2023 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON) | 979-8-3503-6953-3/23/$31.00 ©2023 IEEE | DOI: 10.1109/CHILECON60335.2023.10418659

Optimization of a Muon Detection System with Silicon Photomultiplier Sensors (SiPM)

1st Ing. Matias Bertoli
Laboratorio de Mecánica y Energía
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción
San Lorenzo, Paraguay
mbertoli@fiuna.edu.py

2nd Ing. Giovanni Secchia
Laboratorio de Mecánica y Energía
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción
San Lorenzo, Paraguay
gsecchia@fiuna.edu.py

3rd Dr. Jorge Andres Molina Insfrán
Laboratorio de Mecánica y Energía
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción
San Lorenzo, Paraguay
jmolina@fiuna.edu.py

4th Msc. Esteban Javier Cristaldo Morales
Laboratorio de Mecánica y Energía
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción
San Lorenzo, Paraguay
ecristaldo@fiuna.edu.py

5th Ing. Carlos Gaspar Benitez Montiel
Laboratorio de Mecánica y Energía
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción
San Lorenzo, Paraguay
cmontiel@fiuna.edu.py

6th Ing. Alan Cuevas Mongelós
Laboratorio de Mecánica y Energía
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción
San Lorenzo, Paraguay
acuevas@fiuna.edu.py

***Abstract*—The objective of this work is to design and implement two cosmic ray detection systems to analyze the impact of the South Atlantic Magnetic Anomaly on the observed incoming particle rate. The implemented detection systems utilize scintillating materials to emit photons when ionizing particles pass through them. These photons are captured by silicon photomultiplier sensors (SiPM), generating signals that are then conditioned by an electronic board. The board can accommodate up to 16 sensors grouped in sets of 4. The signals are amplified, compared with a reference, and digitized using a hysteresis comparator and time stretcher. An FPGA device has been programmed to process the signals, control the duty point, and test the detector's timing. The detection system consists of two independent configurations. The first configuration includes three stacked 50 cm x 50 cm scintillators that can be rotated with respect to the zenith angle. The second configuration consists of four 25 cm x 25 cm scintillators that can be used as two separate detectors. The measurements have been carefully adjusted to the expected muon distribution and exhibit similar behavior to other detectors in the Mechanics and Energy laboratory. Furthermore, the new architecture has successfully observed interesting space weather events, validating all detection systems.**

***Index Terms*—Cosmic Rays, Plastic Scintillators, Silicon Photomultiplier, Signal Conditioning, FPGA,SPI**

I. Introducción

Con el objetivo de monitorear y cuantificar las partículas de rayos cósmicos que llegan a la corteza terrestre, este trabajo propone el diseño e implementación de tres detectores de partículas, todos con geometrías variables que permiten el estudio tanto de los ángulos de incidencia, así como la penetración en distintos materiales, y también el estudio del decaimiento y vida media de los muones. Actualmente en el laboratorio existen 2 detectores capaces de detectar los rayos cósmicos: el Escaramujo y Muon Matrix, los cuales siguen en funcionamiento sin embargo, cuentan con diversos PCBs y dificultad para establecer el punto de trabajo o cambiar el mismo. El desafío de este proyecto es el de optimizar estos sistemas. Para ello, se reducirá el número de placas electrónicas utilizadas para la lectura de los centelladores. El control de dichos circuitos se realizará de manera individual, utilizando como interfaz de usuario un computador para facilitar la manipulación de variables eléctricas y aumentar la confiabilidad de los sistemas utilizados.

II. Consideraciones para el diseño del sistema de adquisición de datos y acondicionamiento de señal

A. Detección de muones

El proceso de detección de muones se da luego de que estas partículas atraviesan el material centellador, liberando fotones que serán capturados y transformados en pulsos de corriente mediante el sensor fotomultiplicador de silicio (SiPM). Como este mismo proceso se produce para cualquier tipo de partícula ionizante, para certificar que es un muon hay que hacer este mismo proceso en por lo menos dos centelleadores de forma casi simultánea. Esto es porque debido a su gran energía, los muones que depositan energía en el primer centelleador,

979-8-3503-6953-3/23/31.00 ©2023 IEEE

Authorized licensed use limited to: Universidad Industrial de Santander. Downloaded on April 11,2025 at 22:10:58 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

también lo harán en el segundo, por lo que si hay una coincidencia temporal en la producción de los dos pulsos (uno de cada centelleador), se tendrá la certeza de que son muones. Las otras partículas que componen el fondo radioactivo natural no tienen la energía suficiente para atravesar dos o más capas de centelleadores, por lo que normalmente se usa este tipo de "telescopio" para la detección de muones. Una excepción a esta regla pueden ser los rayos gamma de altas energías que provienen de los rayos cósmicos, pero que se los puede filtrar con la introducción de planchas de hierro u otros materiales de alta densidad.

B. Polarización de los SiPM

Para alimentar a los fotomultiplicadores con los requerimientos especificados en su hoja de datos técnicos, el fabricante recomienda el esquema de polarización por medio de un voltaje de polarización V_{bias} en el rango de $53 \pm 5\,V$, un filtro paso bajo conectado a $Vbias$ con una resistencia de $1\,k\Omega$ y un capacitor de $0.1\ \mu F$ con el fin de eliminar componentes AC y cualquier componente armónico generado en la fuente de tensión DC, para evitar variaciones en la ganancia del sensor.

C. Acondicionamiento de señal

El circuito de acondicionamiento de señal tiene como objetivo obtener una salida en forma de pulso digital constante con una duración preestablecida acorde a los requerimientos del sistema cada vez que se detecte un muon en cualquiera de las cuatro entradas de cada canal. El esquema de la Figura 1 corresponde a un diagrama de bloques sobre el funcionamiento de un canal de la placa acondicionadora y sus sub circuitos.

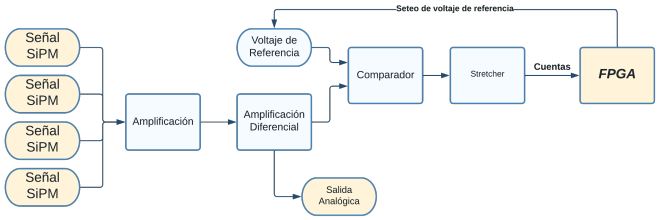

Fig. 1. Diagrama de bloques de un canal de la placa de acondicionamiento de señal.

El proceso comienza por la salida del SiPM, esta señal debe ser acondicionada y amplificada mediante amplificadores operacionales en una configuración donde la entrada sea corriente y la salida voltaje, ya que un SiPM es descrito como un dispositivo que genera una señal de corriente cuando la luz incide en él, y las entradas digitales del FPGA (del inglés *Field-Programmable Gate Array*) necesitan una entrada de tensión para su funcionamiento, en el trabajo [1] se diseñó un amplificador de transimpedancia con el operacional OPA 847, que es utilizado en este trabajo para cumplir con esta etapa del circuito.

La segunda etapa del circuito consiste en un amplificador diferencial, el cual fue diseñado en el trabajo [4] y fue implementado en este trabajo, en el cual los capacitores $C4$ y $C5$ controlan la frecuencia de corte del amplificador diferencial, las resistencias para los lazos de realimentación $R1$ y $R2$ en $750\,\Omega$ y $C1$ y $C2$ en $15\,pF$ establecen la ganancia unitaria del amplificador diferencial. Esto con el fin de obtener la lectura mediante un osciloscopio de la señal amplificada sin que esta lectura afecte a la etapa de transimpedancia, aumentando la carga capacitiva a la salida de forma excesiva, causando que el circuito oscile. A su vez, la resistencia $R3 = 49.9\,\Omega$ fija la impedancia de la salida positiva del amplificador diferencial y la impedancia con la que se debe utilizar la punta de prueba del osciloscopio.

Para la lectura de la señal amplificada es necesaria su digitalización, esto se realiza por medio de un comparador con histéresis o disparador de Schmitt, en el cual se compara la salida de la etapa de amplificación con una referencia a fin de obtener un pulso de salida cuando la señal supera a este valor de referencia lo cual confirma la presencia de un fotón a la entrada. Se estableció el punto de trabajo y el valor de los componentes con el fin de obtener un valor de histéresis de $2.1\,mV$, también se utilizaron capacitores de *bypass* encargados de filtrar componentes de alta frecuencia en la señal de alimentación del operacional.

Se diseñó el circuito generador de voltaje de referencia con el fin de disponer el $Vref$ necesario para la etapa de comparación, éste consiste en un amplificador operacional en su configuración de inversor con ganancia unitaria y un seguidor de voltaje con el fin de obtener una salida negativa y de igual magnitud que un divisor de tensión compuesto por un potenciómetro digital y una resistencia $R16 = 750\,k\Omega$ que fue calculada por medio de simulaciones en el software LTSpice.

La salida de la etapa de comparación tiene una duración variable y depende de la entrada, para un correcto conteo y lectura directa de las cuentas es ideal independizar la salida de la entrada y determinarla con una duración constante. En los trabajos [1] y [2] se utilizó una etapa de dilatación temporal o *Stretcher* que consiste en una combinación de compuertas lógicas y un arreglo de capacitor y resistencia que son los encargados de establecer el tiempo de salida en $492\ ns$ con los valores de $R1 = 47\ \Omega$ y $C1 = 0.015\ \mu F$ a su vez, se utiliza la resistencia $R2 = 1\ k\Omega$ entre la entrada de la etapa y la primera compuerta lógica que funciona como *pull-up* del sistema y a la salida un divisor de tensión formado por dos resistencias de $80\,\Omega$ para establecer la impedancia de entrada vista desde el FPGA y reducir el voltaje de salida, ya que las compuertas del FPGA admiten un voltaje máximo de $3.3\,V$.

En trabajos anteriores la placa del FPGA se encontraba en un PCB distinto al de la amplificación, ya que cada placa solo manejaba un SiPM por separado, lo cual conllevaba la utilización de una gran cantidad de cableado, es por esto que se diseñó un PCB con 4 canales de 4 SiPMs totalizando 16 sensores en total y la adición de un conector para la placa del FPGA al PCB. Quedando así definido el circuito final de este trabajo como se visualiza en la Figura 1.

Authorized licensed use limited to: Universidad Industrial de Santander. Downloaded on April 11,2025 at 22:10:58 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

D. Adquisición de datos

Los pulsos de 492 ns adquiridos mediante la placa electrónica son procesados por un FPGA que es un dispositivo programable que contiene bloques de lógica donde la interconexión y funcionalidad de los mismos puede ser configurada mediante un lenguaje de descripción. En este trabajo el mismo se configuró según el esquema de la Figura 2, que a diferencia de sistemas anteriores éste dispone de múltiples salidas independientes con el fin de registrar las cuentas simples de multiples detectores y las combinaciones según el caso de estudio. Esto con el fin de profundizar en diversos experimentos relacionados a los componentes de los rayos cosmicos con una sola arquitectura de detección y analizarlas al mismo tiempo de manera independiente.

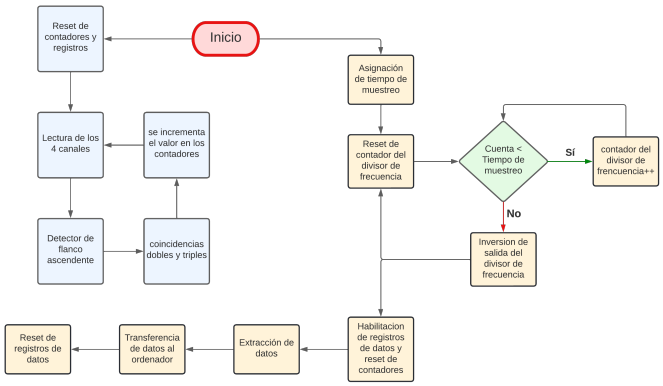

Fig. 2. Esquema del algoritmo utilizado en el procesamiento de datos invididuales y de coincidencias

Con el fin de obtener las cuentas acumuladas en cada uno de los canales de la placa electrónica y registrar las coincidencias, es decir, cuando se dan simultáneo dos o más pulsos en la entrada, se establecieron tres conjuntos de procesos en el algoritmo creado, Primeramente, en la esquina superior izquierda, en color azul, se aprecia un conjunto independiente y en bucle donde se realiza la lectura de los datos y se establecen las cuentas simples, dobles y triples del sistema. Por otra parte, se tiene el conjunto ilustrado en amarillo que funciona en paralelo donde al inicio se asigna un tiempo de muestreo y se utiliza un divisor de frecuencia. Finalmente, se utilizan los cambios de estado de la salida del divisor de frecuencia como indicador para habilitar registros, reiniciar contadores, extraer los datos, transferir al ordenador y finalmente reiniciar los registros.

E. Configuración del voltaje de referencia

Para la modificación del voltaje de referencia se utilizan cada uno de los potenciómetros digitales del circuito, dichos dispositivos se controlan mediante comandos del FPGA utilizando el estándar de comunicaciones SPI enviando un bus de datos que lo harán variar de entre 1024 posiciones posibles y adaptándose así al voltaje requerido.

F. Conexión al computador

Para realizar la comunicación entre el FPGA y el computador se optó por la utilización del módulo UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter* por sus siglas en inglés) que se sintetiza en el FPGA seleccionado para este trabajo. Posteriormente, para el tratamiento y almacenamiento de datos proveniente del módulo USB al computador se utilizaron las librerías de Python pySerial y MySQL. Estos módulos encapsulan el acceso para el puerto serial, esperan comandos del FPGA mediante interrupciones y almacenan las cuentas en un servidor SQL alojado por el ordenador, siendo esta la mejor forma de sincronizar la comunicación FPGA - computador ya que ambos se regirán por el mismo reloj. Este *script* se encuentra preparado para la detección de cambios inesperados de los puertos USB en el computador que ejecuta dicho código. Luego de este proceso, un segundo *script* de Python accede a este servidor y lo grafica mediante la herramienta para disposición de datos llamada Grafana.

III. Implementación

A. Selección de componentes activos

La elección del amplificador operacional que se encuentra en la primera fase del circuito de acondicionamiento se basa en las conclusiones del trabajo [1] y los resultados del trabajo [2], ya que este se ajusta mejor a los requerimientos del sistema debido a sus prestaciones de ancho de banda y buena relación señal ruido. Se escogió la utilización del OPA 847, así como el operacional para el disparador Schmitt fue seleccionado teniendo en cuenta tiempos de operación ultrarrápidos y de bajo consumo. Con base a los resultados obtenidos en el trabajo [2], se optó por utilizar el TL3116 que es utilizado normalmente en aplicaciones que requieren altos niveles de precisión. En la etapa de suma diferencial se escogió al THS4131, que es un amplificador diferencial caracterizado por su bajo ruido de $1.3nV/\sqrt{Hz}$ y ancho de banda de $150MHz$, $-3dB$.

Para controlar el voltaje de referencia en la etapa de comparación fue utilizado un potenciómetro digital capaz de ser comandado por SPI por medio del FPGA utilizado, es por esto que fue seleccionado el AD5270BRMZ-100-RL7, debido a su interfaz SPI y la tolerancia de 1% con la que cuentan sus valores resistivos programados.

B. PCB

Para la implementación del circuito expuesto, se han añadido capacitores de desacople en todos los elementos activos, se minimizaron las capacitancias parásitas para el OPA847 eliminando el material conductor alrededor de los pines de entrada y salida del OPA847 en los planos de tierra y potencia que se encuentren bajo este dispositivo, así como también el cumplimento de todas las reglas y buenas practicas entorno a la fabricación de un PCB.

C. Desarrollo del firmware

Para cumplir con el proceso de adquirir y procesar los datos de la placa electrónica se utilizó la placa de desarrollo Cmod

Authorized licensed use limited to: Universidad Industrial de Santander. Downloaded on April 11,2025 at 22:10:58 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

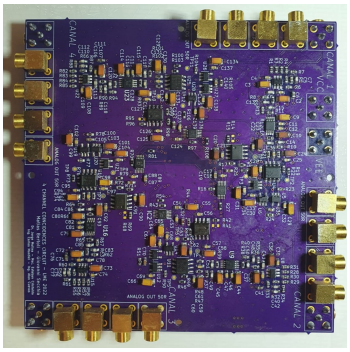

Fig. 3. Vista frontal de la placa final.

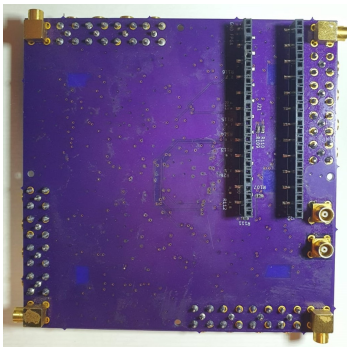

Fig. 4. Vista trasera de la placa final.

A7-15T de la marca Xilinx, la cual posee un FPGA Artix-7, la elección de la placa fue debido a su utilización en proyectos anteriores del laboratorio con el experimento de detección de muones, lo cual proveyó de experiencia previa en su utilización y adecuación al hardware utilizado. Primeramente, se definió un bloque lógico y un procesador que maneja interrupciones y se encarga de la extracción y transferencia de datos. La transferencia de datos se realiza a través de una conexión UART y la modificación del potenciómetro digital vía SPI. Para esto utilizamos dos tipos de software: Vivado de Xilinx para crear el hardware del sistema; y Vitis para crear la aplicación que utilizará el procesador. La placa del FPGA recibe las señales de salida de 492 ns de los 4 canales de acondicionamiento, así como también controla los 4 potenciómetros digitales por medio de las señales que componen al protocolo SPI, estas señales son: clk, mosi, miso y enable. El objetivo de este es enviar al computador por medio de USB las coincidencias simples, dobles o triples de cada detector, Como se observa en la figura 5.

IV. Validaciones

A. Validación de la placa desarrollada

La placa diseñada y sus 2 construcciones requeridas para este trabajo se sometieron a una validación final en un banco de pruebas, en el cual se inserta por uno de sus extremos la placa que contiene al SiPM alimentado por V_{bias} y su salida se conecta a la placa acondicionadora, por el otro extremo del tubo se inserta una placa electrónica que simula la forma

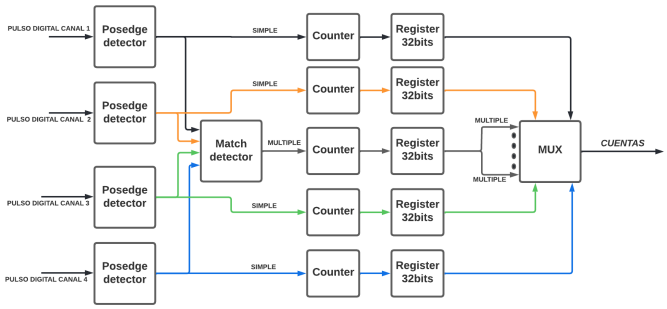

Fig. 5. Esquema logico del FPGA.

de onda de un centelleador por medio de una entrada de onda cuadrada de $1KHz$ de frecuencia, compuertas lógicas, y un led azul, siendo la luz de este la que es captada por el SiPM. En la Figura 6 se observan la imagen en osciloscopio correspondiente al pulso proveniente del SiPM acondicionado, así como la correspondiente a la señal digital asociada a la captación de fotones por parte del SiPM con un tiempo en alto de 448 ns, ambas superpuestas y visualizadas en los canales 1 y 3 del osciloscopio, respectivamente. De esta manera se obtienen las salidas esperadas, validando así la placa desarrollada.

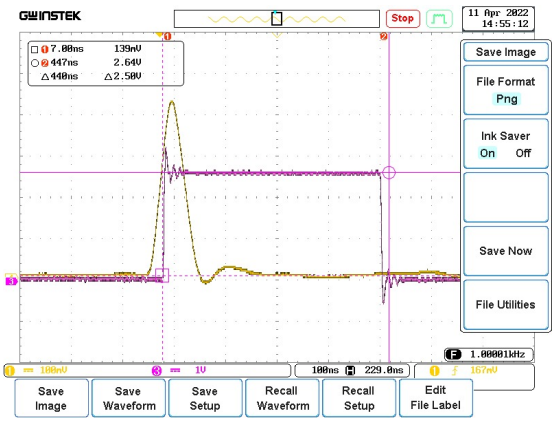

Fig. 6. Respuesta del sistema.

B. Validación de la aplicación ejecutada en el FPGA

Con el fin de comprobar el manejo correcto de datos por nuestra aplicación, se sometió a la placa electrónica a un bombardeo de señales por medio del mismo banco de pruebas donde se hicieron las validaciones anteriores, en este caso particular se estableció la frecuencia del generador de señales en $1\,kHz$ y se observo la respuesta del sistema en el computador satisfactoriamente.

El otro aspecto importante a validar de la aplicación es la correcta modificación del valor del potenciómetro, en la cual por medio del osciloscopio nuevamente se puede apreciar un envío correcto de las señales clk, enable y MOSI respectivamente, que garantiza un correcto funcionamiento del

Authorized licensed use limited to: Universidad Industrial de Santander. Downloaded on April 11,2025 at 22:10:58 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

mismo, quedando así validada la descripción de hardware y la aplicación creada para el FPGA en este trabajo.

V. Resultados

Las pruebas consistieron en medir primero la distribución angular para demostrar que los datos obtenidos corresponden a los muones, luego apilar los 4 detectores a fin de obtener la mayor aceptancia angular, para luego colocar los 4 detectores en los soportes creados especialmente para estudiar la llegada de los muones a determinados grados.

En cada prueba se midió el número de coincidencias entre las señales de las distintas placas, lo que indica el número de muones que atravesaron los centelleadores. Hay que señalar que existen correcciones de presión y temperatura que se deben aplicar a todos los datos de detección de muones que aquí no se consideraron por no ser del alcance de este trabajo. El interés principal de la toma de estos datos es la comparación del comportamiento a lo largo del tiempo de los muones registrados con nuestro detector con los registrados por el detector de muones del trabajo final de grado [2], que fue usado como referencia para este trabajo.

A. Medición de la distribución angular

El arribo de los muones a la superficie terrestre posee una distribución dada por la función del coseno cuadrado [7] con respecto al cenit. El estudio se realizó utilizando un soporte móvil construido para el estudio angular, dando como resultado el gráfico de la Figura 7.

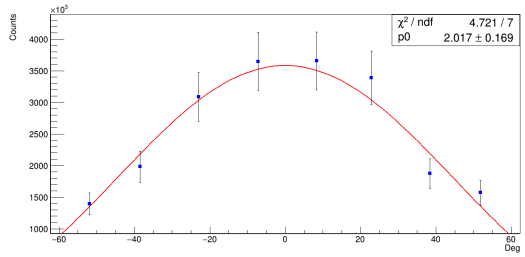

Fig. 7. Ajuste de los datos obtenidos a través de la función del coseno cuadrado con respecto al cenit. Las barras de error representadas en el gráfico corresponden al error estadístico obtenido para cada punto.

El ajuste obtenido corresponde al valor de 2.017 +/- 0.169, con lo que se puede comprobar que las señales registradas en los detectores se comportan según lo esperado.

B. Comparación entre los detectores

Para verificar que los muones registrados por nuestro detector llegan a la superficie de la misma manera que mide el detector de muones Muon Matrix [2] que posee el laboratorio, se compararon los datos obtenidos por ambos detectores. Inicialmente, se apilaron los 4 centelleadores de 25 cm x 25 cm y 3 de 50 cm x 50 cm, cada uno tomando datos por separado y se tomaron las coincidencias de las señales de ambos detectores para verificar que realmente se registraban muones en nuestros detectores. En la Figura 8 las línea amarilla y la azul son los muones registrados con nuestro detector en sus dos configuraciones, mientras que las línea roja representa los muones registrados con el Muon Matrix. Puede observarse el mismo patrón de conducta en ambos detectores, por lo que podemos comprobar que ambos detectores se comportan de igual manera.

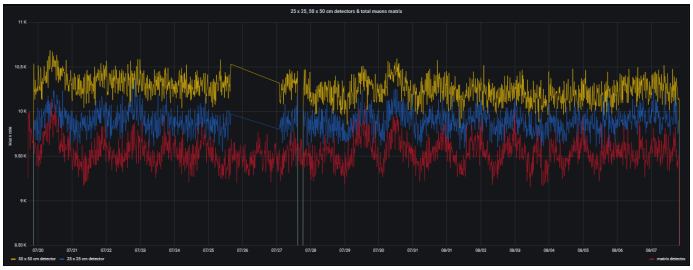

Fig. 8. Comparación entre los muones registrados por los tres conjuntos de centelleadores apilados: 50 x 50 cm (línea amarilla), 25 x 25 cm (línea azul), y Muon Matrix (línea roja).

C. Influencia del campo magnético terrestre en las tasas de muones capturada

Los detectores construidos también se pueden utilizar para estudiar las variaciones en el campo magnético ecuatorial dado por el índice Dst [8]. Este índice sirve para monitorear el eje magnético axi-simétrico de las corrientes de la magnetósfera, incluida las corrientes del anillo de Van Allen.

La Figura 9 muestra las variaciones en las tasas de captación de muones a lo largo del tiempo, y la Figura 10 muestra los momentos en que se produjeron alteraciones en los datos registrados.

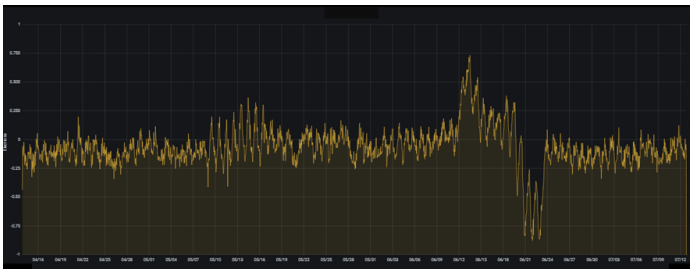

Fig. 9. Tasa de captacion de muones en el periodo del 16 de abril al 12 de julio de 2023, se observan fluctuaciones diarias al igual que los trabajos anteriores.

Fig. 10. Se resaltan los registros en los que se produjeron alteraciones correspondientes a la variacion de la radiacion solar.

La Figura 11 muestra la variación temporal del índice Dst medido por el World Data Center for Geomagnetism de Kyoto

Authorized licensed use limited to: Universidad Industrial de Santander. Downloaded on April 11,2025 at 22:10:58 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

[8], donde puede relacionarse que las variaciones del campo magnético ecuatorial concuerda con los datos tomados por los detectores de muones de nuestro laboratorio.

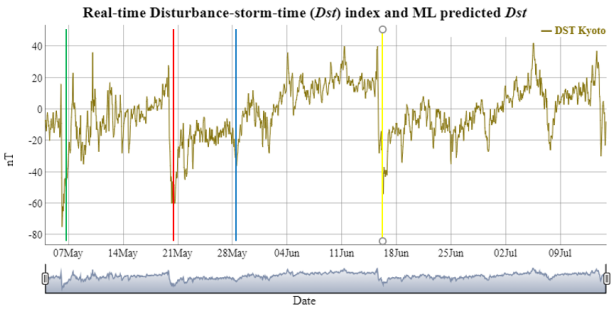

Fig. 11. Datos del campo magnético ecuatorial calculado por el el WDC de Kyoto. Las lineas verticales muestran los cambios en el campo magnético que originaron las variaciones en los datos registrados por los detectores de muones.

VI. Conclusión

Las mejoras introducidas tanto para las lecturas de las señales, como para el procesamiento de datos de diferentes sistemas de detección de rayos cósmicos, funcionaron según lo programado, arrojando resultados coherentes e interesantes. Detectores anteriores requerían de placas individuales para cada SiPM y posteriormente una placa para enviar todas las señales provenientes de distintas placas al FPGA, con esta arquitectura se redujo a una sola placa central. A su vez, gracias a la versatilidad adquirida con la determinación de canales individuales y sus combinaciones, se puede estudiar con más detalle y precisión distintos aspectos de la radiación cósmica que complementan a los detectores de muones, todo esto en tiempo real y de manera independiente con múltiples detectores funcionando con un mismo sistema de adquisición de datos dispuestos de manera sencilla para los usuarios finales como se observa en la figura 12.

Fig. 12. Pantalla disponible para el análisis de datos en tiempo real de acuerdo a las variables deseadas.

El sistema de detección se encuentra activo en la Facultad de Ingeniería de la UNA en San Lorenzo - Paraguay, como se muestra en la figura 13 y un detector análogo a este se encuentra el laboratorio Fermilab, el cual comenzara a tomar datos desde noviembre del 2023 con el fin de estudiar la anomalía magnética del atlántico sur y otros fenómenos con la particularidad de poder ser comparado con el detector de sus mismas capacidades ubicado en Paraguay.

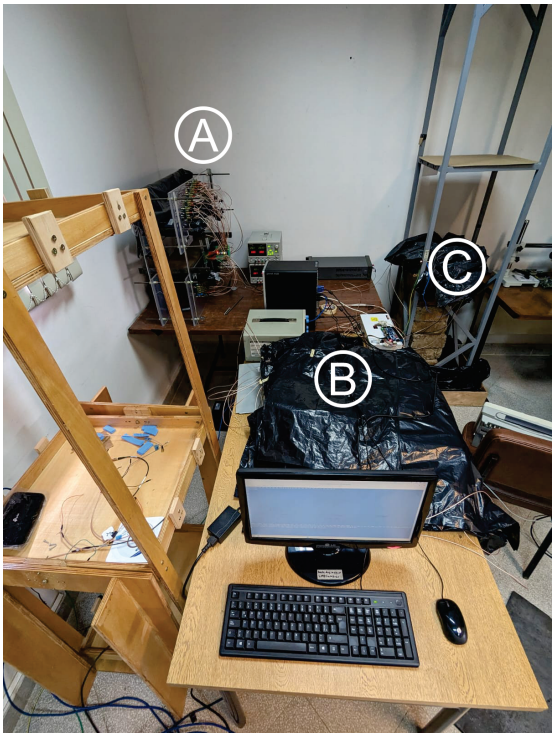

Fig. 13. Detector ubicado en el Laboratorio de Mecánica y Energía. Donde se puede observar a los detectores del Muon Matrix (A), (B) detector de 50 cm x 50 cm y (C) 2 pares de detectores de 25 cm x 25 cm arriba y abajo de 70 cm de concreto.

References

[1] Cristaldo, Esteban y Yoshimura, Leonardo. ”Diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos para sensores fotomultiplicadores de silicio (SiPM) del experimento DUNE”. Facultad de Ingeniería - UNA, 2018

[2] Boscarino, Lucas y Cuevas, Alan. ”Diseño e implementación de un sistema de detección de muones en configuración matricial de tres dimensiones utilizando sensores fotomultiplicadores de silicio”. Facultad de Ingeniería - UNA, 2021

[3] Montiel, Carlos B. and Aranda, Diego and Cristaldo, Esteban and Molina, Jorge. 2019 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON), ”Comparison between Transimpedance and Charge Integrator Amplification Topologies for Conditioning Signals Obtained from SiPM Sensors for the DUNE Experiment”, 2019

[4] Cristaldo, Esteban. ”Diseño y caracterización de amplificadores de transimpedancia para el acondicionamiento de señales de sensores SiPM a temperaturas criogénicas aplicados al experimento DUNE”. Universidad del Cono Sur de las Américas, 2020

[5] Nagamine, Kanetada, Introductory Muon Science, Cambridge University Press, 2003.

[6] Peter K.F. Grieder, Chapter 4 - Cosmic Rays Underground, Underwater and Under Ice, 2001.

[7] Workman, R. L. and Others,”Review of Particle Physics”, 2022.

[8] World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, Nose M., Iyemori T., Sugiura M. and Kamei T. (2015) - Geomagnetic Dst index. www.https://isgi.unistra.fr/indices_dst.php

[9] Shukla, P. (2016). Energy and angular distributions of atmospheric muons at the earth. International Journal of Modern Physics A.

Authorized licensed use limited to: Universidad Industrial de Santander. Downloaded on April 11,2025 at 22:10:58 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.