s *Cosmic Microwave Background Radiation*) y una de sus consecuencias te3ricas fue la predici3n, por parte de Greisen [6] y, de manera independiente, Kuz'min y Zatsepin [7], del llamado "corte GZK" que

corresponde a una drástica disminución del flujo de rayos cósmicos para energías superiores a 5×10^{19} eV. Sin embargo, distintos experimentos (Yakutsk en Rusia, Haverah Park en el Reino Unido, AGASA 4 en Japón y Fly's Eye en EE. UU.) habían observado muchos eventos con energías superiores al corte GZK, es decir, mayores a 10^{20} eV y, en total, unos 1300 con 10^{19} eV. La aparente contradicción entre estas observaciones y la predicción GZK fue una motivación para la construcción del Observatorio Pierre Auger.

Actualmente los Observatorios Pierre Auger y Telescope Array son los observatorios híbridos modernos y de referencia en la escala energética de los UHECR.

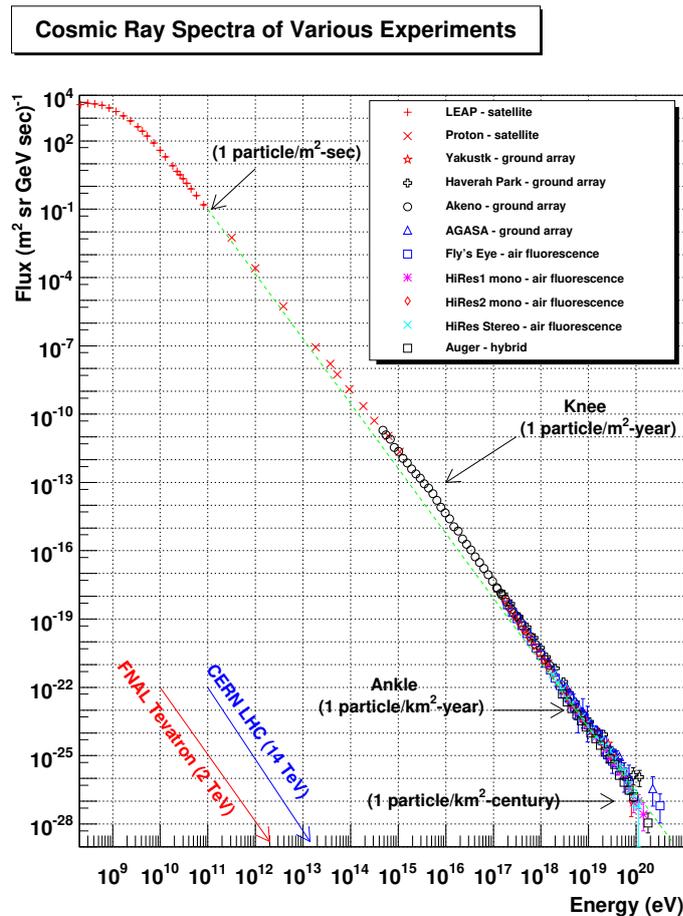


FIGURA 1.2: Espectro de rayos cósmicos en función de la energía cinética de la partícula primaria medido por distintos experimentos. Se puede observar que el espectro a partir de energías superiores a $\sim 10^9$ eV sigue una ley de potencias bastante uniforme, con tan sólo pequeñas variaciones. Extraído de [8]

1.2. Espectro de Energía

Uno de los resultados más importantes en el estudio de los rayos cósmicos es su espectro de energía, el cual consiste en la medición del flujo de rayos cósmicos en función de la energía (ver figura 1.2). Abarca más de 15 órdenes de magnitud, desde 10^5 eV para partículas del viento solar hasta más de 10^{20} eV. El flujo de rayos

c3smicos sigue una ley de potencias inversa

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\gamma}, \quad (1.1)$$

donde γ es el 3ndice espectral, el cual presenta leves variaciones en distintos intervalos del espectro.

El espectro de rayos c3smicos que podemos medir desde la Tierra es el resultante de la convoluci3n del espectro de energ3a de las part3culas primarias al crearse en las fuentes y las alteraciones que sufren en su propagaci3n por el espacio.

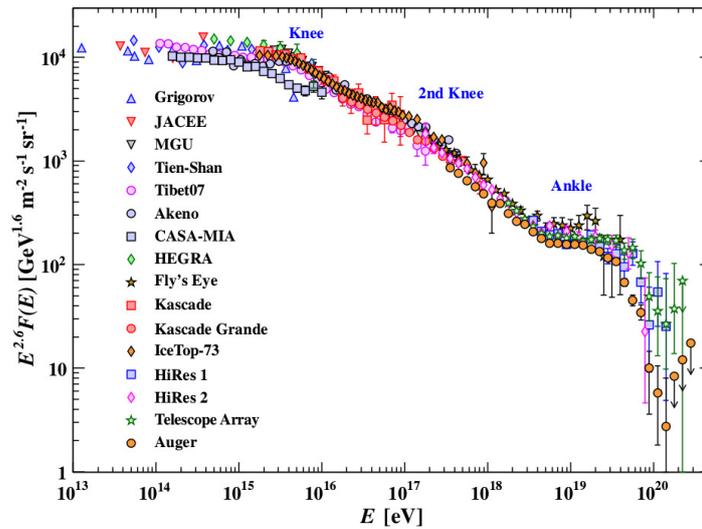


FIGURA 1.3: Espectro de rayos c3smicos ampliado. Se pueden observar las regiones en el espectro de energ3a donde ocurren peque1os cambios en el 3ndice espectral. Extra3do de [9]

Es notable que para energ3as superiores a $\sim 10^9$ eV el valor del 3ndice espectral es aproximadamente 3 por casi 10 3rdenes de magnitud de energ3a, con tan s3lo peque1as variaciones. En la figura 1.3 se puede observar 4 regiones en el espectro de energ3a donde ocurren peque1os cambios en el 3ndice espectral. La primera regi3n ocurre entre 10^{15} y 10^{16} eV y es llamada "rodilla" (en ingl3s *knee*). El cambio de la pendiente, a este valor de energ3a, se debe a la p3rdida de eficiencia en acelerar n3cleos livianos (protones) en remanentes de supernovas. Al decaer el flujo de protones se produce un cambio gradual en la composici3n del rayo c3smico de livianos a pesados a medida que aumenta la energ3a. Este cambio de la composici3n del rayo c3smico primario en esta regi3n fue estudiado por el experimento Karlsruhe Shower Core and Array Detector (KASCADE) [10]. El segundo cambio en el espectro ocurre a los $\sim 10^{17}$ eV y es conocido como "segunda rodilla" (en ingl3s *second knee*). Hasta el momento la interpretaci3n f3sica de este cambio en la pendiente no es clara. Podr3a deberse tanto a la culminaci3n de la componente gal3ctica de los rayos c3smicos, como al apilamiento producto de la creaci3n de pares en los procesos de interacci3n de los protones con la CMBR durante su propagaci3n por el medio intergal3ctico, o una combinaci3n de ambos efectos. Al tercer cambio se le da el nombre de "tobillo"

(en inglés *ankle*) y ocurre a $\sim 10^{18,6}$ eV. Finalmente, a los $\sim 10^{19,6}$ eV se encuentra la supresión del flujo. Todos estos leves cambios del índice espectral son objeto de estudios para diferentes observatorios de UHECR.

1.3. Cascadas Atmosféricas Extendidas

Por debajo de $\sim 10^{14}$ eV el flujo de partículas es suficientemente alto como para dar lugar al estudio de rayos cósmicos en forma directa, utilizando detectores transportados por globos o satélites. A energías más altas, donde el flujo comienza a caer a algunas partículas por metro cuadrado por día y en donde el primario no puede ser absorbido totalmente por un detector, se deben realizar mediciones indirectas mediante el estudio de la cascada de partículas secundarias generadas por el rayo cósmico primario al interactuar con los átomos de la atmósfera. Estas cascadas de partículas también son conocidas como “cascadas atmosféricas extendidas” (EAS por sus siglas en inglés *Extensive Air Shower*). Estas pueden ser detectadas mediante la observación de la fluorescencia de los átomos de nitrógeno atmosférico cuando interactúan con las partículas secundarias cargadas de los rayos cósmicos o por la detección de las partículas de las cascadas que llegan hasta el nivel del suelo.

Las partículas secundarias adquieren cantidad de movimiento transversal y también sufren dispersión Coulombiana, motivo por el cual estas partículas no se propagan en la dirección de incidencia del rayo cósmico primario, esto origina el desarrollo lateral de las cascadas. La mayoría de las partículas secundarias producidas son piones y kaones, aunque bariones y antibariones también son producidos pero en menor cantidad. Estas partículas pueden volver a interactuar con los átomos de la atmósfera y así producir nuevas partículas secundarias. Algunas de estas partículas secundarias, como por ejemplo los piones y kaones, son inestables y por lo tanto pueden decaer. Si el camino libre medio correspondiente a la interacción con la atmósfera es menor que la longitud de decaimiento, el proceso de interacción domina frente al decaimiento y viceversa. Las partículas secundarias interactúan o decaen al propagarse a través de la atmósfera, desarrollándose de esta manera la cascada de partículas que avanza en dirección a la superficie de la tierra.

El proceso continua hasta que la energía promedio de las partículas alcanza la energía crítica E_c . Para electrones o positrones, E_c es la energía por debajo de la cual la pérdida de energía dominante es por ionización en lugar de radiación de frenado. En el caso de fotones, E_c es la energía donde la dispersión por Compton predomina por sobre la creación de pares.

Cuando las partículas alcanzan la energía crítica ($E(X) = E_c$) no se crean más partículas y se cumple que la cantidad máxima de partículas es igual a:

$$N_{max} = N(X_{max}) = \frac{E_0}{E_c} = 2^{X_{max}/\lambda}, \quad (1.2)$$

donde X_{max} es la profundidad atmosférica para la cual se alcanza el número máximo de partículas N_{max} , λ es el camino libre medio y E_0 es la energía de la partícula primaria. Despejando X_{max} se obtiene:

$$X_{max} = \lambda \cdot \frac{\ln(\frac{E_0}{E_c})}{\ln 2} \quad (1.3)$$

De las ecuaciones 1.2 y 1.3 se puede inferir que el número máximo de partículas es proporcional a la energía del rayo cósmico primario ($N_{max} \propto E_0$) y que la profundidad atmosférica para la cual se alcanza el número máximo de partículas es proporcional al logaritmo de la energía de éste ($X_{max} \propto \ln(E_0)$).

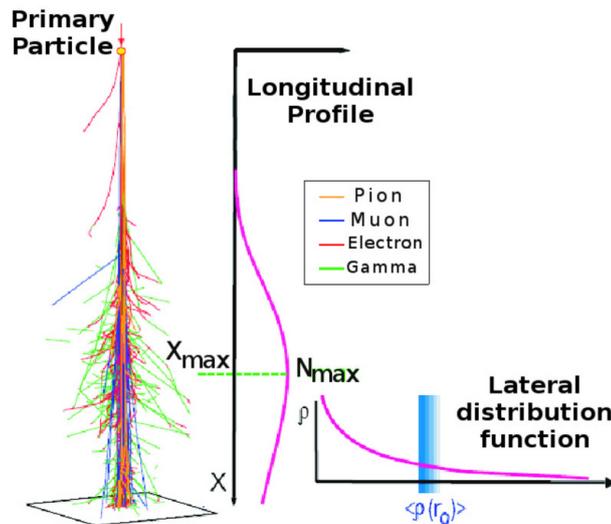


FIGURA 1.4: Ejemplo de cascada atmosférica extendida y sus características más importantes: distribución longitudinal y lateral. Extraída de [11].

En términos generales se puede pensar en las EAS como extensos discos de partículas (que según la energía del primario pueden tener radios de hasta varios kilómetros) de algunos metros de espesor, ligeramente curvados (aplanándose a medida que avanzan en el aire), que se propagan con una dirección principal dada por la dirección de la partícula primaria con una velocidad próxima a la de la luz. La descripción de la cascada se logra especificando la cantidad de partículas según su profundidad en la atmósfera (perfil longitudinal) y por la distribución radial con respecto al eje de la cascada (perfil lateral) al nivel de observación (ver figura 1.4).

Las cascadas iniciadas por nucleones o núcleos pueden dividirse en tres canales: el electromagnético, el muónico y el hadrónico. En la figura 1.5 se puede observar un esquema de las interacciones que ocurren en una EAS.

Las cascadas iniciadas por fotones sólo poseen una componente importante, la electromagnética. Cuando la primera interacción es hadrónica, el número de hadrones se va incrementando a partir de las siguientes generaciones de partículas producidas. En cada generación, aproximadamente el 30 % de la energía es transferida a la componente electromagnética de la cascada a partir del rápido decaimiento de los piones neutros en fotones. Aproximadamente el 90 % de la energía del primario

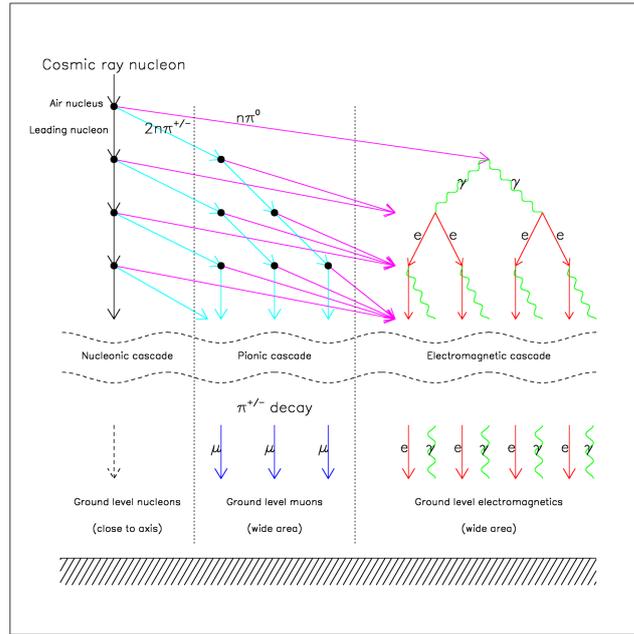


FIGURA 1.5: Esquema del desarrollo de una cascada atmosférica extendida. Un rayo cósmico primario interactúa con el núcleo de una molécula atmosférica, resultando en una cascada de partículas que se dividen en tres canales: el hadrónico, el piónico / muónico y el electromagnético. Adaptada de [12].

es disipada en el canal electromagnético a través de procesos de ionización. Es por este motivo que el estudio de este canal permite aproximar el valor de la energía del rayo cósmico incidente. La energía restante es transferida a muones y neutrinos a partir del decaimiento de piones cargados y kaones cargados. La mayor parte de estos muones consigue llegar a la superficie antes de decaer en electrones y neutrinos, y sólo pierden una pequeña fracción de su energía por ionización. Se puede deducir que la cantidad de muones que arribarán a la superficie (N_{μ}^A) en una EAS será proporcional a:

$$N_{\mu}^A \propto A^{1-\alpha} \cdot E_0^{\alpha} \quad (1.4)$$

$$\alpha = \frac{\ln(n_{\text{partículas cargadas}})}{\ln(n_{\text{partículas totales}})},$$

donde A es el número másico del núcleo de la partícula primaria, E_0 es la energía de la partícula primaria y α un factor que depende de la energía del primario y puede valer entre 0,82 y 0,95.

Es por este motivo que el estudio de la componente muónica de la EAS permite discriminar la composición química del primario [13].

Capítulo 2

Observatorio Pierre Auger

2.1. Introducción

El Observatorio Pierre Auger [12, 14] se encuentra emplazado en el hemisferio sur, en el departamento de Malargüe y San Rafael, provincia de Mendoza, República Argentina. Fue concebido para determinar la naturaleza, energía y lugar de origen de los rayos cósmicos con energías superiores a 10^{18} eV hasta las energías más altas. Para la detección de rayos cósmicos se utiliza una técnica híbrida formada por dos métodos independientes y complementarios de detección. Por un lado, detecta las partículas que llegan al nivel del suelo y, por otro, la fluorescencia emitida por el nitrógeno atmosférico. Debido a que el flujo de rayos cósmicos para energías mayores a 10^{20} eV es del orden de una por kilómetro cuadrado por siglo, es necesario que los detectores se extiendan sobre una gran superficie. Es por este motivo que el Observatorio Pierre Auger tiene una extensión de ~ 3000 km², lo que lo convierte en el Observatorio más extenso del planeta (ver figura 2.1).

Las partículas de la cascada atmosférica que llegan al nivel del suelo son registradas mediante ~ 1600 detectores de radiación Cherenkov, posicionados a distancias regulares entre sí de 1,5 km, que forman el denominado arreglo de superficie SD [15]. La fluorescencia atmosférica es registrada utilizando 24 telescopios ópticos posicionados en grupos de seis en cuatro puntos perimetrales del arreglo de superficie, formando el denominado detector de fluorescencia FD [16]. Por lo tanto el detector SD es el encargado de medir la distribución lateral de la cascada y el detector FD es el encargado de medir el perfil longitudinal de la misma.

2.2. Detector de Superficie

El detector de superficie o SD tiene como objetivo principal la medición de la distribución lateral de la cascada. Está formado por detectores de radiación Cherenkov posicionados sobre un arreglo con geometría triangular, separados 1500 m entre sí.

Cada uno de estos detectores está formado por un tanque cilíndrico de polietileno de 3,6 m de diámetro y 1,6 m de altura (ver figura 2.2). En su interior se encuentra una bolsa sellada, cuya superficie interna es altamente reflectante y difusora. Esta bolsa es rellena hasta una altura de 1,2 m con 12000 litros de agua ultra pura. Tres

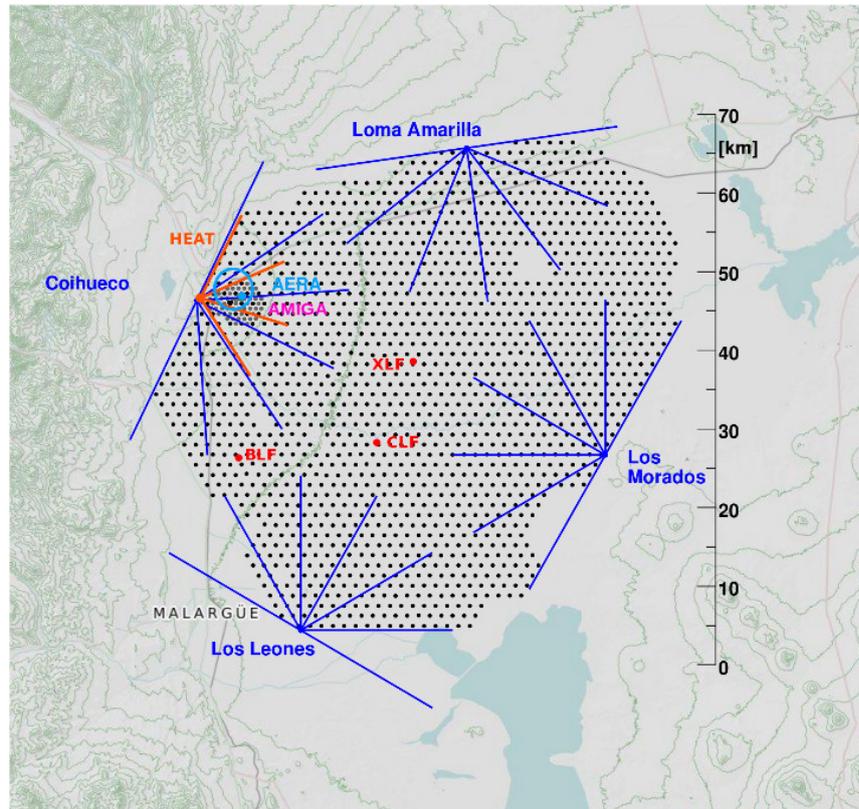


FIGURA 2.1: Mapa con la ubicación de los detectores del Observatorio Pierre Auger. En este se encuentran resaltados las posiciones de los diferentes detectores que posee el Observatorio.

tubos fotomultiplicadores (PMT) XP1805/D1 manufacturados por Photonis se encuentran alojados en la parte superior de la bolsa mirando al interior de la misma a través de ventanas transparentes. Cada PMT se encuentra a 1,2 m del centro del tanque y distribuidos de forma simétrica. Estos PMTs son los encargados de captar la luz Cherenkov producida por las partículas cargadas que pasan a través del agua y convertirla en pulsos de corriente. Cada tanque posee una electrónica asociada llamada *local station* (LS) que se encarga de la adquisición y procesamiento de las señales producidas por los PMTs.

Por cada PMT se obtienen dos señales analógicas, una de alta ganancia y otra de baja ganancia. La señal de baja ganancia se extrae directamente del ánodo del PMT. La señal de alta ganancia se extrae del último dínodo del PMT y luego es amplificada ~ 40 veces para obtener una relación entre las señales de alta y baja ganancia de 32 veces. Las seis señales provenientes de los tres PMTs son muestreadas y digitalizadas con un conversor analógico-digital (ADC) de alta velocidad de 10 bits a una frecuencia de 40 MHz. Las mediciones de baja y alta ganancia permiten extender el rango dinámico a 15 bits, lo cual es necesario para poder realizar la calibración con partículas individuales y a la vez detectar grandes cantidades de partículas cuando el eje de la cascada se encuentra cercano al detector. Estas señales digitales son adquiridas por un FPGA (del inglés *Field Programmable Gate Array*), el cual tiene implementada

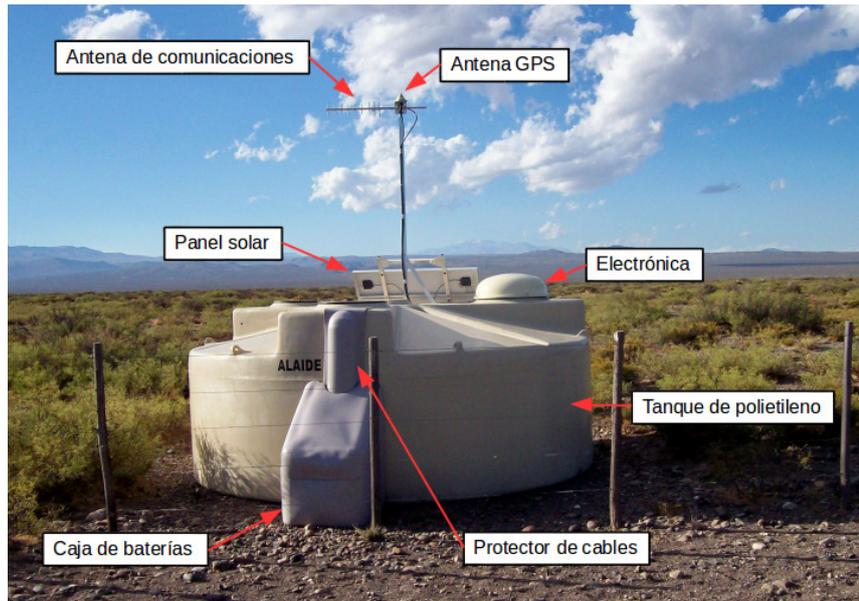


FIGURA 2.2: Esquema de los componentes principales de una estación del detector de superficie en el campo.

la lógica para generar el disparo y la adquisición de los eventos. La electrónica de acondicionamiento de la señal, el ADC de alta velocidad y el FPGA forman parte de lo que se denomina como *front-end* de la electrónica de la estación de SD.

La LS posee una unidad de control, formada por un microprocesador Power PC 403GCX de 80 Mhz, que se encarga de ejecutar los programas de calibración y adquisición del SD. Esta electrónica se encuentra conectada a una radio, mediante la cual se comunica con el sistema de adquisición central (CDAS por sus siglas en inglés *Central Data Acquisition System*). Este sistema se encarga de realizar la adquisición de datos, la configuración del detector y la actualización del software tanto del FPGA como de la computadora local.

Para realizar la sincronización entre las estaciones del SD, cada una se encuentra dotada con un módulo GPS. Éste, además de proporcionar la ubicación del tanque, genera un pulso por segundo que le permite determinar los tiempos de disparo con una precisión de 8 ns.

La alimentación de cada detector es provista por un sistema de paneles solares y baterías.

2.2.1. Niveles de Disparo del Detector de Superficie

Dado que no es posible el almacenado de la totalidad de los datos que son generados por los tanques del SD, el detector implementa un sistema de disparo para almacenar únicamente los datos de posibles cascadas atmosféricas de interés científico [17]. Este sistema de disparo posee un esquema jerárquico, separado en tres niveles.

El primer nivel de disparo es el T1 y se produce de forma local en cada detector del SD. Este disparo se implementa a nivel de hardware (dentro del FPGA) y es

el que decide cuándo serán almacenados los potenciales eventos de interés para la física. Cada uno de estos disparos tiene un tiempo asociado llamado *timestamp*. Este nivel se forma por la sumatoria de tres componentes:

- *Threshold Trigger* (TH): Se produce cuando los tres PMTs superan simultáneamente 1,75 veces el pico de la señal producida por la de un muón (I_{VEM}) durante un bin temporal (25 ns). Este disparo es el más común y tiene una frecuencia aproximada de 100 Hz.
- *Time over Threshold* (ToT): Se produce cuando al menos dos PMTs superan $0,2 \times I_{VEM}$ durante 13 bins (325 ns) en una ventana de 120 bins (3000 ns). Este disparo tiene una frecuencia aproximada de 1,2 Hz.
- *Multiplicity of Positive Step Trigger* (MoPS) y *Time over Threshold deconvolved* (ToTd): Estos tipos de disparo fueron diseñados para minimizar la influencia de los muones y se basan en el disparo ToT. La reducción de la influencia de los muones en el disparo permite reducir el nivel de energía de detección del arreglo y la mejora de la eficiencia de la detección de disparos producidos por cascadas generadas por fotones y neutrinos.

El segundo nivel de disparo es el T2. Este nivel de disparo se produce por software de forma local en cada estación del SD. En este nivel se seleccionan los eventos con mayor probabilidad de pertenecer a un evento de interés. Aproximadamente uno de cada cinco T1 se convierten en T2. Todos los eventos del tipo ToT, ToTd y MoPS son promovidos a T2. Solo los eventos del tipo TH que superan un nivel de disparo de los tres PMTs de forma simultánea de $3,2 \times I_{VEM}$ son promovidos a T2. La frecuencia de disparos T2 es aproximadamente de 23 Hz.

Con los *timestamp* de cada evento de los disparos T2 se genera una lista, que es enviada una vez por segundo al CDAS. Este realiza una búsqueda de patrones geométricos de los tanques que produjeron T2 dentro de una ventana temporal de $30 \mu s$. Al encontrar un patrón, el CDAS envía una petición de los datos del evento en cuestión a los tanques que participaron. Este pedido de datos es el tercer nivel de disparo o T3 y debe ser generado en pocos segundos, debido a que los tanques del SD pueden almacenar aproximadamente 20 s de datos (2048 eventos a 100 Hz).

Una vez recibidos los datos de los tanques, estos son almacenados en el CDAS de forma permanente para su posterior selección y análisis.

2.3. Detector de Fluorescencia

El detector de fluorescencia o FD está constituido por 24 telescopios que se encuentran distribuidos en grupos de seis en cuatro edificios localizados en puntos perimetrales del arreglo de los SD (ver figura 2.3). Este detector es el encargado de medir el desarrollo longitudinal de la cascada. De sus observaciones se puede obtener información sobre la dirección de arribo del rayo cósmico, la profundidad

atmosférica a la que se genera el máximo número de partículas (X_{max}) de la cascada y una mejor estimación de la energía del rayo cósmico.



FIGURA 2.3: Edificio de fluorescencia "Los Morados". En su interior se encuentran seis telescopios cubriendo un campo de observación que va de $\sim 1,7^\circ$ hasta $\sim 30,3^\circ$ en elevación y 180° en azimut.

Los telescopios miden la luz ultravioleta emitida por las moléculas de nitrógeno de la atmósfera cuando son excitadas por las partículas cargadas de la cascada atmosférica. Su funcionamiento está limitado a las noches con condiciones atmosféricas favorables y con reducida iluminación de la luna. Es por este motivo que el ciclo de operación del FD es del 13 % del tiempo.

El campo de visión de cada telescopio cubre $28,6^\circ$ en elevación y 30° en azimut. Cada instalación, formada por seis telescopios, tienen un campo de observación que va de $\sim 1,7^\circ$ hasta $\sim 30,3^\circ$ en elevación y 180° en azimut.

Cada telescopio (ver figura 2.4) está formado por un espejo de $\sim 13\text{ m}^2$ y una cámara compuesta por 440 PMTs hexagonales Photonis XP3062. Cada PMT tiene una apertura angular de $1,5^\circ$. La señal de cada PMT es digitalizada a una frecuencia de 100 MHz y 15 bits de resolución.

2.4. Expansión del Observatorio Pierre Auger

Las regiones donde se encuentran los cambios del índice espectral conocidas como segunda rodilla y tobillo se cree que están vinculadas a una transición en el origen de los rayos cósmicos de galácticos a extragalácticos. Para integrar esta región

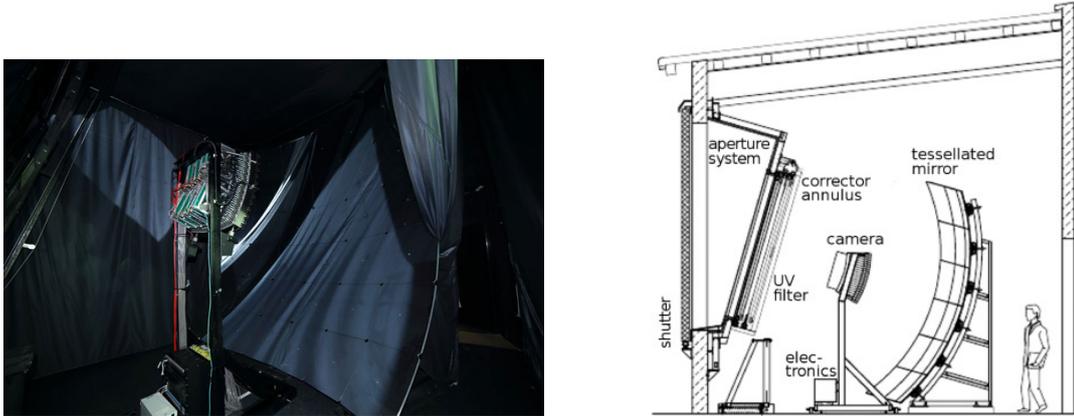


FIGURA 2.4: A la izquierda se puede observar una fotografía de uno de los 24 telescopios que conforman el detector de FD. A la derecha se observa un esquema del telescopio.

de estudio, la Colaboración Internacional del Observatorio Pierre Auger ha decidido modificar su diseño original y extender el rango de detección de energía a 10^{17} eV.

Al bajar la energía del primario, el X_{max} se encuentra en regiones de mayor altitud, por eso es que se ha decidido también extender el campo de visión del detector de fluorescencia en uno de los cuatro puntos perimetrales y de esta manera poder cubrir hasta $\sim 60^\circ$ de elevación. A esta extensión se la denomina HEAT [18, 19] (High Elevation Auger Telescopes).

Otra característica importante es que, a menor energía, menor es el área de impacto de las cascadas generadas. Es por esto que se ha decidido la instalación de un conjunto de estaciones en el SD con un espaciamiento menor, junto con contadores de muones que permitirán identificar cambios en la composición del primario. La extensión a menores energías del arreglo de superficie se denomina AMIGA [20] (Auger Muon and Infil for the Ground Array) y, junto con HEAT, posibilitarán mejorar la aceptación del Observatorio hasta energías de 10^{17} eV.

2.4.1. HEAT (High Elevation Auger Telescopes)

Este detector está formado por tres telescopios de fluorescencia de diseño similar a los telescopios del FD (ver figura 2.5). Se encuentran situados a 180 m en dirección noreste del edificio de FD en el cerro Coihueco. Tienen un campo de visión vertical de 28° , con dos posiciones posibles. Una posición que coincide con el campo de vista del FD para fines de calibración y otra que observa más elevado en la atmósfera ($30^\circ \times 58^\circ$). Esta segunda posición permite la detección de cascadas de menor energía, ya que estas se desarrollan más arriba en la atmósfera. Dado que la luz de fluorescencia que se produce en una cascada es proporcional a la energía del primario, este detector solo puede detectar cascadas cuyo punto de impacto es más cercano a la posición de los telescopios comparado con el FD.



FIGURA 2.5: Fotografía del telescopio HEAT en el cerro Coihueco.

2.4.2. AMIGA (Auger Muon and Infil for the Ground Array)

Los principales objetivos del proyecto AMIGA son la extensión del rango de detección del Observatorio Pierre Auger, para poder observar rayos cósmicos de energías más bajas de hasta 10^{17} eV, estudiar la transición de los rayos cósmicos de extragalácticos a galácticos y su composición química [21]. Para poder cumplir con estos objetivos se propuso la construcción de dos detectores llamados *infill* y *detector de muones*.

El *infill* es un arreglo de 69 estaciones idénticas a las del SD pero dispuestas cada 750 m, cubriendo un área de 25 km^2 . Este detector extiende el rango de observación del SD hasta $\sim 3 \times 10^{17}$ eV, una década por debajo del arreglo principal. A partir de simulaciones [22], se ha concluido que la distancia óptima a la que se debe hallar el centro del *infill* respecto de un edificio de fluorescencia es entre 6 km y 7 km [23]. Este detector ya se encuentra instalado en las cercanías del cerro Coihueco y operativo desde septiembre del 2011.

El *detector de muones* (MD por sus siglas en inglés *Muon Detector*) fue concebido para el estudio de la componente muónica de las cascadas atmosféricas extendidas. El número de muones producidos (N_μ) en una cascada es un parámetro sensible a la composición química del rayo cósmico primario. Por lo tanto, este detector permitirá estudiar la composición química de los rayos cósmicos de energías comprendidas entre la segunda rodilla y el tobillo. Importantes resultados en física de rayos cósmicos mediante técnicas de detección de muones han sido obtenidos previamente por experimentos como KASCADE [24] y KASCADE-Grande [25].

El MD está formado por un arreglo de contadores de muones (MC por sus siglas en inglés *Muon Counter*) de 30 m^2 localizados en cada una de las posiciones del *infill*. Cada MC está formado por módulos contadores de muones.

Los módulos contadores de muones son detectores de centelleo de forma rectangular con una superficie de 10 m^2 y 5 m^2 . Cada módulo se encuentra segmentado en

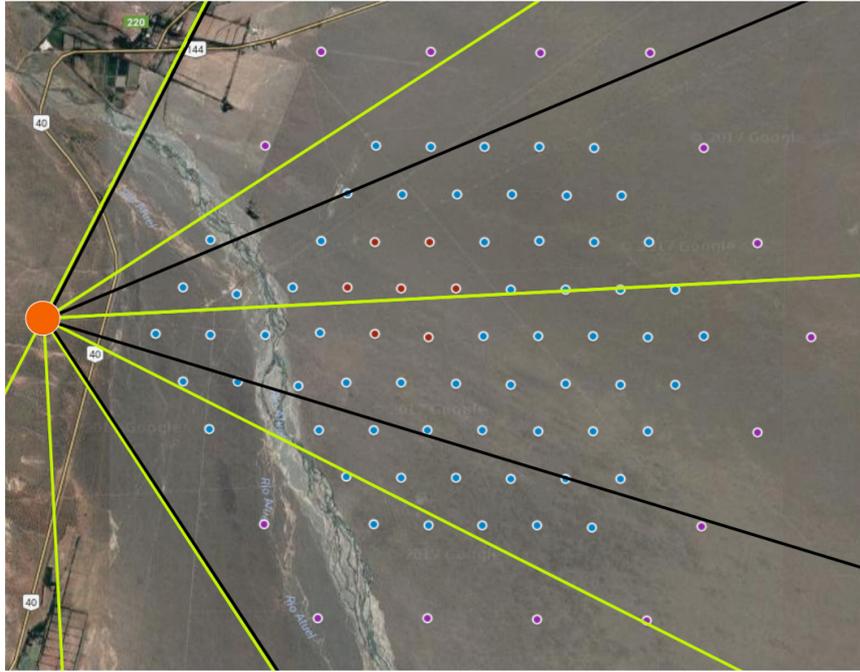


FIGURA 2.6: Mapa del sitio donde se encuentra AMIGA. Los puntos rojos son las posiciones de las estaciones que conforman el arreglo de ingeniería. Los puntos azules son las estaciones que llevarán asociado un contador de muones. Los puntos anteriores son las estaciones que conforman el *infill*. Los puntos violeta son las estaciones del arreglo principal del SD perimetrales al *infill*. El punto naranja indica la posición del edificio de FD del cerro Coihueco y la extensión HEAT. Las líneas verdes representan las proyecciones a nivel del suelo del campo de observación del FD y las líneas negras son las del detector HEAT.



FIGURA 2.7: Instalación de tres módulos contadores de muones en una posición del *infill*. Se puede observar en el centro de cada módulo el tubo de acceso a la electrónica.

64 canales, cuyos segmentos están formados por barras centelladoras de plástico extrudido. Las barras centelladoras poseen una ranura longitudinal en la cara superior, donde se acopla una fibra óptica WLS (por sus siglas en inglés *Wavelength Shifting*) [26]. El conjunto de 64 fibras se colectan en un adaptador óptico, donde se conecta el

fotodetector del módulo. Las señales generadas por este fotodetector son adecuadas por un *front-end* electrónico y adquiridas por un *back-end* para luego ser transmitidas al CDAS mediante un enlace de radio. El sistema de telecomunicaciones implementado consiste en un enlace de radio punto a multipunto diseñado para conectar 85 posiciones o subscriptores a dos coordinadores localizados en el edificio de FD del cerro Coihueco [27].



FIGURA 2.8: Fotografía de una posición del arreglo de ingeniería. Se puede observar un tanque detector del SD y los cuatro tubos de acceso de los módulos contadores de muones asociado a éste.

Los módulos se encuentran enterrados a $\sim 2,3$ m (ver figura 2.7). La tierra que se encuentra por encima de ellos provee el aislamiento necesario para blindar la componente electromagnética de las cascadas. Cada contador está asociado a un detector de superficie (ver figura 2.8), el cual es el encargado de proveer el *trigger* para la adquisición de datos.

En febrero de 2015 se finalizó la instalación de 37 módulos contadores de muones en siete posiciones del arreglo del *infill*. A este conjunto de módulos asociados con estaciones del SD se lo denomina celda unitaria (UC por sus siglas en inglés *Unitary Cell*). La UC es utilizada como arreglo de ingeniería, para investigación, desarrollo y estudio del comportamiento del detector. Cinco de las siete posiciones poseen cada una un contador de muones de 30 m^2 . Las otras dos tienen dos MC cada una, a los que se los denomina gemelos o *twins* en inglés. En la figura 2.9 se encuentra un esquema de las siete posiciones de la UC. El arreglo de *twins* tiene como objetivo la validación de forma experimental del contador de muones.

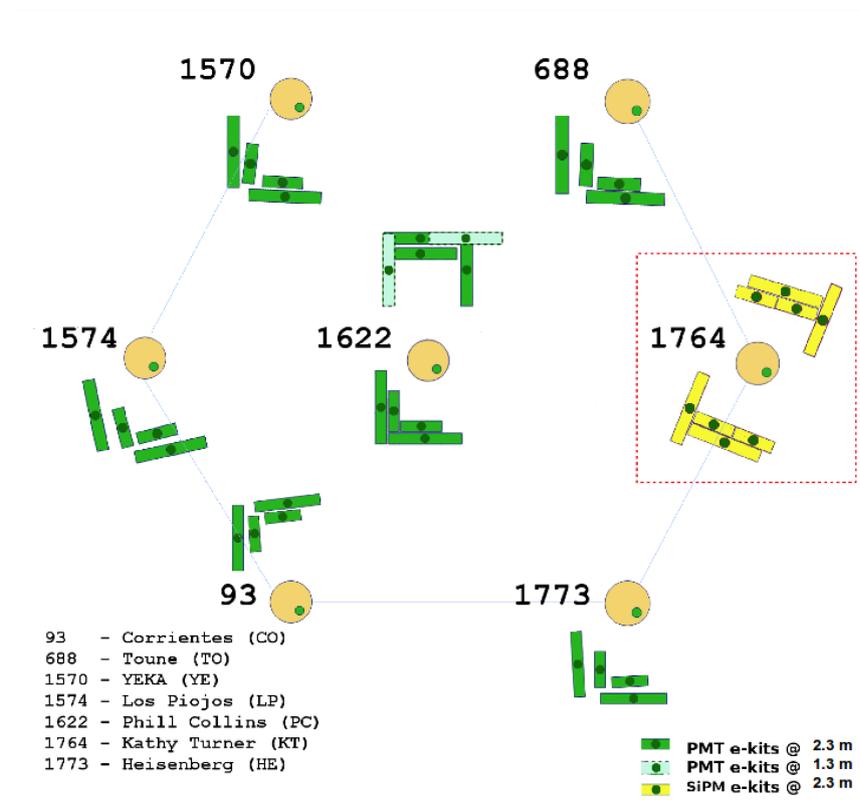


FIGURA 2.9: Esquema de las siete posiciones de la UC. Se encuentra resaltada la posición 1764 llamada *Kathy Turner*.

Capítulo 3

Fotomultiplicadores de Silicio

3.1. Introducción

El fotomultiplicador de silicio [28], también conocido como SiPM, es un fotodetector de estado sólido capaz de detectar fotones individuales. Estos dispositivos operan a baja tensión y poseen una ganancia elevada, alta eficiencia de fotodetección, rápida respuesta, excelente resolución temporal y un amplio rango de respuesta espectral. También son inmunes a campos magnéticos, son mecánicamente robustos y no sufren degradación por exposición a luz intensa. Todas estas características los hacen aptos para el conteo de fotones y pueden ser utilizados en aplicaciones donde se desea detectar niveles de luz extremadamente bajos.

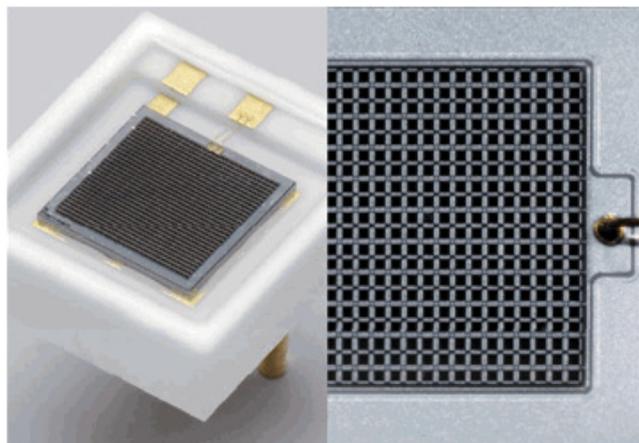


FIGURA 3.1: Vista ampliada de un SiPM modelo S12572-100C de la empresa Hamamatsu. Se puede observar el arreglo de celdas idénticas de forma cuadrada.

3.2. Principio de Operación

Cada SiPM [29] posee un pixel formado por un arreglo de celdas idénticas de forma cuadrada (ver figura 3.1), conectadas en paralelo. Cada celda está constituida por un fotodiodo de avalancha (APD) trabajando en modo Geiger con un resistor (R_Q) en serie (ver figura 3.2). Para que el SiPM funcione, debe ser polarizado en inversa, aplicando una tensión entre su ánodo y cátodo conocida como V_{BIAS} . Esta tensión debe ser mayor que la tensión de ruptura (V_{BR}) de las celdas

APD. La diferencia de tensión entre V_{BIAS} y V_{BR} es conocida como sobretensión ($\Delta V = V_{BIAS} - V_{BR}$) y es uno de los parámetros de operación principales de los SiPM.

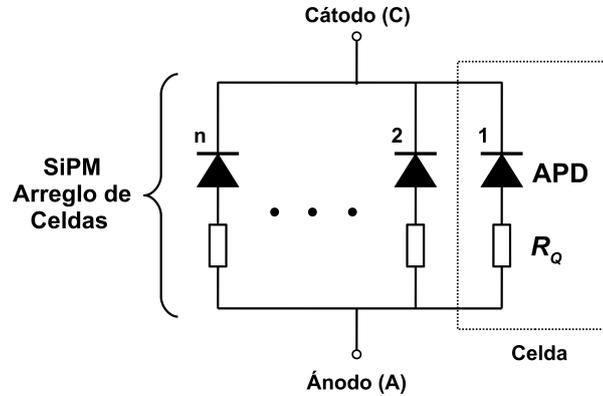


FIGURA 3.2: Circuito equivalente de un SiPM. Cada celda está constituida por un fotodiodo de avalancha (APD) trabajando en modo Geiger con un resistor (R_Q) en serie.

Los APD están formados por una juntura p-n, en la cual, al estar polarizada en inversa por la tensión V_{BIAS} , se crea una zona de deplexión [30], en la que aparece un campo eléctrico (ver figura 3.3). Cuando un fotón impacta y penetra en la celda APD, puede excitar a un electrón llevándolo a la banda de conducción y creando un par de portadores de carga electrón-hueco (e-h). Este fenómeno es conocido como efecto fotoeléctrico. El campo eléctrico separa al par portador de carga y envía al electrón o hueco a la zona de avalancha, en donde por ionización por impacto se inicia una corriente de avalancha. Esta corriente es sostenida en el tiempo hasta que se reduzca el campo eléctrico existente en la juntura. Dado que el APD se encuentra conectado en serie con una resistencia, la circulación de esta corriente genera una caída de tensión en la misma. Esta caída de tensión produce una reducción en la tensión aplicada al APD, lo que hace que el campo eléctrico existente en la juntura se reduzca, provocando que la probabilidad de ionización por impacto disminuya. Este efecto comienza a extinguir la corriente de avalancha.

La señal resultante es un pulso de corriente con un tiempo de subida del orden de ~ 1 ns, con un valor de pico proporcional a $\Delta V / R_Q$, y un tiempo de bajada del orden de las decenas de ns. Durante el tiempo de caída, la tensión aplicada a el APD aumenta alcanzando el valor previo al disparo del mismo, momento en el cual la avalancha es completamente extinguida. La señal resultante del disparo de una celda es conocida como fotón equivalente o por sus siglas en inglés *PE Photon Equivalent*. Una avalancha puede producir entre 10^5 y 10^6 pares e-h adicionales dependiendo del ΔV . La cantidad adicional de pares e-h es la ganancia (M) del dispositivo. Si dos o más fotones son absorbidos de forma simultánea por la celda APD, el pulso resultante es de la misma amplitud y duración que el PE. Si varias celdas APD absorben simultáneamente fotones, el pulso resultante es la superposición de

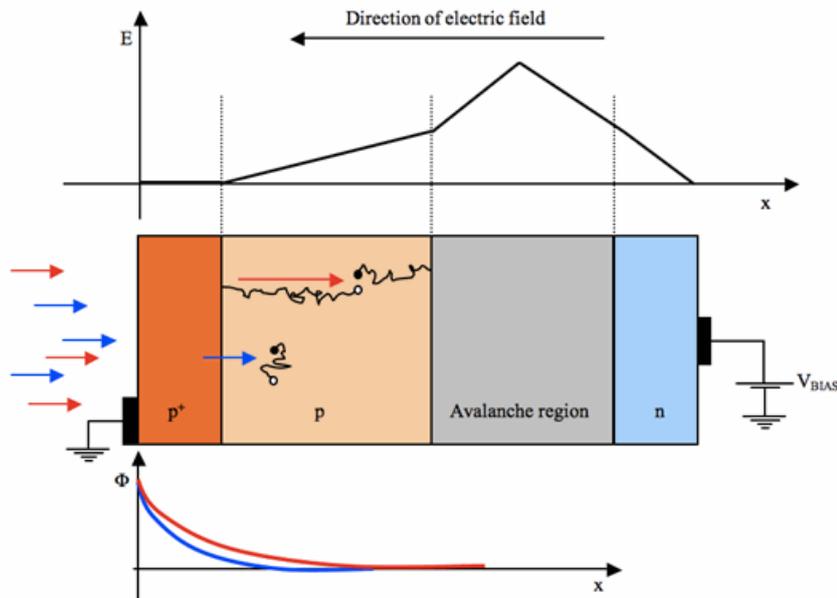


FIGURA 3.3: Esquema de la Juntura p-n y campo eléctrico en un APD. Extraída de [29].

los pulsos generados por cada celda. La carga del pulso es proporcional a la cantidad de disparos independientes de las celdas.

Una forma de modelar el proceso de disparo de una celda APD es utilizando un circuito eléctrico. En la figura 3.4 se puede observar un modelo eléctrico equivalente aproximado de una sola celda polarizada con una tensión V_{BIAS} . La tensión de polarización es levemente mayor a la tensión de ruptura V_{BR} del APD. En el tiempo previo al disparo de la celda, la capacidad de la juntura C_J se encuentra completamente cargada a la tensión V_{BIAS} , que también es la tensión V_{APD} aplicada a los terminales del diodo APD. Esta tensión es la que genera el campo eléctrico en la zona de depleción, que es lo suficientemente intenso como para generar una avalancha auto-sostenida.

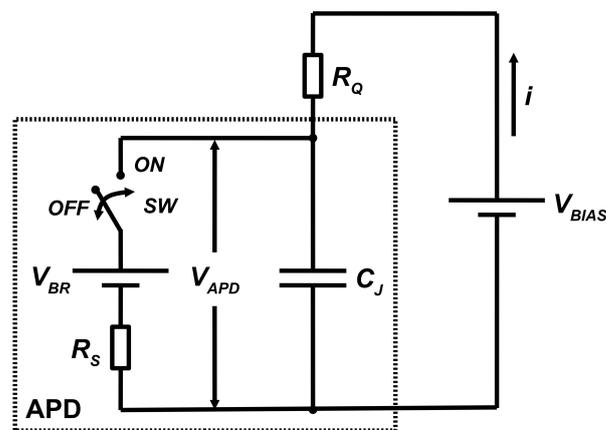


FIGURA 3.4: Modelo eléctrico equivalente aproximado de una sola celda.

En el momento que se inyecta un portador de carga en la zona de avalancha el

interruptor SW del circuito se cierra, pasando a la posición ON. En ese momento C_J comienza a descargarse a través del resistor R_S que representa la resistencia de la zona de deplexión (compuesta principalmente por plasma) en conjunto con la resistencia de las regiones neutras del APD. Analizando el circuito se puede deducir el valor de la corriente $i(t)$, la cual se encuentra expresada en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{1}{R_Q} \cdot (V_{BIAS} - V_{eq} - ((V_{BIAS} - V_{eq}) \cdot e^{(-\frac{t}{R_{eq} \cdot C_J})})) \quad (3.1) \\ V_{eq} &= \left(\frac{V_{BR}}{R_S} + \frac{V_{BIAS}}{R_Q} \right) \cdot (R_{eq}) \\ R_{eq} &= \frac{R_S \cdot R_Q}{R_S + R_Q}. \end{aligned}$$

Considerando que $R_Q \gg R_S$ y dado que V_{BIAS} es del mismo orden que V_{BR} , se puede deducir que el valor V_{eq} tiende a V_{BR} y R_{eq} tiende a R_S . Tomando estos valores se puede hacer una simplificación del valor de $i(t)$ que se muestra en la siguiente ecuación:

$$i(t) = \frac{\Delta V}{R_Q} \cdot (1 - e^{(-\frac{t}{R_S \cdot C_J})}). \quad (3.2)$$

Durante el tiempo de descarga de C_J la tensión V_{APD} disminuye con un tiempo característico $T_d \sim R_S \cdot C_J$. Esto produce que el campo eléctrico decrezca, llegando al punto en el cual no se logra mantener la avalancha. En este momento el interruptor se abre y pasa a la posición OFF. C_J comienza a cargarse hasta aproximadamente la tensión V_{BIAS} a través del resistor R_Q con un tiempo característico $T_c \sim R_Q \cdot C_J$. La corriente $i(t)$ durante el proceso de recarga de la celda se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$i(t) = \frac{\Delta V}{R_Q} \cdot e^{(-\frac{t}{R_Q \cdot C_J})}. \quad (3.3)$$

Una vez terminado el proceso de carga, la celda se encuentra apta para volver a ser disparada. Si durante el proceso de recarga de la celda se inyecta un portador de carga en la zona de avalancha, se generará un nuevo disparo de la celda, pero la carga generada será menor a la de un PE. La forma del pulso de corriente $i(t)$ que se produce en el disparo de una celda se puede observar en la figura 3.5.

La salida del sensor es una corriente fotoeléctrica y la carga total generada Q durante un evento está dada por

$$Q = N \cdot M \cdot q, \quad (3.4)$$

donde N es el número total de celdas disparadas, M es la ganancia del SiPM y q es la carga del electrón. La carga total es equivalente a la integral del pulso de corriente fotoeléctrica.

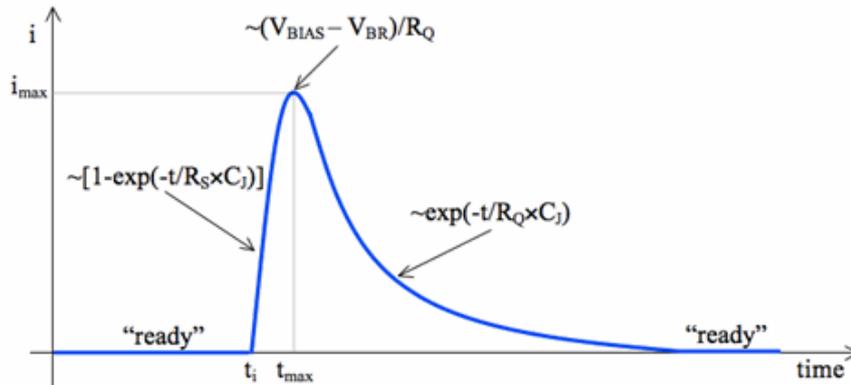


FIGURA 3.5: Pulso de corriente teórico que se produce en el disparo de una celda. Extraída de [29].

3.3. Características de los SiPMs

En esta sección se detallarán las principales características de los SiPMs [31] que tendrán que ser tenidas en cuenta para los análisis futuros de esta tesis.

3.3.1. Factor de Relleno (Fill Factor)

El factor de relleno hace referencia a la relación entre el área sensible del dispositivo y el área total del mismo. Debido a la estructura del SiPM, las celdas deben estar separadas de sus vecinas para realizar un aislamiento óptico y eléctrico. A su vez, es necesario destinar parte del área a la resistencia que se encuentra en serie con el APD y a las pistas de señal. Todas estas consideraciones llevan a que parte de la superficie del SiPM no sea sensible y por lo tanto a una reducción del factor de relleno.

3.3.2. Ganancia

La ganancia de un SiPM está definida como la cantidad de carga creada por cada fotón detectado. Cada celda genera una cantidad de carga uniforme y cuantificada cada vez que se genera una avalancha por la absorción de un fotón. La ganancia M se puede calcular a partir de la sobretensión ΔV , la capacidad de una celda C_J y la carga del electrón q ,

$$M = \frac{C_j \cdot \Delta V}{q}. \quad (3.5)$$

3.3.3. Eficiencia de Fotodetección

La eficiencia de fotodetección (PDE por sus siglas en inglés *Photon Detection Efficiency*), es una medida de la sensibilidad de un SiPM para detectar fotones. Este parámetro es dependiente de la longitud de onda de la luz incidente, el valor de sobretensión y el factor de relleno. El PDE es la probabilidad de que un fotón incidente

genere una avalancha y se define como:

$$\text{PDE} = \eta(\lambda) \cdot \varepsilon(V) \cdot F, \quad (3.6)$$

donde $\eta(\lambda)$ es la eficiencia cuántica del silicio, $\varepsilon(V)$ es la probabilidad de iniciación de una avalancha y F es el factor de relleno.

3.3.4. Cuentas Oscuras (Dark Counts)

Las cuentas oscuras son pulsos generados de forma espontánea en ausencia de luz. Estos disparos son el producto de la generación térmica de portadores e indistinguibles de los disparos resultantes de la absorción de un fotón. Este tipo de ruido entra en la clasificación de ruido no correlacionado ya que su generación no depende de la ocurrencia de un disparo previo. El número medio de cuentas oscuras por segundo se denomina tasa de cuentas oscuras o en inglés *dark count rate* y es un parámetro clave para definir el ruido del detector. La tasa de cuentas oscuras depende de factores como: la temperatura, la sobretensión, el tamaño del pixel y la calidad del material semiconductor.

3.3.5. Crosstalk

Durante el proceso de avalancha se generan fotones secundarios, los cuales pueden ser detectados por otras celdas del SiPM provocando su disparo. A este efecto se lo conoce como *crosstalk* óptico. Como una primera aproximación, se puede considerar que la avalancha secundaria ocurre de forma sincrónica en tiempo con la avalancha primaria, produciendo una señal resultante del apilamiento de las señales individuales de cada celda. Este tipo de ruido entra en la clasificación de ruido correlacionado ya que su generación depende de la ocurrencia de un disparo previo. La probabilidad de *crosstalk* es la probabilidad de que la avalancha en una celda produzca un avalancha en una segunda celda y se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$P_{\text{crosstalk}} = \frac{N_{1,5PE}}{N_{0,5PE}}. \quad (3.7)$$

En la figura 3.6 se pueden observar las tres formas en que los fotones secundarios pueden propagarse dentro del SiPM produciendo *crosstalk* óptico. Estas son: a) directamente de una celda a otra, b) los fotones pueden ser reflejados en la parte superior de la ventana del sensor (usualmente epoxi), o c) los fotones pueden ser reflejados en la parte inferior del sustrato de silicio.

La probabilidad de *crosstalk* depende del valor de sobre-tensión y se ve afectada por el factor de relleno del SiPM.

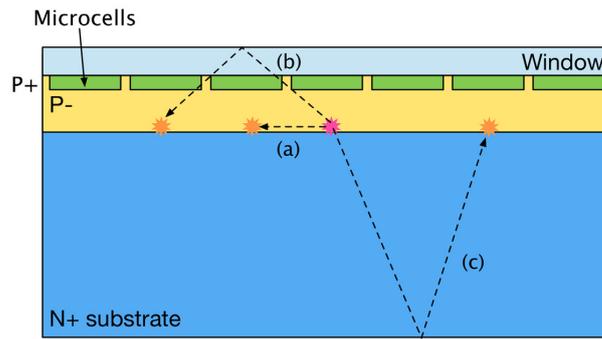


FIGURA 3.6: Una ilustración de las diversas maneras en que los fotones secundarios se pueden propagar a celdas vecinas produciendo *crosstalk* óptico. Extraída de [32].

3.3.6. Afterpulsing

Durante el proceso de avalancha portadores pueden quedar atrapados en defectos en el silicio. Luego de un determinado tiempo del orden de los ns , estos portadores atrapados se liberan, iniciando potencialmente una nueva avalancha en la misma celda. Si este efecto ocurre durante el proceso de recarga de la celda, el nuevo pulso generado será de menor amplitud que la del PE. Los pulsos secundarios producto de la liberación de portadores atrapados reciben el nombre en inglés de *afterpulse* y contribuyen al ruido de este tipo de sensor. Este tipo de ruido entra en la clasificación de ruido correlacionado ya que su generación depende de la ocurrencia de un disparo previo.

3.3.7. Linealidad y Rango Dinámico

La linealidad es la capacidad del sensor en proporcionar una corriente fotoeléctrica de salida que tenga una relación lineal con la cantidad de fotones incidentes.

La relación entre el número de fotones incidentes (N_{in}) y el número de celdas disparadas (N_{disp}) se puede predecir con las siguientes ecuaciones:

$$N_{disp} = N_{pixel} \cdot (1 - e^{(-\frac{PDE \cdot N_{in}}{N_{pixel}})}) | PW < T_{recarga}, \quad (3.8)$$

$$N_{disp} = \frac{N_{pixel} \cdot PW}{T_{recarga}} \cdot (1 - e^{(-\frac{PDE \cdot N_{in}}{N_{pixel} \cdot PW})}) | PW > T_{recarga}, \quad (3.9)$$

donde N_{pixel} es la cantidad de celdas que posee el pixel del SiPM, el PDE es la eficiencia de fotodetección, PW es el ancho del pulso de luz incidente y $T_{recupero}$ es el tiempo de recarga o recuperado de la celda del SiPM.

El rango dinámico se puede definir como el rango de señales ópticas que el sensor puede captar y generar una salida que pueda ser utilizada.

3.3.8. Dependencia con la Temperatura

En los SiPM hay dos parámetros primarios que dependen de la temperatura, los cuales son las cuentas oscuras y la tensión de ruptura. La tensión de ruptura varía de forma lineal con la temperatura y dado que varios parámetros importantes del SiPM (la ganancia, el PDE, la probabilidad de *crossstalk*, etc.) dependen del valor de esta tensión, se suele realizar una compensación, que puede ser un ajuste del valor de tensión de polarización proporcional a las variaciones de la temperatura ó el control de la temperatura para mantenerla constante. En el caso de las cuentas oscuras éstas tienen una dependencia dada por

$$N_{0,5PE} = A \cdot T^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-\left(\frac{E_g}{2 \cdot k \cdot T}\right)}, \quad (3.10)$$

donde T es la temperatura en grados Kelvin, A es una constante arbitraria, E_g es la energía de band gap en eV y k es la constante de Boltzmann.

Capítulo 4

Sistema Propuesto para los Contadores de Muones de AMIGA

4.1. El Contador de Muones de AMIGA

Como se mencionó en la subsección 2.4.2 los tanques del *infill* tendrán asociado un contador de muones de 30 m^2 . El diseño de los contadores de muones es modular, dado a que cada uno está formado por un conjunto de módulos contadores de muones de 10 m^2 y 5 m^2 . En el arreglo de ingeniería cada MC está formado por dos módulos de 10 m^2 y dos de 5 m^2 (ver figura 4.1). Para la fase de producción cada MC estará formado por tres módulos de 10 m^2 .

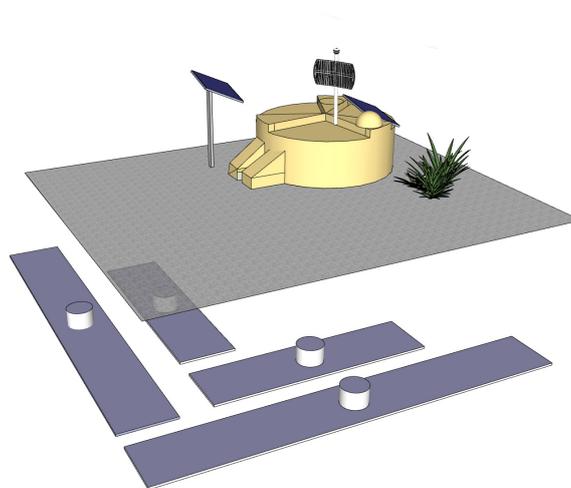


FIGURA 4.1: Esquema de una posición del *infill*. Se pueden observar 4 módulos contadores de muones (30 m^2 totales) asociados a una estación del SD. Los módulos contadores de muones se encuentran dispuestos en forma de "L" para minimizar posibles errores sistemáticos producto del arribo de muones altamente inclinados.

El objetivo de los módulos contadores de muones es poder contar la cantidad de partículas que impactan su área de detección durante una cascada atmosférica extendida. Cuando el flujo de partículas es bajo se optó por utilizar un método de conteo, que se basa en la identificación de partículas individuales. Cuando el flujo de partículas es elevado se optó por deconvolucionar el número de muones a partir de la integral de la señal generada por el fotodetector.

4.2. Diseño Mecánico del Módulo Contador de Muones

Cada módulo contador de muones [33] se encuentra segmentado en 64 segmentos formados por barras centelladoras. Estas barras se componen de una base de poliestireno de calidad comercial sin aditivos (Styron 663 W), dopadas con el 1 % del peso con PPO y con 0,03 % del peso con POPOP. Cada barra se encuentra coextrudida con una capa reflectora de 0,25 mm de espesor formada por poliestireno con 12 % de dióxido de titanio (TiO_2) [34]. Las barras centelladoras poseen una sección transversal de detección de 41 mm x 10 mm con una ranura de 2 mm de profundidad centrada en la parte superior sin el recubrimiento de TiO_2 . La longitud de los centelladores utilizados en el módulo de 10 m², es de 4 m y para los módulos de 5 m², es de 2 m.

Cuando una partícula cargada atraviesa el centellador, esta excita las moléculas principalmente de PPO las cuales emiten fotones en el rango de longitudes de onda ultravioleta. Estos fotones son absorbidos por las moléculas de POPOP las cuales re-emiten fotones en el rango de longitudes de onda visibles, cercano al violeta. Este proceso tiene una constante de tiempo muy corta, del orden de 1 ns. La longitud de atenuación de la luz producida por las barras centelladoras es de $\sim (55 \pm 5)$ mm (con el recubrimiento de TiO_2), es por este motivo que para poder dirigir la luz producida en el centellador al fotodetector es necesario la utilización de una fibra óptica del tipo WLS. Esta fibra óptica plástica es pegada con el cemento óptico BC-600 [35] en la ranura que posee el centellador. Luego la ranura es recubierta con una cinta de aluminio reflectante para minimizar la pérdida de fotones (ver figura 4.2).

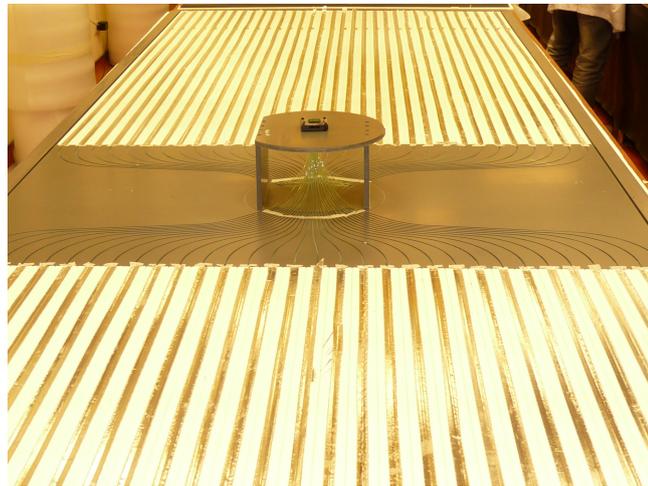


FIGURA 4.2: Vista interna de un módulo en donde se aprecian las barras centelladoras, las fibras ópticas que salen de ellas dirigiéndose al adaptador óptico del módulo.

El modelo de fibra óptica utilizada en AMIGA es la BCF-99-29AMC de Saint-Gobain [36], de 1,2 mm de diámetro. Este modelo tiene el mismo dopante que la BCF-92, pero con el doble de concentración. Esta fibra óptica es del tipo multi-recubrimiento, formada por un núcleo (*core*) de poliestireno con un índice de refracción $n_{co} \simeq 1,6$,

dopado con materiales fluorescentes y recubierto por dos capas. El primer recubrimiento es de polimetilmetacrilato con un índice de refracción de $n_{ci} \simeq 1,49$ y el segundo recubrimiento es de una resina de epoxi transparente con un índice de refracción de $n_{ce} \simeq 1,42$. Los fotones colectados por la fibra óptica excitan al material fluorescente que posee el *core* y este re-emite en una longitud de onda mayor con un tiempo de decaimiento de 3,5 ns. El pico del espectro de absorción se encuentra en 410 nm y el de emisión en 485 nm. La re-emisión de fotones en el interior de la fibra óptica es isotrópica y solo los fotones que tengan un ángulo comprendido en el cono de aceptación podrán propagarse en su interior. La mitad de estos fotones se propagarán en una dirección y la otra mitad en la contraria. La fibra utilizada posee dos constantes de atenuación, una es de $\sim (386 \pm 25)$ cm y la otra es de $\sim (3,3 \pm 1)$ cm [37].

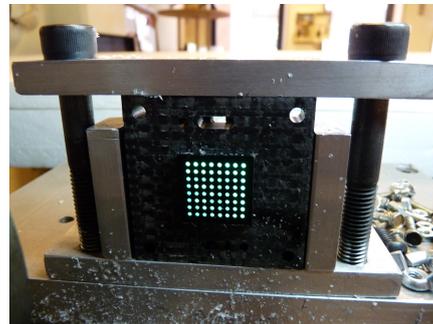


FIGURA 4.3: En la fotografía de la izquierda se puede observar el proceso de pulido de las fibras ópticas. En la fotografía de la derecha se puede observar el adaptador óptico pulido.

Uno de los extremos de la fibra óptica se corta a 45° y se pinta de negro para evitar reflexiones hacia el otro extremo. El otro extremo se coloca en un adaptador óptico (ver figura 4.3). A este adaptador llegan las fibras ópticas de los 64 centelladores y se colocan formando un arreglo de 8×8 . La separación entre fibras es de 2,3 mm y la superficie de acople con el fotodetector se encuentra pulida.

El módulo contador de muones posee un recubrimiento plástico de policloruro de vinilo (PVC) a prueba de agua (ver figura 4.4).

4.3. Actualización del Sistema de Detección

Las principales motivaciones para realizar el desarrollo de los contadores de muones con SiPM fueron reducir el costo tanto del dispositivo fotodetector como así de la electrónica asociada, reducir su consumo, debido a que todo el sistema es alimentado con paneles solares y aumentar la eficiencia de detección de partículas del detector. Además los SiPM tienen características distintivas como una muy buena definición del PE y mayor vida útil y robustez comparado con los tradicionales PMTs. A su vez, como sus píxeles son independientes, se puede suprimir el crosstalk entre canales. Este efecto es indeseado ya que puede introducir un error al momento de realizar el conteo de partículas.



FIGURA 4.4: Fotografía de dos módulos contadores de muones de 10 m^2 fabricados en el laboratorio de mecánica del Instituto de Tecnología en Detección y Astropartículas (ITeDA). Se puede observar que ambos módulos poseen apliques de telgopor que le brindan de una protección adicional contra las rocas que se utilizarán para el blindaje.

Para el desarrollo del sistema de detección se partió de las especificaciones básicas que restringen al diseño y funcionamiento del sistema de conteo y de la experiencia adquirida en el desarrollo del sistema de detección con PMT [38, 39].

La actualización del sistema de detección basado en SiPM de los contadores de muones de AMIGA se dividió en las siguientes cinco etapas:

- Selección del SiPM y de la electrónica de adquisición.
- Diseño y construcción del primer prototipo.
- Validación del primer prototipo.
- Diseño y construcción del prototipo de preproducción.
- Validación del prototipo de preproducción.

4.3.1. Especificaciones del Sistema de Detección

A continuación se mencionan las dos características principales del detector que restringen al sistema de detección.

- *Segmentación espacial del detector.* Ésta es la que limita la cantidad máxima de impactos de partículas que el detector puede detectar de forma simultánea. La segmentación espacial fue seleccionada en base a simulaciones [40], en las cuales se determinó que una segmentación de 192 segmentos cada 30 m^2 es suficiente para la física que se desea realizar con el detector. Es por este motivo que cada contador de muones estará formado por tres módulos de 10 m^2 con 64 segmentos cada uno.

- *Resolución temporal del conjunto barra centelladora y fibra óptica.* La resolución temporal es aquella que limita la capacidad del detector en resolver temporalmente impactos de partículas en un mismo segmento y está limitada por la distribución temporal de los fotones producidos por el impacto de una partícula. Esta distribución temporal está definida principalmente por el tiempo de decaimiento del centellador y el tiempo de decaimiento de la fibra óptica. Para el conjunto centellador y fibra que son utilizadas en los módulos de AMIGA, el ancho máximo de la distribución temporal de fotones se encuentra entre 25 y 35 ns [41].

4.3.2. Selección del SiPM

Para la selección del SiPM se tuvo en cuenta la maximización de la relación señal a ruido. Para el primer prototipo del sistema de detección se evaluaron tres modelos diferentes de SiPM de la empresa Hamamatsu, los cuales fueron: S12571-100C, S12572-100C y el S13081-050CS. Las características principales de los tres SiPM bajo prueba se encuentran en la tabla 4.1.

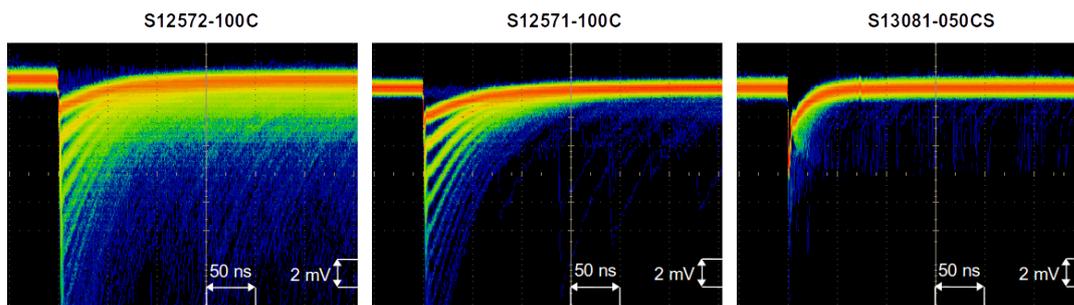


FIGURA 4.5: Superposición de 5000 trazas (tensión en función del tiempo) de cuentas oscuras de cada modelo de SiPM bajo prueba. Todas las mediciones fueron realizadas con el mismo amplificador y a una temperatura de 25°C. El valor de sobretensión se ajustó al valor recomendado por el fabricante.

Como se puede observar en la tabla 4.1 los SiPMs bajo prueba poseen similar eficiencia de fotodetección, por lo que los niveles de señal para los tres dispositivos serán similares. Por este motivo para la selección del SiPM se buscó la minimización del ruido. El ruido en los SiPM, como se vio en la sección 3, está formado por tres componentes: las cuentas oscuras, el crosstalk y el afterpulsing.

En la figura 4.5 se pueden observar tres gráficos formados por la superposición de 5000 trazas de cuentas oscuras de los modelos bajo prueba, en donde la escala de colores denota la cantidad de trazas superpuestas. El circuito de la etapa de amplificación utilizado posee una ganancia de ~ -17 veces y un ancho de banda de 1,2 GHz. Éste está formado por un amplificador inversor monolítico Gali 84+ [42]. Los pulsos fueron adquiridos con el osciloscopio Tektronix DPO 7104.

Idealmente los pulsos producto de la excitación térmica deberían tener la forma de un PE, pero en los gráficos se puede observar que los pulsos adquiridos pueden tener la forma de la superposición de más de un PE y además, luego de la ocurrencia

del primer pulso, existe la probabilidad de ocurrencia de un segundo pulso. Estos efectos son debido al crosstalk y afterpulsing de los SiPM respectivamente.

En el gráfico del primer modelo S12572-100C se puede observar que ambos efectos son muy notorios, esto es debido a que tanto la probabilidad de crosstalk como la de afterpulsing son elevadas. En el gráfico del segundo modelo S12571-100C se puede observar una reducción en la probabilidad de afterpulsing respecto al anterior modelo, pero este mantiene una probabilidad elevada (35 %) de crosstalk. En el gráfico del tercer modelo S13081-050CS se puede observar que el efecto de crosstalk es mínimo, del orden de 1 % y la cantidad de afterpulses también es reducida con respecto al modelo S12572-100C.

Parámetros	Modelo de SiPM			Unidad	
	S12572-100C	S12571-100C	S13081-050CS		
Dimensión de Celda	100	100	50	μm	
Área Fotosensible Efectiva	3 x 3	1 x 1	1,3 x 1,3	mm	
Factor de Relleno Geométrico	78,5	78	61	%	
Eficiencia de Fotodetección	35	35	35	%	
Número de Celdas	900	100	667	-	
Cuentas Oscuras	Típico	1000	100	90	kcps
	Máximo	2000	200	360	kcps
Ganancia M (a la tensión de operación)	$2,8 \times 10^6$	$2,8 \times 10^6$	$1,5 \times 10^6$	-	
Coeficiente de Ganancia por Temperatura	$1,2 \times 10^5$	$1,2 \times 10^5$	$2,7 \times 10^4$	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	
Tensión de Ruptura	65 ± 10	65 ± 10	53 ± 5	V	
Probabilidad de Crosstalk	35	35	1	%	
Coeficiente de Temperatura	60	60	54	$\text{mV}/^{\circ}\text{C}$	

CUADRO 4.1: Características principales, obtenidas de las hojas de datos de Hamamatsu, de los tres modelos de SiPM bajo prueba: S12571-100C [43], S12572-100C [44] and S13081-050CS.

Es decir, el modelo S12572-100C posee la mayor probabilidad de crosstalk y afterpulsing de los tres modelos bajo prueba. En el modelo S12571-100C se puede ver una reducción en la probabilidad de afterpulsing, pero debido al elevado crosstalk se pueden observar que las cuentas oscuras y los afterpulses pueden ser de varios PE. Para el modelo S13081-050CS se puede observar la mínima probabilidad de crosstalk y afterpulsing, teniendo de esta manera el menor ruido de los tres modelos bajo prueba. Es por este motivo que se decidió seleccionar al modelo S13081-050CS para el primer prototipo del sistema de detección.

4.3.3. Selección de la Electrónica de Adquisición

La electrónica propuesta para el sistema de adquisición se basó en la ya existente de AMIGA para PMTs. El esquema del sistema que se propuso divide a la electrónica en dos partes: el *front-end* y el *back-end*.

El *front-end* es el encargado del acondicionamiento y discriminación de las señales producidas por los SiPMs. El *back-end* es el encargado de la adquisición, almacenamiento y transmisión de los datos generados por el detector.

Para el diseño de la electrónica se consideraron las siguientes especificaciones:

1. Compatibilidad con el diseño mecánico existente del detector: la electrónica debe poder acoplarse con el adaptador óptico y poseer el sistema de alineación para que cada fibra óptica quede centrada con el pixel correspondiente.
2. Capacidad de identificar pulsos de luz de un ancho temporal máximo de 25 a 35 ns: este tiempo está impuesto por la distribución de luz que se genera en el conjunto centellador y fibra óptica en el detector.
3. La respuesta del sistema debe ser estable ante variaciones de la temperatura.
4. Bajo consumo eléctrico, debido a que el sistema es alimentado por un conjunto de paneles solares y baterías.
5. La salida de cada canal de SiPM debe ser una señal digital para permitir el conteo de partículas: el ancho temporal de esta salida no debe ser mayor que el ancho temporal máximo del pulso de luz producido en el detector para evitar la degradación de la resolución temporal.
6. La señal digital de cada canal debe ser adquirida a 320 MHz [38].
7. Cada vez que se genere una señal de disparo, el sistema debe adquirir durante $6,4 \mu\text{s}$.
8. Almacenamiento de la información de hasta 2048 disparos consecutivos con una separación de $19,4 \mu\text{s}$.

A continuación se describe el *front-end* y *back-end* del sistema de detección con SiPM.

Front-end

El *front-end* propuesto para el sistema de detección de los módulos contadores de muones de AMIGA está formado por las siguientes cuatro etapas:

1. *Polarización*. Esta etapa es la encargada de la polarización de los SiPMs. Debido a que el sistema de detección utiliza 64 SiPMs y cada uno posee una tensión de ruptura diferente, es necesario que el sistema sea capaz de aplicar a cada SiPM de forma individual la tensión de polarización que le corresponda. Para poder realizar este ajuste se decidió aplicar una tensión V_{HV} única a los cátodos de los SiPMs y una tensión V_{p_i} individual a cada ánodo. Por lo tanto, la tensión de polarización V_{bias} de cada SiPM está dada por la siguiente ecuación:

$$V_{bias} = V_{HV} - V_{p_i}. \quad (4.1)$$

Como se vio en la sección 3.2 la tensión de ruptura de los SiPM varía con la temperatura. Es por este motivo que el sistema debe corregir la tensión aplicada en función de la temperatura del SiPM. Para ello esta etapa cuenta con

un sistema de control que mide la temperatura de los SiPMs y en base a ésta corrige la tensión V_{HV} aplicada a los mismos.

2. *Pre-amplificación.* Esta etapa está formada por 64 amplificadores de tensión de ganancia variable. Con ellos se puede ajustar la ganancia de cada canal para optimizar la conformación y discriminación de las señales producidas por los SiPMs.
3. *Conformación de señal.* Uno de los requerimientos más importantes del sistema de detección es que el ancho temporal de los pulsos digitales de las salidas no degrade la resolución temporal del detector. Debido a que el ancho temporal de los pulsos característicos de los SiPM está dominado por el tiempo de bajada de los mismos (del orden de las decenas de nano segundos) y como éste es superior a los requerimientos del ancho máximo de los pulsos digitales (25 y 35 ns); es necesario la incorporación de un conformador de señal en la etapa de amplificación previa a la discriminación. Este conformador, conocido como *fast shaper*, es un filtro pasa altos o pasa banda con una constante de tiempos menor a la del ancho máximo requerido.
4. *Discriminación.* Esta etapa se encarga de realizar la comparación de las señales luego del conformador de señal con un nivel de tensión de referencia. De esta manera se discriminan las señales que se encuentran por encima o debajo del nivel de tensión de referencia.

Al momento del diseño de la electrónica del *front-end* se evaluaron las diferentes tecnologías existentes en el mercado de los componentes que podrían conformar las diferentes etapas de la misma. Los requerimientos de alta ganancia, gran velocidad y las restricciones en el consumo, fueron los factores tenidos en cuenta para decidir que realizar un *front-end* con componentes discretos fuera inviable. Es por este motivo que se optó por la búsqueda de un circuito integrado de aplicación específica (ASIC por sus siglas en inglés *Application Specific Integrated Circuit*) que satisfaga los requerimientos del *front-end*. De la bibliografía existente se determinó que la mejor opción para la electrónica del sistema de detección era el ASIC *Cherenkov Imaging Telescope Integrated Read Out Chip* (CITIROC) [45] desarrollado por el centro de diseño de microelectrónica CNRS-IN2P3-Ecole Polytechnique Omega, situado en Palaiseau al suroeste de París, Francia.

El CITIROC es un ASIC desarrollado para la lectura de 32 SiPMs de forma individual de bajo consumo (5,6 mW por canal). En la figura 4.6 se puede observar un esquema de su circuito interno. Este ASIC permite realizar un ajuste en la tensión de polarización individual de cada SiPM. Esto lo logra dado a que cada canal posee a su entrada un conversor digital-analógico (DAC por sus siglas en inglés *Digital to Analog Converter*) de alta impedancia de salida que impone la tensión V_{p_i} en el ánodo de cada SiPM, que en conjunto con la tensión V_{HV} impuesta en el cátodo lo polarizan. El rango dinámico de la tensión generada por este DAC puede ser de

4,5 V o 2,5 V según se seleccione y la resolución del mismo es de 8 bits. A este DAC lo llamaremos *8-bit input DAC*.

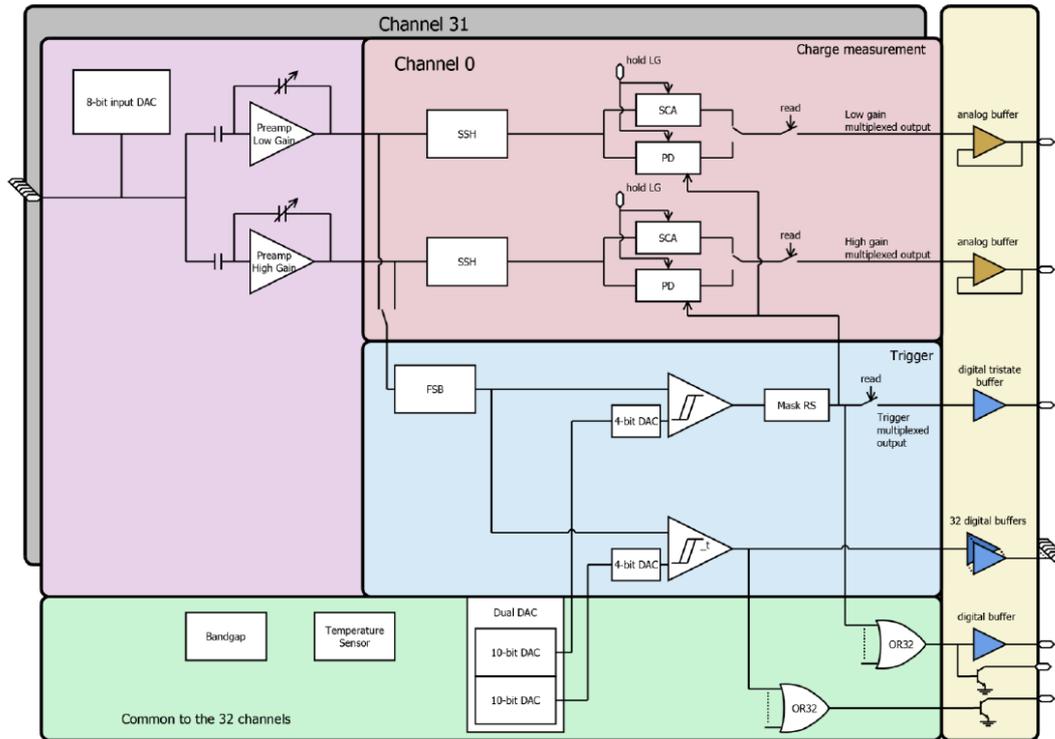


FIGURA 4.6: Esquema interno del ASIC CITIROC.

Cada canal del CITIROC incorpora dos pre-amplificadores de ganancia variable programables, garantizando una cobertura versátil del rango dinámico de la aplicación. El rango de ganancias que se pueden seleccionar para los amplificadores puede ir de 1 a 15 veces para el amplificador de baja ganancia y de 10 a 150 veces para el amplificador de alta ganancia. Esto se logra ajustando la capacidad de realimentación del pre-amplificador.

A la salida de la etapa de pre-amplificación se encuentra un conformador de señal formado por un amplificador pasa banda que llamaremos FSB (ver figura 4.7). A través de una llave selectora se puede elegir entre la utilización del pre-amplificador de baja o alta ganancia como etapa previa al conformador de señal. Esta etapa mejora la resolución de pulsos consecutivos reduciendo el ancho temporal de los pulsos amplificados del SiPM (ver figura 4.8).

La función transferencia del conformador de señal es:

$$H_{FSB}(s) = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{R_1 C_1 s}{(1 + R_1 C_1 s) \cdot (1 + R_2 C_2 s)}. \quad (4.2)$$

Para minimizar el ruido en esta configuración las constantes de tiempo $\tau_d = R_1 C_1$ y $\tau_i = R_2 C_2$ deben ser iguales. Es decir, el circuito tendrá una única constante de tiempo $\tau = t_d = t_i$. Los valores de los componentes son: $R_1 = 500 \Omega$, $C_1 = 5 \text{ pF}$, $R_2 = 25 \text{ k}\Omega$, $C_2 = 100 \text{ fF}$ y la constante de tiempo del circuito es $\tau = 2,5 \text{ ns}$. El

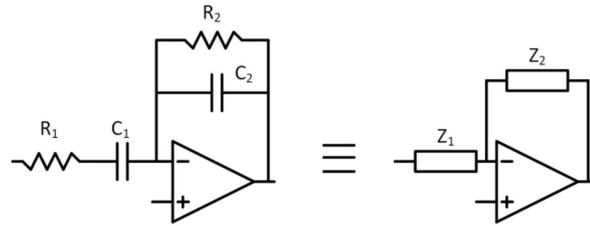


FIGURA 4.7: Circuito esquemático del conformador de señal FSB.

tiempo al pico T_p que se logra con esta configuración es de $T_p = 15$ ns. La ganancia G queda dada por la relación R_2/R_1 y tiene un valor de 50.

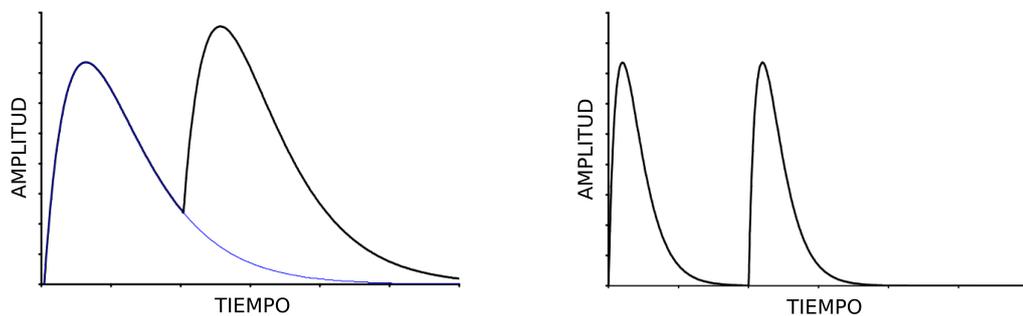


FIGURA 4.8: Ejemplo de la reducción temporal de los pulsos de una señal para mejorar la resolución de pulsos consecutivos.

La salida de cada FSB se inyecta a la entrada de un discriminador que es el encargado de comparar esta señal con una tensión de referencia. Esta tensión es fijada por dos DACs, uno de 10 bits de resolución único para todos los comparadores que llamaremos *10-bit DAC* con el cual se realiza un ajuste grueso general de las 32 tensiones de referencia y un DAC de 4 bits de resolución individual por canal que llamaremos *4-bit DAC* que es el encargado de realizar un ajuste fino de esta tensión. La salida de cada comparador la llamaremos salida digital y ésta puede tener el valor de 0 V en el caso que la señal a la entrada del discriminador no supere la tensión de referencia y 3,3 V para el caso en que si la supere.

El resto de los dispositivos internos del CITIROC que no fueron explicados en esta subsección no son utilizados en el *front-end* y dado que este ASIC tiene la capacidad de apagar los dispositivos no utilizados estos fueron apagados para reducir el consumo del mismo.

Para la polarización de los SiPM se decidió utilizar la fuente de alimentación C11204-01 [46] de la empresa Hamamatsu, la cual se encuentra optimizada para la polarización de SiPMs.

Características principales de la fuente C11204-01

- Rango de tensión de salida: 50 V a 90 V
- Ruido de rizado de la tensión de salida: 0,1 mV_{p-p}

- Estabilidad térmica: ± 10 ppm/ $^{\circ}\text{C}$
- Resolución de la tensión de salida: 1,8 mV
- Monitoreo de la tensión y corriente de salida
- Función integrada de compensación de la tensión de salida por variaciones de la temperatura
- Comunicación serie para la configuración

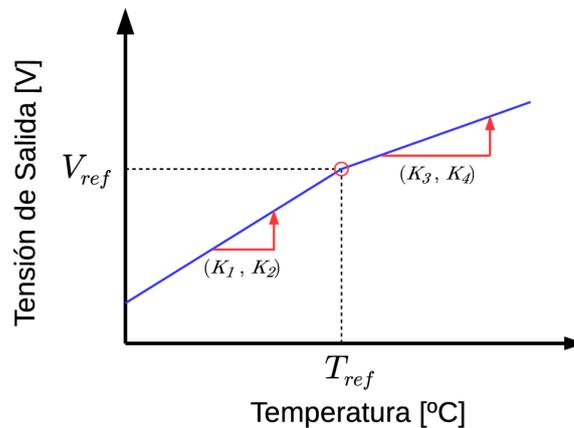


FIGURA 4.9: Función de corrección de la fuente de alta tensión C11204-01.

Esta fuente de alimentación cuenta con un sistema de control que a través de la medición de la temperatura de los SiPMs, efectúa un ajuste automático de la tensión de salida. La medición de la temperatura se realiza mediante el sensor de temperatura LM94021. La tensión de salida V_{HV} está determinada por la siguiente ecuación:

$$V_{HV} = K_2 \cdot (T - T_{ref})^2 + K_1 \cdot (T - T_{ref}) + V_{ref}, \quad (4.3)$$

donde K_2 y K_1 son los coeficientes cuadrático y lineal respectivamente de la compensación por temperatura, T es la temperatura medida, V_{ref} la tensión de referencia y T_{ref} es la temperatura de referencia.

Como se puede observar en la figura 4.9, la fuente de alimentación divide a la función de compensación en dos partes. Para las temperaturas menores a T_{ref} implementa un función del tipo 4.3 y para las temperaturas mayores a T_{ref} implementa la misma ecuación pero con dos factores diferentes K_3 y K_4 .

Back-end

El back-end del sistema de detección es el encargado de realizar la adquisición, almacenamiento y transmisión de los datos generados por el detector. A su vez se encarga de realizar el monitoreo de las variables físicas del sistema, como ser las múltiples tensiones presentes en las placas, temperaturas, la cantidad de disparos

T1 que recibe el detector por segundo y las variables de monitoreo de la fuente de alta tensión.

El *back-end* fue diseñado como un sistema embebido dividido en dos grandes partes. Una encargada de la adquisición y almacenamiento de datos en tiempo real y la otra de la transmisión de datos y monitoreo de las variables de la electrónica.

El sistema de adquisición y almacenamiento se encarga de realizar un muestreo en tiempo real de las 64 señales de las salidas digitales de los CITIROCs a una frecuencia de 320 MHz y almacenar los datos en una cola circular de 2048 posiciones ($6,4\mu s$ de duración). En el momento de la recepción de un disparo T1 el sistema continúa almacenando los datos por un tiempo de post-disparo. Una vez finalizado este tiempo la adquisición continúa en una segunda cola circular y los datos del evento (los de la primera cola circular) son almacenados en una memoria RAM externa del tipo LPDDR (del inglés *Low Power Double Data Rate*). En una tabla de 2048 posiciones se guarda el código del T1 recibido en conjunto con la posición de la memoria externa donde se encuentra almacenado el evento. El sistema de doble cola circular permite la recepción de dos eventos consecutivos, eliminando el tiempo muerto del almacenamiento en la memoria externa.

Cuando el tanque recibe un disparo T3 (solicitud de evento), una electrónica de superficie se encarga de identificar dicha solicitud y de realizar el pedido del evento a todos los dispositivos (módulos contadores de muones) que se encuentren en la red local de datos de la estación. Para ello realiza un envío de un paquete con la información del evento solicitado (código de T1) a la dirección de *bradcast* de la red local utilizando el protocolo UDP (del inglés *User Datagram Protocol*). Cuando las electrónicas reciben la solicitud del evento, éstas lo buscan en la tabla de eventos y transmiten los datos a un servidor dedicado en el CDAS.

4.4. Electrónica de Pre-Producción

La electrónica de pre-producción es una electrónica la cual integra todos los componentes necesarios del sistema de detección. Fue desarrollada para realizar las primeras pruebas en los detectores ya instalados del observatorio y es la versión previa a la electrónica de producción de los contadores de muones de AMIGA.

Esta electrónica fue pensada para ser modular y por este motivo se la dividió en tres partes. Cada parte está formada por una placa de circuito impreso (PCB por sus siglas en inglés *Printed Circuit Board*). Una primer placa la cual posee el fotodetector en conjunto con el sensor de temperatura, una segunda placa formada por el *front-end* y una tercer placa formada por el *back-end*. En la figura 4.10 se puede observar un esquema completo de la electrónica de pre-producción.

Para el fotodetector de la electrónica de pre-producción se decidió utilizar un arreglo de SiPMs de 8x8 canales todos integrados en un solo encapsulado. La disposición y tamaño de los píxeles del arreglo de SiPMs fue adoptada del PMT multiánodo modelo H8804-200MOD utilizado en la versión con PMT de AMIGA. De esta

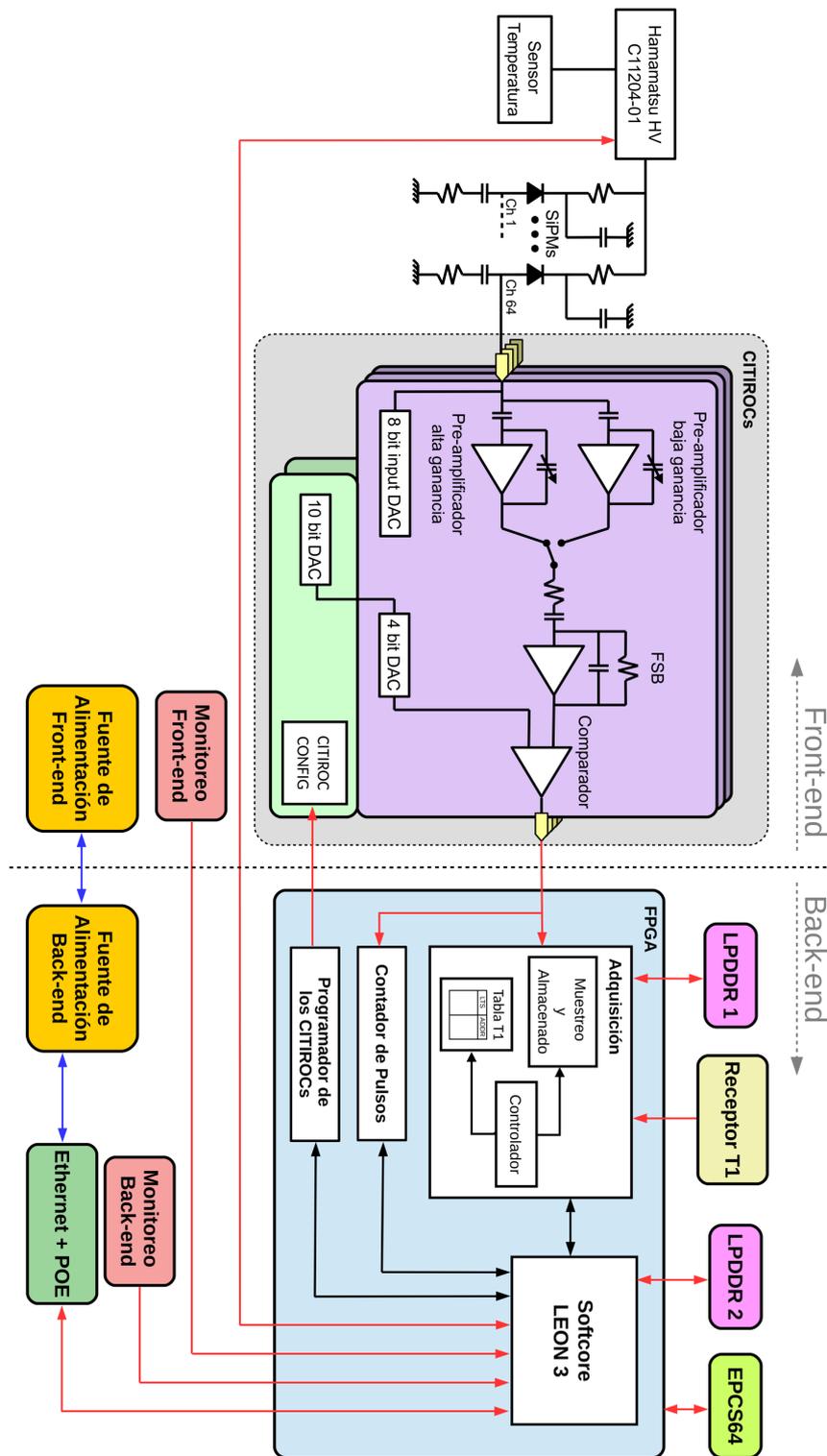


FIGURA 4.10: Esquema de la electrónica de pre-producción.

manera el sistema es totalmente compatible con los módulos ya instalados en el observatorio.

La tarea de la fabricación del arreglo de SiPMs fue encomendada a la empresa

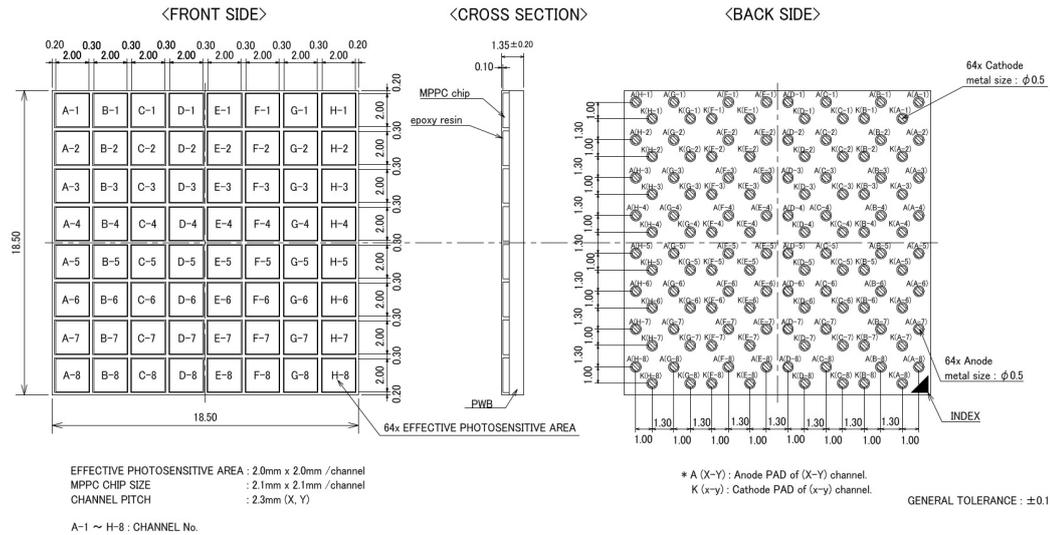


FIGURA 4.11: Dibujo mecánico del arreglo de SiPMs modelo S13361-2050NE-08 SPL.

Hamamatsu. Al momento de realizar el pedido del arreglo de SiPMs, la empresa nos informó que el modelo S13081-050 se encontraba discontinuado y en su reemplazo propone la fabricación del arreglo con una versión actualizada del mismo. El arreglo final fabricado está formado por 64 SiPMs de la línea S13361 y lleva el nombre de S13361-2050NE-08 SPL [47]. Las principales características de este arreglo se encuentran en la tabla 4.2. En la figura 4.11 se puede observar el dibujo mecánico del arreglo utilizado en la electrónica de pre-producción del sistema de detección de AMIGA y en la figura 4.13 se puede observar dos fotografías de las celdas internas de un pixel del arreglo de SiPMs seleccionado.



FIGURA 4.12: Fotografía de la placa que contiene el arreglo de 64 SiPMs utilizada en el sistema de detección del contador de muones de AMIGA.

En la primera placa, además del fotodetector, se encuentra el sensor de temperatura modelo LM94021 requerido por la fuente de alta tensión para poder realizar la medición de temperatura necesaria para la corrección del punto de operación de los SiPMs. Para la conexión de este PCB con el *front-end* se utilizaron dos conectores de alta frecuencia modelo QFSS-026-04.25-L-D-PT4 de la empresa Samtec. En la figura 4.12 se puede observar una fotografía de éste PCB.

Para la alineación del arreglo de SiPMs con el adaptador óptico del módulo contador de muones se utiliza el mismo sistema de espigas metálicas utilizadas en la versión con PMT del módulo. La placa cuenta con dos perforaciones de 3 mm de diámetro a través de las cuales pasan las espigas de alineación que se encuentran pegadas en un dispositivo plástico que se ubica por detrás del PCB.

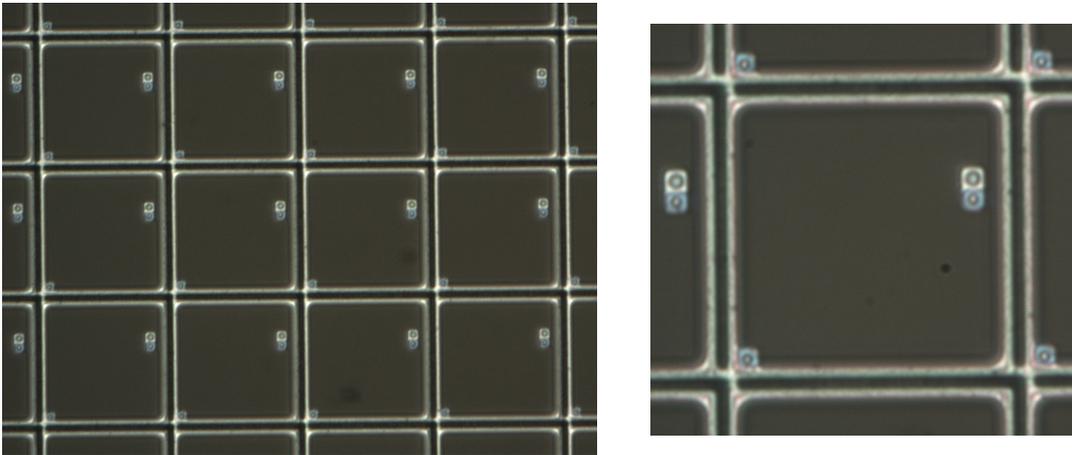


FIGURA 4.13: Fotografías de las celdas internas de un pixel del arreglo de SiPMs S13361-2050NE-08 SPL. A la izquierda se encuentra una ampliación de 20 veces y a la derecha una ampliación de 50 veces. Las celdas de los SiPMs del arreglo son de $50 \mu\text{m}$ de lado.

Parámetros		Modelo de SiPM	Unidad
		S13361-2050NE-08 SPL	
Dimensión de Celda		50	μm
Área Fotosensible Efectiva		2×2	mm
Factor de Relleno Geométrico		74	%
Eficiencia de Fotodetección		40	%
Número de Celdas		1584	-
Cuentas Oscuras	Típico	300	kcps
	Máximo	900	kcps
Ganancia M (a la tensión de operación)		$1,7 \times 10^6$	-
Coeficiente de Ganancia por Temperatura		$3,06 \times 10^4$	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
Tensión de Ruptura		53 ± 5	V
Probabilidad de Crosstalk		3	%
Coeficiente de Temperatura		54	$\text{mV}/^{\circ}\text{C}$

CUADRO 4.2: Características principales, obtenidas de las hojas de datos de Hamamatsu, del arreglo de 64 SiPMs utilizado en AMIGA: S13361-2050NE-08 SPL.

La segunda placa es la que conforma el *front-end* de la electrónica del sistema de detección. El *front-end* está formado principalmente por dos ASIC CITIROC, cada uno de 32 canales. Los CITIROCs se encargan del acondicionamiento y discriminación de las señales de los SiPMs, como así también del ajuste individual de la tensión de polarización de los SiPMs. En esta placa también se encuentra la fuente de alta tensión utilizada para la polarización de los SiPMs y el ajuste de esta tensión en

función de la temperatura medida de los fotodetectores. En la figura 4.14 se puede observar una fotografía de la placa del *front-end*.

La salida de los 64 canales de los discriminadores y las señales control del CITIROC, como del circuito integrado modelo ADS7828E encargado de realizar el monitoreo de las tensiones de las fuentes de alimentación y de las salidas de los sensores internos de temperatura de los CITIROCs se encuentran ruteadas a un conector de alta velocidad modelo QTH-090-04-L-D-A-K-TR de la empresa Samtec. Además, se encuentra un conector extra para recibir la tensión alimentación y las señales de habilitación de las fuentes. Ambos conectores se conectan con la placa del *back-end*.

Esta placa posee una fuente modelo RS3-2405S de la empresa RECOM Power que realiza un aislamiento galvánico de la tensión externa (tensión de las baterías).

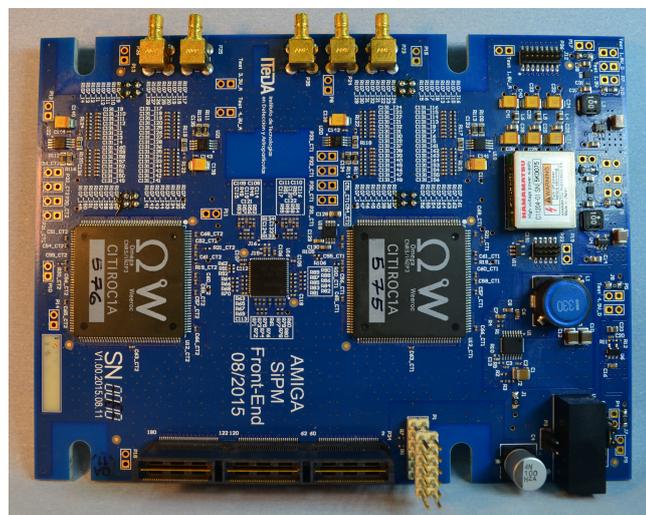


FIGURA 4.14: Fotografía de la placa del *front-end* del sistema de detección de los contadores de AMIGA.

La tercer placa es la que conforma el *back-end* de la electrónica del módulo contador de muones. El *back-end* está formado principalmente por un FPGA Cyclone IV modelo EP4CE40U19I7, en el que se encuentra implementado un microprocesador con todos los periféricos necesarios para su funcionamiento. En la figura 4.15 se puede observar una fotografía de la placa que conforma el *back-end*.

El microprocesador es un LEON3 de 32 bits, basado en la arquitectura y conjunto de instrucciones de un SPARC-V8 RISC. Fue diseñado originalmente por la *European Space Research and Technology Centre* (ESTEC) y parte de la *European Space Agency* (ESA), y luego continuado por *Gaisler Research*. En él corre un sistema operativo LINUX en conjunto con un grupo de programas encargados de la adquisición, configuración, calibración y monitoreo de la electrónica.

Esta placa posee dos memorias del tipo LPDDR, una utilizada por el microprocesador y la otra utilizada por el módulo de adquisición para el almacenaje de los eventos. Para la programación del FPGA esta placa cuenta con una unidad de programación de Altera modelo EPCS64, la cual cuenta con una memoria del tipo flash en donde se almacenan los programas para la configuración del FPGA como así

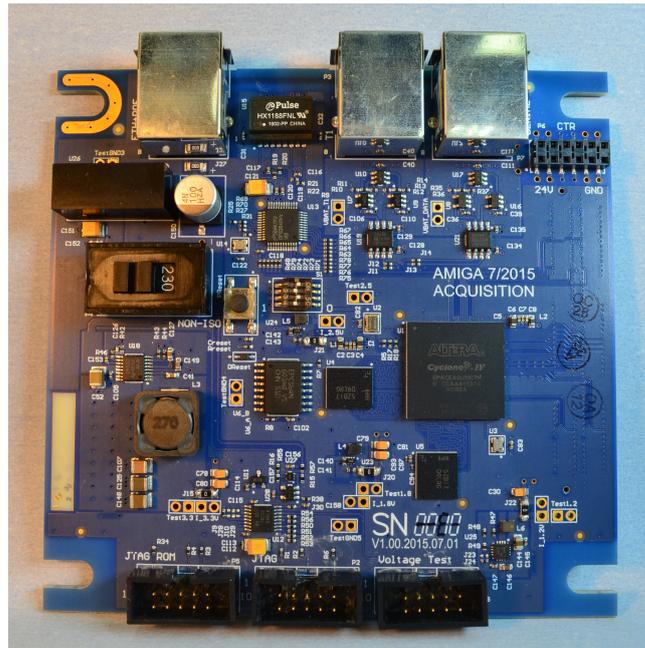


FIGURA 4.15: Fotografía de la placa del *back-end* del sistema de detección de los contadores de AMIGA.

también el bootloader necesario para realizar el arranque del sistema operativo. El bootloader realiza una petición de IP a la red, un servidor DHCP contesta dicha petición devolviendo la IP solicitada y además se encarga de indicarle donde realizar la búsqueda del sistema operativo. Una vez recibida esta información el bootloader solicita el sistema operativo que se encuentra almacenado en la radio de la estación, lo carga en una de las dos memorias RAM y comienza con su ejecución.

En esta placa se encuentran los receptores LVDS necesarios para la recepción de las señales de disparo T1 que son enviadas por la electrónica de superficie.

Capítulo 5

Calibración del Sistema de Conteo

Para que el sistema de conteo funcione correctamente, es decir, que sea capaz de identificar los pulsos de luz que se generan cuando las partículas atraviesan el detector, este debe ser calibrado.

El sistema de conteo de AMIGA se divide en dos partes [48]. Por un lado se encuentra el fotodetector encargado de convertir los pulsos de luz en pulsos de corriente y por otro lado se encuentra la electrónica asociada a la identificación de esos pulsos. Es por este motivo que la calibración del sistema de conteo se divide a su vez en dos partes. La primera parte consiste en la calibración de cada canal individual del sensor óptico y la segunda parte consiste en la calibración del detector. En las siguientes secciones se describirán ambas calibraciones del sistema de conteo.

5.1. Calibración de los SiPMs

El objetivo de esta calibración es polarizar de forma individual a los SiPMs que conforman el sensor óptico del detector. Para realizar esta calibración primero se debe obtener la tensión de ruptura de cada SiPM y luego, aplicar a cada uno una tensión igual a su tensión de ruptura más una sobretensión. El valor de sobretensión será el mismo para todos los SiPMs. El valor de sobretensión se puede ajustar para optimizar la eficiencia del sistema de detección.

En esta sección se explica un método para la obtención del valor de tensión de ruptura de cada SiPM y la forma de aplicar la tensión de operación correspondiente a cada uno utilizando la electrónica propuesta de AMIGA.

5.1.1. Diseño Experimental para la Calibración de los SiPMs

El diseño experimental utilizado para la calibración propuesta de los SiPMs está formado por tres etapas. La primera etapa está formada por el SiPM, la fuente de alta tensión y el sensor de temperatura. Esta etapa se encarga de aplicar una tensión única en los cátodos de los SiPMs y modificarla en función de la temperatura de los mismos. Para esta compensación se configuran los coeficientes cuadráticos K_2 de las funciones de compensación de la fuente de alta tensión a cero y los coeficientes K_1 al valor del coeficiente de temperatura de los SiPMs bajo prueba. La segunda etapa está formada por el CITIROC. Esta etapa es utilizada para la amplificación

y discriminación de los pulsos generados por los SiPMs. La amplificación de los pulsos se puede modificar variando la ganancia del pre-amplificador de entrada de cada canal del CITIROC. Para esta calibración se utiliza el pre-amplificador de alta ganancia. Para variar el nivel de discriminación se utiliza el *10-bit DAC*. A su vez, esta etapa es utilizada para aplicar una tensión a los ánodos de los SiPMs a calibrar utilizando el *8-bit input DAC*. La tercera etapa está formada por un FPGA el cual es el encargado de adquirir los pulsos digitales presentes a la salida de la etapa de discriminación del CITIROC.

5.1.2. Medición del Valor Medio del Pico de Tensión del Fotón Equivalente

Para la medición del valor medio del pico de tensión del fotón equivalente se desarrolló un software que realiza de forma automática la medición de la tasa de pulsos digitales por segundo para diferentes valores de nivel de discriminación impuesto por el *10-bit DAC*. A modo de ejemplo, en la figura 5.1 se puede observar dicha medición para un SiPM que se encontraba a oscuras. Los pulsos adquiridos son producto de la corriente oscura del SiPM. En el gráfico se denotan dos regiones en donde la cantidad de pulsos digitales por segundo se mantiene aproximadamente constante. A estas regiones se las llama *plateaus*. La región del primer *plateau* está formada por todos los pulsos digitales originados por señales de uno o más fotones equivalentes, la región del segundo *plateau* está formada por los pulsos digitales originados por dos o más fotones equivalentes. Es por este motivo que se puede observar una clara transición del primer al segundo *plateau*. Esta transición ocurre cuando el valor del discriminador comienza a pasar por el pico del primer fotón equivalente.

Esta curva representa la función de supervivencia de la función de distribución de amplitud media de tensión de los pulsos del SiPM. El valor medio del pico de tensión de un PE se encuentra correlacionado con el valor del *10-bit DAC* (D_{max}) en donde la derivada en valor absoluto de la función de supervivencia en la región de la transición del primer al segundo *plateau* se hace máxima. En la figura 5.2 se puede observar el valor absoluto de la derivada de la función de supervivencia y su ajuste con una función normal. El valor D_{max} se obtiene para donde el ajuste del valor absoluto de la derivada es máximo.

Es importante notar que este valor posee un offset (DC_{level}), introducido por la tensión de continua presente a la entrada del comparador. El valor de DC_{level} corresponde al valor del *10-bit DAC* para el cual la curva de supervivencia se hace máxima. El valor del pico de tensión de un PE (PE_{peak}), en unidades de DAC, se obtiene con la siguiente ecuación:

$$PE_{peak} = D_{max} - DC_{level}. \quad (5.1)$$

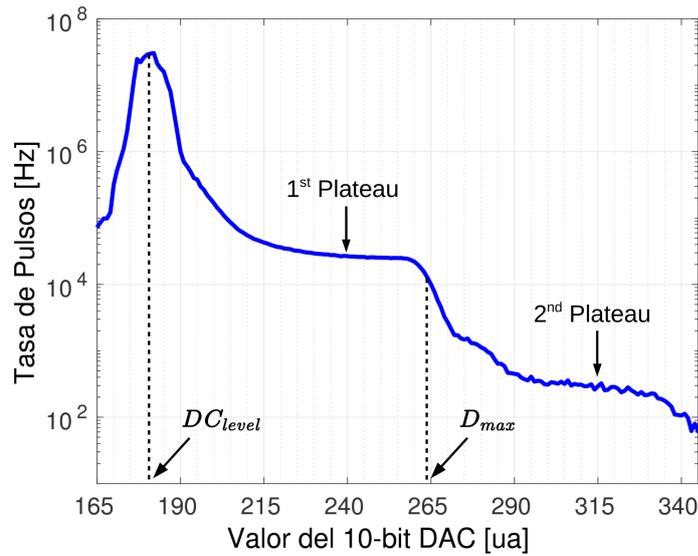


FIGURA 5.1: Medición de la frecuencia de pulsos digitales de un SiPM en función del valor del nivel de discriminación impuesto por el 10-bit DAC. El valor DC_{level} corresponde a la componente de tensión continua presente a la entrada del discriminador introducida por el *fast shaper*. Se encuentran indicadas las regiones de los *plateau*, como así el valor D_{max} .

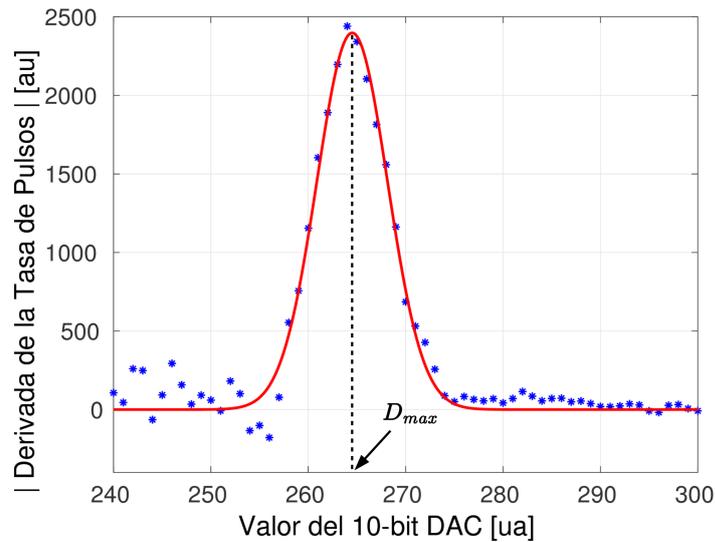


FIGURA 5.2: Valor absoluto de la derivada de la función de supervivencia en la región de la transición del primer al segundo *plateau*. En rojo se observa el ajuste gaussiano de los puntos, del cual se obtiene el valor D_{max} .

Otra forma de obtener el valor D_{max} es del ajuste de la función de supervivencia en la región de la transición del primer al segundo *plateau*. Para realizar el ajuste se utiliza la siguiente función:

$$a \cdot \operatorname{erfc}(b \cdot (x - c)) + d, \quad (5.2)$$

donde erfc es la función error complementaria, a , b , c y d son parámetros libres en el ajuste. El valor de c una vez realizado el ajuste corresponde al valor D_{max} .

5.1.3. Medición de la Tensión de Ruptura

Existen diferentes formas de estimar el valor de la tensión de ruptura de un SiPM [49]. Debido a las restricciones que son impuestas por el diseño de la electrónica, el método para la estimación del valor de la tensión de ruptura de los SiPMs es el descrito en esta subsección.

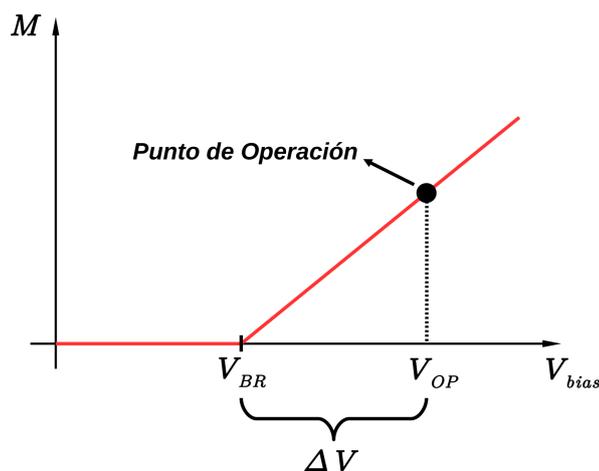


FIGURA 5.3: Comportamiento ideal de la ganancia de un SiPM en función de la tensión de polarización V_{BIAS} .

Como se vio en la subsección 3.3.2 la ganancia de un SiPM depende de forma lineal con el valor de sobretensión. Se puede deducir de la ecuación 3.5 que la ganancia se hace cero cuando $\Delta V = 0$, es decir, cuando $V_{BIAS} = V_{BR}$. En la figura 5.3 se puede observar como varía de forma teórica la ganancia de un SiPM en función de la tensión V_{BIAS} . Esta figura muestra que si la ganancia es medida en función de la tensión V_{BIAS} , la tensión de ruptura se puede obtener como el valor de tensión para el cual la curva intercepta el eje x ($V_{BIAS} = V_{BR}$).

Se puede deducir que el valor medio del pico de tensión de un PE es proporcional a la ganancia del SiPM. Para obtener el valor de tensión de ruptura se propone medir utilizando el método anteriormente descrito el valor medio del pico de tensión del PE para distintas tensiones de polarización. Los cambios de la tensión de polarización se deben realizar únicamente por la fuente de alta tensión, en el caso de la electrónica de AMIGA es la fuente C11204-01 de Hamamatsu. A modo de ejemplo, en la figura 5.4 se puede observar esta medición para cuatro SiPMs. Se puede observar el comportamiento lineal de la ganancia o valor medio del pico del PE en función de la V_{BIAS} . Del ajuste de los valores obtenidos con una función lineal se puede obtener el valor de tensión para el cual el valor medio del pico del PE se hace cero. Este valor de tensión es el valor de la tensión de ruptura para el SiPM bajo prueba.

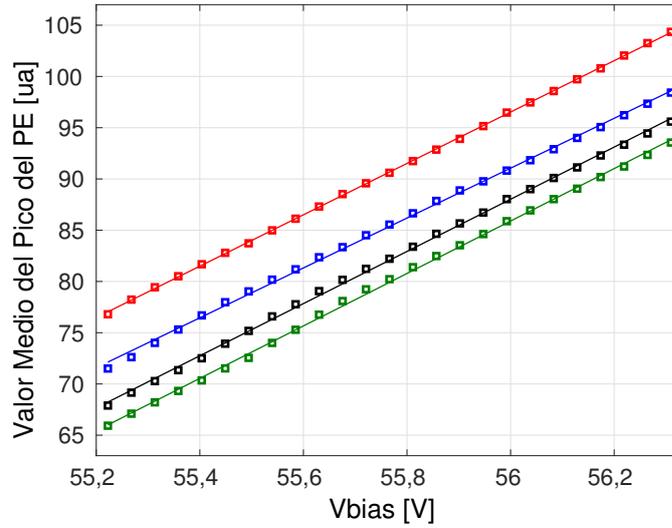


FIGURA 5.4: Medición de la tensión media del pico del PE para cuatro SiPMs en función de la tensión V_{BIAS} .

Los valores obtenidos de tensión de ruptura serán los reales siempre y cuando la tensión de ánodo de los SiPMs sea cero y la tensión impuesta por la fuente de alta tensión sea conocida. Es importante notar que tanto la fuente de alta tensión como las tensiones impuestas por los DACs *8-bit input DAC* de cada canal del CITIROC pueden llegar a tener un offset tanto positivo como negativo. Esto permite diferenciar la tensión configurada de la tensión impuesta por estos dispositivos.

En el caso de la fuente de alta tensión tendremos

$$V_{HV} = V_{HV_set} + V_{HV_offset}, \quad (5.3)$$

donde V_{HV} es la tensión impuesta por la fuente de alta tensión, V_{HV_set} es la tensión configurada y V_{HV_offset} es el offset de la fuente.

En el caso de los DACs *8-bit input DAC* tendremos

$$V_{DAC} = V_{DAC_set} + V_{DAC_offset}, \quad (5.4)$$

donde V_{DAC} es la tensión impuesta por el *8-bit input DAC* de un canal del CITIROC, V_{DAC_set} es la tensión configurada y V_{DAC_offset} es el offset del DAC.

La tensión de polarización será

$$V_{BIAS} = V_{HV} - V_{DAC}. \quad (5.5)$$

Si reemplazamos los valores V_{HV} y V_{DAC} por las ecuaciones 5.3 y 5.4 respectivamente resulta

$$V_{BIAS} = (V_{HV_set} - V_{DAC_set}) + (V_{HV_offset} - V_{DAC_offset}) \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned}
 V_{BIAS_set} &= V_{HV_set} - V_{DAC_set} \\
 V_{BIAS_offset} &= V_{HV_offset} - V_{DAC_offset}.
 \end{aligned}
 \tag{5.7}$$

En el caso de AMIGA, no se desea conocer la tensión de ruptura real de los SiPMs, sino obtener la tensión V_{HV_set} que se debe configurar a la fuente de alta tensión para que la ganancia del SiPM sea cero. Esta tensión será la tensión de ruptura virtual del SiPM bajo prueba. Utilizar este valor en vez del real simplifica la calibración de la electrónica ya que no es necesario la medición de los offset tanto de la fuente como de los DACs *8-bit input DAC*, la calibración resultante es tanto del SiPM como del conjunto fuente y DAC.

Durante el proceso de medición de la tensión media del pico del PE del SiPM, el valor de los DACs *8-bit input DAC* se configura a un nivel de tensión bajo, pero no nulo. Esto es para evitar posibles problemas con la existencia de offset negativo. En el caso del ejemplo se configuró al valor 250 (el mínimo valor es 255 y el máximo valor es 0), pero podría haber sido configurado a un valor superior de tensión o un menor valor del DAC. Este valor será usado de referencia para el futuro ajuste de los canales individuales.

5.1.4. Ajuste de los Canales Individuales

La última etapa de la calibración de los SiPMs de la electrónica de AMIGA es realizar un ajuste individual de la polarización de los SiPMs. Este ajuste consiste en aplicar a cada SiPM la tensión de ruptura virtual más un valor de sobretensión. Este valor de sobretensión será el mismo para todos los canales.

Para realizar el ajuste de los canales primero se debe de obtener la máxima tensión de ruptura virtual de los SiPMs que están conectados a la electrónica, a este valor lo llamaremos V_{BR_max} . Una vez obtenido V_{BR_max} se le suma el valor de la sobretensión elegida y con este valor se configura la fuente de alta tensión. Por último se debe calcular y configurar el valor de DAC de cada *8-bit input DAC* para que cada SiPM se encuentre polarizado correctamente. El valor de tensión V_{DAC_set} que debe ser configurado en cada canal de los *8-bit input DAC* es:

$$V_{DAC_set} = V_{BR_max} - V_{BR_i}, \tag{5.8}$$

donde V_{BR_max} es el valor de tensión de ruptura máxima entre los SiPMs de la electrónica y V_{BR_i} es el valor de la tensión de ruptura del canal a ajustar.

Para la conversión de la tensión V_{DAC_set} al valor a configurar hay que tener en cuenta la tensión de referencia $V_{8bitDAC_REF}$ de los DACs *8-bit input DAC*. Esta puede ser 4,5 o 2,5 V.

5.2. Calibración del Detector

Una vez que el SiPM se encuentra calibrado y operando con la sobretensión deseada se debe determinar el valor del nivel de discriminación y la estrategia de conteo.

Para esta calibración el diseño experimental que es utilizado es el descrito en la subsección 5.1.1.

5.2.1. Selección de la Estrategia de Conteo

Como fue descrito en [50], el sistema de conteo que posee PMTs como dispositivo sensor de luz fue diseñado para contar muones mediante la identificación de un patrón en la traza digital adquirida por el *back-end*. El nivel de discriminación en este sistema es configurado por debajo del valor medio de pico de un PE y luego se aplica una técnica de reconocimiento de patrones para discriminar las señales de partículas del ruido. Esta estrategia de conteo tiene en cuenta la estructura temporal de la señal sobre el nivel de discriminación.

La estrategia de conteo que se propone para el sistema de conteo que posee SiPMs como dispositivo sensor de luz se basa en un criterio por amplitud. Esto es debido a dos motivos. Por un lado los SiPMs a diferencia de los PMTs poseen una tasa de ruido mayor. La tasa de ruido puede mantenerse elevada no solo al nivel de un PE, sino que dependiendo el crosstalk del dispositivo puede llegar a ser elevada al nivel de varios PEs. Por otro lado, al ser los pulsos de un ancho temporal mayor la estructura amplitud-temporal se ve atenuada. El nivel de discriminación es configurado al menor valor que asegure una baja contaminación de la señal por el ruido de los dispositivos, sin reducir significativamente la eficiencia de conteo.

En la figura 5.5 se puede observar la tasa de pulsos de un SiPM en función del nivel de discriminación del DAC *10-bit DAC*. Se encuentran graficados dos casos: la curva roja es la medición de la tasa de pulsos digitales cuando el SiPM bajo prueba se encuentra acoplado al módulo detector (fibra con barra centelladora) y la curva azul es cuando el SiPM no se encuentra acoplado. Ambas mediciones se realizaron a 25°C. Cuando el SiPM no se encuentra acoplado al detector, la tasa de pulsos medida está formada solamente por el ruido inherente al SiPM, es decir, por la corriente oscura, su crosstalk y afterpulses. Cuando el SiPM se encuentra acoplado al detector no sólo el ruido inherente al SiPM es medido, sino también todas las señales que son producto del impacto de partículas cargadas en el centellador. A estas partículas se las considera como radiación de fondo. Esta radiación está compuesta por partículas secundarias producto de un rayo cósmico y de la radiación emitida por los materiales circundantes (ej. paredes, pisos, etc.).

En las curvas de la figura 5.5 se puede observar que para niveles bajos de discriminación la señal que predomina es la generada por el ruido inherente al SiPM y para valores elevados (tercer *plateau* en adelante) la señal que predomina es la generada por la radiación de fondo. La ocurrencia de estas señales es al azar y se

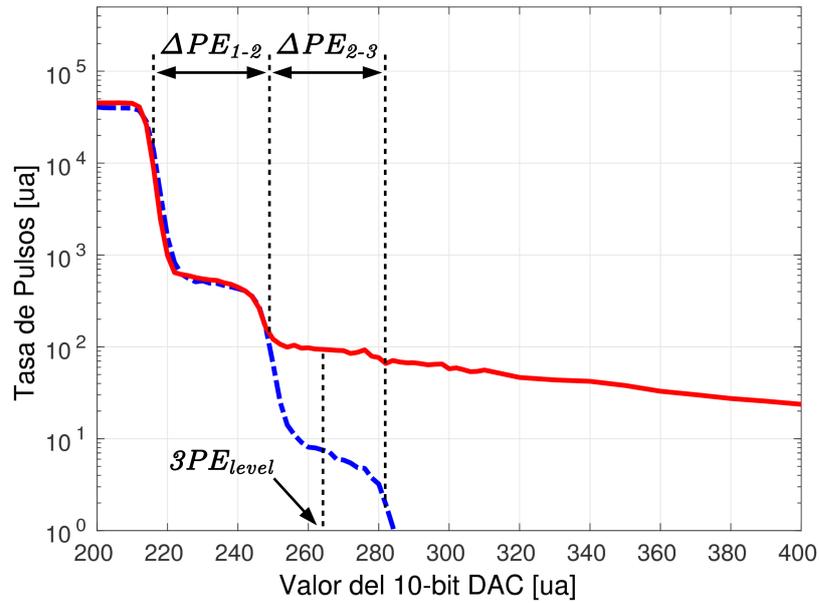


FIGURA 5.5: Medición de la tasa de pulsos digitales de un SiPM para diferentes niveles de discriminación del DAC *10-bit DAC*. La curva en rojo es la medición en la cual el SiPM estaba acoplado al detector y la azul cuando el SiPM no se encontraba acoplado al detector. Ambas mediciones fueron realizadas a 25°C y con $\Delta V = 3,75\text{ V}$.

encuentran distribuidas uniformemente en el tiempo. Son las que contribuyen al conteo accidental de partículas durante un evento. Como se mencionó anteriormente la fuente de estas señales son dos. En el caso de las generadas por la radiación de fondo no pueden ser eliminadas y las que son producto del ruido inherente al SiPM solo pueden ser disminuidas mejorando la tecnología del mismo. Por ejemplo, es deseable que el crosstalk sea el menor posible, de esta manera se podría reducir el nivel de discriminación al segundo *plateau* y en el caso de reducir la corriente oscura se podría reducir el nivel de discriminación al primer *plateau*, este es el caso del PMT debido a que su corriente oscura es muy baja (del orden de 5 Hz). Hay que tener en cuenta que la distribución en amplitud de los pulsos de los PMTs tiene mucho más variación estadística que la de los pulsos de los SiPMs, y la misma medición de la tasa de pulsos en función de nivel de discriminación para un PMT directamente no muestra *plateaus*. En el caso del SiPM que fue utilizado en este ejemplo el nivel de discriminación se decidió colocarlo en el tercer *plateau*.

Como se mencionó anteriormente el nivel de discriminación se debe configurar en el valor más bajo posible tratando de que la probabilidad de conteo accidental ($P_{\text{conteo-accidental}}$) del detector se mantenga lo más baja que sea tolerable para el sistema. Para el módulo contador de muones se impuso que la probabilidad de conteo accidental se mantenga por debajo de 5%, el cual se seleccionó considerando que el sobre-conteo debe permanecer por debajo del valor de error del número de muones

reportado en [51] (ver figuras 5,8 y 11). La $P_{\text{conteo-accidental}}$ se puede estimar como:

$$P_{\text{conteo-accidental}} = n \cdot T_{\text{event}} \cdot R_{\text{noise}}, \quad (5.9)$$

donde n es la segmentación del detector o número de barras, T_{event} es el tiempo de duración de la adquisición y R_{noise} es la tasa de ruido al nivel de discriminación seleccionado. Por ejemplo, en el caso de la medición ejemplificada al nivel de discriminación $3PE_{\text{level}}$ la tasa de ruido es ~ 100 Hz, el número de segmentos es 64 y el tiempo T_{event} es $3,2\mu\text{s}$, resultando que la $P_{\text{conteo-accidental}} \simeq 2\%$.

Capítulo 6

Mediciones de Laboratorio

6.1. Introducción

En este capítulo se describe el montaje experimental realizado para la caracterización del sistema de conteo, como así las pruebas realizadas tanto con el prototipo de la electrónica, como la electrónica de pre-producción para validar su correcto funcionamiento.

6.2. Montaje Experimental

Para poder realizar comparaciones entre el prototipo de la electrónica y la electrónica de pre-producción y para aumentar la repetitividad de los experimentos se decidió realizar un montaje experimental único para todas las pruebas. El montaje experimental reproduce a escala el conjunto contador de muones y detector de superficie y está formado por dos partes: el instrumento de medición *PIPA* y el sistema de disparo. En las siguientes dos subsecciones se describen ambas partes.

6.2.1. Instrumento de Medición *PIPA*

Para el estudio del comportamiento de la electrónica del sistema de conteo se diseñó un instrumento de medición llamado *PIPA*, el cual es una versión reducida de un módulo contador de muones, con una menor cantidad de canales. Este instrumento está construido con los mismos centelladores, fibras y adaptador óptico que posee un módulo contador de muones de AMIGA.

La *PIPA* cuenta con 3 canales, cuyas barras centelladoras se encuentran apiladas una encima de la otra en el interior de un perfil estructural rectangular de aluminio de 5 m de longitud y con paredes de 2 mm de espesor. Durante su construcción se aseguró que los centelladores se encuentren posicionados contra la cara lateral interna del perfil de aluminio para conocer con precisión su ubicación espacial una vez cerrado el mismo (ver figura 6.1).

La longitud de las fibras utilizadas es de 5 m de largo, de los cuales 4 m se encuentran en contacto con el centellador y el resto (1 m) entre el centellador y el adaptador

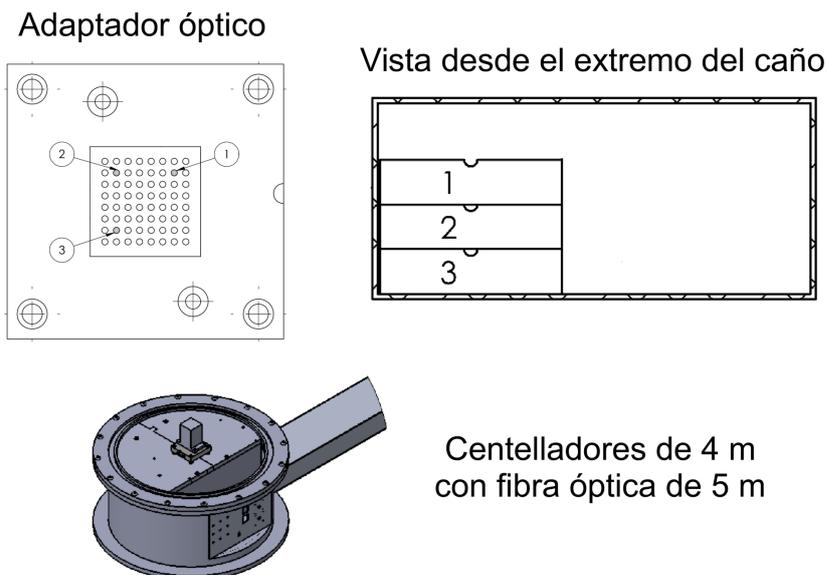


FIGURA 6.1: Disposición de fibras en el adaptador óptico y ubicación de los centelladores en el interior del perfil estructural rectangular de aluminio del instrumento de medición *PIPA*.

óptico. La disposición de fibras en el adaptador óptico y la ubicación de los centelladores en el interior del perfil de aluminio se pueden observar en la figura 6.1. En la figura 6.2 se pueden observar fotografías de este instrumento de medición.



FIGURA 6.2: A la izquierda se muestra una fotografía del extremo de la *PIPA* en donde se encuentra el adaptador óptico y en donde se coloca la electrónica a medir. A la derecha se muestra una fotografía del extremo contrario de la *PIPA* con su tapa descubierta para poder observar el interior del perfil.

6.2.2. Sistema de Disparo

Diferentes tipos de radiación en forma de partículas elementales atraviesan constantemente al módulo contador de muones. Para hacer un estudio de las señales generadas por estas partículas es importante la identificación del momento temporal

y la ubicación espacial del impacto de las mismas. Para poder conocer su ubicación y momento en que se produce el impacto se diseñó un sistema de disparo llamado telescopio de muones. Este dispositivo genera una señal de disparo en el momento que se detecta el impacto de una partícula. De su emplazamiento en el detector se determina la zona de impacto de las partículas.

El telescopio de muones está formado por dos detectores de centelleo ubicados en la parte superior e inferior del detector a medir respectivamente. La condición de disparo se genera cuando ambos detectores generan señales producto de la incidencia de una partícula, en una determinada ventana temporal. A este disparo lo llamaremos *trigger* de coincidencia.

Cada detector del telescopio de muones está formado por una barra centelladora idéntica a las utilizadas en el detector de AMIGA de $4,1 \times 4,1$ cm de lado, al que se acopló un SiPM modelo S13081-050CS para la conversión del pulso de luz a una señal eléctrica. Para mejorar el acople entre el centellador y el SiPM se realizó el pulido de las caras del centellador y se aplicó grasa óptica entre ellos. Para aumentar la colección de luz por el SiPM se recubrieron las caras del centellador que no tenían el recubrimiento de dióxido de titanio con cinta de aluminio. A cada sistema de detección se lo introdujo en un encapsulado de PVC el cual es montado en una estructura en forma de C que permite la alineación de ambos detectores del telescopio de muones con las barras centelladoras que se encuentran en el interior del instrumento de medición *PIPA*. En la figura 6.3 se pueden observar los dos detectores de centelleo del telescopio de muones y como se encuentran montados en la estructura de soporte.

Las señales generadas por cada SiPM son amplificadas, discriminadas y adquiridas por una electrónica encargada de la determinación de la ocurrencia de la coincidencia temporal de ambas señales. En el caso de determinar una coincidencia temporal esta electrónica genera una señal de disparo T1. Esta señal es utilizada para que el sistema de adquisición que se esté utilizando se dispare y adquiera la información pertinente a la prueba que se esté realizando.

Durante el armado del sistema de disparo se seleccionaron dos SiPMs con tensiones de ruptura similar para poder utilizar una única fuente de alimentación para su polarización. La fuente utilizada es la Hamamatsu modelo C11204-01. En el interior de cada detector, además del SiPM, se encuentra un sensor de temperatura modelo LM94021, mediante el cual la fuente de alimentación mide la temperatura a la que se encuentra el SiPM y realiza la corrección de la tensión de polarización para mantener su punto de operación constante frente a las variaciones de la temperatura.

En la figura 6.4 se puede observar una fotografía del telescopio de muones montado en el instrumento de medición *PIPA*. Éste puede ser ubicado en diferentes posiciones a lo largo de la misma, permitiendo de esta manera la identificación de la ubicación espacial de las partículas que generan el disparo del telescopio de muones.

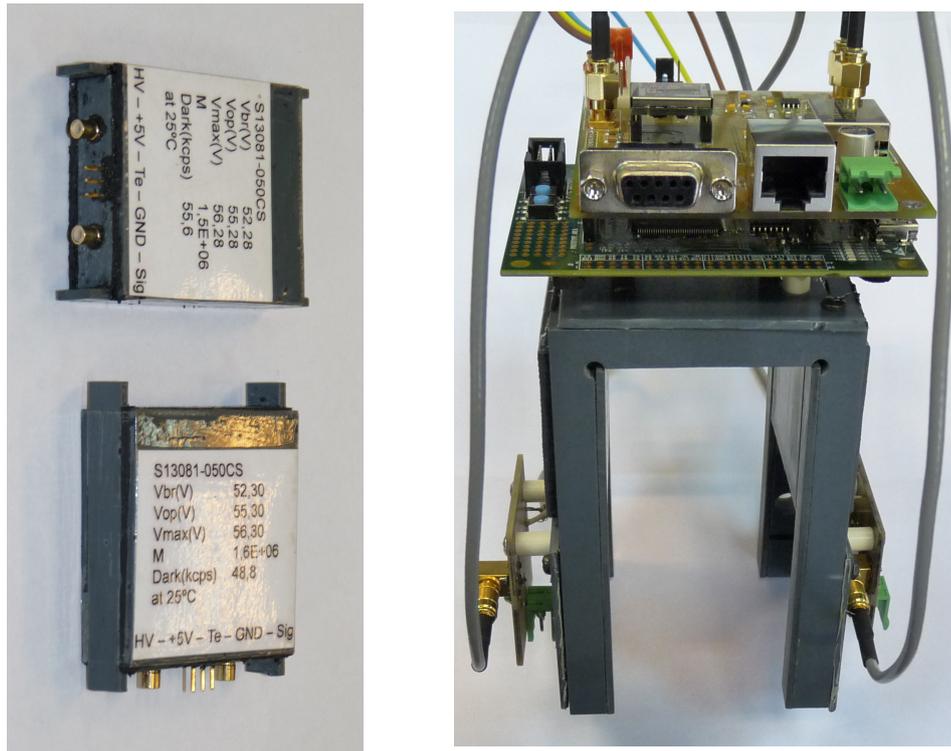


FIGURA 6.3: A la izquierda se muestra una fotografía de los dos detectores de centelleo utilizados en el telescopio de muones. Se pueden observar los conectores del tipo SMB utilizados para la polarización del SiPM y su salida de señal. También se encuentra el conector para el sensor de temperatura interno. A la derecha se muestra una fotografía de la estructura de soporte en forma de C del telescopio de muones.

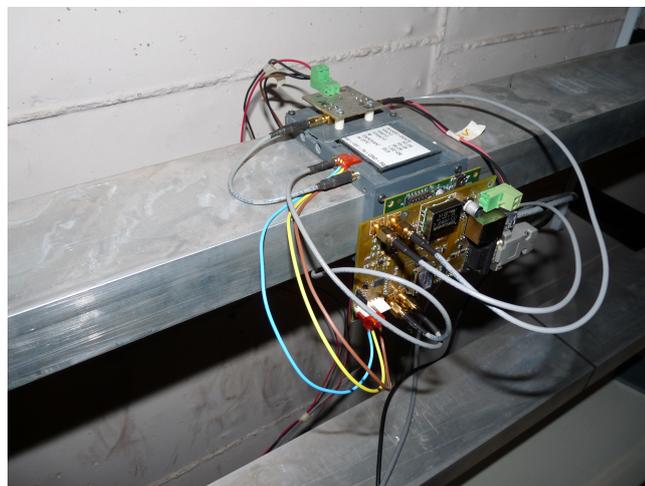


FIGURA 6.4: Fotografía del telescopio de muones montado en el instrumento de medición PIPA.

6.3. Pruebas del Prototipo del Sistema de Detección

La primera etapa del desarrollo del sistema de conteo con SiPM constó en realizar una prueba de concepto del SiPM, *front-end* y *back-end* seleccionados. Con esta prueba se evaluó la factibilidad de realizar el conteo de partículas con el sistema propuesto. Un esquema del montaje experimental completo se puede observar en la

figura 6.5.

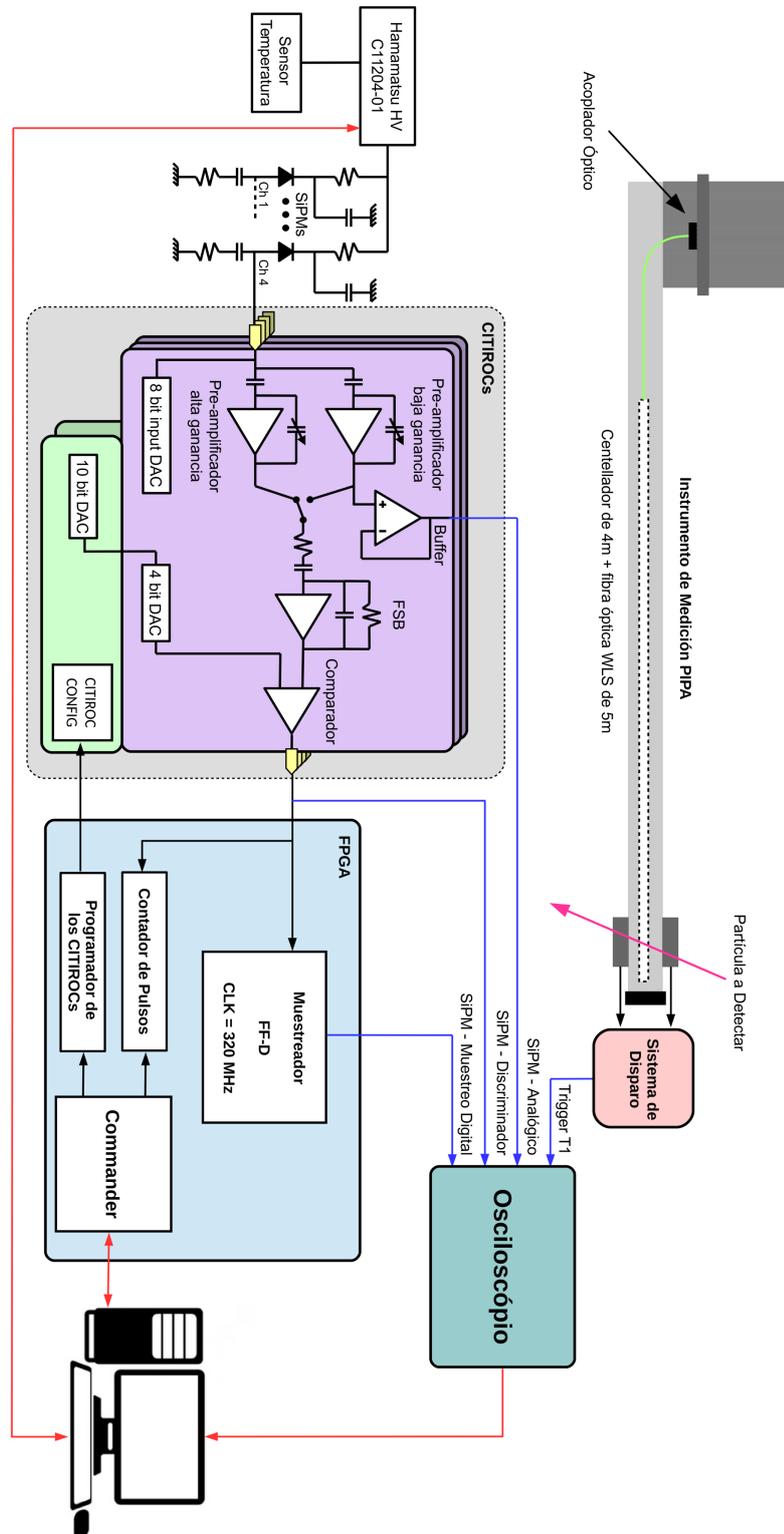


FIGURA 6.5: Esquema de la electrónica.

Las variables principales a medir durante estas pruebas fueron las señales analógicas amplificadas de los SiPMs bajo prueba, la medición de la salida del discriminador del CITIROC, tanto su forma como la tasa de ocurrencia de las mismas y la salida de la etapa de muestreo del FPGA.

Para estas pruebas se utilizó como *front-end* y *back-end* una placa de evaluación del ASIC CITIROC provisto por la empresa *Weeroc*. Este kit está formado por un ASIC CITIROC y un FPGA Cyclone III modelo EP3C16Q240. En la figura 6.6 se puede observar una fotografía del kit utilizado.

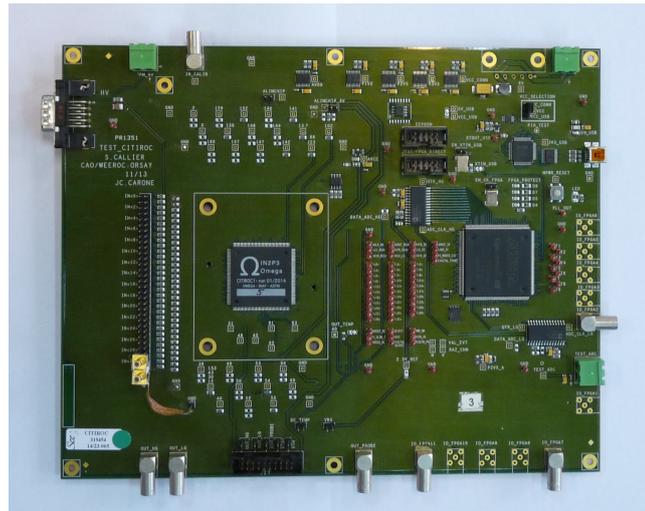


FIGURA 6.6: Fotografía del Kit de desarrollo del ASIC CITIROC.

El SiPM utilizado en estas pruebas fue el S13081-050CS. Se realizó un soporte mecánico de polioximetileno (POM) capaz de alojar cuatro SiPMs (ver figura 6.7), tres de los cuales se alinean con los canales 1, 2 y 3 del adaptador óptico del instrumento de medición *PIPA* (ver figura 6.1). La fuente de alimentación utilizada para la polarización de los SiPM fue la fuente Hamamatsu C11204-01. Además se utilizó el sensor de temperatura LM94021 para realizar el sistema de control de la tensión de polarización de los SiPM.

Se programó el FPGA para que sea capaz de recibir la configuración del CITIROC desde una PC mediante un puerto serie y así realice la programación del mismo. Además se realizó un módulo de software capaz de medir la tasa de pulsos digitales presentes a la salida del discriminador y otro capaz de realizar un muestreo de estos pulsos a un frecuencia de 320 MHz y cuya salida fue enviada a pines externos del FPGA para su medición.

Para realizar las mediciones se utilizó un osciloscopio Tektronix modelo DPO7104. Para la medición de las señales digitales se utilizaron puntas activas Tektronix modelo TAP1500.

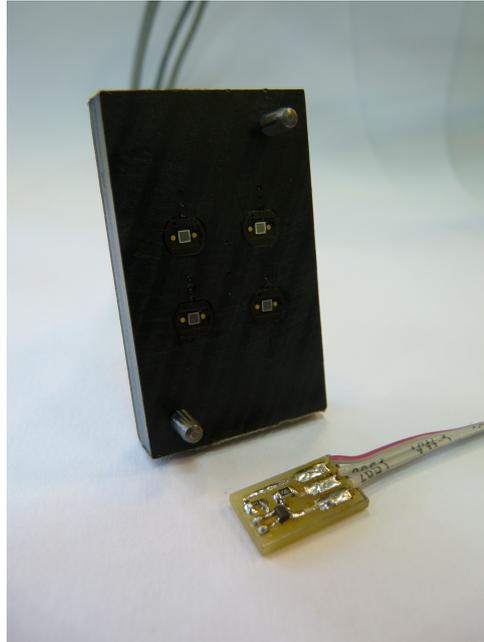


FIGURA 6.7: Fotografía del soporte de POM con los cuatro SiPMs S13081-050CS. Este posee las dos espigas metálicas de alineación con el adaptador óptico. En la parte inferior se observa al sensor de temperatura LM94021 utilizado para la medición de la temperatura de los SiPMs bajo prueba.

6.3.1. Fotones Detectados en Función de la Distancia de Impacto

La atenuación de las fibras ópticas es un factor fundamental que limita el rendimiento del sistema de detección. Este efecto produce que el valor medio de fotones que llegan al fotodetector producto del impacto de una partícula dependa de la posición de impacto en el detector. A mayor distancia a lo largo de la fibra que los fotones deban recorrer, menor será la cantidad de fotones recibidos.

Para poder medir la cantidad de fotones detectados en función de la distancia de impacto es necesario realizar la medición de la cantidad de carga que genera el SiPM para partículas a diferentes distancias de impacto y luego normalizar dicho valor con la carga de un PE.

Para realizar esta medición se utilizó el montaje experimental descrito anteriormente. Se colocó el telescopio de muones en 8 valores diferentes de distancia de fibra óptica respecto del adaptador óptico y se midieron con el osciloscopio las señales generadas por el SiPM bajo prueba luego de la etapa de amplificación. Estas mediciones se repitieron para dos valores diferentes de sobretensión del SiPM. Además, se obtuvo la medición de pulsos de un PE para las dos sobretensiones utilizadas, para poder realizar la normalización y así poder obtener el número de fotones medio detectados por el sistema en función de la distancia de impacto de las partículas. A modo de ejemplo, se puede observar en la figura 6.8 la superposición de mil trazas adquiridas por el osciloscopio, con el telescopio de muones colocado a una distancia de 4,3 m.

Para obtener el valor de carga de las señales adquiridas con el osciloscopio se

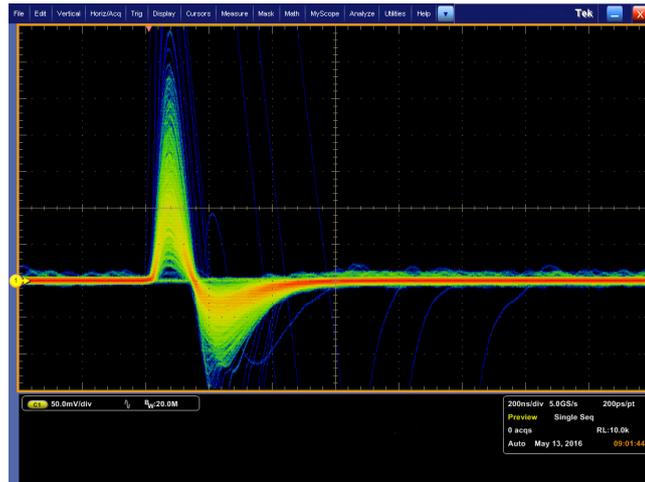


FIGURA 6.8: Superposición de las trazas (tensión en función del tiempo) de los pulsos del SiPM amplificados de 1000 disparos generados por eventos de muones. Las mediciones se realizaron a una temperatura de 25°C y $\Delta V = 3,75\text{ V}$.

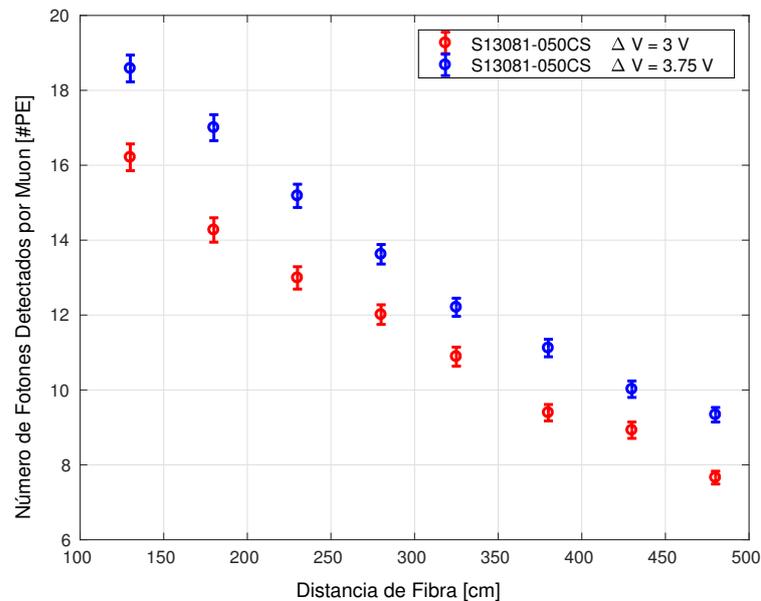


FIGURA 6.9: Número medio de fotones detectados por el impacto de un muon en el detector en función de la distancia de fibra, para dos sobretensiones: $\Delta V = 3\text{ V}$ y $\Delta V = 3,75\text{ V}$. El valor medio de fotones detectados por el fotodetector producto del impacto de una partícula no es uniforme a lo largo del detector debido a la atenuación de la fibra óptica. Las barras de error sólo se deben a errores estadísticos de la media. Todas las mediciones fueron realizadas a 25°C .

realizó un procesamiento *offline* de las señales mediante un programa en MATLAB. A continuación se describe el método utilizado para la obtención del valor de la carga para las señales obtenidas. Las trazas adquiridas tienen una cantidad de 10 mil muestras, adquiridas a una velocidad de 5 GS/s , es decir, éstas poseen una duración de $2\ \mu\text{s}$. De los valores de las muestras de los primeros 200 ns se obtiene el valor de la línea de base, para ello se obtiene el valor medio de las primeras 1000 muestras de la

traza. Además de éstas se obtiene su desvío estándar. Para la obtención del valor de la carga del pulso se toman los 2000 valores de las muestras correspondientes entre 300 ns y 700 ns, a los que se le resta el valor de la línea de base obtenida y se realiza la sumatoria de todos los valores que superan al valor de un desvío estándar de la línea de base. Por último, a este valor se lo multiplica por el diferencial de tiempo del muestreo y se lo divide por el valor de la impedancia de entrada del osciloscopio, en este caso de 50Ω . Los resultados obtenidos se pueden observar en la figura 6.9.

6.3.2. Ancho Temporal de las Señales Digitales

Uno de los parámetros más relevantes para el sistema de conteo es la duración temporal de las señales digitales a la salida del discriminador del CITIROC. Esto es debido a que estos anchos temporales deben ser del orden del ancho temporal del arribo de fotones al fotodetector, para no degradar la resolución temporal del detector.

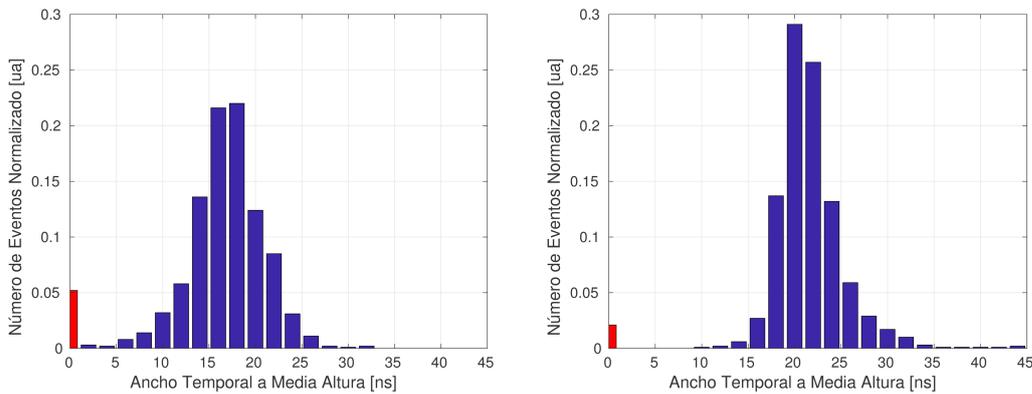


FIGURA 6.10: Ambos gráficos muestran el histograma de ancho temporal de 1000 trazas de pulsos digitales a la salida del discriminador del CITIROC. Las barras de color rojo corresponden a las trazas que no tienen un pulso a la salida digital. En el histograma izquierdo (derecha) el telescopio de muones se colocó a 430 cm (130 cm) de fibra. Todas las mediciones fueron realizadas a 25°C .

Para realizar la medición de estos anchos se utilizó el montaje experimental anteriormente descrito y se adquirieron con el osciloscopio las señales a la salida del discriminador del CITIROC. Previamente a la adquisición de las señales se realizó la calibración completa para el SiPM bajo prueba. El nivel de discriminación fue colocado a 2,5 veces el nivel de un PE. A las señales adquiridas se les calculó el ancho temporal a la mitad de la amplitud máxima (FWHM del inglés *Full Width at Half Maximum*). Esta medición se hizo para 8 posiciones del telescopio de muones y para dos valores de sobretensión.

En la figura 6.10 se puede observar el histograma de anchos temporales a la salida del discriminador del CITIROC para dos distancias de fibra distintas. Se puede observar que para la distancia más cercana el valor medio de la distribución aumenta. En ambos casos el 99% de los anchos medidos se encontraban por debajo de los 35 ns.

6.3.3. Eficiencia del sistema de detección

Este parámetro es aquel que indica la capacidad que tiene el detector en poder identificar las partículas que lo impactan. Es uno de los parámetros principales del sistema de detección y es aquel que se trata de maximizar sin afectar el resto de los parámetros del detector.

La eficiencia se obtiene de la relación entre la cantidad de partículas que fueron detectadas y la cantidad total de partículas que impactaron el detector. Dado que la detección de partículas se basa en una discriminación de la señal que genera el SiPM respecto a un nivel umbral, la capacidad de identificar las partículas es dependiente de la cantidad de fotones que son detectados por el SiPM, y como este parámetro depende de la distancia a la que impacta la partícula en la barra centelladora dado la atenuación de la fibra óptica, la eficiencia del detector es dependiente de la distancia del impacto.

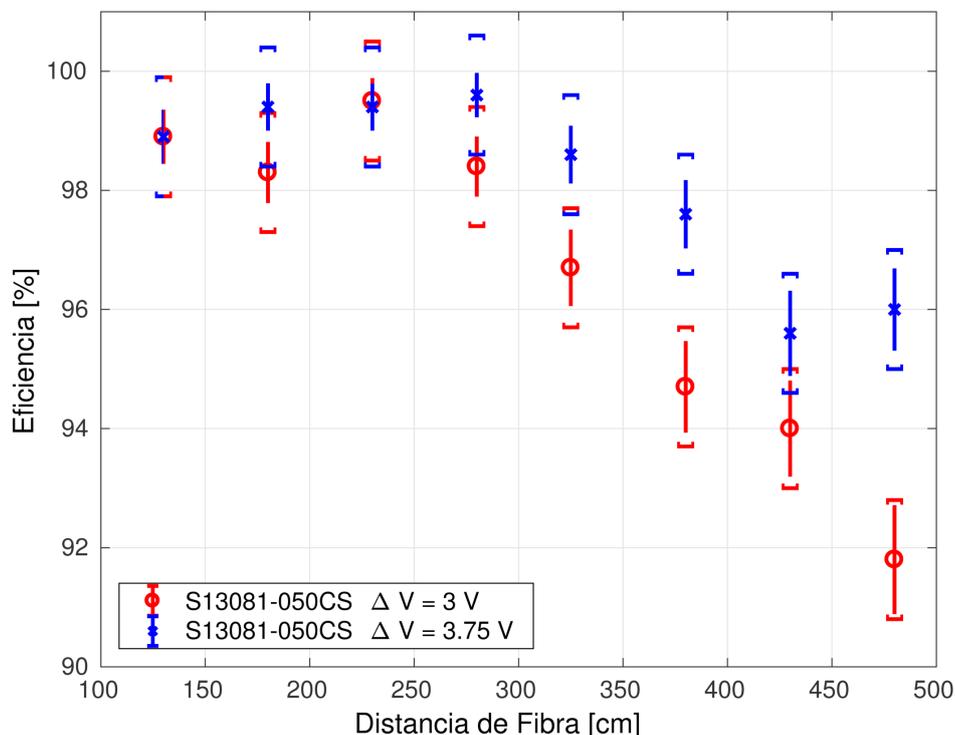


FIGURA 6.11: Medición de eficiencia para dos ΔV diferentes. El valor estimado de la eficiencia integrada es: 97 % para $\Delta V = 3$ V (puntos rojos) y 98 % para $\Delta V = 3,75$ V (puntos azules). Las líneas verticales representan errores estadísticos suponiendo una distribución binomial y los corchetes representan los errores sistemáticos causados por los falsos disparos del telescopio de muones.

Para realizar la medición de la eficiencia del sistema de detección se utilizó el montaje experimental anteriormente descrito y se adquirieron con el osciloscopio las señales a la salida del discriminador del CITIROC y la salida de la etapa de muestreo del FPGA por cada disparo generado por el telescopio de muones. Esta medición se hizo para 8 posiciones del telescopio de muones, para dos valores de

sobretensión y el nivel de discriminación configurado fue de 2,5 veces el valor de pico de un PE.

En la figura 6.11 se puede observar el resultado de esta medición. Se puede observar que para mayor ΔV la eficiencia incrementa para las distancias más alejadas, esto es debido a que al aumentar el valor de sobretensión del SiPM se produce un aumento en el PDE y por lo tanto el valor medio de fotones detectados aumenta. Aunque la eficiencia tiene una dependencia con la distancia, un parámetro importante que debe calcularse es la eficiencia integrada sobre toda la barra centelleante. Esta se obtiene realizando la relación entre la integral de la curva de atenuación entre las distancias que se encuentra el centellador, en el caso de la prueba es entre 1 m y 5 m de fibra, respecto a la integral de la curva de una eficiencia del 100 %. El valor estimado de la eficiencia integrada es: 97 % para $\Delta V = 3 \text{ V}$ y 98 % para $\Delta V = 3,75 \text{ V}$.

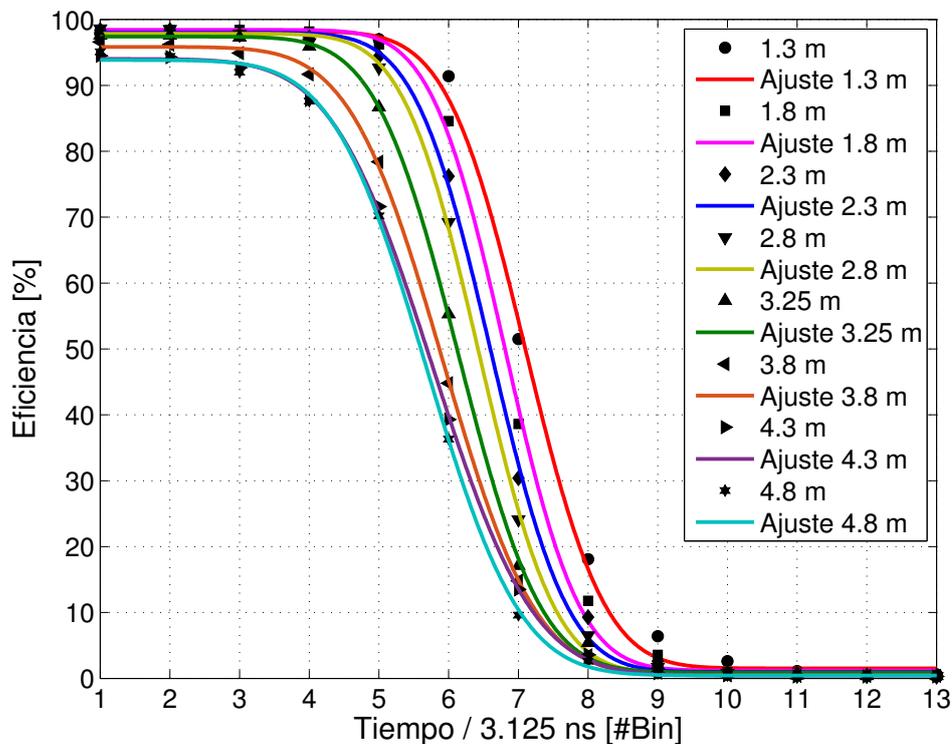


FIGURA 6.12: Eficiencia en función del ancho temporal mínimo del pulso digital a la salida del discriminador del CITIROC.

En la figura 6.12 se puede observar como varía la eficiencia en función del ancho temporal mínimo del pulso digital a la salida del discriminador del CITIROC. De este gráfico también se puede obtener información sobre la distribución de los anchos temporales de los pulsos digitales. Se puede observar que todos los pulsos tienen como mínimo entre uno y dos bins temporales y el 99 % de los pulsos tiene como máximo 10 bins temporales. Es por este motivo que para la estrategia de identificación de partículas se pide que los pulsos digitales tengan un ancho temporal de al

menos un bin y un máximo de 10 bins.

6.4. Pruebas de la Electrónica de Pre-Producción

Una vez desarrolladas las electrónicas de pre-producción se realizaron una serie de pruebas previas a la instalación de las mismas en la estación de SD *Kathy Turner*. En las sub-secciones siguientes se detallan las pruebas realizadas y sus resultados. El montaje experimental utilizado para las pruebas es el mismo que fue utilizado para las pruebas del prototipo del sistema de detección que fue descrito en la sección 6.2.

6.4.1. Ancho Temporal de las Señales Digitales

Para realizar la medición del ancho de los pulsos digitales se utilizó el montaje experimental anteriormente descrito y se adquirieron con el FPGA las señales a la salida del discriminador del CITIROC con una velocidad de muestreo de 320 Mhz. Previamente a la adquisición de las señales se realizó la calibración completa para los SiPMs bajo prueba. El nivel de discriminación fue colocado a 2,5 veces el nivel de un PE y el valor de sobretensión a 3 V. A las señales adquiridas se les calculó el ancho temporal midiendo la cantidad de unos consecutivos adquiridos. Esta medición se realizó para 2 posiciones del telescopio de muones.

En la figura 6.13 se puede observar el histograma de anchos temporales de los pulsos digitales a la salida del discriminador del CITIROC adquiridos por el FPGA para dos diferentes distancias a lo largo de la fibra óptica. Para la distancia más lejana (el gráfico de la izquierda) se puede observar que el 99,7% de los pulsos digitales poseen un ancho temporal por debajo de los 12 bins. Para la distancia más cercana (el gráfico de la derecha) se observa un incremento en el valor medio de la distribución de ancho temporal de los pulsos, en este caso el 98,7% de los pulsos poseen un ancho temporal por debajo de los 12 bins.

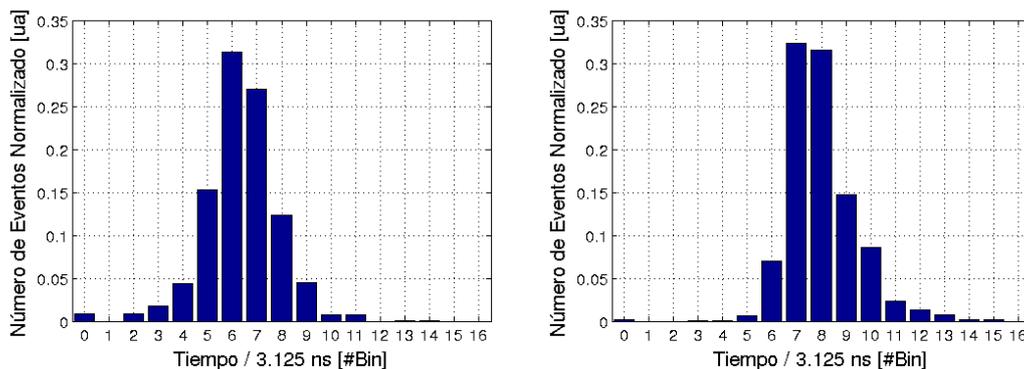


FIGURA 6.13: Ambos gráficos muestran el histograma de ancho temporal de 1000 trazas de pulsos digitales adquiridos con el FPGA a 320 MHz. En el histograma izquierdo (derecha) el telescopio de muones se colocó a 480 cm (180 cm) de fibra. Todas las mediciones fueron realizadas a 25°C.

6.4.2. Eficiencia del sistema de detección

Como se mencionó anteriormente, la eficiencia del sistema de detección es uno de los parámetros principales del sistema de detección. De las mediciones que se describieron anteriormente con la versión de prototipo se pudo ver que la eficiencia al final de la varilla era la menor, debido a la atenuación de la fibra óptica, es por este motivo que se realizaron una serie de mediciones variando el valor de sobretensión del SiPM, como así también el nivel de discriminación para evaluar la eficiencia al final de la barra centelladora para tres canales diferentes de la electrónica. Los resultados de dichas mediciones se encuentra en la tabla 6.1.

Parámetros		Eficiencia [%]		
Sobretensión [V]	Nivel de Discriminación [#PE]	Ch 2	Ch 7	Ch 42
3,5	3,5	96,0	90,4	97,0
3,5	2,5	98,8	95,2	98,8
3	3,5	94,3	87,3	95,0
3	2,5	97,2	93,9	99,3
2,5	2,5	97,5	91,6	97,4

CUADRO 6.1: Resultados de la medición de eficiencia para diferentes valores de sobretensión y nivel de discriminación para tres canales de la electrónica bajo prueba a una distancia de 4,8 m de fibra.

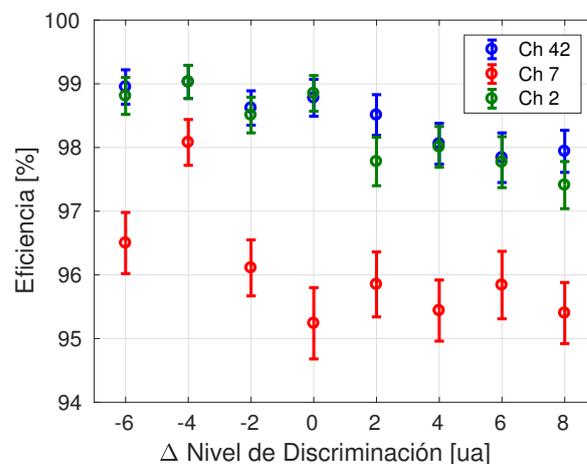


FIGURA 6.14: Medición de la eficiencia para los tres canales con centellador del instrumento PIPA a una distancia de 4,8 m en función de la variación del nivel de discriminación entorno al nivel de 2,5 PE calculado. El valor de sobretensión durante la medición fue de $\Delta V = 3,5$ V.

Se realizó la medición de la eficiencia en función de la variación del nivel de discriminación entorno al nivel calculado para observar su estabilidad. En la figura 6.11 se puede observar los resultados de dicha medición para los tres canales con barras centelladoras del instrumento PIPA a una distancia de fibra de 4,8 m, se utilizó un $\Delta V = 3,5$ V y se varió el nivel de discriminación de cada canal entorno al nivel de discriminación calculado de 2,5 PE. Se puede observar que la eficiencia decrece al

aumentar el nivel de discriminación. La variación de eficiencia es de aproximadamente $0,1\%/unidad\ de\ DAC$ para los valores de discriminación entorno al nivel de 2,5 PE.

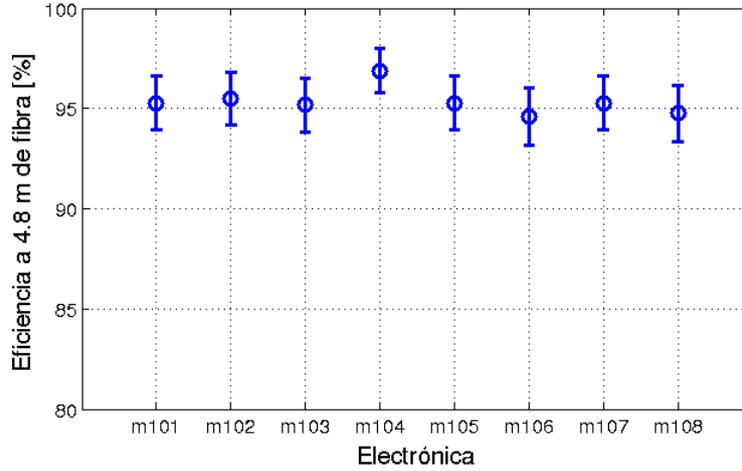


FIGURA 6.15: Eficiencia del canal 2 de las 8 electrónicas instaladas en la posición KT de la UC. Todas las electrónicas se configuraron con un $\Delta V = 3,5\text{ V}$ y el nivel de discriminación en 3,5 PE.

También se realizaron pruebas de la eficiencia utilizando las 8 electrónicas de pre-producción que se instalaron en la estación de SD *Kathy Turner*. El montaje experimental utilizado para la medición fue el mismo para todas las electrónicas. Para esta prueba se utilizó el valor de sobretensión de $\Delta V = 3,5\text{ V}$ y el nivel de discriminación en 3,5 PE. Los resultados de esta prueba se pueden observar en la figura 6.15.

6.4.3. Probabilidad de Sobre-Conteo por Radiación de Fondo

Los SiPMs instalados en los módulos contadores de muones generan constantemente pulsos debido a la detección de luz generada por el impacto de partículas en el detector (partículas secundarias producto de un rayo cósmico o de la radiación emitida por los materiales circundantes al detector) o por su ruido inherente. Estos pulsos luego de ser discriminados por el *front-end* son adquiridos por el *back-end*.

Existe la probabilidad de que uno de estos pulso ocurra durante un evento de interés, produciendo un incremento en la cantidad de partículas contadas por el detector, lo que introduce una sobre-estimación de la cantidad total de partículas que impactaron al detector durante el evento.

La electrónica posee un sistema que mide la tasa de pulsos totales TP_{total} que ocurren por segundo y envía la medición a un servidor el cual se encarga de su almacenamiento. Para obtener la probabilidad de sobre-conteo por fondo $PSC_{por\ fondo}$ en una ventana temporal de $1\ \mu s$ se propone realizar el siguiente cálculo:

$$PSC_{por\ fondo} = TP_{total} * 1\ \mu s \quad (6.1)$$

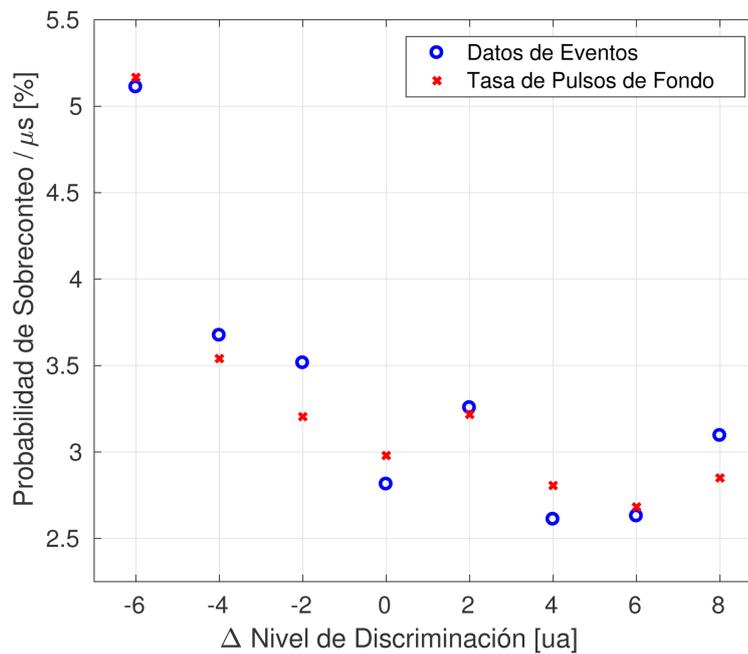


FIGURA 6.16: Probabilidad de sobre-conteo por radiación de fondo en una ventana temporal de 1μ s en función de la variación del nivel de discriminación entorno al nivel de 2,5 PE calculado.

De las mediciones realizadas para evaluar la eficiencia en función de la variación del nivel de discriminación de la sección anterior se obtuvo, de los canales que no poseían centellador, la cantidad total de pulsos contados debido al ruido inherente de los SiPM y con este valor se obtuvo para cada nivel de discriminación una probabilidad de sobre-conteo en una ventana temporal de 1μ s. Al mismo tiempo durante la toma de datos se realizó la medición de la tasa de pulsos totales. De dicha medición se obtuvo el valor medio y se realizó el cálculo de la probabilidad $PSC_{por\ fondo}$. En el gráfico de la figura 6.16 se puede observar el valor de la probabilidad de sobre-conteo en una ventana temporal de 1μ s obtenida mediante los datos de los eventos realizados y de la medición de la tasa de pulsos de fondo. Del análisis de los datos medidos se puede observar una fuerte concordancia entre ambas mediciones.

6.4.4. Distribución del Tiempo de Arribo para una Misma Partícula

Otra de las mediciones realizadas en el telescopio de muones es la distribución de la diferencia temporal de las señales que deja una misma partícula al atravesar dos centelladores apilados.

En la figura 6.17 se puede observar la distribución de la diferencia temporal para dos distancias de fibra diferentes. Se realizó el ajuste de los valores con una función normal, la media para ambos ajustes es de cero y para la distancia de 1,8 m el $\sigma_{1,8} = 0,66$ y para la distancia de 4,8 m el $\sigma_{4,8} = 0,92$.

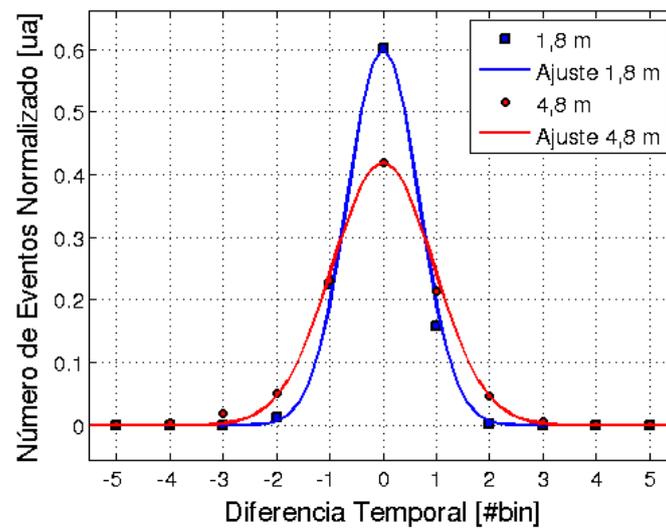


FIGURA 6.17: Medición de la distribución de la diferencia temporal de las señales que deja una misma partícula al atravesar dos centelladores apilados para dos distancias de fibra diferentes.

Del análisis de estas mediciones se puede observar que para la distancia más lejana el ancho de la distribución aumenta, esto es debido a que los efectos de atenuación de la fibra producen que el tiempo de arribo del pulso de luz al dispositivo sensor tenga una mayor fluctuación a medida que aumenta la distancia que éste se propaga dentro de la fibra.

Capítulo 7

Mediciones con los Detectores Instalados

7.1. Instalación en *Kathy Turner*

El 25 de Octubre del 2016 se finalizó la instalación de 8 electrónicas de la versión de pre-producción con SiPM en los módulos contadores de muones de la estación de SD *Kathy Turner*. En las figuras 7.1 y 7.2 se pueden observar cuatro fotografías del proceso de instalación de la electrónica en el módulo 101 de dicha posición de SD.

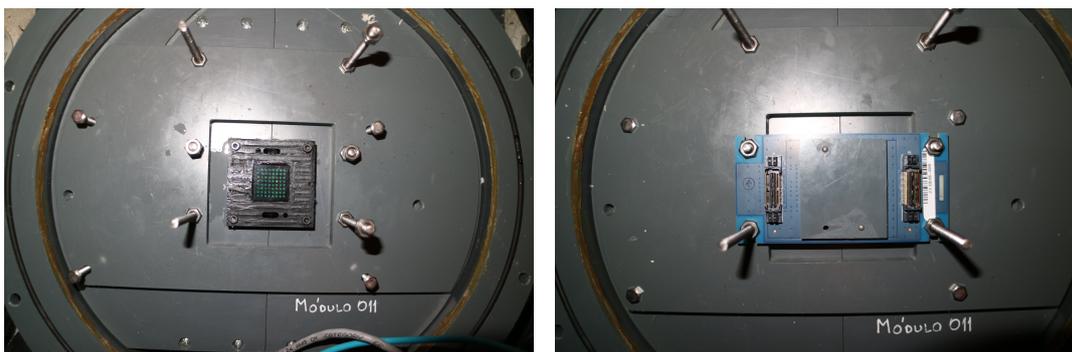


FIGURA 7.1: La fotografía de la izquierda muestra al adaptador óptico de un módulo contador de muones y la fotografía de la derecha muestra la instalación de la placa con el arreglo de 64 SiPMs en el módulo.

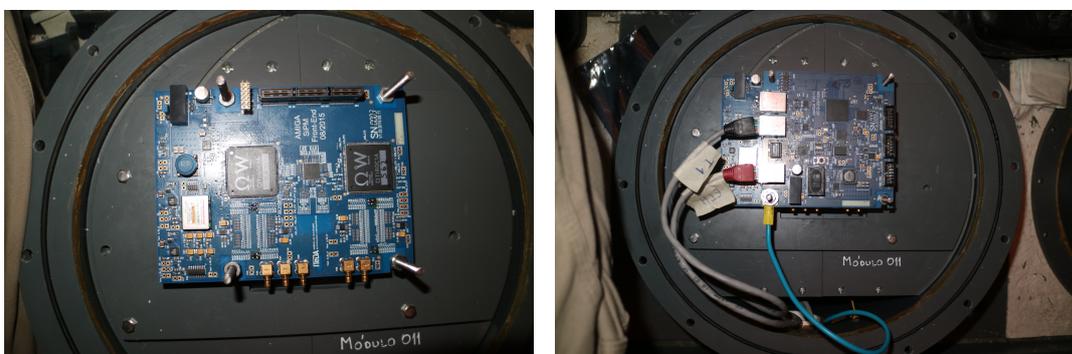


FIGURA 7.2: La fotografía de la izquierda muestra la instalación de la placa del *front-end* y la de la derecha la instalación del *back-end* y cableado final del módulo.

Esta electrónica enterrada se interconecta con la superficie mediante dos cables,

uno para la alimentación y conexión ethernet y otro para recibir la señal de disparo T1. A su vez posee un tercer para la puesta a tierra del módulo.

Como se mencionó en la sección 2.4.2 los módulos se encuentran enterrados a 2,3 m de la superficie. Para poder acceder a su electrónica los módulos cuentan con un tubo de acceso por el cual una persona puede bajar y realizar la instalación o mantenimiento de la electrónica. Una vez finalizada la instalación, el recinto que contiene la electrónica es recubierto con bloques de poliestireno expandido y sobre ellos se colocan 5 bolsas rellenas con 1 m³ de tierra del sitio cada una, para completar el blindaje del módulo. Por último se recubre el tubo de acceso con una tapa, la cual evita el ingreso de agua al interior del mismo. En las figuras 7.3 y 7.4 se pueden observar cuatro fotografías de los procedimientos anteriormente descriptos.



FIGURA 7.3: La fotografía de la izquierda muestra el cerramiento del recinto donde se encuentra la electrónica del módulo contador. La fotografía de la derecha muestra la colocación de los bloques de poliestireno expandido.



FIGURA 7.4: La fotografía de la izquierda muestra el rellenado del tubo de acceso con las bolsas de tierra. La fotografía de la derecha muestra el tubo de acceso con su tapa exterior.

En la figura 7.5 se puede observar un esquema de los 8 módulos contadores de muones instalados en la estación de SD *Kathy Turner*. Se puede observar el número identificatorio correspondiente a cada módulo, su tamaño y orientación.

7.2. Calibración de los Módulos Contadores de Muones

Las electrónicas antes de ser emplazadas en los módulos contadores de muones de *Kathy Turner* se les realizó la calibración descrita en el capítulo 5. Esta calibración

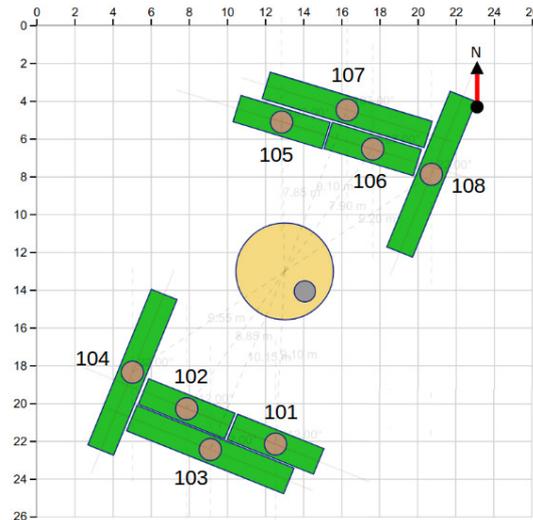


FIGURA 7.5: Esquema de los 8 módulos contadores de muones instalados en la estación SD Kathy Turner.

se divide en dos partes, una primera tiene como objetivo configurar a la electrónica para que todos los SiPMs operen a un mismo valor de sobretensión y la segunda calibración tiene como objetivo configurar los niveles de discriminación.

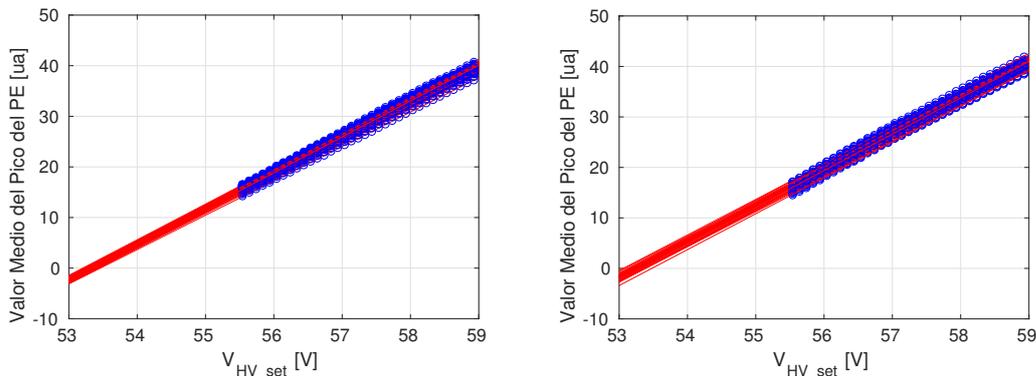


FIGURA 7.6: Valores medio del pico de un PE para cada canal de la electrónica del módulo 108 de Kathy Turner en función de la tensión configurada de la fuente de alta tensión. A la izquierda se encuentran los valores obtenidos para los 32 canales del CITIROC 1 y a la derecha los obtenidos para los 32 canales del CITIROC 2.

Para realizar la primera calibración se obtuvieron los valores medio del pico de un PE para cada canal en función de la tensión configurada de la fuente de alta tensión. En la figuras 7.6 se pueden observar dos gráficos de los resultados obtenidos para ambos CITIROCs de la electrónica del módulo 108 de Kathy Turner. De estos datos se obtuvieron los valores de las tensiones de ruptura para los 64 SiPMs que conforman el arreglo. En la figura 7.7 se puede observar un histograma de los valores de las tensiones de ruptura obtenidas.

De estos valores se obtuvo el mayor al cual se le sumó un valor de sobretensión determinado, en el caso de las 8 electrónicas instaladas el valor es de $\Delta V = 3,5 V$, con este valor obtenido se configura la fuente de alta tensión. A su vez, se obtuvieron

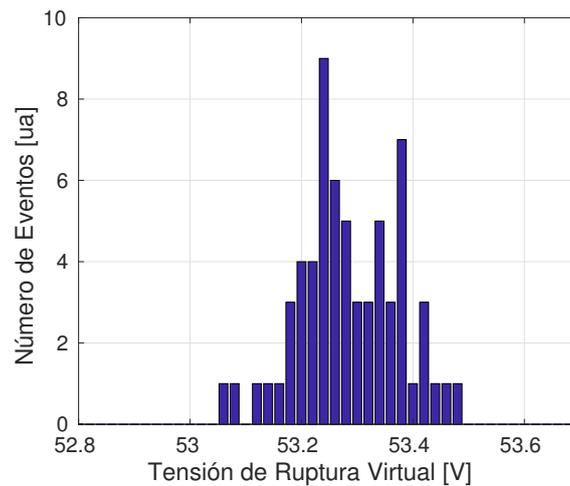


FIGURA 7.7: Histograma de los valores de las tensiones de ruptura virtuales de los 64 SiPMs de la electrónica 108 de *Kathy Turner*.

los valores de los DACs *8-bit input DAC* para que todos los SiPMs de la electrónica estén polarizados con el mismo ΔV .

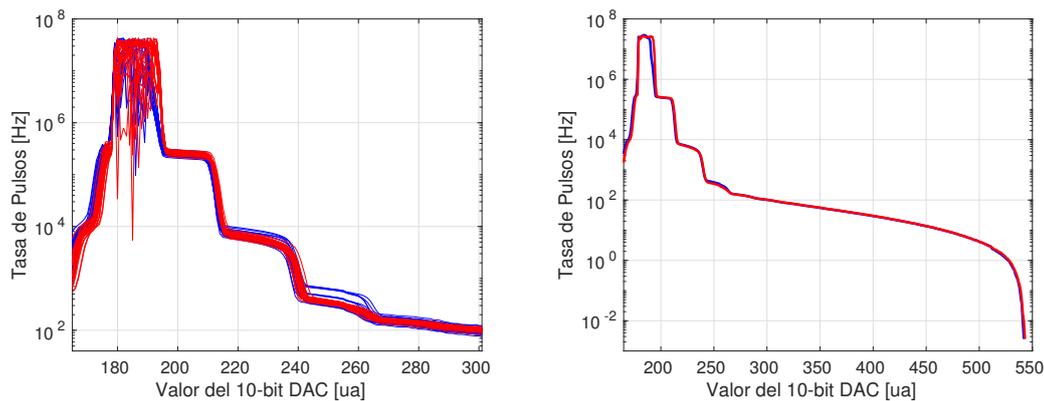


FIGURA 7.8: Medición de la tasa de pulsos en función del valor del nivel de discriminación de la electrónica 108. A la izquierda se puede observar las 64 curvas de cada canal para el intervalo de interés de los valores del nivel de discriminación. En azul se encuentran graficados los canales correspondientes al CITIROC 1 y en rojo los correspondientes al CITIROC 2. A la derecha se encuentran graficadas las curvas de los valores medios obtenidos para cada CITIROC, en azul el CITIROC 1 y en rojo el CITIROC 2.

Una vez que se configuró la electrónica se realizó la medición de la tasa de pulsos en función del valor del nivel de discriminación con las electrónicas instaladas en los detectores. En la figura 7.8 se pueden observar los resultados de dicha medición. El gráfico de la izquierda se encuentran graficadas las 64 curvas de cada canal. El color de las curvas indica a qué CITIROC pertenece el canal graficado. Se puede observar que las transiciones de un plateau a otro ocurren aproximadamente para los mismos valores del nivel de discriminación dentro de un mismo CITIROC. Los valores de la tasa de pulsos para un mismo plateau puede variar entre canales debido a que estos pueden poseer diferentes niveles de cuentas oscuras, *crosstalk* y *afterpulsing*.

Módulo	Configuración CITIROC 1		Configuración CITIROC 2	
	2,5 PE	3,5 PE	2,5 PE	3,5 PE
101	245	270	246	271
102	246	270	243	267
103	247	272	244	269
104	251	277	251	278
105	244	268	240	263
106	249	274	247	272
107	245	269	247	270
108	249	273	249	274

CUADRO 7.1: Valores de configuración de los niveles de discriminación (10-bit DAC) para las 8 electrónicas instaladas en *Kathy Turner* para dos niveles diferentes de discriminación (2,5 PE y 3,5 PE).

El nivel de discriminación para las electrónicas fue colocado en dos valores diferentes para realizar pruebas de eficiencia y contaminación por ruido. En un primer período (2016-10-28 a 2017-03-30) los niveles de los discriminadores fueron configurados a 3,5 PE y para el segundo período (2017-04-01 a la actualidad) fueron configurados a 2,5 PE. Los niveles que fueron configurados en las 8 electrónicas instaladas en *Kathy Turner* se pueden observar en la tabla 7.1.

Para la configuración de sobretensión seleccionada se realizó la medición del *crosstalk* medio de los 64 canales de las ocho electrónicas instaladas. Esta medición se realizó a partir de los valores obtenidos de las curvas de las tasas de pulsos de cada canal. Los valores obtenidos se encuentran en la tabla 7.2.

Módulo	<i>Crosstalk</i> Medio [%]	<i>Crosstalk</i> Std [%]
101	2,4	0,1
102	2,7	0,1
103	2,1	0,1
104	2,6	0,1
105	2,6	0,1
106	2,5	0,1
107	2,5	0,2
108	2,5	0,3

CUADRO 7.2: Valores de *crosstalk* medio de las ocho electrónicas instaladas en los módulos de la estación de SD *Kathy Turner*.

7.3. Selección del Punto de Disparo para la Adquisición

Como se mencionó en la sección 4.3.3 la electrónica al recibir un disparo almacena las señales de los discriminadores de los 64 canales del módulo por un tiempo de $6,4 \mu\text{s}$ con una frecuencia de muestreo de 320 MHz. Es decir, almacena un total de 2048 muestras por cada canal. La electrónica es capaz de ser configurada para que el disparo se encuentre temporalmente ubicado en cualquier posición de las 2048

muestras, es decir que hay un cierto número de muestras previas al disparo y otras posteriores al mismo.

El disparo que recibe la electrónica del módulo contador de muones, como se mencionó en la sección 2.2.1, es generado por el tanque de superficie SD. Este disparo recibe el nombre de T1 y existen diferentes tipos. Dado que el T1 se puede llegar a generar temporalmente en diferentes momentos respecto del tiempo de arribo de la cascada atmosférica extendida y a su vez existe un tiempo de propagación de la señal de T1 entre la estación de SD y el módulo, se genera un corrimiento temporal entre el tiempo de impacto de los muones en el detector y la posición del disparo del mismo en la ventana de adquisición. A su vez, la señal de T1 que recibe el módulo carece de información sobre el tipo de disparo o la ubicación temporal en la ventana de adquisición de la señal en la estación de SD. Es por estos motivos que una de las primeras pruebas a realizar con los detectores instalados fue la obtención de la posición de disparo que permitiera que los eventos entren dentro de la ventana temporal de adquisición.

En la figura 7.9 se puede observar el histograma de ocurrencias de bins temporales con señal para dos períodos de tiempos, cada uno con una posición de disparo diferente. Cada período está formado por 2950 eventos, la gráfica azul corresponde al período 2016-10-28 al 2016-11-06 cuya posición de disparo fue colocada en el bin 1024. La gráfica roja corresponde al período 2016-12-02 al 2016-12-08 cuya posición de disparo fue colocada en el bin 1648.

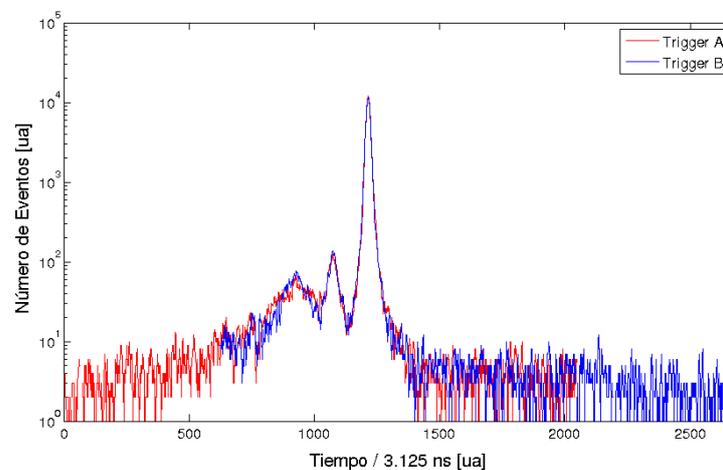


FIGURA 7.9: La gráfica azul corresponde al período 2016-10-28 al 2016-11-06 cuya posición de disparo fue colocada en el bin 1024. La gráfica roja corresponde al período 2016-12-02 al 2016-12-08 cuya posición de disparo fue colocada en el bin 1648.

Se puede observar que para la primera posición del disparo se recorta parte del comienzo de las señales generadas en el detector, pero para la segunda posición (disparo en el bin 1648) se logra que la mayor parte de las señales de los eventos entren dentro de la ventana temporal de adquisición. Es por este motivo que se seleccionó como posición de disparo el bin 1648.

7.4. Tasa de Pulsos de Fondo en los Detectores

Como se mencionó en la sección 6.4.3 los SiPMs instalados en los módulos contadores de muones generan constantemente pulsos debido a la detección de luz generada por el impacto de partículas en el detector (partículas secundarias producto de un rayo cósmico o de la radiación emitida por los materiales circundantes al detector) o por su ruido inherente. Estos pulsos luego de ser discriminados por el *front-end* son adquiridos por el *back-end*. La electrónica se encuentra programada para medir la tasa de ocurrencia de estos pulsos y envía las mediciones periódicamente a un servidor. A esta tasa de pulsos medida se la llama TP_{total} y está formada por

$$TP_{total} = TP_{rad\ amb} + TP_{ruido\ SiPM} \quad (7.1)$$

donde $TP_{rad\ amb}$ es la tasa de pulsos generados por la radiación del ambiente y $TP_{ruido\ SiPM}$ es la tasa de pulsos generados por el ruido del SiPM.

De esta medición se pueden realizar estudios sobre la radiación de fondo a la que es sometido el detector o evaluar la contaminación que pueden llegar a tener los eventos que son adquiridos.

En la figura 7.10 se pueden observar dos gráficos, a la izquierda la medición de la tasa de pulsos TP_{total} detectada por el canal 40 de la electrónica 108 de la posición de SD *Kathy Turner* y a la derecha la medición de temperatura del arreglo de SiPMs, ambas mediciones son del mismo período de tiempo. Durante estas mediciones el nivel de discriminación se encontraba configurado a 3,5 PE.

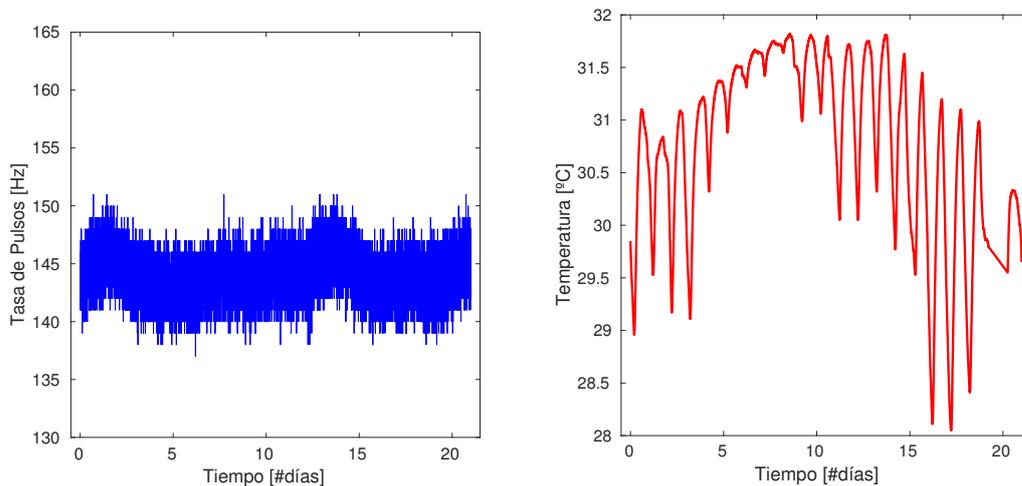


FIGURA 7.10: El gráfico de la izquierda es la medición de la tasa de pulsos totales adquirida por la electrónica del módulo contador de muones 108 de la posición de SD *Kathy Turner* para el período 2017-02-16 al 2017-03-08 con el nivel de discriminación en 3,5 PE. A la derecha se encuentra la medición de la temperatura del arreglo de SiPMs de dicha electrónica para el mismo período.

El factor de correlación entre ambas mediciones es $\sim 2\%$, lo que nos indica que la tasa de pulsos TP_{total} a este nivel de discriminación no se ve afectada por las variaciones de la temperatura.

En la figura 7.11 se pueden observar las mismas mediciones pero para otro período de tiempo, durante el cual el nivel de discriminación se encontraba configurado a 2,5 PE. El factor de correlación entre ambas mediciones es $\sim 98\%$, lo que nos indica que la tasa de pulsos TP_{total} a este nivel de discriminación se ve afectada por las variaciones de la temperatura. Para este caso, al reducir el nivel de discriminación, la tasa de pulsos $TP_{ruido SiPM}$ comienza a ser comparable con la tasa de pulsos $TP_{rad amb}$ y dado que el ruido del SiPM es dependiente de la temperatura, sus fluctuaciones son las observadas en la medición.

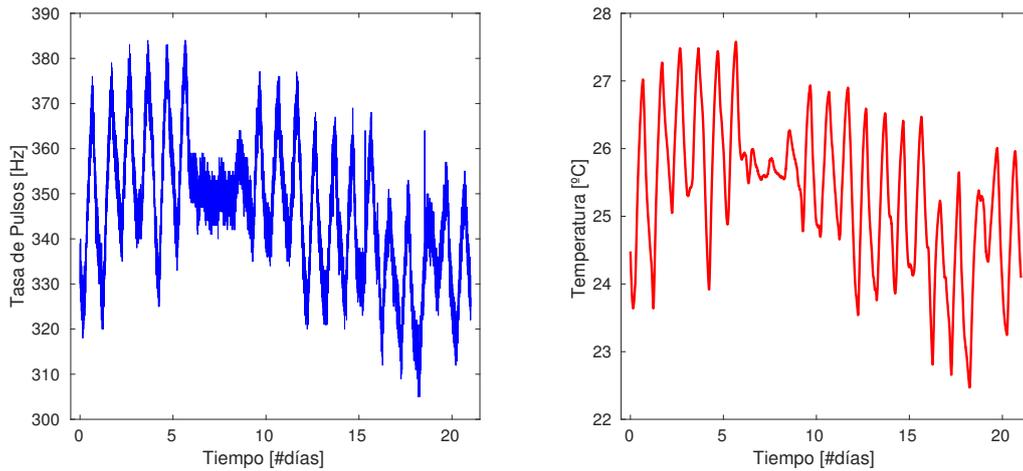


FIGURA 7.11: El gráfico de la izquierda indica la medición de la tasa de pulsos totales adquirida por la electrónica del módulo contador de muones 108 de la posición de SD *Kathy Turner* para el período 2017-04-09 al 2017-04-29 con el nivel de discriminación en 2,5 PE. A la derecha se encuentra la medición de la temperatura del arreglo de SiPMs de dicha electrónica para el mismo período.

7.4.1. Obtención de la Tasa de Pulsos de la Radiación Ambiente

Como se mencionó anteriormente la medición que el detector realiza es la de la tasa de pulsos TP_{total} , y como se observó de las mediciones realizadas cuando el nivel de discriminación es bajo, la tasa de pulsos posee fluctuaciones con la temperatura. Estas fluctuaciones son debido a que a este nivel la tasa de pulsos $TP_{ruido SiPM}$ comienza a ser apreciable y dado que ésta fluctúa con la temperatura, la tasa de pulsos TP_{total} posee variaciones correlacionadas con las variaciones de la temperatura. Esto produce un impedimento de poder realizar una medición directa de la tasa de pulsos $TP_{rad amb}$.

Como se mencionó en la sección 3.2 el ruido en los SiPMs está formado principalmente por tres componentes: cuentas oscuras, *crosstalk* y *afterpulsing*. De las tres componentes del ruido del SiPM la que mayor dependencia con la temperatura tiene son las cuentas oscuras, debido a que esta componente es producto de la generación térmica de portadores de carga en la zona de avalancha. La siguiente ecuación describe la generación de portadores térmicos en un material semiconductor, los cuales conforman la tasa de cuentas oscuras T_{CO} :

$$T_{CO} \approx A \cdot T^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left[-\frac{E_g}{2 \cdot k \cdot T}\right] \quad (7.2)$$

con T la temperatura absoluta [°K], A una constante arbitraria, E_g la energía de band gap del silicio [eV] y k la constante de Boltzmann [eV/K].

Para poder obtener la tasa de pulsos $TP_{rad\ amb}$ se propone substraer de la medición de la tasa de pulsos total la componente de la tasa de pulsos producto de las cuentas oscuras del SiPM.

$$TP_{rad\ amb} = TP_{total} - TP_{CO}(T, A) \quad (7.3)$$

Como se puede observar en la ecuación 7.2 la producción de cuentas oscuras depende de la temperatura, la cual es conocida para el sistema y de una constante arbitraria A desconocida. Para obtener el valor de la constante A se propone obtener su valor para cuando el coeficiente de correlación entre la temperatura medida y la tasa de pulsos $TP_{rad\ amb}$, calculada con la ecuación 7.3, es cero. En la figura 7.12 se puede observar como varía el coeficiente de correlación en función de los valores de la constante A . Se puede observar que para $A = 6,808 \times 10^7$ el valor del coeficiente de correlación es cero.

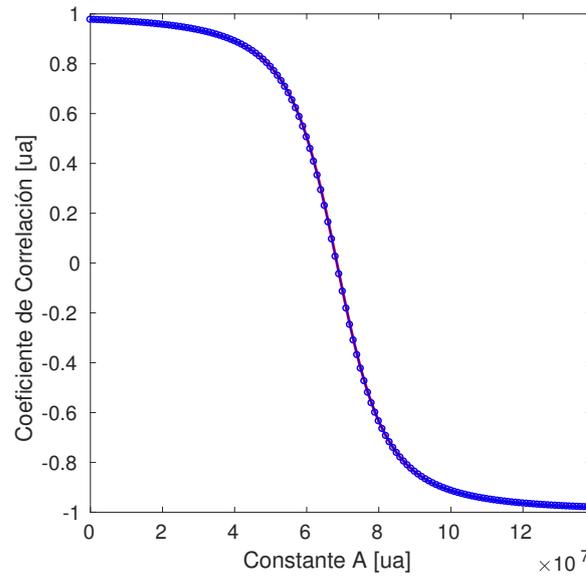


FIGURA 7.12: Coeficiente de correlación entre la temperatura del SiPM y $TP_{rad\ amb}$ calculada para diferentes valores de la constante A .

Luego, con el valor obtenido de A , se calcula el valor de la tasa de pulsos $TP_{rad\ amb}$. En la figura 7.13 se puede observar un gráfico de la tasa de pulsos calculada.

Se puede observar que la tasa de pulsos $TP_{rad\ amb}$ calculada con el método propuesto para el período 2017-04-09 al 2017-04-29 es del mismo orden que con la medida para el período 2017-02-16 al 2017-03-08.

El valor medio de la tasa de pulsos calculada para el período 2017-04-09 al 2017-04-29 es un 19% mayor al del valor medido para el período 2017-02-16 al 2017-03-08,

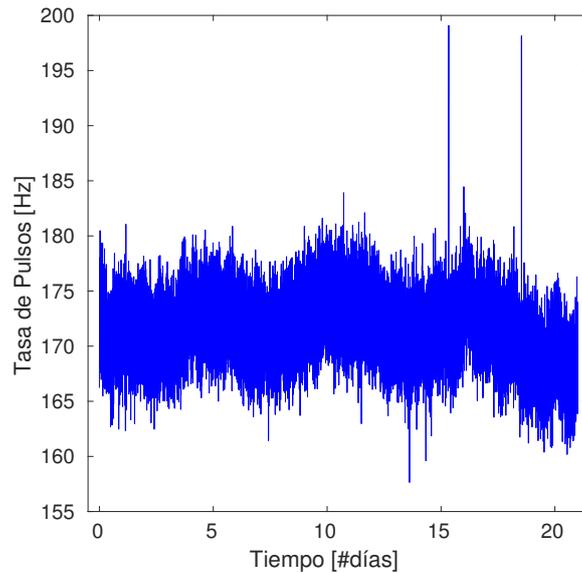


FIGURA 7.13: Tasa de pulsos $TP_{rad\ amb}$ obtenida con el método descrito.

esto puede ser atribuido a que al bajar el nivel de discriminación de 3,5 a 2,5 PE la eficiencia de detección de partículas del sistema aumentó.

7.4.2. Probabilidad de Sobre-Conteo

Como se mencionó en la sub-sección 6.4.3 la tasa de pulsos TP_{total} puede ser utilizada para la estimación de la probabilidad de sobre-conteo por fondo en el detector. En las tablas 7.3 y 7.4 se puede observar el valor de la probabilidad de sobre-conteo por fondo para los ocho detectores instalados en la estación de SD de *Kathy Turner* para los períodos 2017-04-09 al 2017-04-29 y 2017-02-16 al 2017-03-08 respectivamente. También se indica la temperatura máxima y mínima durante el período.

Módulo	PSC Medio en $1\ \mu s$	PSC Mínimo en $1\ \mu s$	PSC Máximo en $1\ \mu s$	Temperatura Mínima	Temperatura Máxima
101	2,8	2,6	2,9	31,2	32,7
102	2,3	2,0	2,6	24,4	28,5
103	2,6	2,4	2,8	25,7	28,4
104	3,0	2,7	3,2	27,4	30,0
105	2,2	1,8	2,5	23,5	28,9
106	2,1	1,8	2,4	23,8	27,9
107	2,4	2,1	2,6	24,6	28,8
108	2,3	2,0	2,5	22,5	27,6

CUADRO 7.3: Probabilidad de sobre-conteo por fondo para una ventana temporal de $1\ \mu s$ para los 8 detectores instalados en la estación de SD *Kathy Turner* para el período 2017-04-09 al 2017-04-29. El nivel de discriminación se encontraba en 2,5 PE.

Como se puede observar la probabilidad de sobre-conteo media en los detectores aumenta 3,3 veces al reducir el nivel de discriminación de 3,5 a 2,5 PE. A su vez, al reducir el nivel de discriminación a 2,5 PE se observó en la sección 7.4.1 que el valor de la tasa de pulsos tiene una fuerte correlación con las variaciones de la

Módulo	PSC Medio en 1 μs	PSC Mínimo en 1 μs	PSC Máximo en 1 μs	Temperatura Mínima	Temperatura Máxima
101	0,6	0,6	0,6	33,5	34,3
102	0,6	0,6	0,6	29,5	32,0
103	0,9	0,9	0,9	29,8	31,3
104	0,9	0,9	1,0	31,5	33,4
105	0,6	0,6	0,7	29,0	32,3
106	0,6	0,6	0,6	29,1	31,1
107	0,9	0,8	0,9	30,2	32,5
108	0,9	0,9	0,9	28,0	31,8

CUADRO 7.4: Probabilidad de sobre-conteo por fondo para una ventana temporal de 1 μs para los 8 detectores instalados en la estación de SD *Kathy Turner* para el período 2017-02-16 al 2017-03-08. El nivel de discriminación se encontraba en 3,5 PE.

temperatura. En el gráfico de la figura 7.14 se puede observar como varía la tasa de pulsos térmicos al nivel de 2,5PE en función de la temperatura para un canal de la electrónica del módulo 108 de la estación de SD de *Kathy Turner*. En la escala de la derecha se puede observar la contribución porcentual $PSC_{\text{térmico}}$ de los 64 canales a la probabilidad de sobre-conteo del módulo.

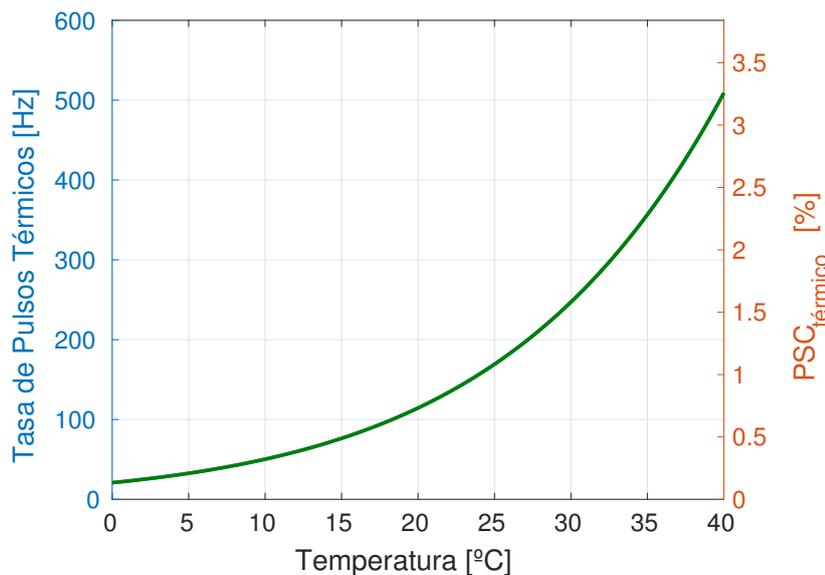


FIGURA 7.14: Gráfico de tasa de pulsos térmicos al nivel de 2,5PE y de la probabilidad de sobre-conteo por pulsos térmicos en función de la temperatura para la electrónica del módulo 108 de la estación de SD de *Kathy Turner*.

7.5. Análisis de Canales con Fallas

Un control que hay que realizar previo al análisis de datos es la verificación de que los canales de las electrónicas instaladas estén funcionando correctamente. En el caso de que un canal presente fallas hay que identificarlo, para luego evaluar su posible apagado por *hardware* o enmascarado durante el análisis de datos.

Para verificar las electrónicas instaladas se realizó un espectrograma de los 64 canales de cada una. El mismo muestra la cantidad de ocurrencias para cada bin temporal de los 64 canales.

Sólo en la electrónica 103 se encontró una anomalía en el canal 42. En la figura 7.15 se puede observar el espectrograma para 6 meses de datos. Se puede apreciar que los bins del canal 42 presentan una menor tasa de ocurrencia respecto al resto de los canales.

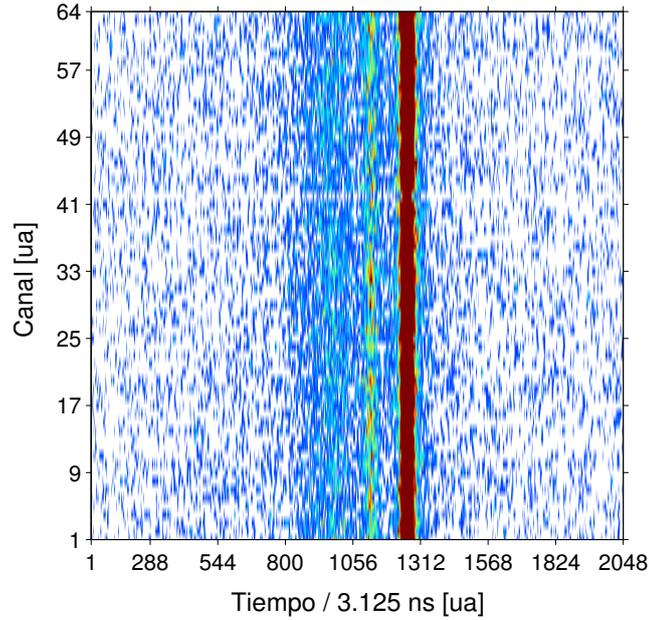


FIGURA 7.15: Espectrograma de los 64 canales de la electrónica del módulo 103 de la estación de SD Kathy Turner.

7.6. Comparación entre Detectores

El estudio que se desarrolla en esta sección pretende obtener la relación que existe entre los detectores instalados en la estación de SD Kathy Turner.

Si se considera un solo evento en donde se midieron x_i e y_i muones en dos detectores respectivamente y se considera que estos datos son independientes y provienen de distribuciones de Poisson con parámetros μ_i y ν_i respectivamente, la función densidad de probabilidad de un evento es,

$$f_i(x_i, y_i | \mu_i, \nu_i) = \text{Poisson}(x_i | \mu_i) \cdot \text{Poisson}(y_i | \nu_i) \quad (7.4)$$

Si consideramos que los dos detectores toman muestra de la misma densidad de muones, los parámetros μ_i y ν_i son proporcionales, es decir,

$$\nu_i = a \cdot \mu_i \quad (7.5)$$

siendo a la constante de proporcionalidad entre los dos detectores bajo prueba.

Considerando 7.4 y 7.5, la likelihood de un evento se puede expresar como,

$$L_i(\mu_i, a) = L(\mu_i | x_i) \cdot L(a \cdot \mu_i | y_i) \quad (7.6)$$

en donde la likelihood depende de los μ_i (uno por evento) y del parámetro a . Dada la likelihood de Poisson,

$$\ln L(\mu) = x \cdot \ln \mu - \mu + c \quad (7.7)$$

el estimador de μ_i queda,

$$\hat{\mu}_i = \frac{x_i + y_i}{1 + a} \quad (7.8)$$

Reemplazando el estimador de μ_i en la likelihood se obtiene la siguiente perfil de likelihood,

$$L_p^i(a) = L(\hat{\mu}_i | x_i) \cdot L(a \cdot \hat{\mu}_i | y_i) \quad (7.9)$$

Esta likelihood depende del parámetro a explícitamente y también implícitamente a través del estimador de μ_i . Considerando todos los eventos, la likelihood completa queda,

$$\ln L(a) = \sum_i \ln L_p^i(a) \quad (7.10)$$

El estimador del parámetro a se encuentra maximizando la likelihood completa con respecto al parámetro a . El estimador de máxima verosimilitud queda,

$$\hat{a} = \frac{\sum_i x_i}{\sum_i y_i} = \frac{\bar{x}}{\bar{y}} \quad (7.11)$$

Es decir, el cociente entre la cantidad total de muones contados por dos detectores, para una misma cantidad de eventos, nos da una estimación del parámetro de proporcionalidad entre ellos. Este parámetro es el que calcularemos para obtener las diferentes relaciones entre los detectores instalados.

7.6.1. Conteo de Muones

Para el conteo de muones se emplea el algoritmo que se describe a continuación. El primer paso es buscar en la traza digital de cada canal el patrón correspondiente a la señal de un muon. El patrón utilizado para la identificación de la señal de un muon es al menos un uno. Cuando se encuentra un patrón en un canal, se abre una ventana de inhibición de 12 muestras con una duración de 37,5 ns. La ventana de inhibición es un tiempo muerto impuesto solamente en el canal donde fue detectado el patrón para tener en cuenta la duración de la señal de un muon. El índice de la primera muestra se registra y la identificación del patrón se reanuda después de la ventana de inhibición.

Corrección por Apilado de Impactos

Como se mencionó en la sección 4.1 el módulo contador de muones de AMIGA se encuentra dividido en 64 segmentos, lo que produce que el detector, durante una cascada atmosférica extendida, pueda recibir el impacto de dos o más partículas en un mismo segmento al mismo tiempo. Este efecto es conocido como el apilado de impactos o en inglés *pile-up*. Un método para poder corregir este efecto es el descrito a continuación y se basa en [40].

Para cada módulo se construye un histograma de conteo agrupando 12 muestras juntas, el tamaño de la ventana de inhibición. El número de canales con coincidencia de patrón se calcula en cada bin. A partir del histograma de conteo se estima la cantidad promedio de muones en un módulo usando,

$$\hat{\mu} = -n \sum_i \ln\left(1 - \frac{k_i}{n}\right) \quad (7.12)$$

donde n es el número de canales operativos en el módulo. La suma se ejecuta sobre el histograma de conteo que tiene canales k_i con una coincidencia en el bin de tiempo i -ésimo.

Sincronización Temporal del MD con el SD

Como se mencionó en la subsección 2.2.1, el detector de superficie posee diferentes tipos de disparos y dado a que cada uno se genera para diferentes condiciones, el instante de tiempo de la generación del disparo para la electrónica enterrada varía respecto al tiempo de arribo de la cascada atmosférica extendida. Esto produce que el comienzo de la señal de muones que es almacenada por la electrónica enterrada varíe dentro de la ventana de adquisición de $6,4 \mu s$. Este efecto se puede observar en el histograma de la cantidad de unos por cada bin temporal de $3,125 ns$ del gráfico de la izquierda de la figura 7.16. En este histograma se pueden distinguir dos picos, los cuales se producen por las diferencias temporales entre los disparos TH y ToT del SD.

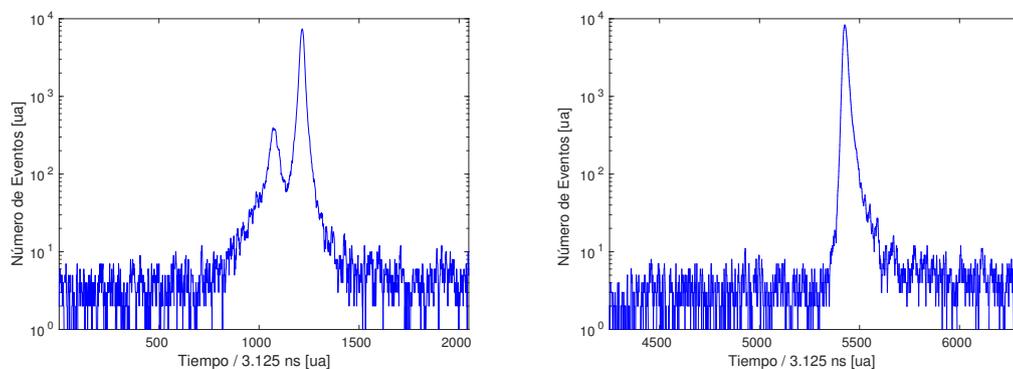


FIGURA 7.16: Histogramas de la cantidad de unos por cada bin temporal de $3,125 ns$. A la izquierda los datos del MD no se encuentran sincronizados con el SD y la derecha los datos se encuentran sincronizados.

Para poder sincronizar los datos del MD con los del SD se realiza el corrimiento temporal de los datos del MD utilizando el tiempo de inicio de la señal del SD. En el histograma de la derecha de la figura 7.16 se pueden observar los datos del MD una vez sincronizados. Se puede observar que los datos que anteriormente se encontraban distribuidos en la traza digital se alinean en una misma región generando un solo pico.

Esta sincronización permite realizar un corte temporal de los datos, dejando solamente los de interés y disminuyendo la contaminación generada por pulsos espurios que son generados tanto por el SiPM como por la radiación del ambiente.

Para el análisis de los datos se decidió realizar un corte y quedarse solamente con las muestras comprendidas entre el bin 5334 a la 5640, es decir, la ventana temporal de datos utilizados es de 956,25 ns.

7.6.2. Análisis de los Datos

Durante el 2017 se realizó la toma de datos de los ocho contadores de muones instalados para realizar los estudios de comparación entre ellos. Durante la toma de datos, se configuraron dos niveles de discriminación diferentes. Del 01-01-2017 al 31-03-2017 el nivel de discriminación configurado fue de 3,5 PE y del 01-04-2017 al 31-06-2017 el nivel de discriminación configurado fue de 2,5 PE.

Módulo	Total Nmu Crudo	Total Nmu Ventana	Total Nmu Ventana y Corregido
101	1203 ± 35	1166 ± 34	1194 ± 35
102	1113 ± 33	1084 ± 33	1109 ± 33
103	2074 ± 46	2029 ± 45	2097 ± 46
104	2036 ± 45	1984 ± 45	2049 ± 45
105	1153 ± 34	1127 ± 34	1154 ± 34
106	1140 ± 34	1105 ± 33	1131 ± 34
107	1999 ± 45	1951 ± 44	2015 ± 45
108	2041 ± 45	1992 ± 45	2063 ± 45

CUADRO 7.5: Recuento total de los muones detectados por el contador de muones para el período 01-01-2017 al 31-03-2017.

Para el estudio de comparación se realizaron cortes de calidad dejando solamente los eventos en los que los ocho módulos contestaron el pedido de T3, y que de la reconstrucción del SD se determinó que la energía del evento era mayor que 10^{17} eV, la estación de SD se encontraba a más de 200 m del centro de la cascada atmosférica extendida y el ángulo de ésta era menor que 45° .

Para el primer período de tiempo, en donde el nivel de discriminación fue establecido en 3,5 PE, se analizaron los datos de 717 eventos, cuyos resultados se encuentran en la tabla 7.5. En la misma se encuentran tres columnas con los datos del recuento total de los muones detectados por el contador. En la columna "Total Nmu Crudo" se encuentra el recuento de muones sin aplicar la sincronización con el SD y sin aplicar la corrección por *pile-up*. En la columna "Total Nmu Ventana" se encuentra

Relación	Valor	Error
m102 / m101	0,93	0,04
m106 / m105	0,98	0,04
m104 / m103	0,98	0,03
m108 / m107	1,02	0,03
m103 / m101	1,76	0,06
m104 / m101	1,72	0,06
m103 / m102	1,89	0,07
m104 / m102	1,85	0,07
m107 / m105	1,75	0,06
m108 / m105	1,79	0,07
m107 / m106	1,78	0,07
m108 / m106	1,82	0,07

CUADRO 7.6: Relación entre los detectores, utilizando para el conteo de muones la sincronización de los datos con el SD en conjunto con el recorte de la ventana temporal y aplicando la corrección por *pile-up* para el período 01-01-2017 al 31-03-2017.

el recuento de muones aplicando la sincronización con el SD, junto con el recorte de la ventana temporal de 956,25 ns, pero no se aplica la corrección por *pile-up*. En la columna "Total Nmu Ventana y Corregido" se encuentra el recuento de muones aplicando la sincronización en conjunto con el recorte de la ventana temporal y aplicando la corrección por *pile-up*. En la tabla 7.6 se puede observar la relación entre los detectores utilizando para el conteo de muones la sincronización de los datos con el SD, en conjunto con el recorte de la ventana temporal y aplicando la corrección por *pile-up*.

Módulo	Total Nmu Crudo	Total Nmu Ventana	Total Nmu Ventana y Corregido
101	1430 ± 38	1320 ± 36	1351 ± 37
102	1419 ± 38	1334 ± 37	1364 ± 37
103	2510 ± 50	2405 ± 49	2491 ± 50
104	2530 ± 50	2386 ± 49	2468 ± 50
105	1365 ± 37	1282 ± 36	1315 ± 36
106	1308 ± 36	1213 ± 35	1243 ± 35
107	2442 ± 49	2315 ± 48	2393 ± 49
108	2507 ± 50	2407 ± 9	2488 ± 50

CUADRO 7.7: Recuento total de los muones detectados por el contador de muones para el período 01-04-2017 al 31-06-2017.

Para el segundo período de tiempo, en donde el nivel de discriminación fue establecido en 2,5 PE, se analizaron los datos de 858 eventos, cuyos resultados del conteo de muones totales se encuentran en la tabla 7.7. La relación entre los detectores utilizando para el conteo de muones la sincronización de los datos con el SD, en conjunto con el recorte de la ventana temporal y aplicando la corrección por *pile-up* se pueden observar en la tabla 7.8.

En la figura 7.17 se puede observar el número de muones contados por el módulo

Relación	Valor	Error
m102 / m101	1,01	0,04
m106 / m105	0,94	0,04
m104 / m103	0,99	0,03
m108 / m107	1,04	0,03
m103 / m101	1,84	0,06
m104 / m101	1,83	0,06
m103 / m102	1,83	0,06
m104 / m102	1,81	0,06
m107 / m105	1,82	0,06
m108 / m105	1,89	0,06
m107 / m106	1,93	0,07
m108 / m106	2,00	0,07

CUADRO 7.8: Relación entre los detectores utilizando para el conteo de muones la sincronización de los datos con el SD, en conjunto con el recorte de la ventana temporal y aplicando la corrección por *pile-up* para el período 01-04-2017 al 31-06-2017.

m108 de 10 m^2 en función del número de muones contados por el módulo m106 de 5 m^2 para cada evento del período 01-04-2017 al 31-06-2017. De la tabla 7.8 se puede observar que para estos datos la relación entre la sumatoria de los números totales de muones contados por cada módulo es de $2,00 \pm 0,07$.

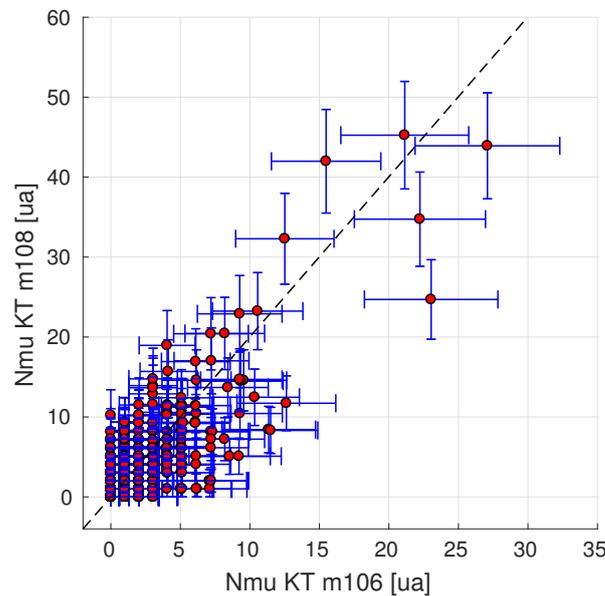


FIGURA 7.17: Número de muones contados por el módulo m108 de 10 m^2 en función del número de muones contados por el módulo m106 de 5 m^2 para cada evento del período 01-04-2017 al 31-06-2017. En línea punteada se encuentra la relación entre la sumatoria de los números totales de muones contados por cada módulo.

En la figura 7.18 se puede observar el número de muones contados por los cuatro módulos contadores de muones del lado sur del detector de superficie *Kathy Turner* en función del número de muones contados por los cuatro módulos contadores de

muones del lado norte para cada evento del período 01-04-2017 al 31-06-2017. La relación entre los números totales de muones contados por cada MC (norte / sur) para este período es de $0,97 \pm 0,02$.

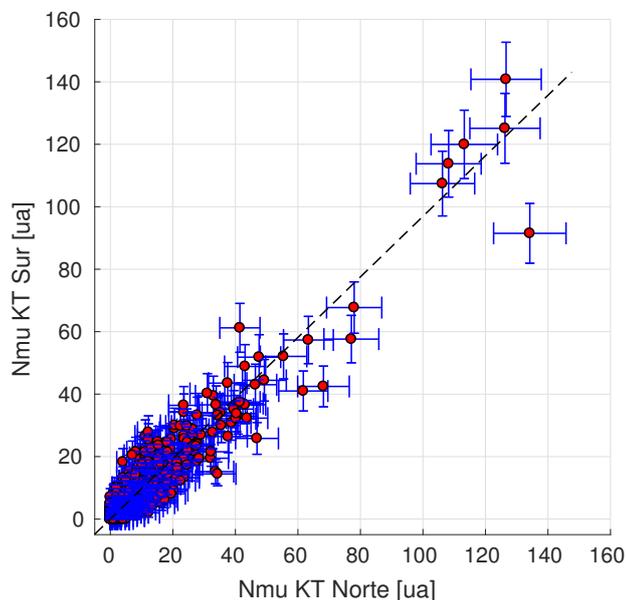


FIGURA 7.18: Número de muones contados por el MC del lado sur del detector de superficie *Kathy Turner* en función del número de muones contados por el MC del lado norte para cada evento del período 01-04-2017 al 31-06-2017. En línea punteada se encuentra la relación entre la sumatoria de los números totales de muones contados por cada MC.

7.6.3. Estabilidad Temporal

Una de las pruebas que se realizó con los módulos contadores instalados fue verificar su estabilidad temporal. Para ello el 13-12-2017 se realizó una corrida de calibración de las electrónicas instaladas en *Kathy Turner*, tras un año y tres meses de operación continua en el Observatorio. De los datos se obtuvieron los valores de un PE y del nivel de base, con los que se calculó el valor que se debe configurar a los CITIROCs para que el nivel de discriminación se encuentre a 2,5 PE. En la tabla 7.9 se pueden observar los valores de configuración de discriminación de cada CITIROC de las ocho electrónicas instaladas tanto de la configuración original, con fecha del 12-09-2016, como de los resultados obtenidos en la última calibración.

De las mediciones realizadas se observa que el valor medio del nivel de discriminación obtenido el 13-12-2017 supera en una unidad de DAC al valor obtenido el 12-09-2016.

En la figura 7.19 se puede observar la tasa de pulsos totales promedio para diferentes valores de discriminación de los 32 canales del CITIROC N°2 del módulo 101 para una medición realizada el 22-10-2016 y otra realizada el 13-12-2017. Como se puede observar las transiciones entre los plateaus ocurren para los mismos valores

Módulo	Nº CITIROC	Nivel de Discriminación 12-09-2016	Nivel de Discriminación 13-12-2017
101	1	245	245
	2	246	247
102	1	246	246
	2	243	244
103	1	247	248
	2	244	244
104	1	251	250
	2	251	251
105	1	244	245
	2	240	240
106	1	249	248
	2	247	248
107	1	245	245
	2	247	249
108	1	249	249
	2	249	249

CUADRO 7.9: Valores de configuración de los CITIROCs de las ocho electrónicas de los módulos contadores de muones de *Kathy Turner* para que el nivel de discriminación se encuentre en 2,5 PE. Estos valores fueron obtenidos a partir de los datos de dos calibraciones diferentes, una realizada al momento de la instalación de la electrónica y la otra un año y tres meses después.

de DAC, lo que nos indica que no se observa una variación en el valor del PE o de la ganancia. A su vez, se observa que la tasa de pulsos para los 3 primeros plateau de la segunda medición (13-12-2017) son superiores a los de la primera medición (22-10-2016), esto se debe a que la temperatura de los SiPMs en la primera medición era de 25,5 °C y en la segunda de 30,8 °C, es decir, al tener una temperatura superior la tasa de cuentas oscuras aumenta.

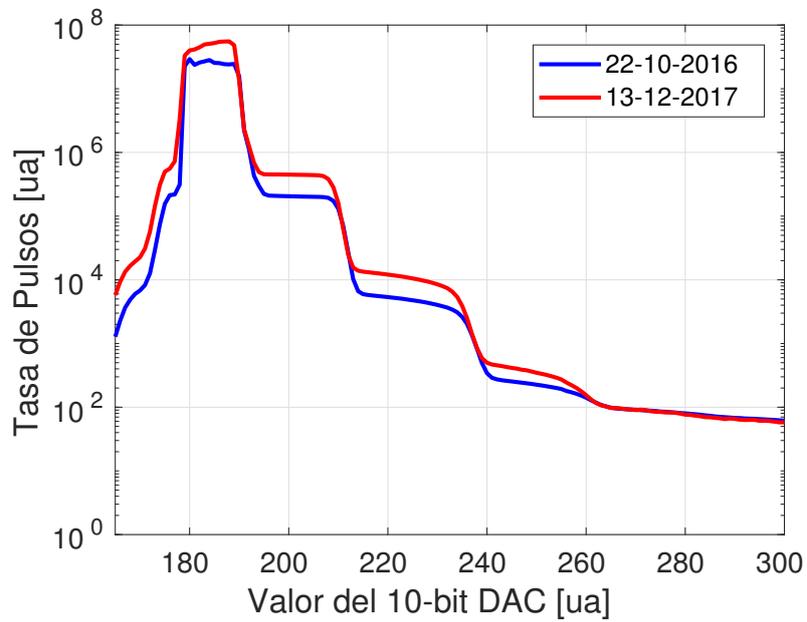


FIGURA 7.19: Tasa de pulsos promedio para los 32 canales del CITIROC N°2 del módulo 101 de la posición de SD *Kathy Turner*. En azul se encuentra la medición realizada a $25,5^{\circ}\text{C}$ el 22-10-2016 y en rojo la misma medición realiza a $30,8^{\circ}\text{C}$ el 13-12-2017.

Capítulo 8

Conclusiones y Trabajo Futuro

8.1. Contribuciones de esta Tesis

Este trabajo se centró en la actualización de la electrónica del Detector de Muones del Observatorio Pierre Auger.

En el capítulo 1 se dio una introducción a la física de los rayos cósmicos. Se resaltaron los interrogantes principales que se presentan a las más elevadas energías, así como las características destacables de su espectro de energía. Se presentó una breve reseña sobre las interacciones que se producen cuando los rayos cósmicos ingresan a la atmósfera de nuestro planeta. Se introdujeron las cualidades principales de las EAS: sus perfiles longitudinal y lateral. Por último, se mostró la potencialidad que brinda el estudio de la componente muónica de las EAS como instrumento para la discriminación de la composición química del rayo cósmico primario.

En el capítulo 2 se realizó una descripción del Observatorio Pierre Auger. Se mostró el método híbrido que se utiliza para la detección de rayos cósmicos. Se presentó al Detector de Superficie, cuya función principal es la medición de la distribución lateral de la cascada. Se describió la electrónica asociada a cada estación que compone este detector y se presentaron sus diferentes niveles de disparo. También se presentó al Detector de Fluorescencia, el cual es el encargado de medir el desarrollo longitudinal de la cascada. Se explicó la motivación científica de la Colaboración Internacional del Observatorio Pierre Auger para decidir extender el rango de detección a energías más bajas y poder determinar la componente muónica de las EAS. Se describió el detector HEAT, el cual incrementa el ángulo de observación del FD. Se introdujo al proyecto AMIGA, se presentó el diseño del sistema de detección formado por pares de detectores, cada uno compuesto por un detector de muones enterrado trabajando en conjunto con un detector de superficie, en un arreglo más denso llamado *infill*. Se detallaron los aspectos más generales de los módulos contadores de muones.

En el capítulo 3 se introdujo al fotomultiplicador de silicio. Se describió su principio de operación y se detallaron sus características principales.

Los aportes originales desarrollados durante el doctorado se presentaron en los capítulos restantes.

En el capítulo 4 se detallan las motivaciones para el desarrollo de una electrónica

cuyo fotodetector sea un arreglo de SiPMs, para realizar la actualización de la electrónica de los contadores de muones que al momento del inicio de este doctorado utilizaban un PMT multiánodo como fotodetector. Se describieron las dos características principales del detector que restringen al sistema de detección: la segmentación espacial del detector, y la resolución temporal del conjunto barra centelladora y fibra óptica.

Se describió la selección del modelo de SiPM en la cual se trató de maximizar la relación señal a ruido. Durante el proceso de selección se evaluaron varios modelos de la empresa Hamamatsu. Dado que los modelos bajo prueba poseen similar PDE se optó por el de menor afterpulsing y crosstalk, es decir el que maximiza la relación señal a ruido. El modelo seleccionado para el prototipo del sistema de detección es el S13081-050CS.

Se detallaron las especificaciones que se tuvieron en cuenta para el diseño de la electrónica del módulo contador de muones. El esquema del sistema propuesto divide a la electrónica en el *front-end* y el *back-end*. Se determinó que el *front-end*, para la aplicación del conteo de muones, debe estar formado por un pre-amplificador, un conformador de señal y un discriminador. Dado que los pulsos del SiPM tienen un tiempo de caída mayor que la resolución temporal deseada para el detector, la utilización de un conformador de señal resulta indispensable, ya que éste es el encargado de recortar las componentes de baja frecuencia de los pulsos amplificados del SiPM y de esta manera reducir su ancho temporal. Se decidió utilizar el ASIC CITIROC para el *front-end* dado que este integra todas las etapas requeridas manteniendo un bajo consumo. Para la polarización de los SiPMs se decidió utilizar la fuente C11204-01 de la empresa Hamamatsu ya que ésta no sólo posee bajo ruido de rizado y una buena resolución de la tensión de salida, sino porque también posee una función integrada de compensación de la tensión de salida en función de la temperatura del arreglo de SiPMs. El *back-end* fue diseñado como un sistema embebido dividido en dos grandes partes. Una encargada de la adquisición y almacenamiento de datos en tiempo real y la otra de la transmisión de datos y monitoreo de las variables de la electrónica.

Una vez probado el prototipo del sistema de detección se realizó una versión de pre-producción, la cual integra todo el sistema de detección en tres placas. Para esta versión se decidió utilizar el arreglo de SiPMs S13361-2050NE-08 SPL formado por 64 SiPMs de la línea S13361. Este modelo es una versión actualizada del utilizado para el prototipo del sistema de detección.

En el capítulo 5 se describe el método desarrollado para calibrar el sistema de conteo. Éste se divide en dos partes: la calibración del fotodetector y la calibración del detector. La calibración del fotodetector tiene como objetivo la obtención de las tensiones de ruptura de cada canal individual para luego poder aplicar el mismo valor de sobretensión a todos los canales. Para ello se desarrolló un método para la obtención de la tensión media del pico de un PE a partir de la tasa de pulsos a la salida del discriminador en función del nivel de discriminación. Cabe destacar

que el método de calibración desarrollado es lo suficientemente robusto como para aceptar posibles offsets desconocidos en las tensiones tanto de los DACs de 8 bits, presentes a la entrada de cada canal preparados para realizar el ajuste individual de la tensión de polarización, cómo de la fuente de alta tensión. La calibración del detector desarrollada consta en la determinación del valor del nivel de discriminación de cada canal y la selección de una estrategia de conteo. La estrategia de conteo propuesta se basa en un criterio de discriminación por amplitud. Esto es debido a que los pulsos producidos por impacto de partículas en el detector, obtenidos con el sistema de detección que se propone en esta tesis, carecen de estructura temporal. Es decir, los pulsos digitales se encuentran en nivel alto por un determinado tiempo, sin variaciones, cuando el fotodetector detecta un pulso de luz. El nivel de discriminación es configurado al menor valor posible tratando de que la probabilidad de conteo accidental del detector se mantenga lo más baja, dentro de la tolerancia del sistema, sin reducir significativamente la eficiencia de conteo.

En el capítulo 6 se detallan las pruebas de laboratorio que se realizaron con prototipo de la electrónica y la electrónica de pre-producción para validar su correcto funcionamiento. Para realizar las pruebas de ambas electrónicas se decidió construir un montaje experimental único, el cual permitió la comparación entre ambas electrónicas y aumentó la repetitividad de las mediciones. Este montaje experimental reproduce al módulo contador de muones y a los disparos generados por la estación de SD. Además, el montaje experimental permite la identificación del impacto de una partícula tanto temporalmente como espacialmente. Esto permitió realizar mediciones del número de fotones detectados por el SiPM en función de la posición de impacto, pudiendo observar la dependencia exponencial producto de la atenuación de la fibra óptica. A su vez, se obtuvo la eficiencia de detección de partículas en función de la posición de impacto.

Uno de los parámetros más relevantes que se estudió de las mediciones del prototipo de la electrónica fue el ancho temporal a media altura de las señales digitales a la salida del discriminador del CITIROC. De estas mediciones se pudo determinar que el sistema de detección no deteriora la respuesta temporal del conjunto centellador fibra, dado que el 99 % de los pulsos detectados poseen una duración temporal por debajo de los 35 ns. Luego de la etapa de muestreo se observó que el 99 % de las señales digitales poseen como máximo 10 bins temporales de 3,125 ns. Otra de las mediciones más relevantes fue la de eficiencia de detección en función de la distancia de impacto. De esta medición se observó una alta eficiencia de detección para todas las distancias, la eficiencia integrada a lo largo de la barra centelladora fue de 97 % para una sobretensión de 3 V y 98 % para una sobretensión de 3,75 V.

Las mediciones realizadas permitieron determinar que para el prototipo de la electrónica que utiliza el SiPM modelo S13081-050CS la configuración óptima es fijar el valor de sobretensión a 3,75 V, el nivel de discriminación a 2,5 PE y utilizar como estrategia de conteo el considerar como muon a toda señal que genere al menos un uno y se aplica una ventana temporal 10 bins de 3,125 ns de duración máxima, sin

importar si durante la ventana ocurren transiciones.

Con la electrónica de pre-producción también se midieron los pulsos producto del impacto de partículas en función de la distancia. De estas mediciones se obtuvo que el 99 % de los pulsos adquiridos por el FPGA poseen un ancho temporal menor a 12 bins temporales. Se obtuvo que para la mayor distancia de fibra, utilizando un valor de sobretensión de 3 V y un nivel de discriminación a 2,5 PE la eficiencia de detección es de aproximadamente 97,6 %, 1,6 % mayor para esa misma distancia con el prototipo de la electrónica. Esto es debido a que la serie S13361 de SiPMs posee un mayor PDE que la serie S13081. De las mediciones también se observó que al nivel de discriminación de 2,5 PE la variación de la eficiencia es de 0,1 %/unidad de DAC lo que nos indica que el sistema es lo suficientemente robusto como para permitir fluctuaciones en el nivel de discriminación sin una reducción considerable en la eficiencia. Además, se realizó la medición de 8 electrónicas diferentes en el mismo montaje experimental y se pudo observar un comportamiento similar de todas ellas.

Los SiPMs instalados en los módulos contadores de muones generan constantemente pulsos debido a la detección de luz generada por el impacto de partículas en el detector o por su ruido inherente. A la probabilidad de que alguno de estos pulsos entre dentro de la ventana de adquisición de un evento se la llama probabilidad de sobre-conteo por radiación de fondo. Se desarrolló un método para poder estimar esta probabilidad a partir de la medición de la tasa de pulsos totales que ocurren por segundo y se lo validó con mediciones de eventos reales. Dado que el SiPM que conforma el arreglo utilizado en la electrónica de pre-producción tiene un área mayor (4 mm^2) con respecto al del prototipo de la electrónica ($1,69 \text{ mm}^2$) y su crosstalk a su vez es levemente mayor (1 % para el S13081 y 3 % para el S13361), se observó un incremento en la tasa de pulsos producto de la excitación térmica al nivel de discriminación utilizado. Esto produjo un incremento de la probabilidad de sobre-conteo para la electrónica de pre-producción ($\sim 3 \text{ \%}/\mu\text{s}$) respecto al prototipo de la electrónica ($\sim 0,625 \text{ \%}/\mu\text{s}$). Por último se obtuvo la distribución de la diferencia temporal de las señales que deja una misma partícula al atravesar dos centelladores apilados, de la cual se observó que a medida que aumenta la distancia donde ocurre el impacto respecto al fotodetector, la diferencia de tiempo entre los pulsos que se generan en ambos centelladores tienen una mayor dispersión. Este estudio permite facilitar la identificación de posibles impactos de una misma partícula en dos centelladores vecinos, también conocido como *clipping-corner*.

En el capítulo 7 se detalla la instalación de las 8 electrónicas de pre-producción en la estación del SD *Kathy Turner*. Dicha instalación se finalizó con éxito el 25 de Octubre del 2016. En primera instancia se realizó una calibración tal como se describió en el capítulo 5. El valor de sobretensión seleccionado fue de 3,5 V y el nivel de discriminación en una primer etapa fue configurado en 3,5 PE y para una segunda etapa fue configurado en 2,5 PE. Este último valor de configuración del nivel de discriminación es el que se encuentra actualmente configurado.

Previo a la toma de datos se realizaron mediciones para poder seleccionar el valor del punto de disparo óptimo en la ventana de adquisición. De las mediciones realizadas se puede observar que los pulsos de los eventos se agrupan principalmente en tres regiones, las cuales se encuentran separadas temporalmente debido a los tiempos característicos de los diferentes tipos de disparos T1 que se generan en la estación de SD. El punto seleccionado para el disparo en la ventana de adquisición de los contadores de muones fue elegido para evitar recortes de las distribuciones de los pulsos observados.

Se realizaron estudios de la tasa de pulsos totales que son adquiridos por el sistema de conteo. Se pudo determinar que la tasa de pulsos totales está formado principalmente por dos componentes: la tasa de pulsos de la radiación ambiente y la tasa de pulsos producto del ruido inherente del sensor. Dado que ambas tasas de pulsos son del mismo orden se desarrolló un método para la separación de ambas componentes aprovechando el modelado del ruido inherente de los SiPMs. También se estudió la probabilidad de sobre-conteo debido a estos pulsos y su dependencia con la temperatura.

Previo al análisis de datos se verificó el correcto funcionamiento de todos los canales de las electrónicas instaladas y se determinó que el canal 42 de la electrónica del módulo 103 presentaba una anomalía, es por este motivo que se decidió enmascarar este canal en el análisis de datos posterior.

Para el conteo de muones se utilizó la estrategia de conteo de al menos un uno en la traza digital y una ventana de inhibición de 12 bins temporales de 3,125 ns. Además, se incluyó una corrección por apilado de impactos dada la alinealidad que se introduce al ser un detector segmentado. Para reducir el sobre-conteo por el ruido de fondo se implementó un método para sincronizar temporalmente los eventos adquiridos por el contador de muones y su estación de superficie correspondiente, permitiendo de esta manera la reducción de la ventana temporal de adquisición de $6,4 \mu\text{s}$ a 956,25 ns.

Del análisis de los datos de los contadores de muones para el período 01-04-2017 al 31-06-2017 se obtuvo una relación en valor medio entre los contadores de 10 m^2 y 5 m^2 de $1,87 \pm 0,06$. La relación entre contadores de igual área resultó en valor medio de $1 \pm 0,04$ y entre los contadores del lado sur en función de los del lado norte de la estación *Kathy Turner* resultó en un valor de $0,97 \pm 0,02$. Estos resultados se encuentran dentro del 5% de error el cual se determinó como tolerable para el sistema.

Por último se realizó una nueva calibración de las electrónicas instaladas en KT tras un año y tres meses de su instalación y se pudo observar que los niveles de discriminación de 2,5 PE no se modificaron, lo que nos indica que los parámetros de los SiPMs permanecieron estables.

Cabe destacar que dado a los resultados satisfactorios obtenidos en las mediciones con la electrónica de pre-producción desarrollada se ha tomado la decisión de adoptarla para la fase de producción de AMIGA.

8.2. Líneas de Trabajo Futuro

La primera línea de continuación de este trabajo de investigación es la caracterización de la eficiencia de fotodetección de los SiPMs utilizados en la versión de pre-producción de AMIGA. Para esta caracterización se deberá construir un dispositivo mediante el cual se pueda conocer la cantidad de luz con la que se ilumina al fotodetector bajo prueba. Para ello se deberá construir una fuente de luz monocromática pulsada, cuya emisión será guiada a una esfera de integración [52] en donde la luz se dispersará y distribuirá de forma uniforme en toda su superficie. Esta esfera contará con dos puertos de salida, en uno se ubicará el SiPM y en el otro un fotodiodo calibrado. Obteniendo las lecturas tanto del SiPM como del fotodiodo calibrado y sabiendo la relación de atenuación entre ambos puertos de la esfera de integración se podrá obtener el valor del PDE para la longitud de onda de la fuente de luz seleccionada. La realización de este trabajo se encuentra enmarcado en el trabajo de fin de grado de la carrera de Ingeniería en Electrónica de estudiantes de la Universidad de San Martín (UNSAM), del cual soy evaluador en conjunto con mi director de Tesis.

La segunda línea de continuación de este trabajo de investigación es la medición de la eficiencia de detección de partículas en función no sólo de la posición longitudinal de impacto en el centellador, como fue estudiada en esta tesis, sino también de su posición tanto transversal como angular. Para ello se deberá construir un telescopio de muones que sea capaz de identificar la posición espacial y angular de la partícula incidente en la barra centelladora bajo prueba. Este trabajo se encuentra enmarcado en el trabajo de los laboratorios 6 y 7 de dos estudiantes de la carrera de grado de Ciencias Físicas de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEN) de la Universidad de Buenos Aires, en el que me encuentro como codirector al momento de la escritura de esta Tesis.

Como se pudo observar durante el desarrollo de esta tesis, uno de los parámetros más importantes de un SiPM utilizado para el conteo de partículas es el crosstalk. Lo que se desea es que el crosstalk sea lo más bajo posible debido a que de esta manera se reduce la probabilidad de conteo accidental. Durante la instalación de las electrónicas de pre-producción en los contadores de muones de AMIGA se observó que el crosstalk de los SiPMs de los arreglos se redujo considerablemente una vez instalado en el detector. En la figura 8.1 se puede observar la tasa de pulsos promedio por canal para la electrónica del contador de muones 102 de la estación de SD *Phill Collins* en las condiciones previas y posteriores al acoplamiento con el detector. El valor de crosstalk calculado para cuando no se encontraba acoplada la electrónica al detector fue de 5,57 % y de 1,73 % para cuando se encontraba acoplada. El estudio de este fenómeno será la tercera línea de continuación de este trabajo de investigación. Una posible aplicación del estudio de este fenómeno será la obtención de un método para la verificación de la correcta instalación de las electrónicas durante la etapa de producción de AMIGA, ya que en esta etapa a diferencia de la instalación realizada en la estación de *Kathy Turner* el personal a cargo no podrá tener acceso directo al

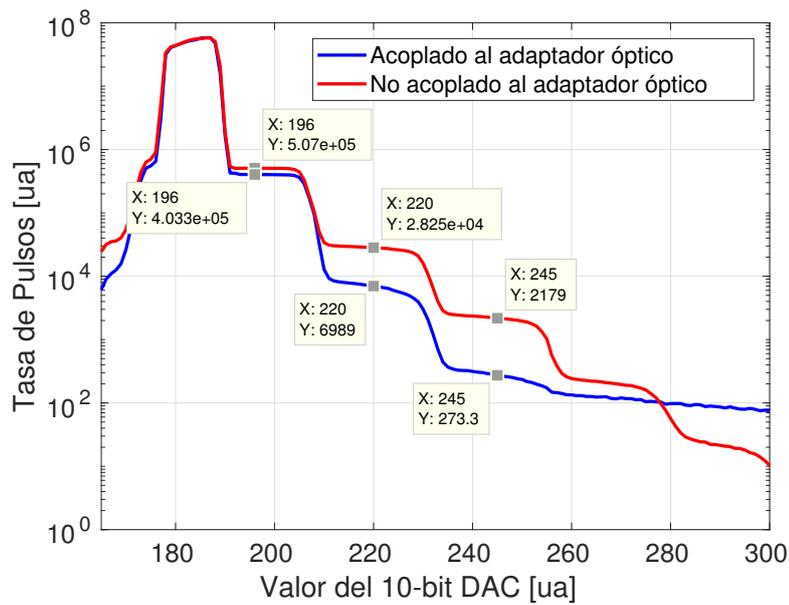


FIGURA 8.1: En rojo se encuentra la medición de la tasa de pulsos promedio por canal cuando la electrónica del módulo 102 de la estación de *Phill Collins* no se encontraba acoplada al detector, en azul se encuentra la medición de la tasa de pulsos promedio por canal cuando la electrónica se encontraba acoplada al detector. Se puede observar los valores de la tasa de pulsos para los niveles 0,5, 1,5 y 2,5 PE de ambas mediciones.

detector, dado que la electrónica se instalará desde la superficie guiándola a través de un tubo de acceso de tamaño reducido hacia el detector.

Bibliografía

- [1] T. Wulf. «Observations on the radiation of high penetration power on the Eiffel tower». En: *Physikalische Zeitschrift* 11 (1910), pág. 811.
- [2] V. F. Hess. «Observations in Low Level Radiation During Seven Free Balloon Flights». En: *Physikalische Zeitschrift* 13 (1912), pág. 1084.
- [3] Pierre Auger, P. Ehrenfest, R. Maze, J. Daudin, and A. Freon Robley. «Extensive cosmic ray showers». En: *Rev.Mod.Phys.* 11 (1939), págs. 288-291. DOI: [10.1103/RevModPhys.11.288](https://doi.org/10.1103/RevModPhys.11.288).
- [4] A.L. Hodson. «Reminiscences on experimental work with various particle detectors». En: *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements* 22 (1991), págs. 178-196. DOI: [10.1016/0920-5632\(91\)90015-7](https://doi.org/10.1016/0920-5632(91)90015-7).
- [5] Arno A. Penzias y Robert Woodrow Wilson. «A Measurement of excess antenna temperature at 4080-Mc/s». En: *Astrophysical Journal* 142 (1965), págs. 419-421. DOI: [10.1086/148307](https://doi.org/10.1086/148307).
- [6] Kenneth Greisen. «End to the cosmic ray spectrum?» En: *Phys.Rev.Lett.* 16 (1966), págs. 748-750. DOI: [10.1103/PhysRevLett.16.748](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.16.748).
- [7] Z. Zatsepin y Kuz'min V. «Upper Limit of the Spectrum of Cosmic Rays». En: *Pis'ma v Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 4 (1966), págs. 114-117.
- [8] W. Hanlon. *Updated cosmic ray spectrum*. URL: <http://www.physics.utah.edu/~whanlon/spectrum.html>.
- [9] K.A. Olive y Particle Data Group. «Review of particle physics». En: *Chinese Physics C* 38.9 (2014), pág. 090001. DOI: [10.1088/1674-1137/38/9/090001](https://doi.org/10.1088/1674-1137/38/9/090001).
- [10] H. Ulrich et al. «Energy spectrum and elemental composition of cosmic rays in the pev region». En: *The European Physical Journal C - Particles and Fields* 33.1 (2004), págs. 944-946. DOI: [10.1140/epjcd/s2004-03-1632-2](https://doi.org/10.1140/epjcd/s2004-03-1632-2).
- [11] Iván Pedro Sidelnik. «Estudio de rayos cósmicos de muy alta energía con AMIGA, una extensión del Observatorio Pierre Auger: detectores de superficie y contadores de muones para estudiar la composición, dirección de arribo y espectro de los rayos cósmicos». Tesis doct. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires, (2012).
- [12] The Pierre Auger Collaboration. *The Pierre Auger Observatory Design Report*. (1997). URL: <http://www.auger.org/admin/index.html>.

- [13] J. Matthews. «A Heitler model of extensive air showers». En: *Astropart. Phys.* 22 (2005), págs. 387-397. DOI: [10.1016/j.astropartphys.2004.09.003](https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2004.09.003).
- [14] The Pierre Auger Collaboration. «The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory». En: *NIM A* 768 (2015), págs. 172-213. DOI: [10.1016/j.nima.2015.06.058](https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.06.058).
- [15] I. Allekotte, A. F. Barbosa, P. Bauleo, C. Bonifazi, B. Civit, C. O. Escobar, B. García, G. Guedes, M. Gómez-Berisso, J. L. Harton, M. Healy, M. Kaducak, P. Mantsch, P. O. Mazur, C. Newman-Holmes, I. Pepe, I. Rodriguez-Cabo, H. Salazar, N. Smetniansky-De Grande, D. Warner, for the Pierre Auger Collaboration. «The Surface Detector System of the Pierre Auger Observatory». En: *NIM A* 586 (2008), págs. 409-420. DOI: [10.1016/j.nima.2007.12.016](https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.12.016).
- [16] The Pierre Auger Collaboration. «The Fluorescence Detector of the Pierre Auger Observatory». En: *NIM A* 620 (2010), págs. 227-251. DOI: [10.1016/j.nima.2010.04.023](https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.04.023).
- [17] The Pierre Auger Collaboration. «Properties and performance of the prototype instrument for the Pierre Auger Observatory». En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 523.1 (2004), págs. 50 -95. ISSN: 0168-9002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2003.12.012>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900203033497>.
- [18] H. Klages for the Pierre Auger Collaboration. «Heat – enhancement telescopes for the pierre auger southern observatory». En: *Proceedings of the 30th ICRC*. Mérida, México, 2007.
- [19] M. Kleifges for the Pierre Auger Collaboration. «Extension of the pierre auger observatory using high-elevation fluorescence telescopes (heat)». En: *Proceedings of the 31st ICRC*. Vol. 5. Łódź, Poland, 2009.
- [20] A. Etchegoyen y For The Pierre Auger Collaboration. «AMIGA, Auger Muons and Infill for the Ground Array». En: *Proceedings of the 30th ICRC*. Mérida, México, 2007. URL: http://www.auger.org/technical_info/pdfs/icrc2007/0710.1646v1.pdf.
- [21] M. Platino for the Pierre Auger Collaboration. «AMIGA, Auger Muons and Infill for the Ground Array of the Pierre Auger Observatory». En: *Proceedings of the 31st ICRC*. Vol. 5. Łódź, Poland, 2009. URL: http://www.auger.org/technical_info/ICRC2009/arxiv_operations.pdf.
- [22] A.D. Supanitsky. «Detector de Superficie y la Composición Química de los Rayos Cósmicos». Ph.D. thesis. Departamento de Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires, feb. de (2007). URL: <http://www.tandar.cnea.gov.ar/doctorado/Tesis/Supanitsky.pdf>.

- [23] D. Melo. «El Detector de Fluorescencia del Observatorio Pierre Auger: Reconstrucción de lluvias de partículas, análisis de los primeros datos y extensión híbrida del detector de fluorescencia a energías $\leq 10^{18}$ eV». Ph.D. thesis. UNSAM, Doctor en Ciencia y Tecnología, (2007).
- [24] The KASCADE Collaboration. «The cosmic-ray experiment KASCADE». En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 513.3 (2003), págs. 490 -510. ISSN: 0168-9002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)02076-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)02076-X). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016890020302076X>.
- [25] The KASCADE-Grande Collaboration. «The KASCADE-Grande experiment». En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 620.2 (2010), págs. 202 -216. ISSN: 0168-9002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.03.147>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900210007734>.
- [26] Saint-Gobain Crystals. *Scintillating Optical Fibers*. 2005. URL: <http://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/fiber-brochure.pdf>.
- [27] M. Platino, M.R. Hampel, P. Fiskelew, A. Almela, A. Sedoski, G. De La Vega, M. Videla, A. Lucero, F. Suarez, O. Wainberg, D. Yelos, A. Cancio, B. Garcia and A. Etchegoyen. «AMIGA at the Auger observatory: the telecommunications system». En: *Journal of Instrumentation* 8.12 (2013), P12014. URL: <http://stacks.iop.org/1748-0221/8/i=12/a=P12014>.
- [28] Hamamatsu. «Opto-Semiconductor Handbook: solid state photodetectors». En: Hamamatsu, 2014. Cap. Avalanche photodiodes (APD) and silicon photomultipliers (SiPM). URL: http://www.hamamatsu.com/eu/en/community/optical_sensors/articles/hamamatsu_photodetectors/index.html.
- [29] Hamamatsu Corporation & New Jersey Institute of Technology S. Piatek. *Physics and Operation of an MPPC*. 2014. URL: https://www.hamamatsu.com/us/en/community/optical_sensors/articles/physics_and_operation_of_mppc/index.html.
- [30] Simon M. Sze y Kwok K. Ng. *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley-Interscience, 2006. ISBN: 0471143235. URL: <https://www.amazon.com/Physics-Semiconductor-Devices-Simon-Sze/dp/0471143235?SubscriptionId=0JYN1NVW651KCA56C102&tag=techkie-20&linkCode=xm2&camp=2025&creative=165953&creativeASIN=0471143235>.

- [31] Patrick Eckert y col. «Characterisation studies of silicon photomultipliers». En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 620.2 (2010), págs. 217 -226. ISSN: 0168-9002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.03.169>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900210008156>.
- [32] SensL. *Introduction to SiPM*. 2018. URL: <https://www.sensl.com/downloads/ds/TN%20-%20Intro%20to%20SPM%20Tech.pdf>.
- [33] The Pierre Auger Collaboration. «Prototype muon detectors for the AMIGA component of the Pierre Auger Observatory». En: *Journal of Instrumentation* 11.02 (2016), P02012. URL: <http://stacks.iop.org/1748-0221/11/i=02/a=P02012>.
- [34] A. Pla-Dalmau, A. D. Bross y V. V. Rykalin. «Extruding plastic scintillator at Fermilab». En: *2003 IEEE Nuclear Science Symposium. Conference Record (IEEE Cat. No.03CH37515)*. Vol. 1. 2003, 102-104 Vol.1. DOI: [10.1109/NSSMIC.2003.1352007](https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2003.1352007).
- [35] *BC-600 Optical Cement*. Saint-Gobain Crystals. 2016. URL: https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/sgc-bc600-data-sheet_69724.pdf.
- [36] *Scintillating Optical Fibers*. Saint-Gobain Crystals. 2005. URL: https://www.researchgate.net/profile/Jeff_Sykora/post/Has_anyone_measured_the_scintillation_light_trapping_efficiency_for_a_wavelength_shifting_fiber_coupled_to_a_scintillator/attachment/59d61dcb79197b8077979d22/AS:273515926753286@1442222686848/download/Saint+Gobain+Bicron+fiber+and+Scintillator+Product+info.pdf.
- [37] M. Platino, M.R. Hampel, A. Almela, A. Krieger, D. Gorbeña, A. Ferrero, G. De La Vega, A. Lucero, F. Suarez, M. Videla, O. Wainberg and A. Etchegoyen. «AMIGA at the Auger Observatory: the scintillator module testing system». En: *Journal of Instrumentation* 6.06 (2011), P06006. URL: <http://stacks.iop.org/1748-0221/6/i=06/a=P06006>.
- [38] O. Wainberg et al. «Digital electronics for the Pierre Auger Observatory AMIGA muon counters». En: *JINST* 9 (2014). DOI: [10.1088/1748-0221/9/04/T04003](https://doi.org/10.1088/1748-0221/9/04/T04003).
- [39] A. Almela et al. «Design and implementation of an embedded system for particle detectors». En: *Proceedings of the 33rd ICRC*. Rio de Janeiro, Brazil, 2013. DOI: [10.13140/2.1.4562.6563](https://doi.org/10.13140/2.1.4562.6563).

- [40] A.D. Supanitsky y col. «Underground muon counters as a tool for composition analyses». En: *Astroparticle Physics* 29.6 (2008), págs. 461 -470. ISSN: 0927-6505. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2008.05.003>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927650508000741>.
- [41] B. Wundheiler for the Pierre Auger Collaboration. «The AMIGA muon counters of the Pierre Auger Observatory: performance and first data». En: *Proceedings of the 32nd ICRC*. Beijing, China, 2011. DOI: [10.1088/1742-6596/375/1/052006](https://doi.org/10.1088/1742-6596/375/1/052006).
- [42] *Monolithic Amplifier*. Mini-Circuits. 2018. URL: <https://www.minicircuits.com/pdfs/GALI-84+.pdf>.
- [43] *MPPC Multi-pixel photon counter, S12571-25, -50, -100C/P specification datasheet*. Hamamatsu Photonics K.K. 2015. URL: http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s12571-025_etc_kapd1042e.pdf.
- [44] *MPPC Multi-pixel photon counter, S12572-25, -50, -100C/P specification datasheet*. Hamamatsu Photonics K.K. 2015. URL: http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s12572-025_etc_kapd1043e.pdf.
- [45] Weeroc. *CITIROC*. 2014. URL: <http://www.weeroc.com/my-weeroc/download-center/products/citiroc/25-citiroc-one-sheet/file>.
- [46] *Power supply for MPPC*. Hamamatsu Photonics K.K. 2015. URL: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/c11204-01_kacc1203e.pdf.
- [47] *MPPC arrays in a chip size package miniaturized through the adoption of TSV structure*. Hamamatsu Photonics K.K. 2018. URL: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13361-2050_series_kapd1055e.pdf.
- [48] M.R. Hampel for the Pierre Auger Collaboration. «Muon counting using silicon photomultipliers in the AMIGA detector of the Pierre Auger observatory». En: *Journal of Instrumentation* 12.03 (2017), P03002. URL: <http://stacks.iop.org/1748-0221/12/i=03/a=P03002>.
- [49] V. Chmill y col. «Study of the breakdown voltage of SiPMs». En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 845 (2017). Proceedings of the Vienna Conference on Instrumentation 2016, págs. 56 -59. ISSN: 0168-9002. DOI: [10.1016/j.nima.2016.04.047](https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.04.047).
- [50] B. Wundheiler for the Pierre Auger Collaboration. «The AMIGA muon counters of the Pierre Auger Observatory: Performance and Studies of the Lateral Distribution Function». En: *Proceedings of the 34th ICRC*. The Hague, The Netherlands, 2015. URL: <https://arxiv.org/pdf/1509.03732v1.pdf>.

- [51] D. Ravignani y A.D. Supanitsky. «A new method for reconstructing the muon lateral distribution with an array of segmented counters». En: *Astroparticle Physics* 65 (2015), págs. 1 -10. ISSN: 0927-6505. DOI: [10.1016/j.astropartphys.2014.11.007](https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2014.11.007).
- [52] Labsphere. *Integrating Sphere Theory Applications*. 2018. URL: https://www.labsphere.com/site/assets/files/2551/integrating_sphere_theory_apps_tech_guide.pdf.