

Requisitos y caracterización de un instrumento para muongrafía

García Pérez, Jorge Alberto*

Tutores: Arnaldi, Horacio - Bertou, Xavier

Laboratorio avanzado - Instituto Balseiro - Universidad Nacional de Cuyo

Mayo de 2017

El objetivo del presente trabajo es un análisis de las unidades de detección de muones que harían parte de un instrumento para la realización de muongrafías. Las unidades de detección están conformadas por dos componentes: una componente que produce luz cuando un muón pasa por esta, y que está basada en el uso de barras centelleadoras, y un fotomultiplicador de silicio (SiPM), que transforma la luz en señal eléctrica. Se estudiarán distintas posibilidades de armado de la primera componente y se estudiará la posibilidad de uso de dos tipos de SiPM, los SiPM S12 y los SiPM S13, los cuales son dos series distintas de fotomultiplicadores de una misma empresa (Hamamatsu). El estudio concluye que no es posible utilizar SiPMs S12 y que la construcción de tal instrumento es posible usando dos pantallas de las barras centelleadoras mencionadas anteriormente, usando como detectores de fotones a los SIPMs S13.

I. INTRODUCCIÓN

A. Muones

El muón (μ^-) es una partícula elemental (no tiene estructura interna) con carga $\pm e$, espín $1/2$ y masa $105.7 \text{ MeV}/c^2$. Su antipartícula, el antimuón o muón positivo (μ^+), sólo difiere del muón en el signo de la carga y en el presente trabajo se les llamará muón a ambas partículas. Así como el electrón, la principal fuente de desaceleración del muón es por medio del bremsstrahlung, y ya que el muón es aproximadamente 200 veces más masivo que el electrón, un muón de una dada energía es capaz de atravesar mucho más material que un electrón con la misma energía [1].

El tiempo de vida media del muón es de $2.2 \mu\text{s}$, y decae en las siguientes reacciones:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

La fuente principal de muones en el planeta es la proveniente de las interacciones de los *rayos cósmicos* con la atmósfera.

1. Rayos cósmicos y Espectro de energías

Estudiados por primera vez en las décadas de 1910, 1920 y 1930 [2], se les llama rayos cósmicos a las partículas (principalmente fotones, electrones y núcleos atómicos) provenientes del espacio que constantemente están llegando a la Tierra. Al atravesar las primeras capas de la atmósfera, los rayos cósmicos interactúan con moléculas del aire (generalmente N_2 y O_2) generando subproductos energéticos en lo que se denomina *lluvia atmosférica*.

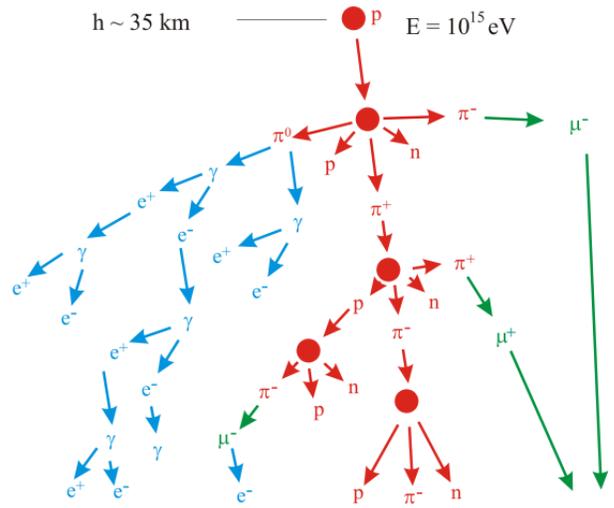


Figura 1. Esquema de una lluvia atmosférica iniciada por un protón de 10^{15} eV con los posibles decaimientos y reacciones. La componente muónica está representada por el color verde, la electromagnética por el azul y la hadrónica por el rojo.

Los subproductos de estas reacciones son clasificados en tres partes: la componente **electromagnética** compuesta por fotones, electrones y positrones, la componente **hadrónica** compuesta por kaones, piones y núcleos, y la componente **muónica**, la cual es relevante para este trabajo.

Gracias a que la energía de los rayos cósmicos puede variar desde 10^5 eV hasta magnitudes más grandes que 10^{20} eV [2], los muones producidos por las lluvias atmosféricas logran tener un amplio rango de energías, siendo aproximadamente 4 GeV la energía promedio de los muones que llegan a la superficie [3].

B. Muongrafía

Unas cuantas décadas después del descubrimiento del muón en 1936 [1], comenzó a considerarse la utilidad de

* ja.garciap13@gmail.com

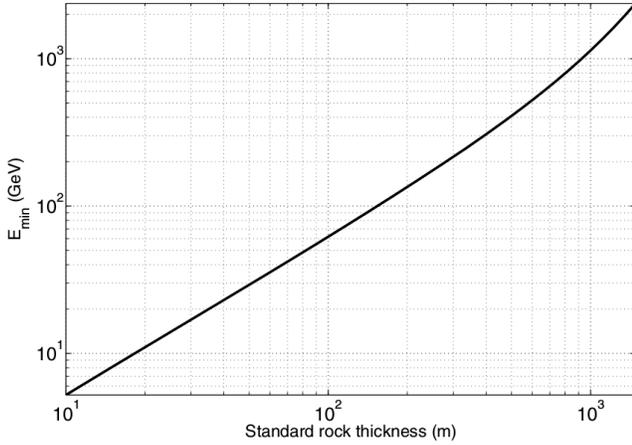


Figura 2. Energía que debe tener un muón para atravesar una determinada distancia de *roca standard*, caracterizada por $\rho = 2.65 \text{ gcm}^{-3}$.

esta partícula para estudiar la estructura interna de objetos masivos a través del principio de funcionamiento de la tomografía, pues los muones más energéticos son capaces de atravesar kilómetros de roca, según se muestra en la figura 2. Adicionalmente, ya que el flujo de muones en la superficie es de aproximadamente $200 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y es aproximadamente constante en el tiempo, este tipo de medición se puede hacer en todo momento y no impone restricción respecto a los tiempos de medición.

Así, si se mide el flujo de muones luego de atravesar el objeto y se compara con el flujo sin el objeto de por medio, se logra saber para una dirección y una resolución angular determinada por el instrumento la cantidad de materia atravesada por las partículas. Esta “cantidad de materia” está representada en el valor de *opacidad*, definido en la ecuación (1), donde $\rho(\xi)$ es la densidad del material en la dirección ξ y L es el grosor del material.

$$\varrho(L) = \int_L \rho(\xi) d\xi \quad (1)$$

C. Instrumento, requerimientos y limitaciones

De acuerdo a lo descrito en la sección anterior, la información que se debe conocer para aplicar la técnica de muongrafía es el flujo de muones para distintas direcciones de interés y el flujo nominal en esas direcciones, es decir, el flujo que se recibiría en el instrumento si el objeto no se encontrara. Así, lo que el instrumento necesita detectar es la cantidad de muones que atraviesan el objeto de estudio y las direcciones de sus trayectorias. Esto se logra con un instrumento como el mostrado en la figura 3. La construcción del instrumento se basa en barras centelleadoras de dimensiones $l * a * e$, con l de aproximadamente 1m y a y e del orden de algunos centímetros. Estas barras emiten una señal cuando son atravesadas por un

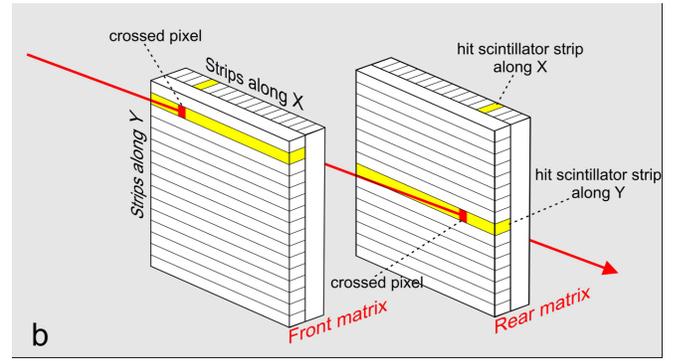


Figura 3. Esquema de un instrumento para muongrafías. La imagen muestra como el arreglo de barras centelleadoras en vertical y horizontal forman una pantalla, y como el uso de dos pantallas permite determinar la trayectoria del muón.

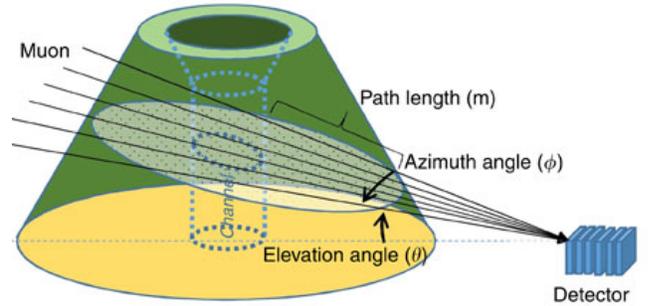


Figura 4. Representación de una muongrafía de un volcán.

muón (se volverá a ellas con más detalle posteriormente). Ubicando varias de estas barras en posición horizontal y justo detrás de estas otras de manera vertical, se consigue una *pantalla* de tamaño $l * l * 2e$. Si un muón atraviesa una pantalla, iluminará alguna de las barras horizontales y alguna de las barras verticales, indicando así que el muón pasó por una región de tamaño $a * a$, llamado *pixel* en el presente trabajo. El área $a * a$ da una indicación de la resolución del instrumento. Luego, si se posicionan dos o más pantallas con distancia entre estas y un muón logra atravesar todas las pantallas debido a la dirección que tenía, la señal de los distintos pixeles atravesados en las pantallas permite reconstruir la trayectoria del muón, siendo la recta que une los pixeles.

Para la realización de la muongrafía, sólo resta ubicar el instrumento frente al objeto de estudio tal como se muestra en la figura 4. Si se ubica el instrumento de tal manera que algunas de las direcciones posibles apunten a cielo abierto, en estas direcciones se registrará el flujo nominal, y luego, comparando con el flujo en las direcciones que atraviesan el objeto, se obtiene la opacidad para distintas secciones del objeto. Como ejemplo, en la figura 5 se muestra una muongrafía hecha del Monte Iwotake, Japón, por el grupo de Tanaka *et al.* [4].

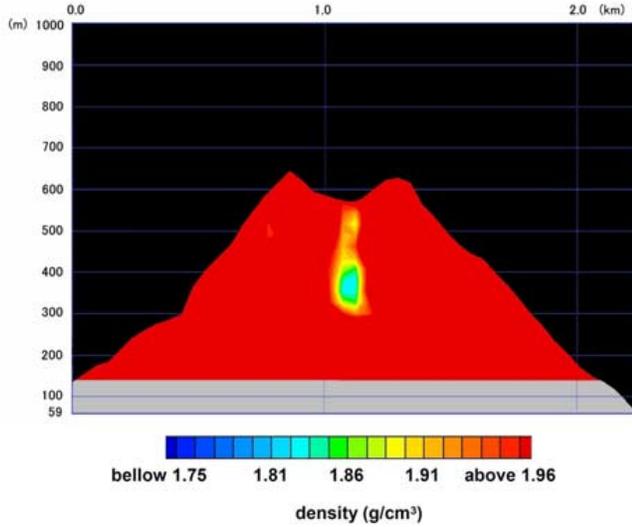


Figura 5. Muongrafía del Monte Iwodake, Japón. La imagen muestra en contraste de colores las variaciones de densidad promedio del material ($\rho(L)/L$) en las direcciones observadas por el detector.

D. Centelleadores

Tal como se mencionó en la sección anterior las barras centelleadoras constituyen la parte del instrumento que se encarga de detectar el muón, logrando esto al emitir luz cuando son atravesadas por este.

Las barras centelleadoras utilizadas en este trabajo hacen parte del tipo de centelleador llamado organo-plástico. Estos se construyen a partir de una base de plástico que constituye aproximadamente el 99% del material y un centelleador. Los centelleadores son moléculas orgánicas en las cuales los niveles electrónicos presentan una banda electrónica estable y una serie de estados excitados separados por un gap de energía. La energía desprendida por el paso del muón en la barra hace que electrones de estas moléculas pasen a estados excitados, desexcitándose en tiempos característicos de unos cuantos nanosegundos con la emisión de fotones [5]. Para recolectar la luz emitida en la barra y dirigirla a detectores electrónicos se introduce una fibra óptica a lo largo de la barra, dopada con un *wavelengthshifter*. El *wavelengthshifter* se encarga de absorber la luz que pasa por la fibra y de reemitirla luego en una longitud de onda conveniente para su posterior detección. La luz reemitida tiene igual probabilidad de propagarse en cualquier dirección, y sólo la luz que salga con direcciones cercanas al eje de la fibra lograrán mantenerse dentro de ella. Al final del proceso, aproximadamente el 3% de luz inicial emitida en la barra logrará llegar a los detectores electrónicos [5]. Para aumentar la probabilidad de recolección de luz en la fibra óptica las barras se recubren con materiales reflectantes.

En el presente trabajo se utilizaron barras centelleadoras Dow Styron 663W dopadas con PPO y POPOP, recu-

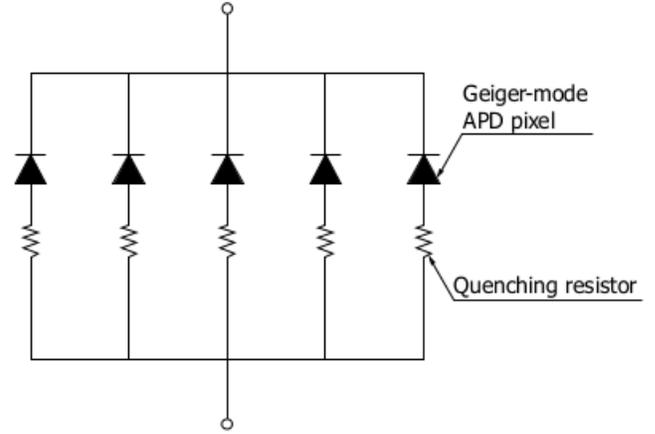


Figura 6. Esquema circuital del funcionamiento de un fotomultiplicador de silicio. La terminal superior está puesta a un voltaje mayor respecto a la terminal inferior, para polarizar a los diodos en inversa.

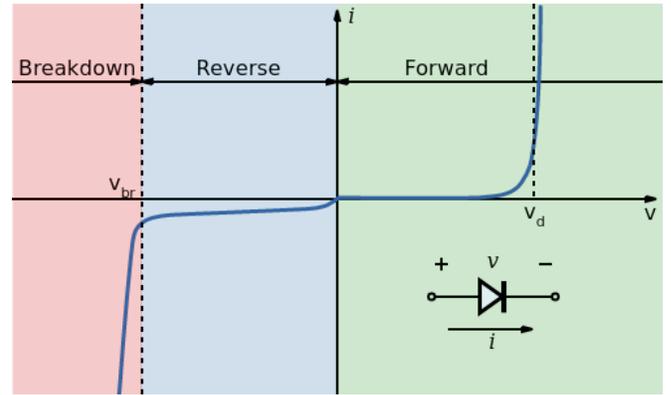


Figura 7. Curva característica de funcionamiento de un diodo, donde el eje vertical es corriente y el eje horizontal es voltaje.

biertas con TiO_2 y papel de aluminio. Las dimensiones de las barras eran de $a = 30$ cm, $h = 4.1$ cm y $p = 1$ cm. Las fibras ópticas utilizadas fueron las Y-11 de 1.2 mm y 1.0 mm de diámetro de la empresa Kuraray, y las BCF-99 de 1.2 mm y BCF-60 de 1.0 mm de la empresa Saint-Gobain. Estas reemitían luz en la parte verde del espectro (530 nm).

E. SiPM

Hasta ahora, la señal de detección de un muón se encuentra en forma de luz conducida a través de fibra óptica, y el paso siguiente es la conversión de esta luz a señal electrónica, para su posterior adquisición y almacenamiento. Los dispositivos electrónicos utilizados para tal fin en este trabajo son los fotomultiplicadores de silicio (*SiPM*, por sus siglas en inglés).

Un SiPM puede modelarse electrónicamente como muchas componentes en paralelo de un fotodiodo y una re-

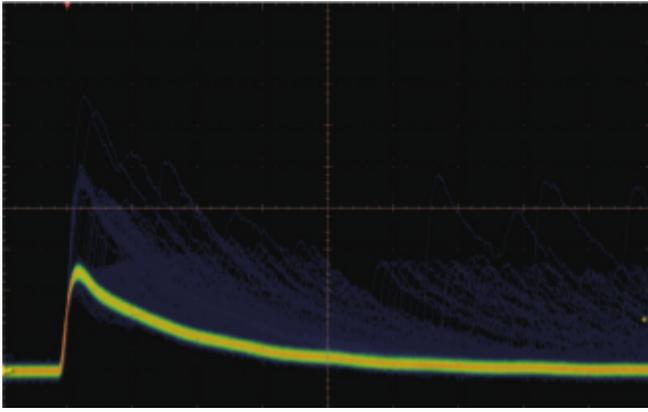


Figura 8. Pulso de corriente registrado en un SiPM por la llegada de fotones a este. Los pulsos azul oscuro que se observan después del pulso principal aparecen debido a que las impurezas en el cristal de Silicio a veces atrapan portadores de carga, liberándolos luego y generando pulsos más débiles [6].

sistencia en serie, tal como se muestra en la figura 6. Los fotodiodos son polarizados inversamente para trabajar en la zona de breakdown del espectro (figura 7); así, para una componente fotodiodo-resistencia particular, la llegada de un fotón al fotodiodo produce una variación en el voltaje que genera una gran variación en la corriente. Este aumento de corriente produce una subida de voltaje en la resistencia, y ya que la componente está alimentada a un voltaje fijo, el aumento de voltaje en la resistencia lleva a una disminución del voltaje en el fotodiodo, reduciendo así la corriente en la componente. Al final del proceso, se produce un pulso tal como el que se muestra en la figura 8 [6].

En un instante dado, cada fotodiodo interactúa solamente con un fotón, y debido a que el SiPM es un armado de estas componentes en paralelo, el SiPM entrega un pulso sumado de todas las componentes que se activaron en ese instante. Así, conociendo la forma del pulso, se puede conocer la cantidad de fotones que llegaron al SiPM, con una capacidad de distinción de fotones individuales.

En el presente trabajo se estudiaron dos tipos de SiPM, S12571-100C y S13360-1325CS, y distintas configuraciones de las barras centelleadoras con las fibras ópticas mencionadas anteriormente; esto, con miras a conocer su viabilidad como componentes en la construcción de un instrumento para realizar muongrafías.

Ambos tipos de SiPM pertenecen a la empresa Hamamatsu y son como se muestra en la figura 9. El SiPM S12571-100C hace parte de una serie de fotomultiplicadores, llamados serie 12, que comparten características electrónicas similares. Asimismo, el producto S13360-1325CS hace parte de la serie 13 de fotomultiplicadores, los cuales presentan un rendimiento mejorado en algunos aspectos electrónicos respecto a los de serie 12, como es el caso de la disminución del *crossstalk*, un tipo de ruido electrónico que se explicará más adelante [7].

En el S13360-1325CS cada diodo representa un área cua-



Figura 9. Fotomultiplicador de silicio (SiPM) de la empresa Hamamatsu.

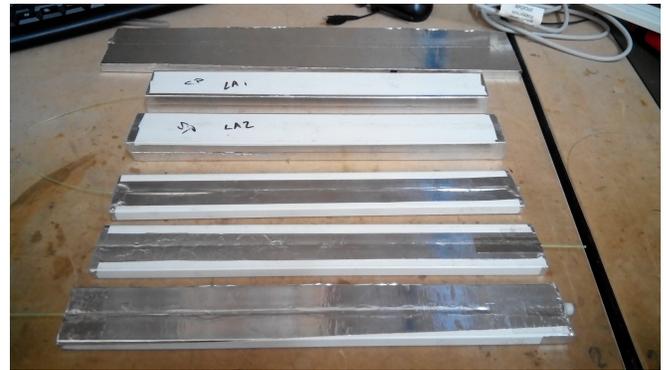


Figura 10. Algunas de las configuraciones de barras centelleadoras usadas en el experimento. De arriba a abajo: **1.** barra centelleadora de diferente material al estudiado en el trabajo y que se usará como referencia; **2.** barra doble con pegamiento óptico y fibra Y11-1.2 mm; **3.** barra doble sin pegamiento óptico; **4., 5. y 6.** barras simples sin pegamiento óptico. La superficie blanca es el TiO_2 , mientras que el recubrimiento metálico es autoadhesivo de aluminio.

drada con lado de longitud de $25 \mu\text{m}$; el S13 (como será llamado de ahora en adelante) cuenta con 2668 pixeles, cubriendo así un área efectiva de detección cuadrada de 1.3 mm de lado [7]. Por otro lado, el S12571-100C (de ahora en adelante S12) tiene 100 diodos, cada uno cubriendo un área cuadrada de $100 \mu\text{m}$ de lado, dando así un área efectiva de detección de 1 mm de lado [8].

El tipo de barra centelleadora utilizada en el presente trabajo se muestra en la figura 10. En cuanto a las distintas configuraciones de barras centelleadoras y fibras ópticas, se probó utilizar dos barras centelleadoras puestas una frente a la otra con una fibra óptica en el medio; se probaron las fibras Y11-1.2 mm, Y11-1.0 mm, BCF-99-1.2 mm y BCF-60-1.0 mm; por último, se probó el uso o no uso de pegamento óptico para pegar la fibra a la barra. Así, se ensayaron distintas combinaciones entre las tres

variables anteriormente expuestas y se estudió el efecto de estas combinaciones en la recolección de luz al producirse un evento muónico.

II. MÉTODO EXPERIMENTAL

Ya que el objetivo del experimento es el estudio de los distintos SiPMs y las distintas configuraciones de centelleadores en miras a la construcción de un instrumento para hacer muografía, el equipo experimental consistió en un montaje simplificado del instrumento, manteniendo cada uno de los pasos que involucra la detección de un muón. Para esto, las barras centelleadoras junto con los SiPMs se colocaron dentro de una caja negra, ya que esto logra bloquear el paso de luz y de partículas creadas localmente en el laboratorio, mientras que no bloquea el paso de partículas energéticas provenientes de los rayos cósmicos, entre ellos los muones. Para proporcionar un voltaje al SiPM y registrar el pulso se utilizaron circuitos integrados originalmente construidos para el proyecto Pierre Auger. Los circuitos daban un voltaje fijo al SiPM y convertían el pulso de corriente obtenido en un pulso de voltaje, amplificado tanto en amplitud como en la duración temporal del pulso, para hacer más fácil la adquisición de datos para la electrónica digital, y con la menor pérdida de información.

La entrada y salida de este primer circuito se conectaba a dos circuitos integrados, los que se muestran en la figura 11. El circuito principal era un FPGA Digilent Nexys II que digitalizaba los pulsos obtenidos con una discretización de $1 \text{ ADC} \simeq 1.96 \text{ mV}$, variando desde 0 a 1023 ADC. El FPGA almacenaba los pulsos en un buffer circular de dos bloques e iba pasando la información a una computadora cada vez que uno de los dos bloques estaba lleno. Por otro lado, el FPGA permitía suministrar al primer circuito un voltaje variable entre 0 y 4095 DAC ordenado a través de la computadora, con una conversión de $1 \text{ DAC} \simeq 0.61 \text{ mV}$. Posteriormente el circuito primario se encargaba de amplificar este voltaje para poder trabajar en el rango necesario para los SiPMs. La comunicación entre el FPGA y el circuito primario se hizo a través de una placa originalmente hecha para el proyecto LAGO, que contaba con tres salidas de voltaje y tres entradas de voltaje, permitiendo así que se pueda proporcionar tres voltajes distintos y recibir tres señales de pulso distintas al tiempo.

Para la digitalización del pulso el circuito FPGA guardaba los valores de voltaje entregados por el circuito primario cada $1 \text{ bin} = 25 \text{ ns}$. El FPGA permitía configurar desde la computadora un valor de trigger en unidades de ADC (de 1 a 1023 ADC), lo cual se podía utilizar como criterio para almacenar ciertos pulsos. Así, cuando se obtenía un valor de voltaje que superaba el trigger el FPGA almacenaba ese valor, los dos valores medidos anteriormente y los nueve valores medidos posteriormente, quedando almacenado el pulso entero en un intervalo de $12 \text{ bins} = 300 \text{ ns}$. Un ejemplo del aspecto final del pulso

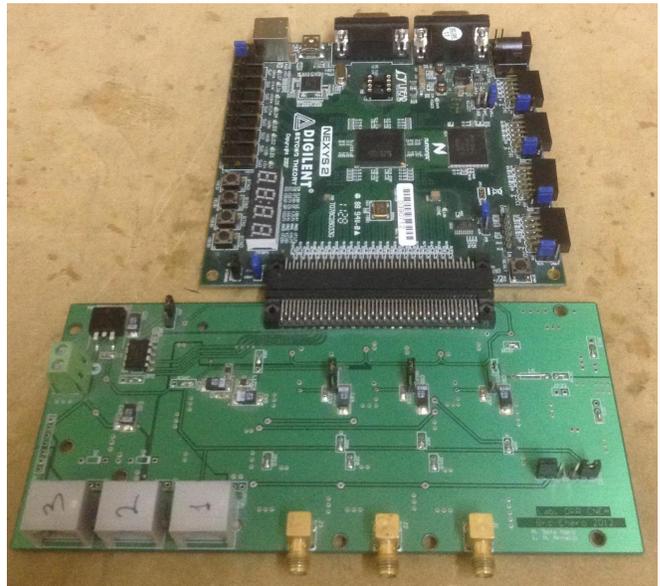


Figura 11. Circuitos integrados que hacen la conexión entre el circuito primario y la computadora. Arriba: FPGA Digilent Nexys II. Abajo: Placa de comunicación del proyecto LAGO.

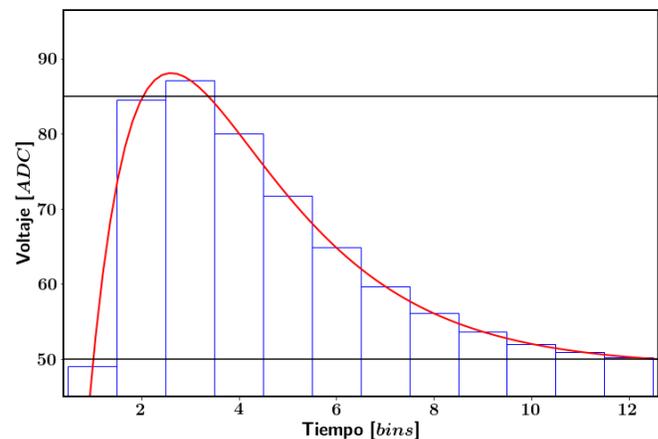


Figura 12. Pulso típico recibido de un SiPM junto con su posterior discretización al pasar por el FPGA. En la figura también se muestra la línea de base, configurada en 50 ADC, y el valor del trigger para el pulso, puesto en 85 ADC.

se encuentra en la figura 12. En el archivo registrado en la computadora se almacenaba cada pulso que superaba el trigger, junto con la información de cuál o cuáles canales fueron los que recibieron la señal, y el momento en el que se produjo el pulso.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para hacer el montaje del experimento se contaba con tres circuitos primarios (figura 13). Dos de estos circuitos fueron modificados para poder acoplarse a un tipo de SiPM; de esta manera, se tenía un circuito preparado

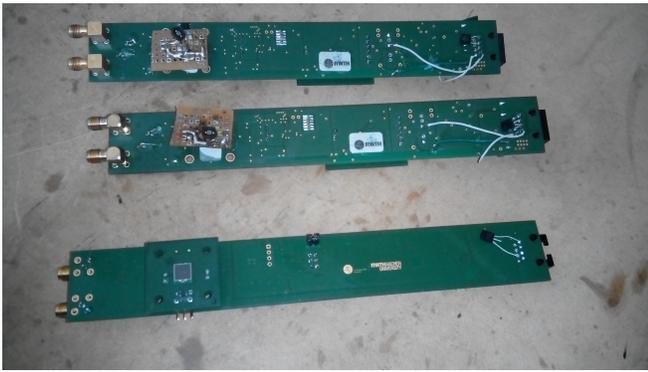


Figura 13. Tres ejemplos de circuito primario. Al lado derecho de los circuitos está la entrada de voltaje, mientras que al lado izquierdo están las conexiones de entrega de señal de los SiPMs. El circuito de abajo es el circuito S13-II, con su SiPM adosado a la placa. Los otros dos circuitos son el circuito S12 y S13, cada uno con el SiPM puesto en la placa de adaptación de color ocre.

para usarse con el SiPM S13, de ahora en adelante *circuito S13*, y otro para usarse con el SiPM S12, llamado en este trabajo *circuito S12*. El tercer circuito había sido comprado recientemente y también era para el proyecto Pierre Auger. Este traía acoplado a él un SiPM S13360 de tipo PE. Debido a que no se le podía cambiar el SiPM al circuito y el tipo de SiPM acoplado no piensa utilizarse para la construcción del instrumento, el circuito y SiPM, de ahora en adelante *circuito S13-II* y SiPM *S13-II*, fueron utilizados como apoyo en algunas mediciones, pero no fueron objeto principal de estudio.

Mientras el circuito S13-II pasaba un voltaje fijo al SiPM S13-II independientemente del valor de voltaje indicado a través del FPGA, los circuitos S12 y S13 sí permitían variar el voltaje puesto a los SiPMs en función del voltaje indicado por el FPGA, por lo que se hizo un estudio preliminar de la conversión entre el voltaje saliente de las terminales para SiPM de los circuitos y los valores DAC puestos por computadora. Adicionalmente se estudió si había algún cambio en esta conversión al cambiar la conexión del circuito primario entre los tres canales de output de la placa LAGO. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 14.

Las regresiones lineales obtenidas de las mediciones permitían colocar los valores necesarios a los circuitos primarios para el funcionamiento de los SiPMs, conociendo el canal que se iba a utilizar y sabiendo que el SiPM S12 funciona a 65.5 V y el SiPM S13 a 55.2 V. Un detalle respecto a la figura 14 es que en esta se ve que los canales 2 y 3 funcionan igual mientras que el canal 1 tiene una relación DAC-voltaje diferente. La razón detrás de esto es que mientras en el canal 1 la conversión DAC-voltaje es hecha a través de un *Digital Analog Converter*, en los canales 2 y 3 la conversión se hace con el método PWM (*Pulse-width modulation*).

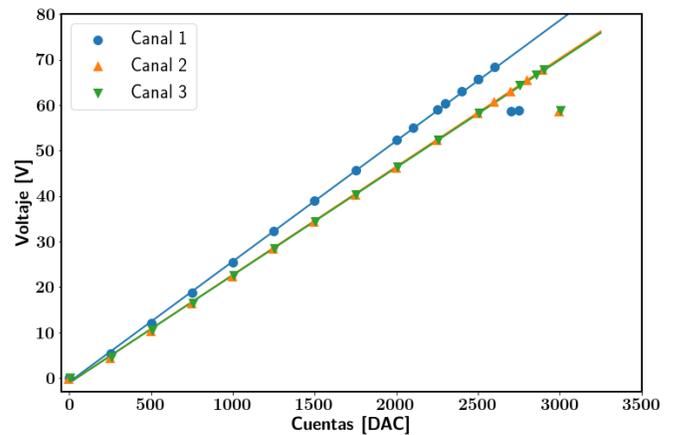


Figura 14. Relación entre los valores puestos en computadora (en unidades DAC) y los valores entregados a los SiPMs para el circuito S12. Los canales indicados en la imagen son los distintos canales de voltaje que permitía usar la placa LAGO. El comportamiento entre estas dos variables para el circuito S13 es lineal también.

A. Caracterización de los SiPMs

Conociendo ya como trabajar con los SiPMs, se tomaron mediciones de ruido con el SiPM S12, S13 y S13-II, para estudiar los aspectos mencionados a continuación.

1. Línea de base

Este concepto hace referencia al valor de voltaje que se registra cuando no aparece ningún pulso dentro de la toma de datos. De acuerdo a la programación de los circuitos, el valor registrado consiste en un voltaje de offset puesto por el circuito FPGA y configurado en 50 ADC. Esto permite hacer posibles lecturas de voltaje negativo que puedan salir del circuito primario. Debido a que el ruido electrónico en el SiPM aumenta apreciablemente con la temperatura, el FPGA realiza una corrección al offset haciendo un promedio de los valores de voltaje registrados en un intervalo de 2 ms y restando la diferencia con 50 ADC al offset, intentando mantener de esta manera el valor constante en 50 ADC. El estudio de la línea de base permite ver qué tanto está fluctuando el offset y por lo tanto qué tanto varía el ruido en el SiPM durante la medición. Asimismo, para un análisis de los pulsos hace falta conocer a partir de qué valor de voltaje se debe tomar el incremento causado por el pulso. Para obtener los valores de línea de base se utilizó el valor de voltaje registrado en el primer bin de cada pulso al hacer una medición utilizando un trigger bajo.

Un ejemplo de los resultados obtenidos se muestra en la figura 15. Esta medición fue hecha para el SiPM S13-II, con un trigger de 55 ADC y con una estadística de aproximadamente 4×10^5 pulsos. Las mediciones obtenidas fueron ajustadas a gaussianas y se calculó a través

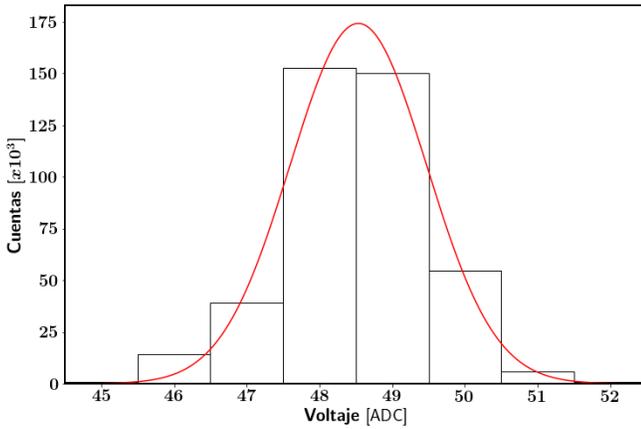


Figura 15. Valores de línea de base registrados junto con su frecuencia. Se hizo un ajuste gaussiano a estos valores para obtener un valor promedio de línea de base.

de este ajuste el valor promedio de línea de base. Para el SiPM S12 se obtuvo 49.81 ± 0.04 ADC, para el S13 50.07 ± 0.08 ADC y para el S13-II 48.53 ± 0.04 ADC.

2. Histograma de carga y ganancia

En la sección IE se mencionó que la forma circuital en la cual están compuestos estos dispositivos hace que se pueda saber cuántos fotones contribuyeron al pulso con una resolución de fotones individuales. Esta relación entre la señal y la cantidad de fotones en la señal se puede obtener a través de la *amplitud* del pulso, que es el valor máximo de voltaje alcanzado, o la *carga*, el área bajo la curva del pulso. Entre ambas opciones se escogió utilizar la carga como medida ya que al digitalizar el pulso la probabilidad de subestimar el valor real de la amplitud es muy alta, mientras que el valor de carga no varía demasiado. Para calcular la carga se utilizó la fórmula (2), donde q es la carga, x_i el valor de voltaje de cada bin y x_0 el valor de línea de base calculado para cada circuito.

$$q = \sum_{\text{bines}} (x_i - x_0) \quad (2)$$

Para poder hacer un análisis de los valores de carga que se miden para cada uno de los SiPMs se evitó la exposición de estos a la luz, ya que estos se saturan al exponerse a la luz ambiente, y al exponerlos a las barras centelleadoras se haría una medición condicionada por el fenómeno propio de la llegada de los muones al centelleador. En cambio, al hacer la medición en oscuridad los valores de carga que aparecen son debidos al ruido electrónico propio de los SiPMs; el ruido electrónico de un SiPM es la activación espontánea de un fotodiodo por temperatura, simulando la llegada de un fotón a este.

La figura 16 muestra histogramas de carga para los SiPMs S12, S13 y S13-II, donde las cuentas encontradas para cada valor de carga están normalizadas por el

SiPM	a [ADC]	b [ADC]
S12	15.5 ± 0.4	26 ± 1
S13	35.09 ± 0.02	-2.52 ± 0.05
S13-II	40.2 ± 0.3	-16 ± 1

Tabla I. Valores calculados para los parámetros a y b de los distintos SiPMs. Estos parámetros hacen referencia a la ecuación $q = an + b$, conocida como *ganancia*.

tiempo que duró la medición; así, la suma total de cuentas teniendo en cuenta todos los valores de carga da la cantidad de pulsos medidos en 1 segundo, debido a ruido. Los picos en los histogramas corresponden a los valores de carga que hacen referencia a la activación de 1, 2, 3, ... fotodiodos en el SiPM, mientras que el número elevado de cuentas en otros valores de carga se debe a la superposición de varios pulsos corridos unos de otros, a ruido del SiPM o ruido electrónico [6]. De acuerdo a esto, el primer pico encontrado con carga diferente de cero hace referencia a la activación de un fotodiodo, el segundo pico a la activación de dos fotodiodos, y así sucesivamente. Debido a que durante el funcionamiento normal del SiPM la activación de n fotodiodos hace referencia a la llegada de n fotones al dispositivo electrónico, al número de fotodiodos activados se le conoce como número de *fotoelectrones* (PE, por sus siglas en inglés).

Si bien para los SiPMs S12 y S13-II los histogramas de carga obtenidos tienen la suficiente estadística como para describir con este el ruido, para el SiPM S13 la cantidad de mediciones obtenidas en la figura para cargas mayores a 1 fotoelectrón es tan baja que no se puede modelar bien el ruido para cargas mayores. Por esto, se realizó para el SiPM S13 una medición adicional, donde se usaba un trigger más alto para dejar afuera las cargas cercanas a un fotoelectrón. Esto permitió hacer mediciones de tiempo más largo para conseguir buena estadística para valores mayores de carga. Por último, utilizando las dos mediciones se construyó un histograma combinado de ambos archivos.

Ajustando gaussianas en el entorno de cada uno de picos se encontró un valor determinado de carga para cada fotoelectrón, y conociendo de antemano de la empresa que fabrica los SiPMs que la relación entre carga y fotoelectrón es lineal [6], se halló la relación entre carga y fotoelectrón para cada SiPM, obteniendo los valores mostrados en la tabla I para una ecuación de la forma $q = an + b$, donde n es el número de fotoelectrones. A esta relación entre carga y fotoelectrones se le conoce como *ganancia*.

En cuanto a la disminución paulatina de la frecuencia de eventos a medida va aumentando la carga, hay que tener presente que las mediciones están hechas sobre el ruido de los SiPMs, por lo que una medición de carga equivalente a dos fotoelectrones significaría que en el intervalo de tiempo de medición del FPGA (25 ns) dos fotodiodos del SiPM coincidentalmente se activaron. De hecho, la probabilidad de que tal cosa ocurra es muy baja si se tiene en cuenta que la activación de los fotodiodos es aleatoria.

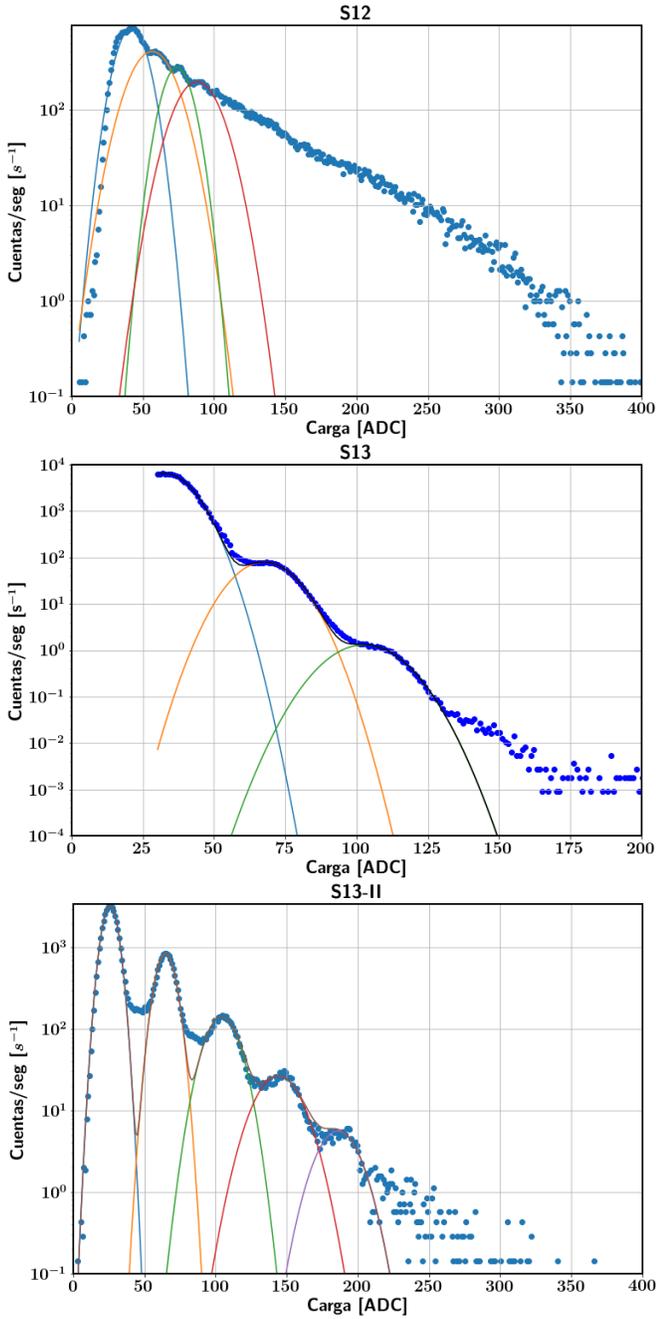


Figura 16. Histograma de carga para los SiPMs S12, S13 y S13-II. Cada uno de los histogramas de carga está graficado junto con unos ajustes de gaussianas hechos en los entornos de cada pico y junto con la función de todas estas gaussianas sumadas.

Lo que realmente ocurre es que al activarse un determinado fotodiodo del SiPM, se aumenta la probabilidad de que cualquiera de los fotodiodos vecinos se active, debido al aumento de agitación térmica producido por el flujo de corriente en el fotodiodo activado. Este tipo de efecto es común en los SiPMs y se le llama *crosstalk* [6]. Así, al activarse un fotodiodo, hay cierta probabilidad de que

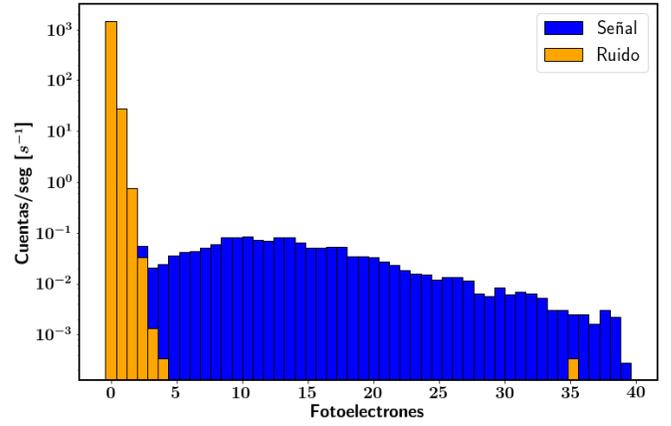


Figura 17. Histogramas de carga para el SiPM S13 cuando se registra señal y ruido (azul) y cuando sólo se registra ruido (naranja). Se observa un aumento en los pulsos con número alto de fotoelectrones.

alguno de sus vecinos se active y como consecuencia se mida dos fotoelectrones; a su vez, aparece cierta probabilidad de que al activarse dos fotoelectrones vecinos un tercer fotodiodo vecino se active, y así sucesivamente. Debido a que la probabilidad de que n fotodiodos se activen va disminuyendo a medida aumenta n , es natural que el número de cuentas decaiga con el aumento de la carga, lo que explica el comportamiento de los histogramas.

B. Mediciones en coincidencia

Ahora, para conocer el comportamiento de los SiPMs y de las configuraciones de barras centelleadoras al medir señales debidas a muones, se hicieron mediciones con señal, es decir, con la fibra óptica colocada sobre la región de detección del SiPM. Las mediciones se hicieron para algunas combinaciones entre configuraciones de barra centelleadora y SiPMs. Se utilizó un trigger que permitiera descartar los pulsos de menor amplitud; esto permitía descartar gran parte del ruido haciendo más fácil la toma de datos durante intervalos de tiempo más grandes (~ 15 min), aumentando así la relación señal:ruido. Una muestra de datos típica representada en forma de histograma de carga se muestra en la figura 17. Como se observa, el paso de un muón por una barra centelleadora deja una cantidad de fotoelectrones más grande que el de un pulso típico debido a ruido. A pesar de esto, para un número de fotoelectrones menor a 4 no se encuentra un criterio claro para poder decidir si un pulso medido puede deberse a un muón detectado o a ruido.

Un método de medición más efectivo que permite distinguir la señal (eventos físicos) del ruido yace en la construcción misma del experimento. Debido a que los muones de interés para la medición son los muones que logran atravesar todas las pantallas del instrumento, se puede considerar un pulso registrado en un SiPM como señal si en ese instante se registra un pulso en otros $2n - 1$ SiPMs

del instrumento (para un instrumento de n pantallas) de tal manera que los pixeles identificados con los SiPMs activados logran formar una recta.

Para este análisis se tuvo en cuenta que el muón lleva una velocidad tan alta que en un intervalo de 25 ns alcanza a atravesar todo el instrumento, puesto que al ser 25 ns el periodo de registro de datos de la electrónica, todo lo que ocurre durante este intervalo ocurre “en el mismo instante”; si se considera que entre la primera y la última pantalla hay ~ 1 m de distancia, el muón debe llevar una velocidad mayor a aproximadamente el 10 % de la velocidad de la luz, y los muones que se espera detectar para una muongrafía tienen una energía mínima de varias decenas de gigaelectronvolts, lo que los hace ultrarelativistas. Así, si se activan instantáneamente $2n$ detectores que forman una línea, el pulso registrado en un SiPM particular cuenta como señal, en caso contrario, como ruido.

Teniendo esto en cuenta, las mediciones posteriores fueron hechas con dos conjuntos centelleador-SiPM al tiempo, poniendo las barras una sobre la otra de tal manera que los muones atraviesen ambas barras y el evento físico se detecte en ambos SiPMs.

Debido a que se desea conocer la capacidad de colección de fotones de las distintas configuraciones posibles de barra-fibra-pegamento, se buscó una barra centelleadora diferente a las que se desea caracterizar como base de comparación para estudiar a las demás. La barra escogida es la que se muestra en la parte superior de la figura 10.

Así, con la idea de tener una medición de base para comparar, se apuntaron el SiPM S12 con el circuito S12 y el SiPM S13-II con su circuito a esta barra mencionada, y se graficaron los valores de carga obtenidos en cada circuito para un mismo intervalo de tiempo donde se midiera un pulso. Para hacer una comparación respecto al ruido, también se hizo una medición como la mencionada anteriormente, pero retirando la barra, para que ambos SiPMs sólo detectaran ruido. La gráfica obtenida es la que se muestra en la figura 18.

En esta imagen se grafica en el eje horizontal los valores de carga registrados por el SiPM S12 y en el eje vertical los valores de carga del S13-II. Cada punto azul representa un pulso registrado en alguno de los SiPM para la medición de ruido y cada punto rojo un pulso registrado en la medición con la barra centelleadora. Lo primero que se puede apreciar en la imagen es que debido a que el ruido electrónico de los SiPMs no está relacionado entre sí, para la medición de ruido se obtienen muchos puntos con valores de carga altos en un SiPM y con carga cercana a cero en el otro SiPM, creándose así los dos “brazos” de puntos que se ven en ambos ejes de la gráfica. Cabe aclarar que este tipo de comportamiento también se observa en la medición con señal, sólo que los puntos están superpuestos con la medición de ruido. Esto se entiende ya que independientemente de que se mida con la barra centelleadora o no, el ruido siempre se mantiene.

Ahora, al comparar ambas mediciones, se ve claramente

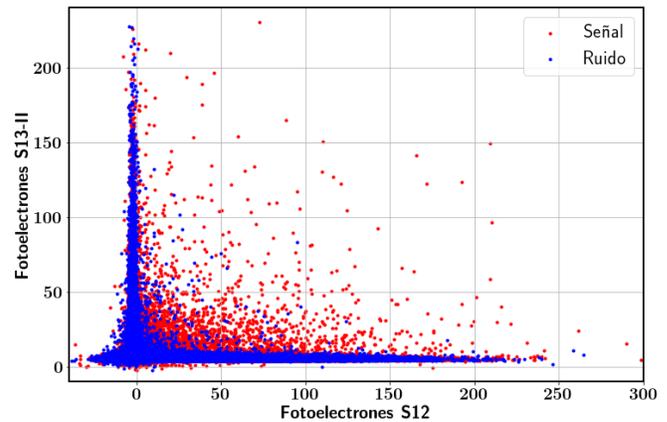


Figura 18. Gráfica de ruido electrónico (azul) y de señal (rojo), donde la medición de señal fue hecha con la barra centelleadora de referencia. El eje horizontal representa los valores de carga medidos en el SiPM S12 mientras que el eje vertical representa los valores de carga del SiPM S13-II.

que ambos SiPMs detectan fotones provenientes de la barra centelleadora, evidenciado por la diferencia entre las gráficas de señal y ruido; cuantitativamente, la medición del fenómeno de detección de muones se presenta en la gráfica como un aumento de pulsos donde ambos circuitos registran cargas altas al tiempo. A pesar de esto, no hay un criterio que se pueda inferir de la gráfica que nos permita determinar si un punto particular aparece por la medición de un evento físico o aparece debido al ruido electrónico. Lo mejor que se puede hacer es crear un criterio para seleccionar una región de la gráfica que nos permita suponer estadísticamente que algún porcentaje pequeño de puntos tiene como origen el ruido electrónico; esto, a expensas de perder detecciones reales que se ubicarían en la región desechada de la gráfica.

Se utilizó la función $f(x) = \frac{130005}{x-40.0} + 275.0$ como criterio preliminar para realizar comparaciones entre este tipo de mediciones; de esta manera, se desechan los puntos encontrados a la izquierda de $f(x)$ para un determinado valor de x , donde x es el valor de carga en el SiPM S12 y $y = f(x)$ el valor de carga en el SiPM S13-II. Las constantes de la función fueron escogidos de tal manera de rescatar la mayor cantidad posible de eventos físicos. Así, se hicieron mediciones en coincidencia en las cuales la barra base se situó debajo y se conectó al SiPM S13-II, mientras que la barra de arriba se conectó al SiPM S12 y fue remplazada de medición en medición, probando configuraciones diferentes. En la figura 19 se muestran algunas de estas mediciones junto con la gráfica de $f(x)$, mientras que la tabla II muestra la proporción señal/ruido para los puntos seleccionados con la función $f(x)$, para las distintas configuraciones probadas.

De acuerdo a la tabla II se observa que todas las configuraciones probadas tienen un rendimiento similar en cuanto a la relación señal/ruido excepto la barra de “muestra”, que fue escogida ya que tuvo fallas en su construcción y se aprovechó para probar el rendimiento de

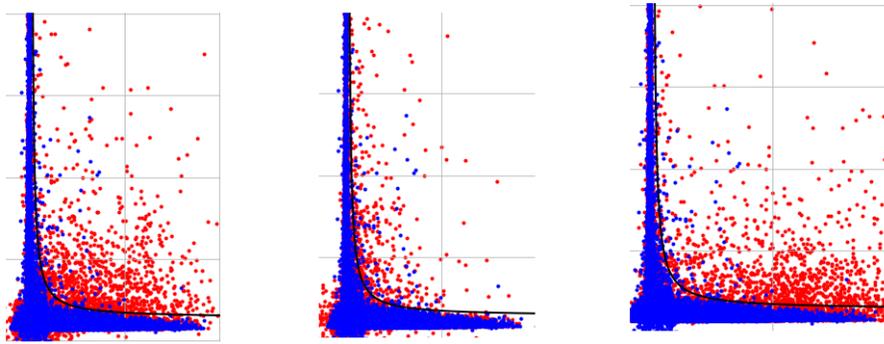


Figura 19. Mediciones de señal contrastadas con mediciones de ruido para distintas configuraciones, junto con la función $f(x)$ marcada por la línea negra. Izquierda: Barra simple sin pegamento, con fibra óptica Y11-1.0mm quemada en un extremo. Centro: Barra de “muestra”, con problemas en su armado. Derecha: Barra doble con pegamento óptico y fibra Y11-1.0mm.

Centelleadores	Señal/Ruido
Doble-pegamento-Y11-1.0 mm	11.43
Doble-s/ pegamento-Y11-1.2 mm	10.92
Muestra	4.10
Simple-pegamento-Y11-1.2mm	8.19
Simple-s/ pegamento- Y11-1.0 mm	10.60

Tabla II. Valores de señal/ruido obtenidos de acuerdo al criterio de la función $f(x)$ para distintas configuraciones de barras centelleadoras.

una barra centelleadora en tales condiciones. La barra de muestra era una barra simple con pegamento óptico y fibra Y-11-1.2 mm, la cual al pegarse quedó medio torcida, saliéndose del surco de la barra en varios puntos.

Debido a que la medición de ruido es la misma para todas las gráficas y a que el flujo de muones se supone constante, el hecho de que la relación señal/ruido aumenta significa que para una determinada medición las cargas registradas para una detección muónica aumentaron, permitiendo que más puntos de señal entren a la zona de la gráfica considerada por el corte hecho por la función $f(x)$. Así, se concluye que entre las barras probadas la que mejor colecta fotones es la doble con pegamento y fibra óptica Y11-1.0 mm. A pesar de esto, los valores obtenidos son bastante similares y se analizará más adelante si las diferencias entre los valores hallados son significativos para la construcción del experimento. Para la barra simple, sin pegamento óptico y con fibra Y-11 de 1.0 mm, se probó una técnica usada en el observatorio Pierre Auger que consiste en quemar sobre una superficie caliente la terminación de la fibra que se colocará frente al SiPM. Los resultados parecen indicar que este procedimiento mejora el rendimiento de las configuraciones de barras, pero los resultados de II todavía no son decisivos. Para comparar el rendimiento entre el SiPM S13 y el SiPM S12 se hicieron mediciones como las hechas hasta ahora, simplemente intercambiando el SiPM S12 y el circuito S12 por el SiPM S13 y su correspondiente circuito. Un ejemplo de las gráficas halladas con este nuevo montaje se muestra en la figura 20.

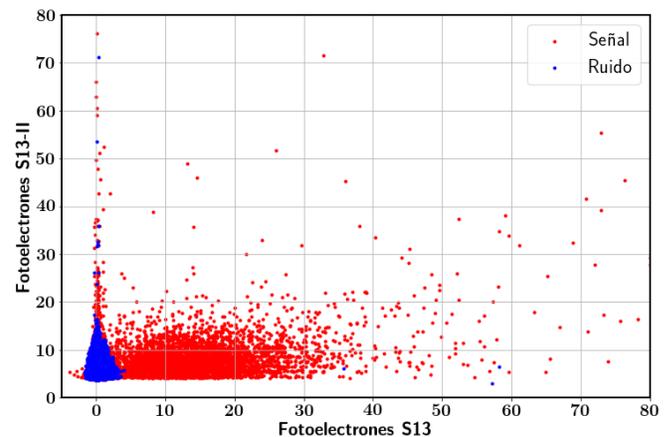


Figura 20. Mediciones de señal y ruido con el SiPM S13 con el método de medición en coincidencia. El eje horizontal muestra los valores de carga en unidades de fotodectrones para el SiPM S13, mientras que el eje vertical muestra esto mismo para el SiPM S13-II.

En la imagen se observa una alta disminución de la cantidad de ruido registrado por el SiPM S13, lo cual era esperable al comparar el histograma de carga de este SiPM con el SiPM S12. Además, la gran disminución del cross-talk al pasar del S12 al S13 también ayuda a que los valores de carga registrados en las detecciones de muones tengan una varianza menor, viéndose esto reflejado en la alta concentración de puntos de señal en una zona de la gráfica. Debido a la increíble mejora que representa el uso del SiPM S13 frente al uso del SiPM S12, se decidió enfocar en este el resto del estudio, y se volverá al SiPM S12 al final del trabajo para hacer una última comparación de su rendimiento frente al S13. Debido a la ventaja que representa la medición en coincidencia para el análisis de datos se siguió utilizando este método, usando ahora como barra base la barra doble, ya que esta fue la de mejor rendimiento de acuerdo a las mediciones hechas hasta ahora; el SiPM que se conectó a esta barra fue el S13-II, pues a fin de cuentas se quiere observar el

rendimiento del S13 con las distintas configuraciones de barras.

El hecho de que haya una separación mucho más clara entre ruido y señal con el SiPM S13 permitió hacer un análisis más exhaustivo del rendimiento de las configuraciones de las barras centelleadoras y de la viabilidad de estas configuraciones junto con el S13 para la construcción del instrumento, lo cual se expondrá en la siguiente sección.

C. Eficiencia y ruido

1. Eficiencia

La falta de un criterio para poder determinar si un pulso particular aparece debido a ruido o una detección no podrá solucionarse, debido a que la física detrás del ruido electrónico de un SiPM no anula la posibilidad de registrar, por ejemplo, un pulso de ruido equivalente a 10 fotoelectrones, a pesar de que la probabilidad de que tal evento ocurra sea mínima. Debido a que se espera detectar muones con la suficiente energía para atravesar centenas o miles de metros de roca, la cantidad de muones que se espera medir por día en el detector oscila entre 1 y 50. Este hecho hace que los tiempos de exposición necesarios para realizar una muografía se encuentren entre 15 días para las mediciones más cortas y 4 meses o más para las mediciones más largas [3]. Asimismo, esta técnica de medición se vuelve fuertemente dependiente de la posibilidad de capturar la mayor cantidad de eventos posibles, debido a la frecuencia tan baja de eventos; por esto, al momento de establecer un criterio a través del cual se desecharán pulsos medidos, se debe procurar no desechar más del 10% de los eventos reales. Si se escoge, por ejemplo, un criterio de selección de puntos que desecha el 10% de los datos, hay que tener en cuenta que un evento será contado como tal si cae dentro de la región de carga aceptada para en los $2n$ SiPMs que atraviesa. Pensando en un instrumento de dos pantallas, la probabilidad de que un evento físico sea registrado como tal es del $90^4\% \simeq 66\%$; con esto, si antes se requería un tiempo de 3 meses para recolectar N eventos, ahora se requerirán 4.5 meses para recolectar la misma cantidad de eventos. A la cantidad de eventos no desechados sobre la cantidad de eventos total se le conoce con el nombre de *eficiencia*, y será el primero de los dos criterios que nos indicará la viabilidad de la configuración escogida.

El segundo criterio será la *pureza*, definida como la cantidad de eventos físicos no desechados sobre la cantidad total de puntos de ruido y señal no desechados. Así, a medida que el criterio escogido filtre menos el ruido, la pureza irá tendiendo a cero, mientras que un criterio que permita escoger sólo eventos físicos dará una pureza del 100%.

La figura 20 sugiere que se puede elegir un valor de trigger para el SiPM S13 que nos permitiría escoger prácticamente todos los eventos de señal sin incluir mucho ruido,

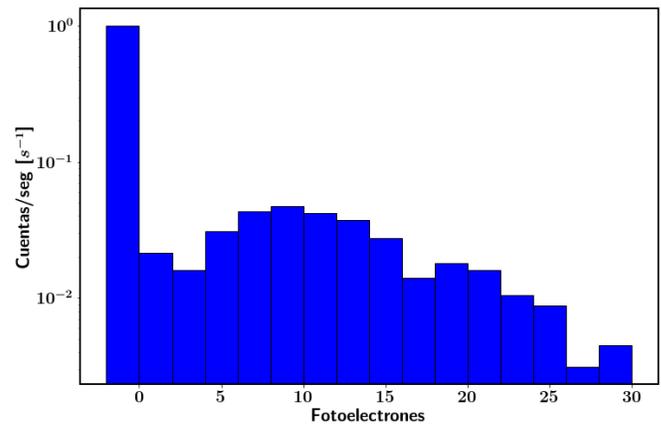


Figura 21. Histograma de carga obtenido para el SiPM S13 al poner un trigger de carga de 10 fotoelectrones en el S13-II. Mientras los primeros 2 bins están dominados por ruido, se puede decir que el resto de bins están dominados por señal.

es decir, se puede buscar un valor de carga, o equivalentemente, de fotoelectrones encima del cual se registrarán todos los eventos, manteniendo valores altos de eficiencia y de pureza. Debido a que este criterio de selección es sencillo de implementar electrónicamente y permite disminuir el tamaño de los archivos almacenados en una medición, la utilización de un trigger en el SiPM fue el criterio que se escogió para estudiar la viabilidad de las configuraciones de centelleadores.

Aunque en la figura 20 se puede ver una separación clara entre señal y ruido para a lo largo del eje horizontal independientemente de los valores de carga del SiPM S13-II (eje y), este fenómeno no se presentó en la mayoría de las mediciones, generándose una brecha entre ruido y señal solamente para valores altos de carga del S13-II.

Si se escogen diferentes valores de carga para el SiPM S13-II y se seleccionan sólo los datos encima de estos triggers, al hacer un histograma de carga del SiPM S13 para cada uno de estos conjuntos de datos se obtendrá aproximadamente la misma forma de curva para los valores de carga que aparecen debido a la detección de muones. Esto ocurre debido a que la cantidad de fotones producidos por el paso de un muón a través de la barra centelleadora conectada al S13 es una función que no depende del trigger escogido en el S13-II; más aún, la función se mantendrá invariante en las distintas mediciones mientras el flujo de muones se mantenga constante y no varíen las condiciones de la barra o el SiPM S13.

En base a lo mencionado anteriormente se buscó un valor de carga en el SiPM S13-II que, al hacer el histograma de cargas para el S13, se pudiera distinguir la señal del ruido y hubiera suficiente estadística como para modelar una función de señal. Un ejemplo de los histogramas de carga obtenidos se muestra en la figura 21.

La parte de señal del histograma fue ajustada a una función lognormal para obtener una expresión analítica de esta. Los valores de los histogramas junto con los ajustes para las distintas configuraciones de barras centellea-

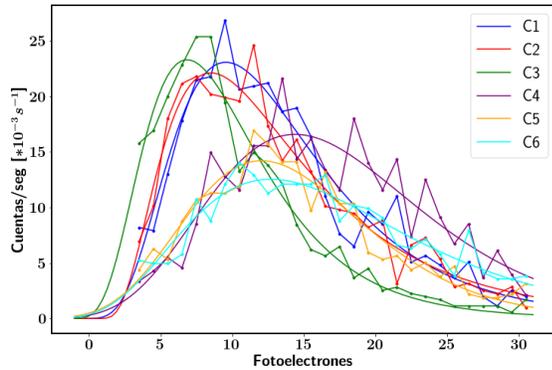


Figura 22. Las rectas unidas por puntos son los datos de señal medidos para las distintas configuraciones, mientras que las líneas continuas son los ajustes hechos a estos datos.

doras se muestran en la figura 22. Las configuraciones utilizadas fueron: barra simple, sin pegamento óptico y con fibra Y11-1.0 mm quemada en la punta sobre superficie caliente, de ahora en adelante C1 (configuración 1); simple, con pegamento, fibra Y11-1.2 mm y punta quemada (C2); simple, sin pegamento, fibra Y11-1.2 mm y punta quemada (C3); simple, sin pegamento, fibra Y11-1.0 mm y punta quemada (C4); simple, sin pegamento, fibra BCF-60-1.0 mm y punta quemada (C5) y simple, sin pegamento, fibra BCF-99-1.2 mm y punta quemada (C6). Las configuraciones C1 y C4 tienen las mismas características porque para hacer la configuración C4 simplemente se reemplazó la fibra óptica de la configuración C1 por una fibra en mejor estado. No se muestra en la imagen el análisis de configuraciones de barras con dos barras centelleadoras pegadas ya que estas funcionaron tan mal que no permitieron escoger un valor de carga en el SiPM S13-II que permitiera separar la señal del ruido; este mismo efecto sucedió con las fibras ópticas a las que no se les quemó la punta sobre una superficie caliente. Estos hechos permiten concluir que las configuraciones con barras dobles presentan problemas al coleccionar fotones, y que fibras en las que se hace el procedimiento usado en el observatorio Pierre Auger tienen una mejor transmisión de fotones al SiPM.

La figura 23 muestra un cálculo analítico de la eficiencia basado en el ajuste.

Si se tiene en cuenta que una buena barra centelleadora es la que colecta más luz, es decir, la que hace que el SiPM registre en promedio valores de fotoelectrones más altos, se llega a que la mejor barra centelleadora es la C4, pero en general su desempeño no es muy superior al del resto de configuraciones. Por otro lado, se observa que las barras centelleadoras C1, C2 y C3 no coleccionan luz tan bien como el resto. Debido a que no hay una característica en cuanto a la escogencia de la fibra óptica o el uso de pegamento que determine de manera clara un desempeño diferente entre las distintas configuraciones,

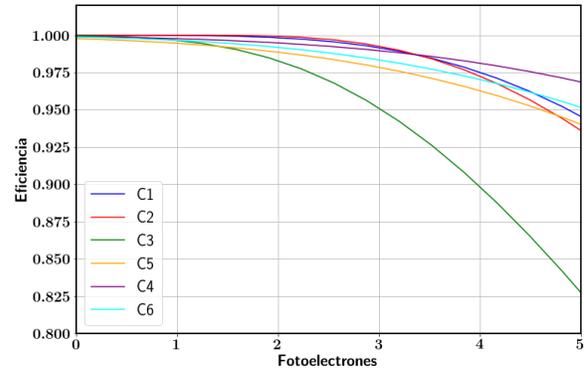


Figura 23. Valores de eficiencia calculados para las distintas configuraciones de barras centelleadoras.

se puede concluir que el uso de pegamento o la escogencia entre diferentes fibras ópticas no influye de manera perceptible en la construcción del instrumento. De hecho, en la figura 23 se observa que aún escogiendo un trigger para tomar sólo los pulsos por encima de 3 fotoelectrones, se puede mantener una eficiencia mayor al 95% con cualquiera de las configuraciones, excepto con una de las tres configuraciones mencionadas anteriormente. En cuanto a estas tres configuraciones, la única característica común entre ellas y que no se encuentra en el resto de configuraciones es el hecho de que las fibras ópticas usadas estaban maltratadas, con varias microfisuras a lo largo de ellas. Así, como última conclusión en cuanto a las barras centelleadoras, se observa que el único factor que disminuye significativamente el rendimiento del instrumento es el descuido en el armado de las barras y en el uso de la fibra óptica.

2. Pureza y ruido

Como parte del análisis de eficiencia recién hecho se obtuvieron funciones analíticas que describen la forma de la señal, indicando la cantidad de cuentas por segundo obtenidas como función de la carga. Lo que hace falta para evaluar la pureza es entonces una forma de describir el ruido electrónico. Esto es justamente lo que se hizo para la sección III A 2 de los resultados, donde se analizaba el ruido para cada SiPM. El único cambio realizado en los histogramas para trabajar con ellos en esta sección fue reescalar la cantidad de cuentas por segundo de tal manera que la cantidad total de eventos registrados por segundo fuera de $90 \cdot 10^3$ [7] para el SiPM S13 y $100 \cdot 10^3$ [8] para el SiPM S12, ya que son las frecuencias de ruido indicadas por la empresa fabricante de los SiPMs. Esto se hizo ya que para hacer ambas mediciones de ruido se pusieron valores de trigger que dejaban eventos de electrónica por fuera, por lo que los dos histogramas conseguidos no mostraban la cantidad real de eventos, sólo la proporción

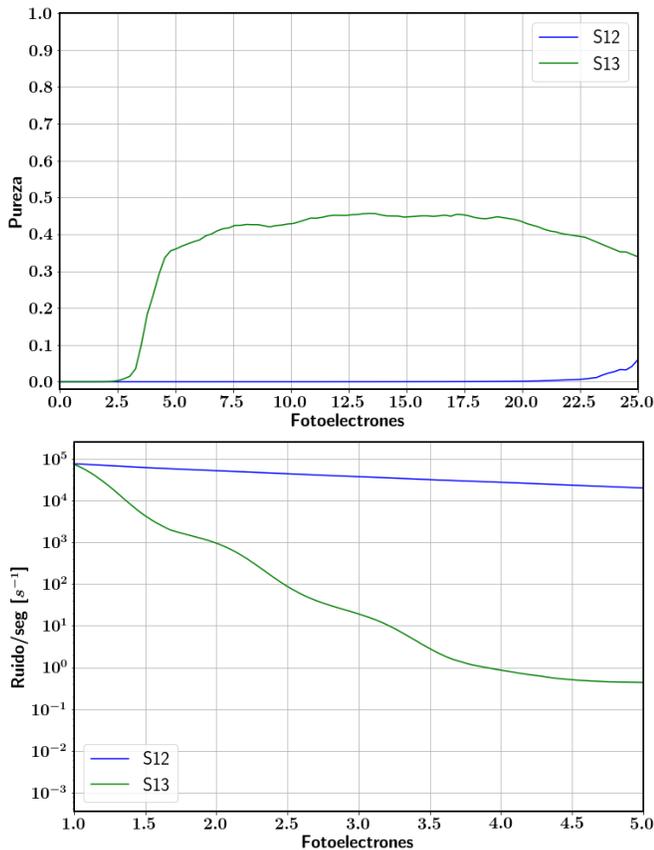


Figura 24. Arriba: pureza en función del trigger, en unidades de fotoelectrones detectados. Abajo: ruido por segundo en función del trigger, en unidades de fotoelectrones. Ambas gráficas muestran el comportamiento del SiPM S12 y el SiPM S13.

de frecuencia entre los eventos a diferentes cargas.

Con estas mediciones de ruido y con la función de señal hallada para la configuración C4 se realizaron las gráficas de pureza en función del trigger y de ruido por segundo incluido en las mediciones en función del trigger, tanto para el SiPM S13 como para el SiPM S12. No se tuvieron en cuenta el resto de configuraciones de barras ya que sus comportamientos son similares. Los resultados se observan en la figura 24.

En cuanto a la pureza en función del trigger se observa que el SiPM S12 tiene un rendimiento muy bajo, con la pureza menor al 10% aún a 25 fotones. Por otro lado, el SiPM S13 tiene una mejoría rápida entre 2.5 y 5 fotoelectrones gracias a su bajo crosstalk pero luego su pureza no mejora más e incluso disminuye para valores de trigger mayores a 20 fotoelectrones. Esto ocurre debido a que aunque el ruido disminuye muy rápido con el número de fotoelectrones la tasa de eventos casuales a números altos sigue siendo significativa respecto al número de eventos de señal. A pesar de que los resultados parecen indicar que no es posible una medición donde se pueda asegurar que gran parte de los datos tomados son señal, falta tener en cuenta la medición por coincidencia que ocurriría si el

instrumento se construyera, lo que permite eliminar gran parte del ruido. Esto se examinará la siguiente sección.

En cuanto al ruido por segundo, se observa un rápido decaimiento de este valor para el SiPM S13, mientras que para el SiPM S12 se mantiene una tasa alta en todo el espectro de la gráfica. Ambas gráficas de la figura 24 muestran el bajo rendimiento que tiene el SiPM S12 si se piensa usar en el instrumento, así como la mejoría de este problema en el SiPM S13.

El ruido por segundo fue analizado en un rango de 1 a 5 fotoelectrones porque, de acuerdo a la figura 23, escoger un trigger entre estos valores permitiría construir un instrumento con alta eficiencia, lo que permitiría mantener los tiempos de exposición necesarios para hacer una muongrafía.

3. Instrumento

En la sección anterior se mostraron gráficas de eficiencia, pureza y ruido por segundo en función del trigger para una medición hecha en el laboratorio, teniendo en cuenta una sola barra centelleadora y SiPM. Para hacer un análisis real de los valores dados anteriormente se debe tener en cuenta una serie de factores que aparecen al pensar en la construcción del instrumento y en una medición real de muongrafía.

El primer factor que hace falta tener en cuenta para ver la pureza real de una medición en función del trigger, así como el ruido por segundo, es el criterio mencionado al principio de la sección III B; hace falta incluir en el análisis que para contar un pulso como detección de muón se debe obtener un pulso en otros $2n - 1$ SiPMs. Así, el ruido electrónico que queda sin poder distinguirse de la señal luego de tener en cuenta este criterio es un posible evento de ruido simultáneo que ocurra en $2n$ SiPMs que formen una línea recta.

Para un instrumento de 2 pantallas no hay ningún criterio que discrimine el ruido debido a la trayectoria recta de un muón, basta con que 4 SiPMs se enciendan durante el intervalo de tiempo manejado por la electrónica para que se pueda confundir con un muón. Así, si $r(x)$ es el ruido por segundo incluido en la medición en función del trigger (x) para un SiPM, el ruido en el instrumento en función del trigger será $R(x) = c^4 r(x)^4 (\Delta t)^3$. Δt es el intervalo de tiempo electrónico, en este caso 25 ns, y c es la cantidad de barras verticales u horizontales que forman un plano de la pantalla. Para los análisis posteriores se supondrá $c = 25$, pues ya que el ancho de las barras es de aproximadamente 4 cm, se necesitará aproximadamente 25 barras para conseguir pantallas de 1 m x 1 m.

Si al instrumento se le agrega una pantalla más, ya que la función $R(x)$ descrita anteriormente selecciona una única recta posible, sólo sobrevivirá el ruido si se activan dos SiPMs en esta nueva pantalla en la zona por donde pasa la recta. Si se considera que la recta pasa por una celda de esta nueva pantalla, y que se contará como detección si se activa esta celda o alguna de sus 8 celdas vecinas,

se tiene que la nueva función de ruido es $R(x) = c^4 * 9r(x)^6(\Delta t)^5$. Así, para n pantallas con $n > 2$, $R(x) = c^4 * 9^{n-2}r(x)^{2n}(\Delta t)^{2n-1}$.

El segundo factor que se debe modificar para hacer un cálculo real de la pureza del instrumento es el flujo de muones en las mediciones. Todas las mediciones hechas hasta ahora fueron realizadas en el laboratorio, donde se presenta un flujo de muones de aproximadamente $200 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Ahora, si se espera analizar un objeto de aproximadamente 500 m de espesor, la figura 2 indica que la energía mínima que tendrán los muones detectados será de $\sim 400 \text{ GeV}$. Para esos valores de energía se puede aproximar a que la tasa máxima de muones será de $0.01 \text{ deg}^{-2}\text{día}^{-1}$. Si se considera que la distancia entre la primera y última pantalla es de 1 m y que el área de cada pantalla es de 1 m x 1 m, se llega a que la resolución angular del instrumento es de $\sim 6000 \text{ deg}^2$, por lo que el flujo a detectar baja a ~ 60 muones por día. Este valor es el que se tendrá en cuenta para hacer el análisis.

Cabe aclarar que la forma de la curva de la señal se mantendrá, y sólo variará la función en un factor de escala. Esto es así debido a que se trabaja en un rango de energías de muones donde estos pierden la misma cantidad de energía por cantidad de material atravesado, por lo que la distribución de probabilidad del número de fotones registrados por muón se mantendrá.

Teniendo en cuenta los dos factores mencionados anteriormente se presenta en la gráfica 25 la pureza y el ruido por segundo en función del trigger y el número de pantallas, así como un cálculo de estos valores para un SiPM individual.

Un primer cambio que ocurre en esta gráfica respecto a la de pureza para un SiPM en el laboratorio (figura 24) es que la pureza del SiPM S13 pasa de ser aproximadamente 0.4 a 0 si se tiene en cuenta el flujo real de muones en una muongrafía. Luego, se observa que al tener en cuenta el criterio de mediciones en coincidencia la pureza del instrumento mejora hasta el punto de obtenerse valores muy cercanos al 100 % para un trigger que registra señal a partir de 2 fotoelectrones. También se observa una mejoría considerable tanto en la pureza como en el ruido por segundo si se usan 3 pantallas en vez de 2. A pesar de esto se debe considerar que agregar una tercera pantalla al instrumento conlleva mayor inversión de trabajo y presupuesto.

En cuanto a la eficiencia real del instrumento, ninguno de los factores mencionados para corregir el ruido por segundo afecta al valor de eficiencia calculado anteriormente. El único efecto que aparece al pasar del análisis de un SiPM al análisis del instrumento es que para que un muón sea aceptado como señal por todos los SiPMs que atraviesa, este debe caer dentro del valor de eficiencia de cada SiPM. Así, la eficiencia del instrumento pasa a ser $S(x) = s(x)^{2n}$ para un instrumento de n pantallas, donde $s(x)$ es la eficiencia en función del trigger para un SiPM. El cálculo de eficiencia en función del trigger para un instrumento de varias pantallas se muestra en la figura 26. Para estos cálculos se escogió como base la eficiencia de

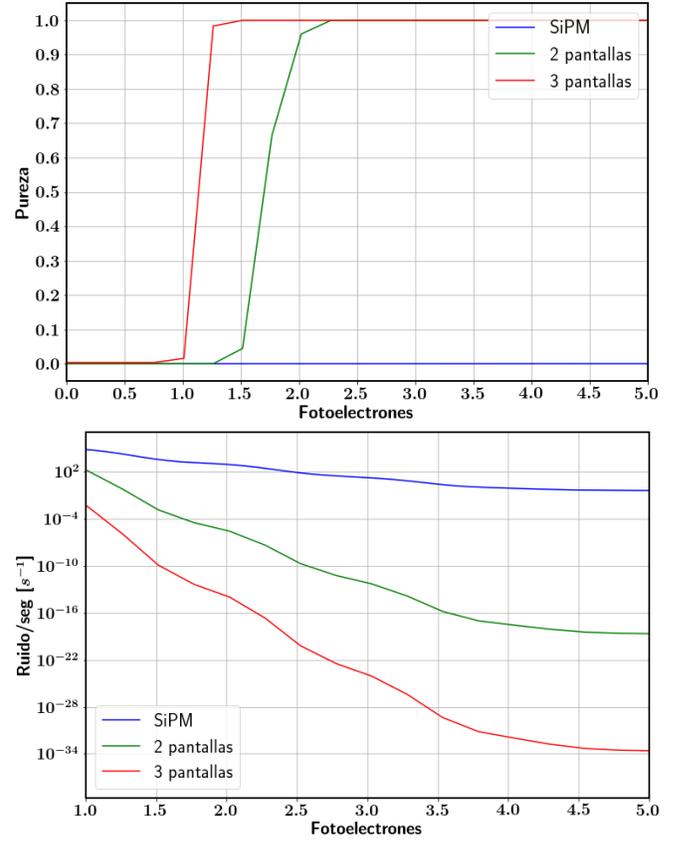


Figura 25. Pureza (arriba) y ruido por segundo (abajo) en función del trigger. Se muestra el comportamiento de un SiPM S13 junto con el de un instrumento de 2 y 3 pantallas construido con SiPMs S13.

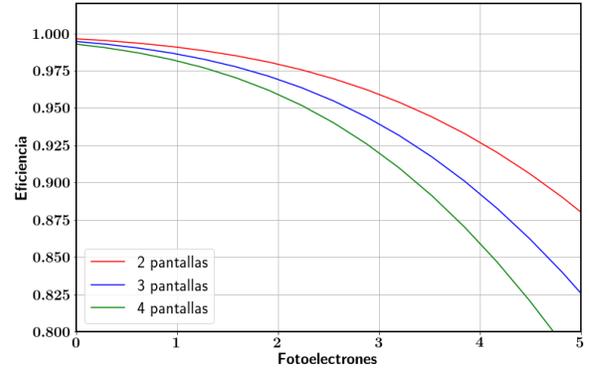


Figura 26. Eficiencia del instrumento en función del trigger para 2, 3 y 4 pantallas.

la configuración C4.

Como se puede deducir de la función $S(x)$, entre más pantallas tenga el instrumento más disminuye la eficiencia, puesto que es menos probable que el muón sea contado como tal en los diferentes SiPMs en los cuales deja señal. Aún así, el rendimiento del instrumento es bas-

tante bueno, pues incluso con 4 pantallas la eficiencia se mantiene sobre el 92.5 % si se hace un trigger entre 2 y 3 fotoelectrones. Si se tiene en cuenta esto y que la pureza de estas tres opciones está por encima del 90 % para 2 y 3 fotoelectrones, se concluye que estas posibilidades son viables para construir el instrumento. Cabe aclarar que aunque en la figura 25 no se muestra la pureza para un instrumento de 4 pantallas, entre más pantallas se use más aumenta la pureza, razón por la cual se sabe que para 4 pantallas la pureza estará por encima del 90 %.

Viendo en más detalle, si se hace un corte de trigger en 2.5 fotoelectrones el ruido por segundo que sería registrado sería de 10^{-10} s^{-1} , lo que es equivalente a un pulso de ruido cada $10^{10} \text{ s} \simeq 300$ años. Esto muestra que a pesar de que cada SiPM tiene eventos de ruido del orden de 10^5 por segundo, al considerar el instrumento completo la probabilidad de que se registre ruido es tan baja que se puede considerar que todo pulso registrado es debido a la detección de un muón.

Por último, las figuras 25 y 26 muestran que la mejor opción para la construcción del instrumento es optar por 2 pantallas, puesto que mantiene una eficiencia más alta que la de un instrumento con 3 o 4 pantallas y al mismo tiempo da índices lo suficientemente bajos de ruido por segundo como para que se pueda considerar todo pulso como señal.

IV. CONCLUSIÓN

Al estudiar las características electrónicas del SiPM S12 y el SiPM S13 se llegó a la conclusión de que el uso del

S12 no es viable para la construcción de un instrumento para realizar muongrafías, puesto que su alto crosstalk hace que el ruido sea predominante en todo el rango de fotoelectrones de interés para la detección de muones. A su vez, se hicieron pruebas con distintas configuraciones de barras centelleadoras, teniendo en cuenta: el uso o no uso de pegamento óptico para pegar la fibra óptica a la barra, la posibilidad de usar como unidad de detección una o dos barras centelleadoras y el ensayo de las fibras ópticas Y11-1.2 mm, Y11-1.0 mm, BCF-99-1.2 mm y BCF-60-1.0 mm. El uso del método de mediciones en coincidencia con dos unidades de detección llevó a las siguientes conclusiones: **1.** El uso de una sola barra como unidad de detección es mejor que el uso de dos barras, posiblemente debido a que el uso de dos barras le da más espacio a la fibra óptica para posicionarse mal y captar menos luz; **2.** Quemar la terminación de la fibra óptica que se pondrá frente al detector aumenta la colección de fotones; **3.** El uso o no uso de pegamento óptico, así como el uso de las distintas fibras ópticas, no refleja variaciones perceptibles en la colección de fotones; **4.** Por otro lado, una mala instalación de la fibra en la barra o la aparición de microfracturas en la fibra debido al uso descuidado de esta sí disminuye enormemente el rendimiento de la unidad de detección.

Por último, se usaron parámetros típicos presentes en una medición de muongrafía para estudiar la viabilidad de la construcción del instrumento con las barras centelleadoras ensayadas y el SiPM S13. Se llegó a la conclusión de que es posible su construcción usando 2, 3 e incluso 4 pantallas de barras centelleadoras, siendo la mejor opción el uso de 2 pantallas.

-
- [1] G. Källen, *Elementary Particle Physics* (Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1964).
 - [2] H. Asorey, *Los detectores cherenkov del observatorio Pierre Auger y su aplicación al estudio de fondos de radiación*, Ph.D. thesis, Partículas y Campos, Centro Atómico Bariloche (2012).
 - [3] J. M. Y. D. D. C. N. Lesparre, D. Gilbert and E. Galichet, *Geophysical Journal International* (2010).
 - [4] M. T. H. S. K. M. Tanaka, T. Uchida and H. Taira, *Geophysical Research Letters* (2009).
 - [5] F. G. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 3rd ed. (John Wiley and Sons, Inc., 2000).
 - [6] K. S. A. Ghassemi and K. Kobayashi, *Multi-pixel photon counter*, Hamamatsu.
 - [7] *Multi-pixel photon counter: S13360 series*, Hamamatsu.
 - [8] *Multi-pixel photon counter: S12571-025, -050, -100C/P*, Hamamatsu.