



Diseño e Implementación del Sistema de Control y Procesamiento de Datos para la Misión de la FIUNA del GuaraníSat-2

Adolfo Sebastián Monje Pérez^{a,1}, Dr. Jorge Molina^{b,2}, Dr. Diego Stalder^{b,2}, Ing. Alan Cuevas^{b,2}, Ing. Lucas Cho^{b,2}

^aTesista, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, Paraguay

^bTutores, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, Paraguay

PALABRAS CLAVE

SiPM
GuaraníSat-2
Microcontrolador
SAMD51
ADC de precisión
(ADS1260)
Clima espacial
Voltaje de ruptura

RESUMEN

El presente trabajo describe el diseño e implementación del sistema de control y procesamiento de datos para la misión MUA, una carga útil a bordo del satélite paraguayo GuaraníSat-2. Esta misión busca cuantificar el flujo de partículas energéticas dentro y fuera de la Anomalía del Atlántico Sur (SAA), una región donde el campo magnético terrestre presenta una menor intensidad, permitiendo un mayor ingreso de radiación cósmica. El sistema desarrollado se encarga de polarizar sensores de tipo SiPM, adquirir los datos de conteo de partículas junto con parámetros ambientales, almacenarlos en memoria no volátil y transmitirlos al computador a bordo (OBC) del nanosatélite. La placa de control fue diseñada conforme a la norma IPC-2221, integrando componentes electrónicos de grado automotriz, un MCU de 120 MHz con un procesador ARM Cortex -M4 y periféricos de alta precisión, capaces de operar en condiciones extremas de temperatura y radiación. Se validó el correcto funcionamiento del sistema mediante rigurosas pruebas de termo-vacío. Los resultados demuestran una adquisición de datos robusta, una comunicación confiable con el OBC y una operación efectiva del algoritmo de polarización. Este desarrollo mantiene al Paraguay como actor relevante en la generación de conocimiento sobre clima espacial y en la validación de tecnologías espaciales propias.

KEYWORDS

SiPM
GuaraníSat-2
SAMD51 microcontroller
Precision ADC
(ADS1260)
Space weather
Breakdown voltage

ABSTRACT

This work presents the design and implementation of the control and data processing system for the MUA mission, a payload aboard the Paraguayan satellite GuaraníSat-2. The mission aims to quantify the flux of energetic particles inside and outside the South Atlantic Anomaly (SAA), a region where the Earth's magnetic field is weaker, allowing more cosmic radiation to penetrate. The developed system polarizes SiPM sensors, acquires particle count data and environmental parameters, stores them in non-volatile memory, and transmits them to the On-Board Computer (OBC) of the nanosatellite. The control board was designed in compliance with IPC-2221 standards, integrating automotive-grade components, a 120 MHz MCU with a ARM Cortex-M4, and high-precision peripherals, ensuring reliable operation under extreme temperature and radiation conditions. The system was validated through rigorous vibration, shock, and thermal vacuum testing. Results demonstrate robust data acquisition, reliable communication with the OBC, and effective operation of the biasing algorithm. This development maintains Paraguay's role in space weather research and contributes to the validation of national space technologies.

1. INTRODUCCIÓN

La Anomalía del Atlántico Sur (SAA) es una región (figura 1) de debilitamiento del campo magnético terrestre que permite una mayor penetración de radiación cósmica (figura 2, afectando a satélites, naves espaciales y potencialmente a la vida en la superficie. Paraguay, por su ubicación geográfica, se

encuentra directamente influenciado por este fenómeno.

¹Alumno de Ingeniería Mecatrónica de Facultad de Ingeniería, UNA, Paraguay (email: amonje@fiuna.edu.py)

²Tutores de la Facultad de Ingeniería, LME-UNA, Paraguay (email: [jmolina, dstalder}@ing.edu.py](mailto:{jmolina, dstalder}@ing.edu.py), [acuevas, lcho}@fiuna.edu.py](mailto:{acuevas, lcho}@fiuna.edu.py))

2020

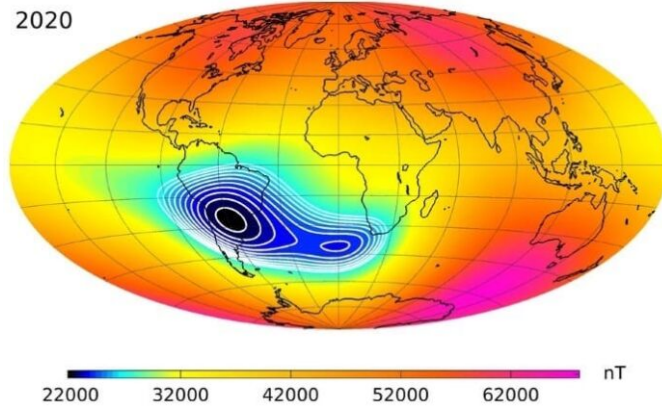


Fig. 1: Ubicación de la SAA. **Fuente:** Agencia Espacial Española [1]

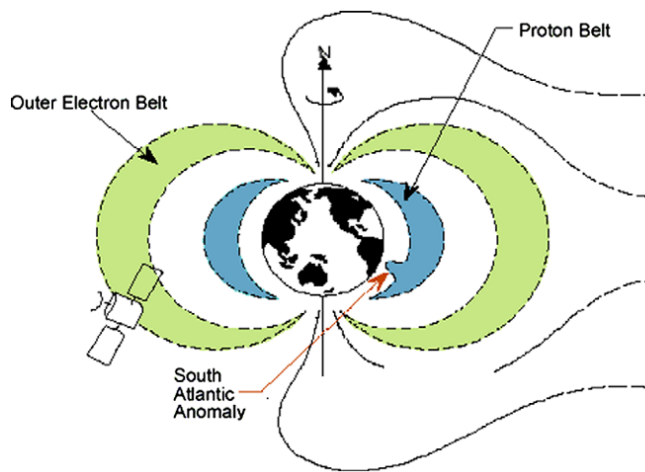


Fig. 2: Representación de los cinturones de Van Allen. **Fuente:** [2]

En este contexto, la misión MUA (South Anomaly Monitoring Unit), parte del satélite GuaraníSat-2, busca analizar el flujo de partículas energéticas dentro y fuera de la SAA. Para alcanzar este objetivo, se ha desarrollado una carga útil científica basada en sensores SiPM, cuya operación requiere un sistema capaz de polarizarlos, adquirir sus datos y gestionar la transferencia de datos a la computadora a bordo. La misión se compone de dos placas o sistemas dependientes entre sí:

- Placa de detección y acondicionamiento: Integra dos canales de centelleadores y SiPM MicroFJ-60035 (figura 3) con los respectivos circuitos elevadores de tensión controlables por el protocolo SPI y circuitos acondicionadores de señales.
- Placa de Control y Procesamiento: Sistema en el que se centra este TFG, integra un MCU para activar la alimentación y procesar los datos, un ADC de precisión para la adquisición de las señales de la placa de detección y una memoria flash para almacenamiento de datos. Este sistema polariza los sensores, obtiene y guarda las cuentas, y se comunica con el OBC para transferir los datos y establecer los estados de operación.

El desafío para el sistema de control es polarizar adecuadamente estos sensores, se espera que el satélite tenga una variación de temperatura de -40 a 70°C en 1.5 hs aproximadamente, estos sensores presentan una estrecha relación de sus

parámetros con la temperatura, por lo que se deben controlar los parámetros principales de forma dinámica.

Este trabajo final de grado se enfoca en el diseño e implementación del sistema de control y procesamiento que da soporte a esta misión científica, permitiendo una caracterización del clima espacial sobre Paraguay.

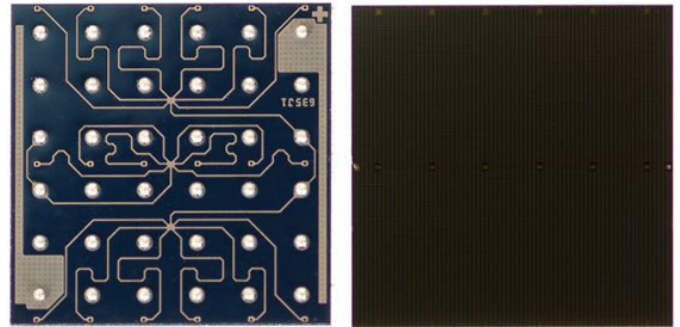


Fig. 3: SiPM MicroFJ-60035 Onsemi **Fuente:** Onsemi MicroFJ series Datasheet.

2. Objetivos

General: Diseñar e implementar el sistema de control y procesamiento de datos para la misión de la FIUNA del GuaraníSat-2.

Específicos:

- Dimensionar y seleccionar componentes electrónicos y materiales que cumplan con los requerimientos de la misión.
- Seleccionar un MCU con la frecuencia de operación necesaria para la detección de pulsos producidos por un circuito acondicionador de señal producida por un Foto Multiplicador de Silicio (SiPM).
- Diseñar un Printed Circuit Board (PCB) que integre los componentes en la placa de control siguiendo la norma del IPC-2221.
- Desarrollar el software de procesamiento y control para la placa de control de la misión.
- Establecer un protocolo de comunicación mediante el puerto serial entre la placa de control y la Computadora a Bordo (OBC).
- Integrar el sistema al GuaraníSat-2.

3. Fundamentos Teóricos

3.1. Centelleadores

Los centelleadores (figura 4) son materiales que emiten fotones cuando son atravesados por partículas ionizantes, fenómeno conocido como luminiscencia. Esta propiedad permite detectar partículas de radiación cósmica mediante la conversión de su energía en fotones, que son captados por sensores ópticos. En particular, los centelleadores plásticos, comúnmente basados en poliviniltolueno y dopados con flúor, emiten fotones con una longitud de onda específica, ideal para su acoplamiento con sensores de silicio como los SiPM.

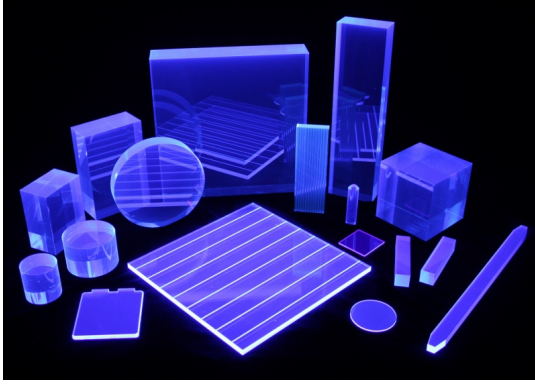


Fig. 4: Centelleador EJ-200, 420 nm. **Fuente:** Eljen Technology [3]

3.2. Foto Multiplicadores de Silicio (SiPM)

Los SiPM son dispositivos foto detectores formados por una matriz de microceldas llamadas SPAD (Single Photon Avalanche Diode), que operan en modo de avalancha para detectar fotones con alta sensibilidad y resolución temporal. El voltaje de ruptura (V_{bd}) es el mínimo voltaje inverso que permite iniciar la avalancha, siendo este un parámetro crítico para su polarización. Para operar, se aplica un voltaje de polarización V_{bias} mayor que V_{bd} por un valor llamado sobre voltaje (V_{OV}), definido como:

$$V_{bias} = V_{bd} + V_{OV}$$

El sobrevoltaje incrementa la ganancia del SiPM, aumentando la señal producida por cada fotón detectado, pero también eleva la tasa de cuentas oscuras (dark counts), que son eventos esporádicos causados por generación térmica espontánea de portadores de carga (electrones y huecos) dentro del semiconductor. Por otro lado, el V_{bd} depende de la temperatura, aumentando conforme esta crece, lo que hace necesario ajustar dinámicamente el V_{bias} para mantener un desempeño óptimo y estable en distintas condiciones ambientales.

3.3. Métodos de Obtención del V_{bd}

El voltaje de ruptura V_{bd} de los SiPMs varía significativamente con la temperatura (figura 5), y su valor nominal, según el fabricante, presenta un rango amplio e impreciso. Diversos estudios, como los de Taggart [4] y Nagai [5], han demostrado esta dependencia térmica y han analizado métodos más robustos para estimar V_{bd} a partir de curvas IV inversas.

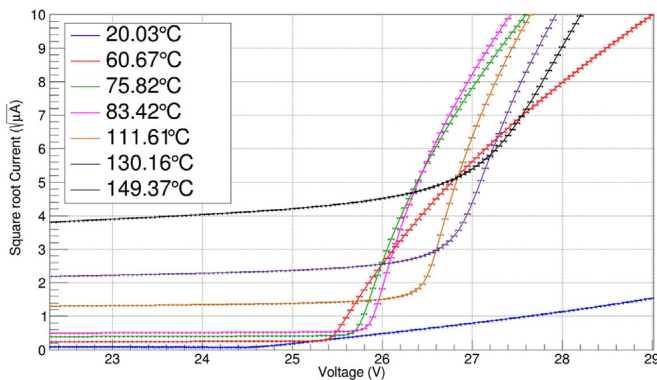


Fig. 5: Reverse IV vs Temperature of SiPM. **Fuente:** Taggart 2019 [4]

Entre los métodos analizados (tercera derivada, derivada logarítmica relativa, e inversa de la derivada logarítmica), se eligió este último para el presente trabajo por su bajo costo computacional y buena estabilidad, lo que lo hace ideal para sistemas embarcados con recursos limitados (ver figura 6).

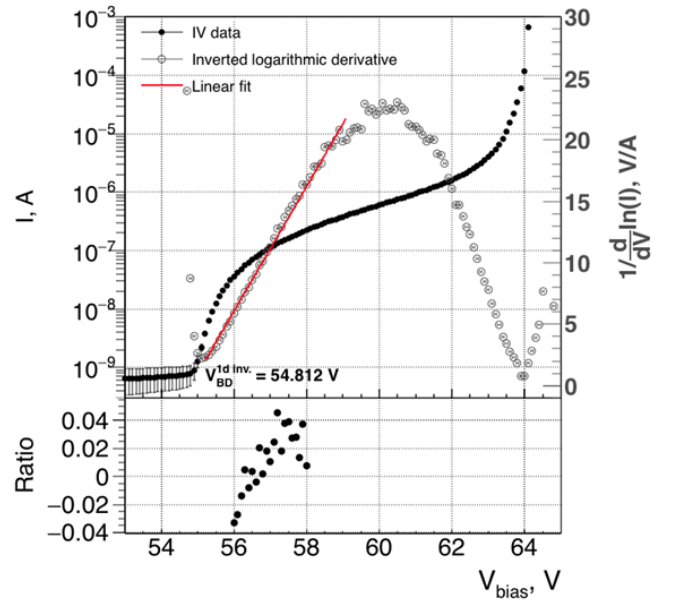


Fig. 6: Inversa de la derivada del logaritmo de la corriente con respecto a la tensión. **Fuente:** A. Nagai [5]

Este método permite estimar el V_{bd} como el mínimo local de la función $1/\frac{d}{dV}\ln(I)$, proporcionando resultados fiables sin necesidad de cálculos complejos.

Dado que en órbita baja la temperatura del sistema puede oscilar entre los -40 a 70°C en ciclos de 1.5 h, se determinó que el V_{bias} debe corregirse cada 120 segundos para compensar variaciones del V_{bd} cercanas a 42mV , teniendo en cuenta la variación del V_{bd} de $21\text{mV}/^\circ\text{C}$ del SiPM utilizado (MicroFJ - 60035).

4. Requerimientos del Sistema de Control y Elección de Componentes

4.1. Requerimientos del GuaraníSat-2

El GuaraníSat-2 es un nanosatélite del tipo “CubeSat” de 3 unidades, donde cada una de ellas es un cubo de 10 cm de arista, siendo la dimensión total del satélite un prisma de $10\times10\times30\text{ cm}$. De acuerdo a eso se establecieron las dimensiones de los PCB de las cargas útiles como se ve en la figura 7.

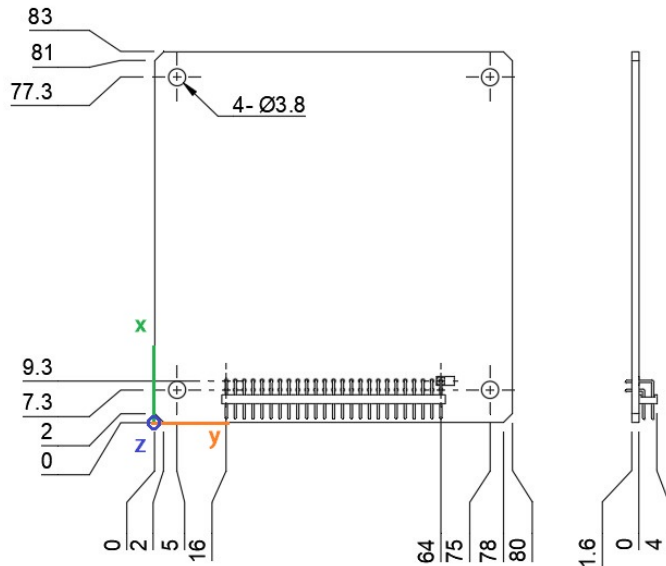


Fig. 7: Dimensión normalizada del PCB. **Fuente:** Agencia Espacial Paraguaya.

El backplane del satélite es la interfaz de conexión de las distintas cargas útiles con el OBC del satélite, la misión MUA se conecta a este mediante un header de 50 pines, implementando los protocolos y señales de alimentación y comunicación de la tabla 1.

USB	Programación y debug en tierra
UART1	Comunicación con el OBC
UART2	Comunicación con el GPS
GPIO	Activación del sistema de control
3V3.2	Línea de alimentación
5V0	Línea de alimentación
GND	Referencia del sistema

TABLA 1: Conexión al backplane del satélite

4.2. Requerimientos de la Placa de Detección

Los componentes controlables que integra la placa de detección y acondicionamiento para permitir al sistema de control modificar el voltaje de polarización, el voltaje umbral de detección de pulsos y adquirir la temperatura del sistema son los expuestos en la tabla 2.

TMP100	Sensor de temperatura	I2C
MCP4561	Potenciometro digital	I2C
MAX1932 x2	Elevador de tensión	SPI
DAC8551 x2	DAC incrementador de resolución	SPI
LED x2	Permite saturar a los SiPM	GPIO

TABLA 2: Componentes controlables de la placa de detección de la misión.

4.3. Componentes principales escogidos

Para garantizar la confiabilidad del sistema ante las exigencias del entorno espacial, se seleccionaron componentes con certificación automotriz AEC-Q100 y, en la mayoría de los casos, con herencia de vuelo. El microcontrolador AT-SAMD51J20A de Microchip integra un núcleo ARM Cortex-M4 a 120 MHz, múltiples interfaces de comunicación (SPI, UART, I2C, QSPI), 1 MB de Flash con ECC y 256 KB de

SRAM, además de temporizadores de alta resolución y tolerancia de operación entre -40 y 125°C . El conversor analógico digital ADS1260 de Texas Instruments ofrece una resolución de 24 bits, hasta 40 kSPS, filtros internos programables y comunicación SPI con verificación por CRC, ideal para la lectura precisa de señales de corriente provenientes de los SiPMs. La memoria flash MT25QL01GBBB de Micron proporciona 128 MB de almacenamiento con soporte QSPI y velocidad de escritura de hasta 133 MHz, con certificación AEC-Q100 y encapsulado robusto. La protección ante sobretensión y sobrecorriente fue implementada mediante el LTC4361, que controla un MOSFET externo y responde ante transitorios en menos de 1 μs . Finalmente, el buffer SN74LVC2G34 protege las líneas de comunicación sensibles, como las entradas UART, frente a eventos eléctricos transitorios, con tecnología CMOS de bajo consumo y conmutación rápida.

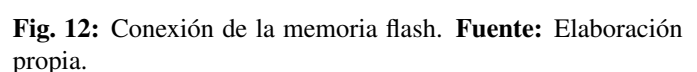
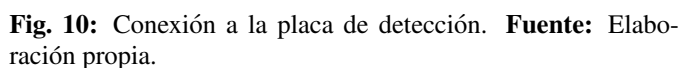
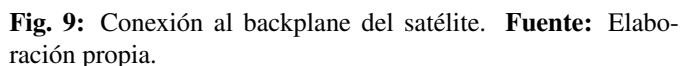
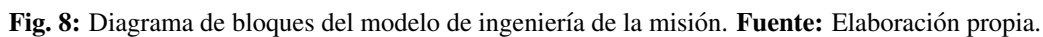
5. Diseño del Hardware

Con los componentes escogidos se diseñó la interconexión de componentes con la placa de detección y el backplane del satélite (figura 8).

Se integran circuitos de protección contra sobrevoltajes y sobre corrientes en las distintas líneas de alimentación que van al sistema de control y de este al sistema de detección de la misión, se implementa una memoria flash a través del protocolo QSPI para multiplicar por 4 la velocidad de transferencia de bytes sin aumentar la velocidad del reloj, además mediante el protocolo SPI se establece comunicación con el ADC, permitiendo así una toma de datos rápida y eficiente. La comunicación con la placa de detección se establece mediante otros buses de comunicación SPI e I2C.

Las figuras 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 y 16 muestran los circuitos implementados.

Se establecieron 4 capas para la fabricación de la PCB, designando las capas como Signal/Power - GND - GND - Signal/Power, siendo la alimentación escogida para estos planos la digital de 3.3 V, de esta forma se genera un efecto de capacitancia entre las capas de alimentación y gnd, permitiendo un filtrado adicional del ruido electromagnético. Para los cálculos del ancho del ruteado de las líneas de alimentación y comunicación se utilizó la herramienta de cálculo **Saturn PCB Design**. Con esto se distribuyeron los componentes como se muestra en las figuras 17 y 18.



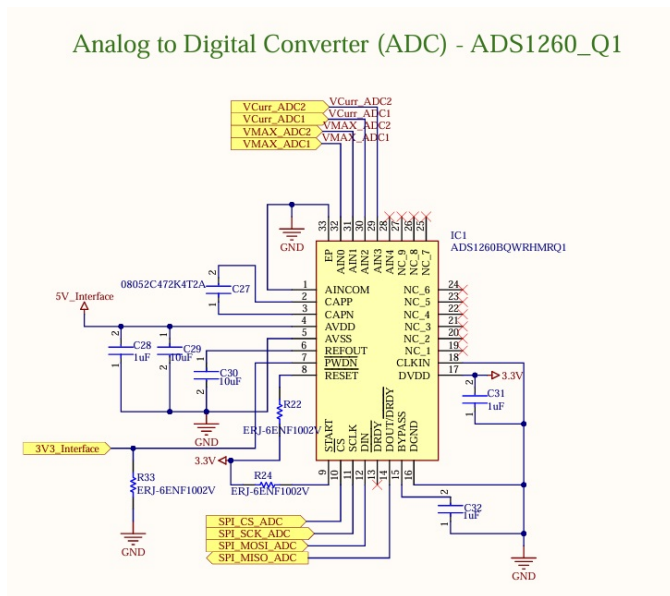


Fig. 13: Conexión del ADC. Fuente: Elaboración propia.

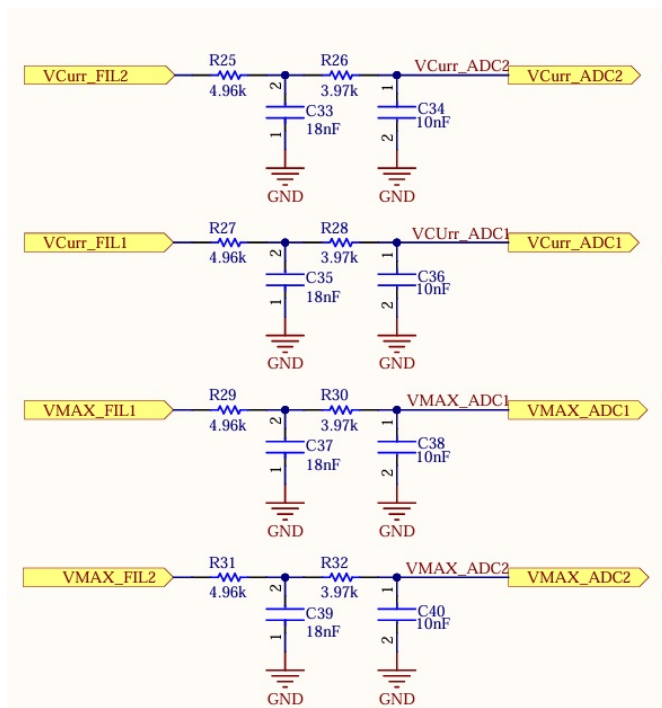


Fig. 14: Filtro pasa bajos pasivo de segundo orden para las señales analógicas que ingresan al ADC. **Fuente:** Elaboración propia.

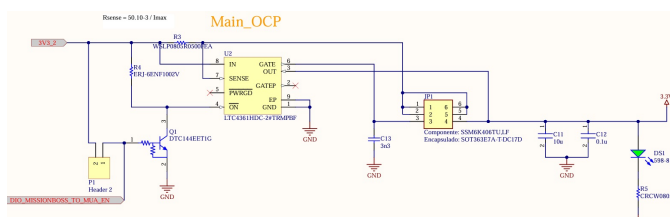


Fig. 15: Circuito de protección contra sobrecorriente y sobrevoltaje, igual para todas las líneas de alimentación. **Fuente:** Elaboración propia.

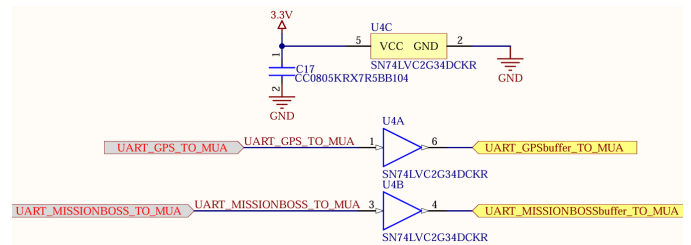


Fig. 16: Buffer de protección de las líneas Rx de los protocolos UART. **Fuente:** Elaboración propia.

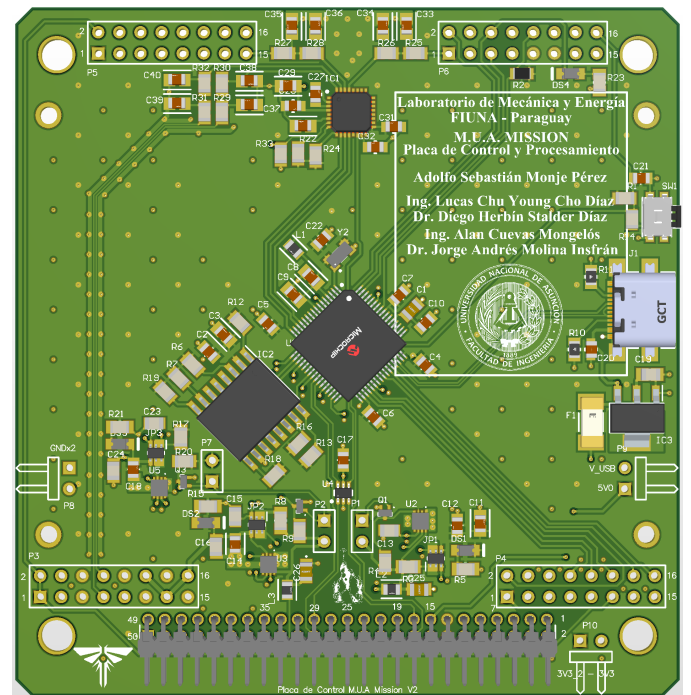


Fig. 17: Vista frontal de la PCB diseñada. **Fuente:** Elaboración propia.

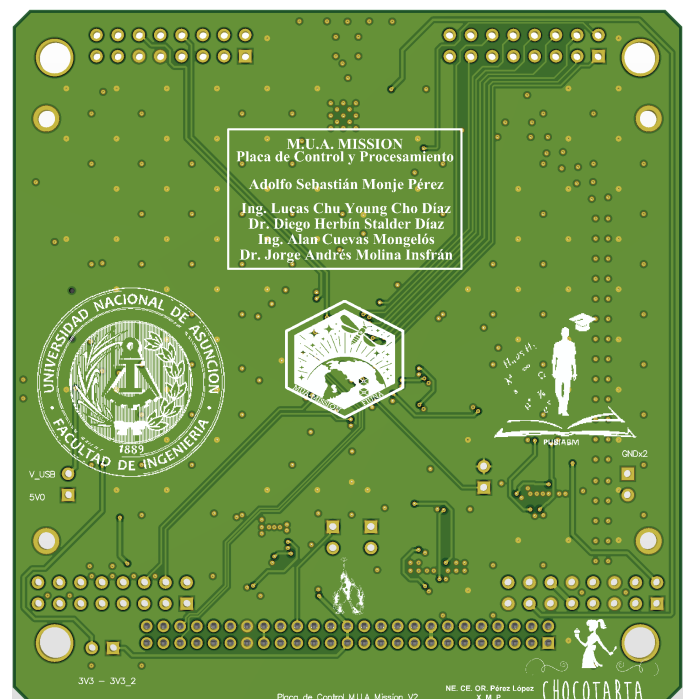


Fig. 18: Vista trasera de la PCB diseñada. **Fuente:** Elaboración propia.

6. Desarrollo del Software

6.1. Comunicación con el OBC

Para permitir que el OBC establezca eficientemente los estados de operación de la misión se desarrolló una máquina de estados finitos como se muestra en la figura 19. En el estado inicial el sistema determina el último estado de operación establecido por el OBC mediante una un byte escrito en la memoria flash, si no hay ninguno guardado el sistema va al estado STANDBY y queda a la espera de los comandos del OBC.

**Operation States - M.U.A MISSION
Finite State Machine - Moore**

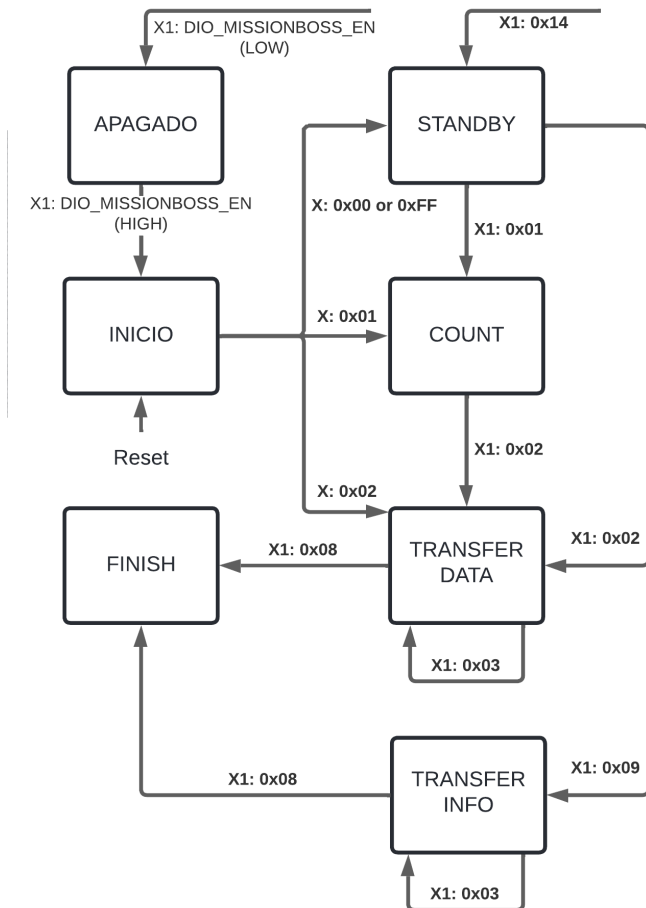


Fig. 19: Máquina de estados finitos de la misión. **Fuente:** Elaboración propia.

En el estado de conteo el sistema de control polariza los sensores cada 120 segundos, captura los pulsos generados por los impactos de las partículas en los centelleadores y almacena las tramas de datos en la memoria flash, este proceso se hace cíclicamente hasta que el OBC establezca un nuevo comando de operación (ver figura 20).

En el estado de transferencia de datos el sistema transfiere las tramas de datos guardadas en el estado de conteo al OBC mediante el puerto serial con 2400 bps.

Las tramas de comunicación establecidas son las que se muestran en la tabla 3.

6.2. Polarización de los sensores

El proceso de polarización de los sensores se muestra en la figura 22 y es igual para ambos canales, el proceso se realiza para un canal a la vez.

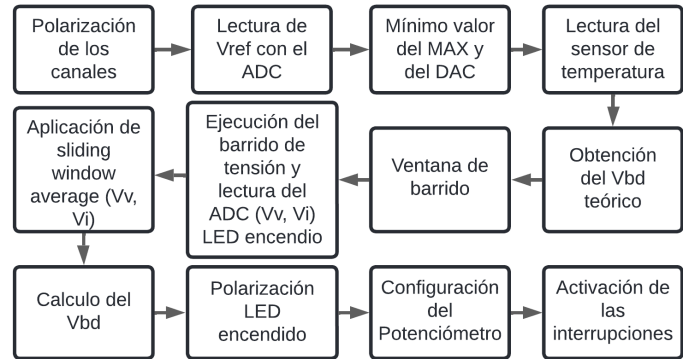


Fig. 22: Diagrama de flujo de la polarización de los canales. **Fuente:** Elaboración propia.

7. Pruebas Experimentales

Con el sistema desarrollado se obtuvieron curvas IV inversas características del SiPM como en la figura 23.

Se hicieron pruebas de flujo de partículas para determinar la eficacia del algoritmo de polarización a la hora de estabilizar las cuentas utilizando fuentes de radiación gamma como el CS-137 (figura 24).

Con la misión MUA integrada al GuaraníSat-2 se hicieron pruebas ambientales tales como Vibración, shock y termo vacío en el **Centro de Testeo de Nanosatélites** ubicado en el **Instituto Tecnológico de Kyushu - Japón (Kyutech)**, el sistema fué validado al superar estas tres pruebas, funcionando correctamente luego de estas. Las pruebas de termo vacío demostraron que la temperatura interna de la misión MUA realmente es menor de lo estimado (figura 25), este dato permitirá analizar la disminución del rango de voltaje de control establecido por la placa de detección, ganando resolución al momento de establecer el voltaje de polarización.

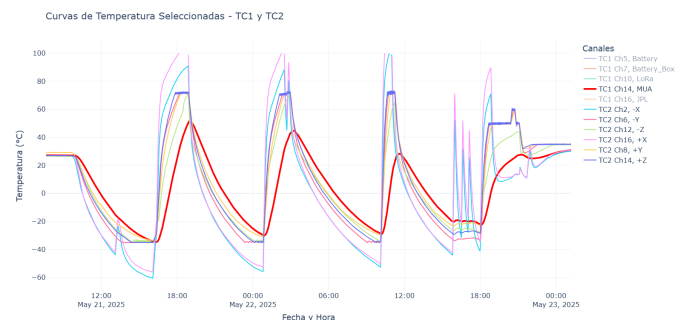


Fig. 25: Curva de temperatura en la cámara de termo vacío, rango alcanzado de -30 a 55°C . **Fuente:** Elaboración propia.

Se hizo además una cuarta prueba en Kyutech utilizando la cámara despachadora (Despatch Chamber) que permite disminuir y elevar la temperatura del sistema con nitrógeno líquido y calentadores pero sin vacío, el perfil de temperatura alcanzado es el de la figura 26. Las pruebas funcionales en esta máquina consistieron en establecer los diferentes modos de operación durante todas las temperaturas alcanzadas.

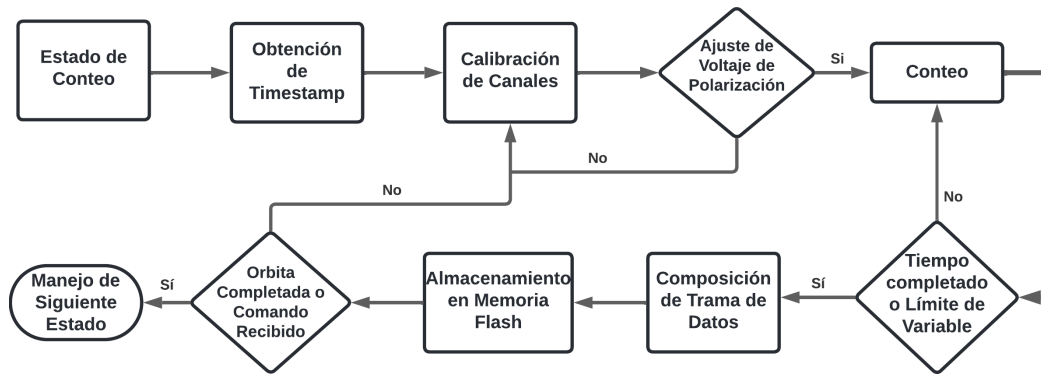


Fig. 20: Diagrama de flujo del estado de conteo de la misión. **Fuente:** Elaboración propia.

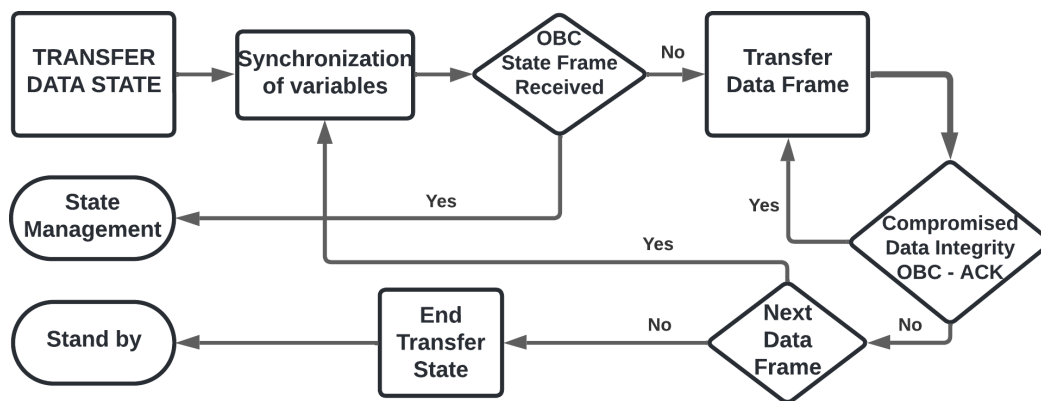


Fig. 21: Diagrama de flujo del estado transferencia de datos de la misión. **Fuente:** Elaboración propia.

Operation	Subsystem ID	CMD ID	Bytes Quantity	Data Bytes	CRC MSB	CRC LSB	Stop Byte
Count Mode	0xAB	0x01	0x00	NONE	0xB7	0xF1	0x0A
Transfer Data Mode	0xAB	0x02	0x00	NONE	0xE2	0xA2	0x0A
Data MUA to OBC	0x26	0x03	0x24	...	0xFF	0xFF	0x0A
NACK Invalid CRC	0x26 — 0xAB	0xFF	0x00	NONE	0xFF	0xFF	0x0A
Finish Mode	0xAB	0x08	0x00	NONE	0x0D	0x69	0x0A
Info Transfer Mode	0xAB	0x09	0x00	NONE	0x	0x	0x0A
STAND BY	0xAB	0x14	0x00	NONE	0x	0x	0x0A
NACK Invalid Frame	0xAB	0x00	0x00	NONE	0x00	0x00	0x0A
ACK	0xAB — 0x26	0xRR	0x00	NONE	0xAA	0xAA	0x0A

TABLA 3: Comandos de las tramas de comunicación con el sistema de control. **Fuente:** Elaboración propia.

Fecha: ThermalTest_Kyutech-250527-165335, Curva IV inversa a -27.5625 °C, SiPM N° 1, Algoritmo V3, LED encendido,
 $V_{bd} = (V \cdot 12) - 3.8 - (R_a/R_b) \cdot (V - \text{First}V) = 23.6505$

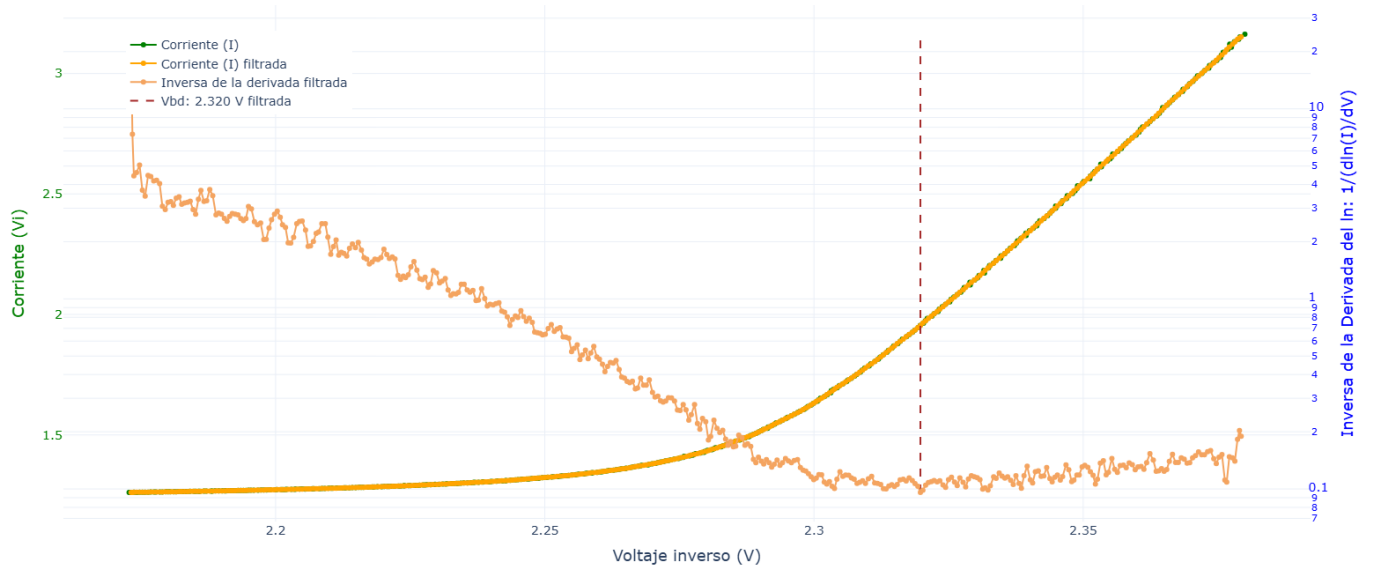


Fig. 23: Curva IV inversa a -27°C. **Fuente:** Elaboración propia.

Flujo de partículas: Fuente CS-137, con compensación, OverVoltage = 2.5 V, archivo device-monitor-250616-164943.log,
 $\Delta t = 120$ seg, pot = 0xE8



Fig. 24: Estabilización del flujo de partículas. **Fuente:** Elaboración propia.

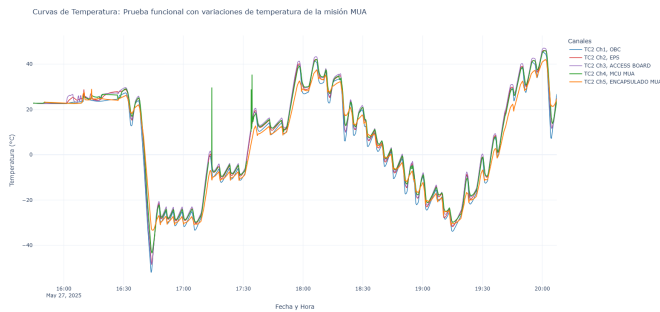


Fig. 26: Prueba funcional en la cámara despachadora. **Fuente:** Elaboración propia.

El resultado de las pruebas funcionales fue exitoso para todos los estados de operación del sistema de control de la misión MUA.

8. Resultados

Se validó el funcionamiento de los componentes bajo condiciones similares a las del espacio, mediante exitosas pruebas de vibración, choque y termo-vacío.

El microcontrolador ATSAM51J20A operó con eficiencia en la gestión de múltiples periféricos críticos para la misión, logrando una lectura confiable de pulsos de 495 ns del sistema de detección.

La PCB fue diseñada siguiendo buenas prácticas de ingeniería, con un apilamiento de capas que favorece la integridad de señal.

El algoritmo de polarización demostró un control eficaz, ajustando dinámicamente el voltaje de operación de los sensores SiPM según la temperatura, garantizando una adquisición de cuentas estable.

La comunicación con el OBC se estableció con éxito, y el sistema de control respondió adecuadamente a los comandos recibidos, cumpliendo con todos los requisitos funcionales.

Este trabajo demuestra la capacidad del país para diseñar e integrar tecnología espacial avanzada, aportando datos relevantes para el estudio del clima espacial y consolidando la posición de la FIUNA en el desarrollo de capacidades satelitales propias.

9. Conclusiones

Si bien los resultados demuestran el buen funcionamiento de todo el sistema, este aún puede ser optimizado, de tal forma a consumir menos energía disminuyendo el tiempo necesario para la polarización de los canales. Aún se debe caracterizar el potenciómetro digital de tal forma a establecer un voltaje umbral óptimo para la detección de los pulsos en el sistema de detección. Se necesita además realizar un algoritmo de acceso dinámico a memoria en caso de que el OBC pierda los datos transferidos a su memoria flash.

El conocimiento de estos y otros puntos sólo permitirán mejorar el sistema de la misión, perfeccionando así sus procesos. Este trabajo lleva más de un año de desarrollo, involucrando a profesionales distinguidos del LME y marcando un hito tecnológico para nuestra institución educativa.

10. Agradecimientos

Se extienden los agradecimientos al Programa Universitario de Becas para la Investigación Andrés Borgognon Montero **PUBIABM** por su apoyo en esta misión tan importante para nuestra institución educativa y para la comunidad científica internacional.

Se agradece a la Agencia Espacial Paraguaya (**AEP**) y al **Space Lab** por su ayuda en el desarrollo de esta misión al igual que al Club de Robótica (**CDR**) de la FIUNA.

11. Referencias

- [1] "Development of the South Atlantic Anomaly — esa.int," https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2020/05/Development_of_the_South_Atlantic_Anomaly, [Accessed 05-09-2024].
- [2] C. Augusto, C. Navia, K. Tsui, H. Shigueoka, P. Miranda, R. Ticona, A. Velarde, and O. Saavedra, "Simultaneous observation at sea level and at 5200 m.a.s.l. of high energy particles in the south atlantic anomaly," *Astroparticle Physics*, vol. 34, no. 1, pp. 40–47, 2010. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927650510000800>
- [3] S. User, "EJ-200, EJ-204, EJ-208, EJ-212 - Plastic Scintillators - Eljen Technology — eljentechnology.com," <https://eljentechnology.com/index.php/products/plastic-scintillators/ej-200-ej-204-ej-208-ej-212>, [Accessed 11-06-2025].
- [4] "Suitability of a SiPM photodetector for implementation in an automated thermoluminescent dosimeter reader — sciencedirect.com," <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969806X18310065?via%3Dihub>, [Accessed 15-02-2025].
- [5] "Characterisation of a large area silicon photomultiplier — arxiv.org," <https://arxiv.org/abs/1810.02275>, [Accessed 15-02-2025].

12. Anexos

Los logs de las diferentes pruebas y los códigos escritos en c++ para la programación del microcontrolador con PlatformIO se encuentran en el siguiente repositorio de GitHub (figura 27) del usuario SebasMP14: <https://github.com/SebasMP14?tab=repositories>.



Fig. 27: Enlace a los repositorios del proyecto **Fuente:** Elaboración propia.

- MUA_Control_Placa_Pruebas: Proyecto principal.
- MUA_Control_SAMD51_Variant: Archivo de configuración de pines del SAMD51.
- Adafruit_SPIFlash_MUA: Librería modificada de Adafruit para el control de la memoria flash MT25QL01GBBB8ESF.

El repositorio que contiene los datos y scripts de python de las distintas pruebas experimentales es:

- Codigos_Pruebas: Scripts de manejo de datos y gráficos de datos.