

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN DE PARTÍCULAS PARA LA MISIÓN MUA DE FIUNA DEL GUARANISAT-2

Maximiliano José Romero Aquino ^{a,1} maxiromero@fiuna.edu.py, Jorge Molina ^{b,2}, Diego Stalder ^{b,3}, Giovanni Secchia ^{b,4}.

^aEstudiante, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay

^bOrientador, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay

Palabras Clave	Resumen
- Anomalía del Atlántico sur - Rayos cósmicos - SiPM - Acondicionamiento de Señal - GuaraniSat-2	La Anomalía Magnética del Atlántico sur (SAA) es una región donde el campo magnético terrestre se debilita significativamente. Para estudiar mejor el fenómeno, el Laboratorio de Mecánica y Energía (LME) de la FIUNA planea lanzar la Misión MUA en el satélite GuaraniSat-2 para obtener datos del clima espacial en la zona de la anomalía. El presente trabajo desarrolló la <i>Unidad de Detección y Acondicionamiento</i> , la cual captará el paso de las partículas energéticas y generará una señal legible por la <i>Unidad de Control</i> de la misión. Se presentará el sistema desarrollado el cual incluye los circuitos, el PCB y las partes mecánicas, así como los resultados obtenidos.
Keywords	Abstract
- South Atlantic Anomaly - Cosmic rays - SiPM - Signal Conditioning - GuaraniSat-2	The South Atlantic Anomaly (SAA) is a region where the magnetic field weakens significantly. To better study this phenomenon, FIUNA's Mechanics and Energy Laboratory (LME) plans to launch the MUA Mission inside the GuaraniSat-2 satellite to obtain data about the space weather from inside the anomaly zone. For this work the mission's <i>Detection and Conditioning Unit</i> was developed, which will catch the passing of energetic particles and will generate a readable signal for the mission's <i>Control Unit</i> . The developed system will be presented which includes the circuits, PCB and mechanic parts, as well as the obtained results.

Capítulo 1

Introducción

La Tierra recibe constantemente radiación proveniente de todas partes del universo a través de los rayos cósmicos, que son partículas muy energéticas viajando a velocidades muy cercanas a la velocidad de la luz. Aparte de estas, también llegan partículas provenientes del Sol que tienen mucha menor energía y que se propagan constantemente a través del viento solar.

Debido al campo geomagnético terrestre, las partículas de menor energía son desviadas y no llegan a in-

gresar a la atmósfera. La radiación que es repelida por el campo magnético es concentrada en una región de la magnetósfera denominada *Cinturones de Van Allen* [1]. El campo magnético de la Tierra debería ser uniforme, pero sin embargo en la realidad posee una desviación llamada Anomalía Magnética del Atlántico Sur (SAMA) teniendo su punto más débil hacia el sur de Brasil en la frontera con Paraguay [2].

La SAMA es objeto de estudio constante por parte de las agencias espaciales, así no solo se obtiene información acerca de la anomalía en sí, sino que se comprenden mejor los procesos del interior de la Tierra que poco se

conocen.

En 2021, la Agencia Espacial Paraguaya (AEP) lanzó el primer satélite paraguayo, el GuaraniSat-1 [3]. Actualmente, la AEP busca lanzar su segundo satélite, el CubeSat GuaraniSat-2. Una de las misiones que se planteó para el GuaraniSat-2 es denominada "South Anomaly Monitoring Unit (MUA)", la cual será desarrollada por la FIUNA y con la que se busca realizar un conteo de partículas para poder contrastar con las mediciones obtenidas en la Tierra, para así comprender mejor la anomalía que actualmente se estudia en el Laboratorio de Mecánica y Energía de la FIUNA.

Con el presente trabajo se busca diseñar e implementar el Sistema de Detección de Partículas y Acondicionamiento de Señal para la Misión MUA de la FIUNA, la cual se encargará de generar señales legibles para la Unidad de Control de la misión, así permitiendo contar la cantidad de partículas que hay en la zona de interés para la misión.

1.1 Objetivo Principal

- Diseñar e implementar un sistema de detección de partículas y acondicionamiento de señal para la Misión MUA de FIUNA del GuaraniSat-2.

1.2 Objetivos Específicos

- Seleccionar los componentes necesarios para llevar a cabo la detección de partículas en el espacio.
- Desarrollar un circuito de amplificación y acondicionamiento del pulso detectado para que pueda ser leído por la Unidad de Control de la misión a fin de realizar el conteo de partículas.
- Seleccionar los componentes electrónicos para el circuito de amplificación que cumplan con todos los requisitos de tolerancia a la radiación y certificación que la misión satelital requiera.
- Diseñar un PCB (Placa de Circuito Impreso) que integre los componentes de la Unidad de Detección y Acondicionamiento siguiendo la norma del IPC 2221 (Institute of Printed Circuits).
- Establecer un protocolo de comunicación entre los componentes digitales ajustables de la unidad de detección y acondicionamiento con la unidad de

control para realizar cambios en los valores de amplificación y detección de acuerdo a variables del ambiente.

- Realizar el ensamble de la placa desarrollada con la Unidad de Control.

Capítulo 2

Revisión de la Literatura

2.1 Rayos cósmicos

Los rayos cósmicos son partículas energéticas que fueron originadas en el espacio exterior y que se mueven a velocidades cercanas a la de la luz. Como las partículas energéticas están eléctricamente cargadas, entonces estas son desviadas por el campo magnético. Cuando un rayo cósmico va en dirección a la Tierra, antes de llegar a la superficie deberá atravesar varias capas. La primera que debe superar es la magnetósfera (donde se ubica el campo magnético). Las partículas de mayor energía que atraviesan la magnetósfera deberán atravesar la atmósfera, donde colisionarán con los átomos y moléculas presentes en ella.

2.2 El campo magnético terrestre (Magnetósfera)

La magnetósfera es la capa de la Tierra que nos blindada de las partículas provenientes del Sol y del espacio exterior. Su presencia protege la superficie del planeta de la erosión que podrían causar los vientos solares [4].

Las partículas energéticas repelidas por el campo magnético son atrapadas a una distancia segura de la superficie en zonas denominadas *Cinturones de Van Allen*, las cuales tienen forma de dona. Cuenta con dos zonas principales: el cinturón externo y el cinturón interno.

2.2.1 Anomalía magnética del Atlántico Sur

Existe un punto en particular del campo magnético el cual presenta un debilitamiento significativo de su fuerza el cual se sitúa aproximadamente entre 15°S y 45°S de latitud, en una zona que abarca prácticamente todo el territorio del Paraguay, gran parte de los países limítrofes de este y también casi toda la parte sur del océano Atlántico, del cual toma nombre [2].

Este debilitamiento del campo magnético hace que las líneas de campo que atraviesan esta zona del planeta curven su trayectoria hacia una especie de hueco o hendidura en donde muchas de ellas van a precipitar hacia la Tierra aumentando de esa manera las cargas en las distintas capas de la ionosfera.

2.3 Detectores Centelladores

Los centelladores son un tipo de material luminiscente capaces de convertir varios tipos de radiación de energía en luz del espectro visible. Es importante esta propiedad puesto que para detectar la presencia de radiación invisible es necesario convertirlo en un estímulo físico el cual pueda ser medido. Este pulso luminoso será posteriormente detectado por medio de un *Fotomultiplicador de Silicio (SiPM por sus siglas en inglés)*, puesto que el destello emitido por lo general es de una magnitud sumamente reducida [5].

Los centelladores utilizados para este trabajo son los producidos por Fermilab (del tipo orgánico). Al final del proceso de decaimiento se emiten fotones de una longitud de onda de aproximadamente 420nm, los cuales pertenecen al rango de mayor sensibilidad típica de los *fotomultiplicadores de silicio (SiPM)*.

2.4 Sensores Fotomultiplicadores de Silicio (SiPM)

Un Fotomultiplicador de Silicio (SiPM), llamado también Contador de Fotones Multipixel (MPCC por sus siglas en inglés) es un fotodetector de estado sólido que hace uso de múltiples fotodiodos de avalancha (APD) operando en modo Geiger [6].

Un SiPM (o MPCC) consiste en un gran número de microceldas. Cada microcelda consiste de un fotodiodo de avalancha (APD) acompañado de un resistor de enfriamiento (cuya tarea es la de restaurar al fotodiodo a su modo de operación Geiger), y si es que el modelo en particular lo presenta, un capacitor de acoplamiento para la salida rápida. Estas microceldas van conectadas en paralelo en el encapsulado final, lo que permite tratarlas como una sola unidad [7].

Los pulsos de corriente producidos por los SiPM son de magnitud moderadamente baja, por lo que para ser leídos por la unidad de control será necesario amplificar la señal.

Los SiPM diseñados para operar en modo Geiger deben ser polarizados en inversa para que operen en modo avalancha. El sobrevoltaje es el exceso de voltaje por sobre el de ruptura que puede aplicarse a un SiPM y es un parámetro importante puesto que afecta otras características como la eficiencia de detección de fotones, la ganancia y el ruido.

El voltaje de ruptura del SiPM es dependiente de la temperatura. En ambientes donde la temperatura no se pueda controlar será necesario implementar un sistema de corrección del voltaje de polarización por medio de la temperatura (y otros parámetros adicionales si es posible) [8].

Para leer la señal de un SiPM de la salida estándar, es necesario convertir la señal de corriente en una señal de voltaje. Para ello, puede hacerse uso de un *amplificador de transimpedancia (TIA)*, o por medio de una resistencia de sensado en serie.

2.4.1 SiPM utilizados en el presente trabajo

Para la detección de los fotones generados por los centelladores mencionados en la Sección 2.3 se hará uso de los *MicroFJ-60035-TSV* de onsemi. Pertenecen a la Serie J de fotosensores, los cuales se diseñaron para aplicaciones de poca luminosidad. Opera en un amplio rango de temperaturas y tiene un voltaje de ruptura promedio de 24,4V; lo que lo sitúa por debajo de los más de 50V sobre los cuales otros SiPM suelen operar.

Capítulo 3

Consideraciones de Diseño

El diseño presentado debe ser capaz de cumplir con los objetivos presentados en el Capítulo 1. Para ello, se deberán tener en cuenta las restricciones de espacio, consumo energético y certificación de componentes.

El voltaje de ruptura de los SiPM es dependiente de la temperatura, y como se espera que la temperatura dentro del satélite varíe significativamente, es necesario implementar un sistema que permita ajustar el voltaje de polarización de los SiPM. Se puede lograr midiendo la temperatura actual para así obtener el cambio en voltaje de polarización necesario. Otra forma más precisa es diseñar un circuito de medición de corriente para poder hallar la curva I_{SiPM} vs V_{pol} para estimar el V_{br} como

el punto donde la corriente empieza a crecer de manera significativa.

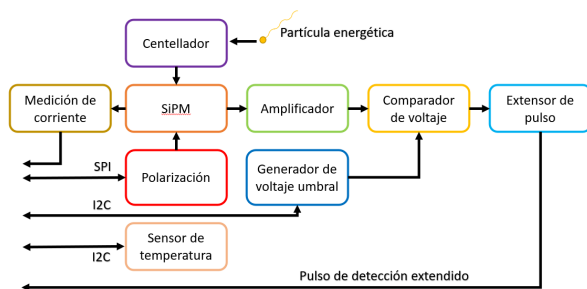


Figura 1: Diagrama de bloques del sistema diseñado.

Fuente: [Elaboración propia]

Se hará uso de una topología de amplificación de transimpedancia para amplificar el pulso de corriente del SiPM debido a que este método de amplificación ya fue verificado y validado en varios trabajos realizados en el Laboratorio de Mecánica y Energía de la FIUNA.

Una vez obtenida la señal amplificada, se procede a introducirla a un comparador de voltaje, el cual transformará la señal analógica a un pulso digital una vez el pulso analógico supere cierto valor umbral controlable por la Unidad de Control.

Este pulso generado en la comparación deberá ser extendido a una duración fija para que pueda ser leído de manera confiable por la Unidad de Control, puesto que el pulso de comparación dependerá del nivel de ganancia del SiPM, el pulso de corriente generado y el valor de voltaje umbral del comparador.

Estos bloques funcionales básicos deberán ser acompañados por todos bloques funcionales suplementarios para poder asistir al funcionamiento de las etapas principales de acondicionamiento.

Entre estos bloques suplementarios se encuentran los de medición de corriente del SiPM para determinar el voltaje de ruptura, el de generación de voltaje umbral para el comparador, y el de medición de temperatura.

El diseño requiere de dos SiPM con un canal de polarización y acondicionamiento dedicado a cada uno, por lo que la mayor parte de los bloques funcionales de la Figura 1 deberá repetirse para cada SiPM, a excepción de los bloques compartidos.

3.1 Electrónica

A continuación se detallará el diseño de los circuitos realizados para poder cumplir con los bloques funcionales indicados en el Capítulo 3, Figura 1.

3.1.1 Circuito de polarización

El circuito para la polarización de los SiPM debe diseñarse para operar con una entrada de 5V y salida que va desde 24V hasta 36V ajustable por la Unidad de Control. Para ello se utilizará un circuito elevador de voltaje DC, el cual permitirá elevar desde 5V hasta 24V, y un DAC que permitirá el ajuste de la salida desde 24V hasta 36V.

3.1.2 Amplificación

Para la amplificación de la señal de corriente del SiPM se hará uso de una topología de amplificador de transimpedancia. Como con esta topología la salida obtenida con el pulso de un SiPM es un pulso invertido (negativo), entonces se establecerá el punto de reposo de la salida en 3,8V para obtener un pulso invertido que descienda por debajo del valor del umbral de detección definido por la Unidad de Control cuando haya una detección.

3.1.3 Comparador

Una vez obtenido el pulso amplificado invertido, es necesario compararlo con el valor del umbral de detección para generar un pulso digital que pueda ser leído por la Unidad de Control. Este comparador mantendrá su salida en HIGH (5V) cuando no se detecte ningún evento y cambiará su estado a LOW (0V) cuando se produzca una detección.

3.1.4 Extensor de duración de pulso (*Stretcher*)

El pulso de salida del comparador no tiene duración fija, puesto que es dependiente de la duración del pulso del amplificador. Será necesaria la implementación de un *stretcher* que fije la duración de salida a un valor preestablecido. Se establecerá la duración el pulso extendido en aproximadamente 500ns. Se logrará por medio de un circuito con compuertas lógicas NAND y NOT y un circuito RC para establecer la duración deseada.

3.1.5 Generación de voltajes adicionales

El voltaje del umbral de detección se generará por medio de un potenciómetro digital (ajustable por medio de una interfaz digital) y un seguidor de tensión. Este potenciómetro se conectará a una referencia de voltaje de 4,096V para no depender de la estabilidad de la alimentación.

Además, será necesaria la generación de voltajes auxiliares fijos para la operación de los otros circuitos. Será necesario generar 2,5V para el circuito de polarización, que se logrará por medio de un diodo de referencia de voltaje, 3,8V para el amplificador de transimpedancia y 0,6V para el circuito de medición de corriente, los cuales serán producidos por medio de divisores de tensión alimentados desde un diodo de referencia de 4,096V y conectados a un seguidor de tensión.

3.1.6 Medición de corriente de SiPM

Para medir la corriente que pasa por cada SiPM se hará uso de la caída de voltaje que hay en una resistencia a la salida del circuito de polarización. Esta caída de voltaje se obtendrá por un amplificador diferencial de tensión. Esta diferencia de voltaje será amplificada para su lectura por medio del ADC de la Unidad de Control, el cual podrá calcular la corriente que fluye por la resistencia a partir del voltaje medido y los valores de resistencia y amplificación.

3.1.7 Medición de temperatura

Es necesario implementar un circuito que mida la temperatura para determinar cuándo sea necesario un ajuste del voltaje de polarización para mantener el nivel de ganancia. Se usará un componente integrado que se comunique por medio de una interfaz digital para leer el valor de la temperatura.

3.2 Interfaces

3.2.1 Interfaz física de conexiones

Para la interfaz física de las conexiones se tuvo en cuenta la ubicación de los componentes, así como la alimentación necesaria para estos. Se asignaron los pines a las señales respectivas en base a su cercanía a los componentes, minimizando en lo posible la longitud de las

pistas. Para los conectores se usaron espadines *through hole* 2x8 con 2,54mm de espaciado.

3.2.2 Interfaces de comunicación digital

Se implementará un bus I2C para la comunicación con los componentes digitales de baja velocidad (sensor de temperatura y potenciómetro digital). Operará a 400kbps.

También se implementará una interfaz SPI para los componentes que requieren mayor velocidad de comunicación como son los de ajuste del voltaje de polarización. Operará a la velocidad máxima permitida por el componente más lento del bus.

3.3 Diseño Mecánico y de PCB

Todos los subsistemas presentados previamente deberán implementarse en una placa con las dimensiones indicadas en la Figura 2, la cual debe alojar todos los componentes de los circuitos diseñados.

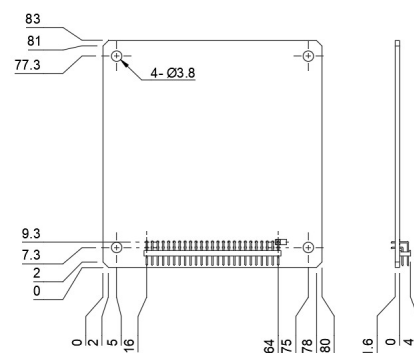


Figura 2: Dimensiones de PCB para las misiones del GuaraniSat-2 Fuente: [AEP]

3.3.1 Diseño de la carcasa

La carcasa de sujeción de los centelladores debe entrar en el espacio no ocupado por los *headers* de la Sección 3.2.1 utilizados para conectarse con la placa de la Unidad de Control. Para ello se diseñó una carcasa a partir de un bloque de aluminio de 80x56mm el cual incluye el espacio para dos centelladores de 40x35mm y aberturas para el ingreso de partículas energéticas. Se puede observar el diseño en la Figura 3.

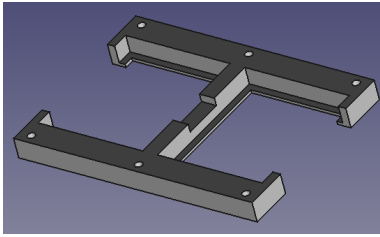


Figura 3: Modelo 3D final de la carcasa de sujeción de centelladores. **Fuente:** [Elaboración propia]



Figura 4: Centellador con recubrimiento y apertura para SiPM. **Fuente:** [Imagen propia]

3.4 Análisis de consumo energético

Una de las limitantes de las misiones del GuaraniSat-2 es el consumo energético. A cada misión se le asigna un máximo de 1,5W. Como este valor es compartido con la Unidad de Control, se asignarán 0,5W a la Unidad de Control y 1W a la Unidad de Detección y Acondicionamiento de este trabajo.

Luego de realizar los cálculos teóricos de consumo de corrientes, se llegó a un consumo total máximo de 0,6W, el cual se encuentra dentro del límite permitido.

Capítulo 4

Implementación

En el presente capítulo se presentará la implementación de los circuitos y elementos mecánicos descritos previamente en el Capítulo 3.

4.1 Componentes utilizados

4.1.1 Centelladores utilizados

El centellador elegido para el trabajo fue el desarrollado por Fermilab. Las unidades disponibles en el laboratorio tienen un espesor de 3mm y un área de 50x50mm. Debido a esto fue necesario el recorte de las unidades para que se ajusten al espacio de 40x35mm. A estos se les aplicó un recubrimiento para bloquear la luz exterior y reflejar los fotones producidos en su interior hasta impactar con el SiPM (Figura 4).

4.1.2 Electrónica

El SiPM utilizado es el MicroFJ-60335-TSV de onsemi, el cual opera a voltajes de polarización reducido y es apropiado para aplicaciones de poca luminosidad.

Se usó el OPA855-Q1 para el circuito de amplificación de transimpedancia, el TSZ122 para los seguidores de tensión, el INA148-Q1 para el amplificador diferencial, el TS3011 como comparador de voltaje, el MCP4561 para el potenciómetro digital, el MAX1932 como elevador de voltaje DC junto al DAC8551-Q1 para el ajuste del valor de su salida, el TMP100-Q1 como sensor de temperatura y los NXB0108 y NXS0108 para traducir el nivel de voltaje de las interfaces digitales de 5V a 3,3V para operar con la Unidad de Control que funciona a 3,3V.

Además se usaron los ADR5041 y ADR5044 para los diodos de referencia de voltaje, así como las compuertas NAND 74LVC2G00DC-Q100 y NOT SN74LV1T04QDCKR-Q1 para el extensor de pulso. Para el resto de componentes (como los pasivos o diodos) se utilizaron componentes de montaje superficial (SMD).

4.1.3 Conectores

Para los conectores de la interfaz física de la placa (Sección 3.2.1) se optó por utilizar espadines de bajo perfil TLW-108-06-G-D de Samtec.

4.2 Desarrollo del PCB

4.2.1 PCB principal

El PCB principal contiene todos los componentes distribuidos en sus dos caras. La cara frontal se usa para situar los SiPM, los diodos LED de estimulación controlada y el sensor de temperatura, junto a la carcasa que sujetará los centelladores en su lugar. En la cara inferior se ubicará el resto de componentes. Se puede observar el PCB elaborado en la Figura 5.

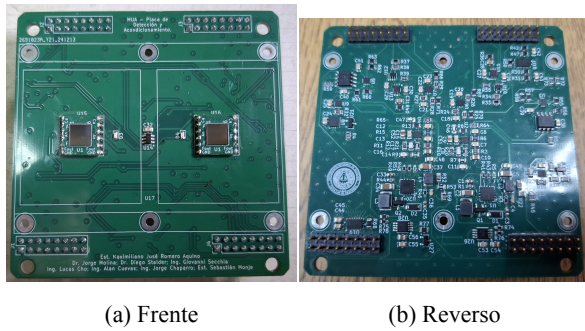


Figura 5: Vistas del PCB diseñado y ensamblado con los componentes. **Fuente:** [Elaboración propia]

4.2.2 PCB auxiliar del SiPM

Para facilitar el soldado del SiPM se desarrolló una placa que actúe como *interposer* entre el SiPM y la placa principal. En la Figura 6 se puede observar el PCB auxiliar desarrollado.

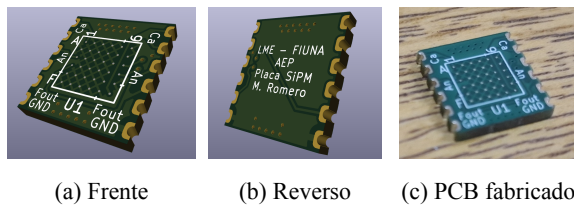


Figura 6: Vistas 3D de la placa auxiliar diseñada junto al PCB fabricado. **Fuente:** [Elaboración propia]

4.3 Fabricación de la carcasa metálica

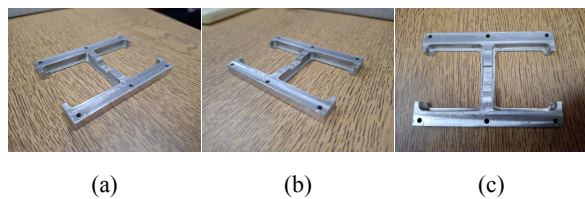


Figura 7: Pieza de la carcasa. **Fuente:** [Elaboración propia]

La carcasa fue fabricada con un bloque de aluminio que fue maquinado por medio de una máquina CNC del Laboratorio de Metalmecánica ubicado en el Laboratorio Estrella en base al modelo 3D de la Figura 3. La pieza elaborada se puede observar en la Figura 7.

4.4 Ensamble final

El ensamble final del PCB junto a los centelladores y la carcasa se muestra en la Figura 8.

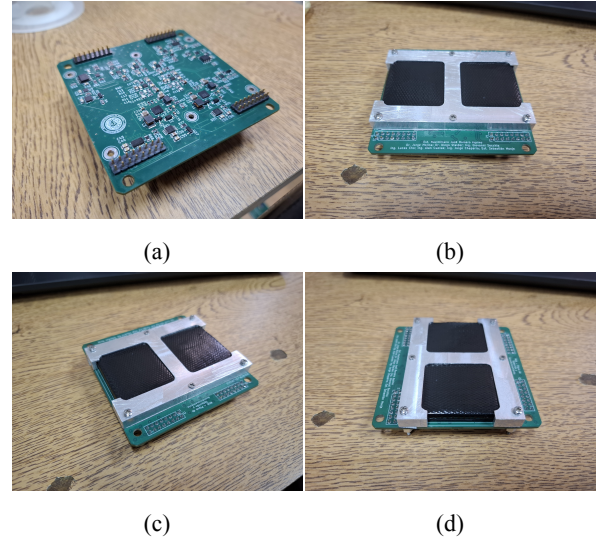


Figura 8: Ensamble de placa con centelladores y carcasa. **Fuente:** [Elaboración propia]

Capítulo 5

Pruebas y Resultados

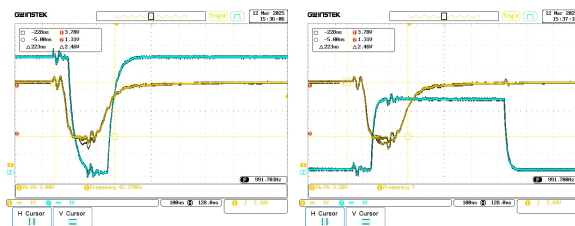
5.1 Pruebas del SiPM, amplificador de transimpedancia, comparador y extensor de pulso

Se realizaron mediciones de las salidas de cada etapa de acondicionamiento para verificar que se obtenga la respuesta esperada, estimulando los SiPM con los LEDs integrados de la placa.

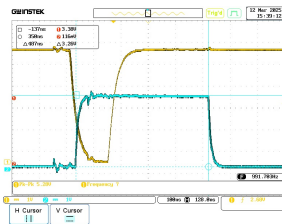
Como se puede observar en las Figuras 9a, 9b y 9c, para el canal 2 los pulsos obtenidos en cada etapa de acondicionamiento corresponden con el comportamiento que se espera, y el pulso final extendido tiene una duración muy cercana a los 500ns que se esperan. El canal 1 presentó resultados similares.

5.2 Pruebas de medición de corriente del SiPM

Se realizó un barrido de valores del voltaje de salida de los MAX1932 y se leerá el voltaje correspondiente a la lectura de corriente de los SiPM para generar la curva de polarización vs lectura de corriente.



(a) Amarillo: Pulso TIA. Celeste: Pulso comparador. (b) Amarillo: Pulso TIA. Celeste: Pulso extensor.



(c) Amarillo: Pulso comparador. Celeste: Pulso extensor.

Figura 9: Mediciones de los pulsos en el Canal 2 con un voltaje de polarización de 24,95V sobre el SiPM.

Fuente: [Elaboración propia]

Se puede observar en la Figura 10 la lectura realizada para el SiPM1. Se observa que a 24,52V sobre el SiPM (luego de realizar los cálculos de ajuste) se llega al voltaje de ruptura, a partir del cual empieza a aumentar la corriente por el SiPM. Se obtuvieron resultados similares para el SiPM2.

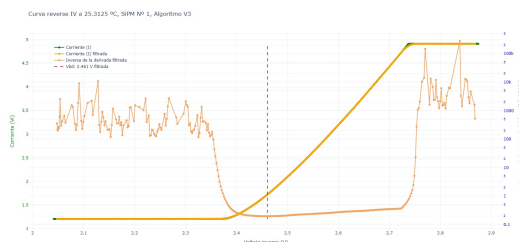


Figura 10: Barrido de medición de la corriente del SiPM1 a 25,3°C. Fuente: [Pruebas con Unidad de Control]

5.3 Pruebas de generación de voltajes

Se realizaron las curvas que midan el voltaje de salida de los circuitos de generación de voltaje (los de polari-

zación y el del umbral) en función al valor enviado y se compararán con los valores teóricos esperados.

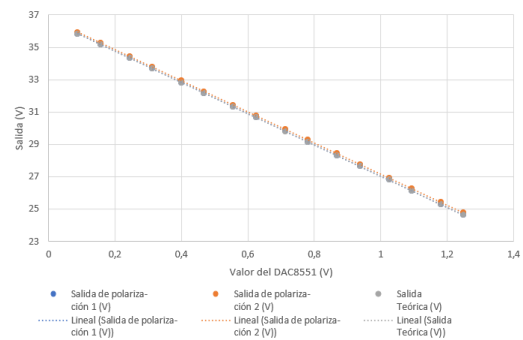


Figura 11: Gráfico de dispersión de puntos correspondiente a las mediciones de la salida de los circuitos de polarización. Fuente: [Elaboración propia]

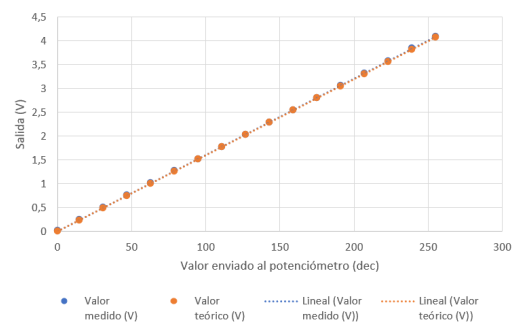


Figura 12: Gráfico de dispersión de puntos correspondiente a las mediciones de la salida del circuito de generación de voltaje umbral. Fuente: [Elaboración propia]

Se puede observar en las Figuras 11 y 12 que los valores medidos son extremadamente cercanos a los valores teóricos esperados.

5.4 Pruebas de comunicación

Se comprobará que todos los dispositivos digitales reciban los comandos de la Unidad de Control y generen la respuesta esperada, siendo algún cambio de voltaje o enviando a la Unidad de Control el valor medido solicitado.

Luego de las pruebas se pudo verificar que cada uno de los componentes digitales produce la respuesta esperada.

5.5 Verificación de ensamble con la Unidad de Control

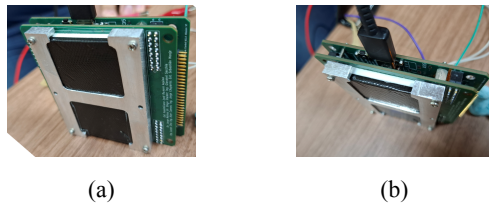


Figura 13: *Ensamble de las placas de la Unidad de Detección y Acondicionamiento y la Unidad de Control.* Fuente: [Elaboración propia]

Como se puede observar en la Figura 13, ambas placas están correctamente conectadas por medio de los espadines de bajo perfil, haciendo contacto con los cabezales de bajo perfil de la Unidad de Control.

Capítulo 6

Conclusiones

Con todo lo presentado con anterioridad se fue capaz de diseñar e implementar el sistema de detección de partículas y acondicionamiento de señal para la Misión MUA de la FIUNA, a lanzarse en el GuaraniSat-2.

Se eligieron los componentes que mejor se ajustaban a las restricciones de la misión asegurándose de que estos soporten las amplias condiciones de operación dentro del satélite (temperatura y vibración).

Se desarrolló el circuito de amplificación y acondicionamiento el cual fue capaz de producir pulsos de detección de acuerdo a las especificaciones de diseño.

Se diseñó el PCB teniendo en cuenta la restricción de tamaño, el cual es capaz de alojar todo el circuito necesario para las tareas requeridas, incluyendo los componentes ajustables y de medición de parámetros de operación. Además, es capaz de alojar correctamente el resto de piezas de la unidad, como son los centelladores y la carcasa de sujeción.

Se analizó y verificó por medio del protocolo de comunicación establecido que todos los componentes digitales de ajuste y de sensado sean capaces de responder de la forma esperada.

Se realizó el ensamble de la placa desarrollada con la Unidad de Control, verificando que la sujeción y con-

exión entre ambas se haya realizado correctamente. También se verificó el funcionamiento conjunto de ambas para la detección de eventos generados por partículas energéticas.

Se concluye que el trabajo presentado cumple con las especificaciones definidas para el proyecto de la misión.

Se espera que con este trabajo se obtengan los datos requeridos por el Laboratorio de Mecánica y Energía para un mejor análisis del clima espacial. También se espera que los nuevos diseños introducidos en este trabajo puedan ser usados para mejorar los sistemas de detección que operan actualmente dentro del laboratorio.

Bibliografía

- [1] Fox, K. C. “NASA’s Van Allen Probes Spot an Impenetrable Barrier in Space” (noviembre 2014).
- [2] Pavón-Carrasco, F. Javier y de Santis, Angelo. “The South Atlantic Anomaly: The Key for a Possible Geomagnetic Reversal”. *Frontiers in Earth Science* (abril 2016).
- [3] Universidad Nacional de Asunción. “El primer satélite paraguayo ya está en órbita” (marzo 2021).
- [4] Buis, Alan. “Earth’s Magnetosphere: Protecting Our Planet from Harmful Space Energy” (agosto 2021).
- [5] Jana, Atanu; Cho, Sangeun; Patil, Supriya A. et al. “Perovskite: Scintillators, direct detectors, and X-ray imagers”. *Materials Today*, **tomo 55**:págs. 110–136 (2022). ISSN 1369-7021.
- [6] Hamamatsu. “What is MPPC® (SiPM)?” (consultado: febrero 2025).
- [7] OnSemi. “Silicon Photomultipliers (SiPM), High PDE and Timing Resolution Sensors in a TSV Package” (agosto 2021).
- [8] OnSemi. “Biasing and Readout of ON Semiconductor SiPM Sensors” (abril 2019).