

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA ELECTRÓNICA DE
DISCRIMINACIÓN Y REGISTRO PARA UN TELESCOPIO
DE MUONES PORTÁTIL PARA EL ESTUDIO DE RAYOS
CÓSMICOS ATMOSFÉRICOS**

KAREN JULIET FORERO GUTIÉRREZ
JOSE LUIS SALAMANCA COY

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIAS ELECTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2018

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA ELECTRÓNICA DE
DISCRIMINACIÓN Y REGISTRO PARA UN TELESCOPIO
DE MUONES PORTÁTIL PARA EL ESTUDIO DE RAYOS
CÓSMICOS ATMOSFÉRICOS**

KAREN JULIET FORERO GUTIÉRREZ
JOSE LUIS SALAMANCA COY

*Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Electrónico*

Director
Jesús Peña Rodríguez
M.Sc. en Ing. Electrónica

Codirectores
Jaime Guillermo Barrero Perez
M.Sc. en Ing. Electrónica
Luis Alberto Núñez de Villavicencio Martínez
Ph.D. en Física

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2018

Dedicado a

...

Karen Juliet Forero Gutiérrez

Dedicado a

...

Jose Luis Salamanca Coy

Índice General

Introducción	10
1. Marco teórico	13
1.1. Rayos Cósmicos	13
1.2. Muongraña y los muones	13
1.3. Hodoscopios	14
1.4. Materiales Centelladores	16
1.4.1. Centelladores plásticos	16
1.5. Detectores de Centelleo	17
1.6. Foto detectores de alta sensibilidad (Foto multiplicadores de Silicio - SiPM) .	18
1.7. Estado del arte	19
1.7.1. Proyecto Mu-Ray	19
1.7.2. Proyecto DIAPHANE	21
2. Metodología y resultados parciales	23
2.1. Interfaz Analógica	24
2.1.1. Etapa de adquisición	24
2.1.1.1. Caracterización del circuito de adquisición	24
2.1.1.2. Caracterización señal de salida etapa de adquisición	27
2.1.1.3. Construcción del segundo panel centellador	28
2.1.2. Discriminación de partículas	30
2.1.2.1. Diseño electrónico	30
2.1.2.2. Resultados de pruebas sobre la interfaz analógica	33
2.2. Interfaz Digital	36
2.2.1. FPGA	37
2.2.1.1. Gestión de funciones	39
2.2.1.2. Despliegue y contadores	40
2.2.1.3. Banco de memoria	41
2.2.1.4. Protocolo de comunicación	42
2.2.2. Umbral de detección	45
2.2.2.1. Sensores adicionales	46
2.2.2.1.1. Temperatura y presión atmosférica	46
2.2.2.1.2. GPS	46
2.2.3. Raspberry Pi	47
2.2.3.1. Estructura del archivo de datos	51
2.2.3.2. Interfaz de usuario	52
Referencias	53

Índice de figuras

1.	Evolución de cascada de rayos cósmicos	14
2.	Hodoscopio con un único plano de detección	15
3.	Hodoscopio con dos planos de detección	16
4.	Plástico Centellador y sus características	17
5.	Proceso de centelleo	18
6.	Estructura MPPC	19
7.	Señal característica del MPPC	19
8.	Proyecto MU-RAY	20
9.	Histograma de transmisión del Mt. Vesuvius	21
10.	Proyecto DIAPHANE	22
11.	Radiografía de la densidad media de La Soufrière de Guadalupe	22
12.	Esquema General del proyecto	23
13.	Esquema general del proyecto con énfasis en la etapa analógica	24
14.	Círculo de adquisición	25
15.	Análisis filtro de alimentación de los fotomultiplicadores de silicio	25
16.	Filtro pasa-altas característico de la configuración derivativa, usada en el circuito de adquisición	26
17.	En la parte superior, el pulso acondicionado (salida de la etapa de adquisición) y en la parte inferior: su espectro en frecuencia para $R_1 = 4,7k\Omega$	27
18.	Características temporales del pulso de adquisición	28
19.	<i>Fotografía tarjetas de adquisición</i>	29
20.	<i>Fotografía paneles centelladores</i>	30
21.	Círculo de discriminación	31
22.	Señales de la interfaz analógica	33
23.	Comparación simulación y señales reales de la etapa de discriminación	34
24.	Umbral de discriminación	35
25.	Señal de salida interfaz analógica	36
26.	Esquema general del proyecto resaltando la interfaz digital en el recuadro rojo	37
27.	Procesador de propósito específico descrito en la FPGA Spartan 6	39
28.	Forma de visualización de contadores disponibles	40
29.	Mapa de memoria y dinámica de registro	42
30.	Forma de comunicación con FPGA del detector	44
31.	Comunicación con FPGA MiniMuTe	45
32.	Sensores adicionales	46
33.	Esquema de funcionamiento desde la interfaz hasta la lectura y escritura de los pines GPIO en la Raspberry pi	49
34.	Comunicación entre objetos en C++	50

35. Estructura del archivo de salida	51
36. Aplicación desarrollada para el detector	52

Índice de tablas

2.1. Criterios de diseño iniciales para la etapa de discriminación	31
2.2. Tabla de comunicación FPGA	43
2.3. Parámetros de tiempo	44

RESUMEN

TÍTULO: Diseño e implementación de la electrónica de discriminación y registro para un Telescopio de muones portátil para el estudio de rayos cósmicos atmosféricos.¹

AUTORES:

Karen Juliet Forero Gutiérrez²
Jose Luis Salamanca Coy²

Palabras Clave: Detectores de centelleo, Rayos cósmicos, Muongrafía.

DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

Este proyecto tiene como objetivo la construcción de un detector de centelleo portátil e independiente para determinar la trayectoria de una partícula que incide sobre el mismo, con el fin de ser utilizado en aplicaciones de muongrafía. Este detector, también llamado hodoscopio, se construye configurando planos de detección multipíxel; los planos se ubican paralelamente sobre el mismo eje de coordenadas con posibilidad de variar la distancia entre los mismos. Su funcionamiento y resolución temporal de detección dependen mayormente del sistema electrónico de discriminación y registro de eventos. Por lo tanto, se propone el diseño de dicho sistema, teniendo en cuenta criterios de bajo consumo y bajo costo en su manufactura.

¹Trabajo de Grado

²Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Jesús Peña Rodríguez. Codirectores: Jaime Guillermo Barrero y Luis Alberto Núñez de Villavicencio Martínez.

RESUMEN

TÍTULO: Diseño e implementación de la electrónica de discriminación y registro para un Telescopio de muones portátil para el estudio de rayos cósmicos atmosféricos.¹

AUTORES:

Karen Juliet Forero Gutiérrez²
Jose Luis Salamanca Coy²

Palabras Clave: Detectores de centelleo, Rayos cósmicos, Muongrafía.

DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

Este proyecto tiene como objetivo la construcción de un detector de centelleo portátil e independiente para determinar la trayectoria de una partícula que incide sobre el mismo, con el fin de ser utilizado en aplicaciones de muongrafía. Este detector, también llamado hodoscopio, se construye configurando planos de detección multipíxel; los planos se ubican paralelamente sobre el mismo eje de coordenadas con posibilidad de variar la distancia entre los mismos. Su funcionamiento y resolución temporal de detección dependen mayormente del sistema electrónico de discriminación y registro de eventos. Por lo tanto, se propone el diseño de dicho sistema, teniendo en cuenta criterios de bajo consumo y bajo costo en su manufactura.

¹Trabajo de Grado

²Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Jesús Peña Rodríguez. Codirectores: Jaime Guillermo Barrero y Luis Alberto Núñez de Villavicencio Martínez.

Introducción

Los rayos cósmicos, también llamados radiación cósmica, son partículas subatómicas procedentes del espacio exterior cuya energía es muy elevada debido a su velocidad (cercana a la velocidad de la luz). Antes de alcanzar la atmósfera, la radiación cósmica está compuesta en un 98 % por protones y partículas alfa de alta energía, el resto lo constituyen electrones y partículas pesadas ionizadas; a este conjunto se le denomina “partículas primarias”. Una vez que las partículas primarias interactúan con la atmósfera y el campo magnético terrestre, pasan a ser “partículas secundarias” y se distribuyen de tal modo que, la mayor intensidad de partículas se registra en los polos magnéticos. Por tanto, la componente de partículas que alcanza el suelo está sujeta a tres elementos fundamentales, la altitud (a mayor altura, menos atmósfera con la cual interaccionar), la latitud (a mayor latitud, mayor cantidad de partículas desviadas por el campo magnético), y finalmente la variación del ciclo solar (aproximadamente cada 11 años).

Cuando un rayo cósmico de alta energía llega a la atmósfera terrestre interactúa con los átomos presentes en esta, choca con los gases y libera electrones. Este proceso excita los átomos y genera nuevas partículas que también colisionan, provocando una serie de reacciones nucleares que originan otras partículas; y así sucesivamente se repite el proceso en cascada. A causa de esas interacciones se pueden generar más de 1000 nuevas partículas que decaen al descender; a nivel del mar y a una latitud de unos 45° N, los componentes importantes de estas partículas secundarias son: muones (72 %), fotones (15 %) y neutrones (9 %). Estos corpúsculos integrantes de las cascadas se pueden medir con distintos tipos de detectores de partículas, generalmente basados en la ionización de la materia o en el efecto Cherenkov [1].

No es casualidad que gran parte de las partículas que alcanzan el nivel del mar sean muones, considerando que los muones son partículas cargadas negativamente que tienen 200 veces la masa del electrón [2, pag 262] y tienen la capacidad de atravesar grandes estructuras sin decaer o quedarse atrapados. Por estas características, aparece una técnica que usa el mismo principio de la radiografía médica estándar, en la que se mide la atenuación de un flujo de radiación (muones atmosféricos o rayos-X) cuando cruza la materia (roca estándar o cuerpo humano) con un dispositivo sensible a recoger dicha radiación; esta técnica lleva el nombre de muongrafía.

La muongrafía es una técnica no invasiva, que consiste en la generación de imágenes a partir del flujo de muones atmosféricos que atraviesan diversos materiales [3]. Los campos de aplicación de esta técnica son variados, algunos como, la identificación de materiales radiactivos en contenedores [4], la exploración de la estructura interna de plantas nucleares [5], inspección de pirámides en busca de cámaras ocultas [6], observación de volcanes para monitorear la evolución temporal de sus cámaras magmáticas [7], e incluso el monitoreo de represas para el rastreo de fisuras.

Para realizar muongrafía se necesitan detectores que sean capaces de determinar trayectorias y así poder determinar el flujo de partículas en el lugar de estudio. Generalmente se emplean hodoscopios conformados por paneles pixelados que varían su sensibilidad dependiendo de la aplicación. Actualmente, existen varios detectores que realizan tomografía de muones [8] [9], estos instrumentos típicamente están conformados por paneles centelladores de gran volumen y peso, un sistema electrónico complejo, costoso y de consumo energético considerable. Además, su ensamblaje requiere una alta complejidad logística para su transporte, instalación y puesta en funcionamiento, lo cual se convierte en un gran obstáculo para

que dichos detectores puedan ser portados a zonas de difícil acceso.

De allí nace la idea de diseñar y construir un instrumento portátil que posibilite la caracterización del comportamiento del flujo de muones que atraviesan diferentes estructuras en lugares de difícil acceso, con bajo consumo energético, alta versatilidad en su transporte e instalación y electrónica de bajo costo. Con esta idea se concretó esta tesis, que se enmarca en los proyectos del Grupo Halley ¹para estudiar los fenómenos asociados con la radiación natural proveniente de los rayos cósmicos e incursionar en técnicas como la muongrafía, que es pionera en Colombia con el proyecto MuTe y el detector producto de esta tesis. El lector se encontrará con una estructura pensada para dar a conocer los pasos y problemáticas abordadas por los autores para dar completa solución a los retos encontrados durante el desarrollo del proyecto.

¹Grupo Halley de Astronomía y Ciencias Aeroespaciales, miembros del Grupo de Relatividad y Gravitación GIRG de la Universidad Industrial de Santander

Capítulo 1

Marco teórico

El propósito de esta sección es presentar la información necesaria para contextualizar el proyecto, revisar el estado del arte en materia de hodoscopios y las referencias que han sido seleccionadas.

1.1. Rayos Cósmicos

No se tiene idea precisa del origen y naturaleza de los rayos cósmicos (RC), dependiendo de su energía provienen de procesos físicos en el Sol (baja energía \approx Kiloelectrovoltios), en la galaxia (\approx Megaelectronvoltios) y extragalácticos (mayores a centenas de gigaelectrovoltios). Los de media y alta energía parecen estar asociados con cataclismos estelares tales como explosión de supernovas o kilonovas ocurridas por fusiones estelares. Por lo tanto, el estudio de la radiación cósmica aporta valiosas herramientas para avanzar en la comprensión de la dinámica del universo.

Los RC se clasifican principalmente en primarios y secundarios. Los llamados primarios se identifican al ser medidos antes de su ingreso a la atmósfera terrestre, su medición se denomina directa. Los RC secundarios son aquellas partículas que se producen luego de las interacciones de los RC primarios con la atmósfera o gases interestelares y su medición es llamada indirecta [10]. Al realizar mediciones con instrumentos terrestres, es posible estudiar el comportamiento del flujo de rayos cósmicos secundarios.

1.2. Muongrafía y los muones

La muongrafía es una técnica de construcción de imágenes basada en mediciones de la absorción de muones atmosféricos dentro de la materia. Gracias a su gran poder penetrante, el flujo de muones atmosféricos permite la inspección de cuerpos grandes que con técnicas convencionales sólo pueden ser estudiados superficialmente con resoluciones del orden de unos pocos cientos de metros.

El muón es una partícula elemental de la familia de los leptones, con carga negativa, similar al electrón, pero con una masa en reposo aproximadamente 200 veces mayor. Es una partícula inestable, pero con una vida media cercana a los 2.2 ms, la segunda más larga después del neutrón, esto permite que viaje algunos km antes de decaer. Los muones no presentan mayores interacciones y además su masa es suficiente para suprimir los efectos de pérdida de energía por radiación de frenado (bremsstrahlung). [2] [9]

Los muones llegan a la tierra producto de los rayos cósmicos primarios que impactan la atmósfera terrestre, estos RC primarios (principalmente protones) interactúan con los nucleones de la atmósfera produciendo otros hadrones, en su mayoría piones y kaones, los cuales decaen produciendo muones [10]. En la Figura 1 se muestra un esquema para ilustrar el fenómeno. A la altura del nivel del mar se espera un flujo de muones de 1 partícula min⁻¹ cm⁻² sr⁻¹¹. Para mayor información sobre partículas y su clasificación el lector puede dirigirse a la referencia [11, pag. 25-72].

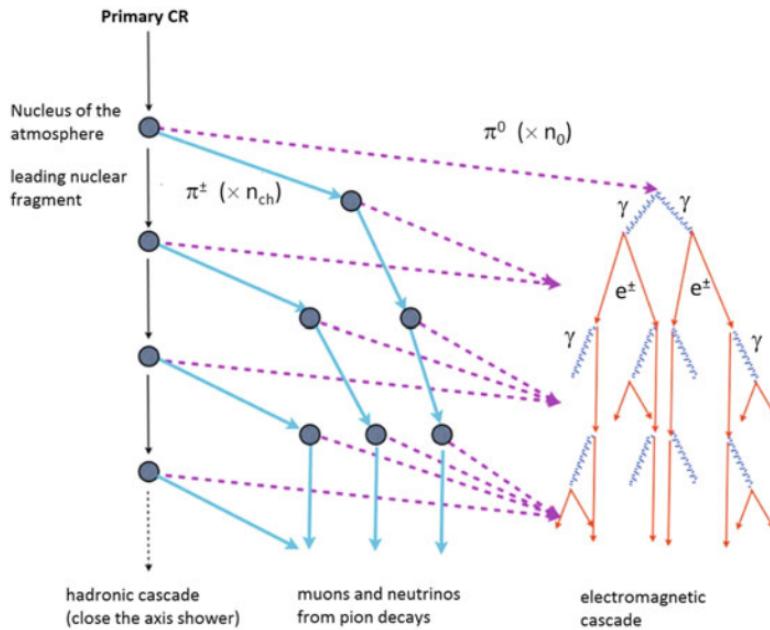


Figura 1: Esquema de la evolución de cascada de rayos cósmicos iniciada por hadrones. Fuente: [10]

La técnica de muongrafía se puede entender siguiendo dos caminos, dependiendo de la naturaleza y el tamaño del objeto bajo estudio. El primer acercamiento está basado en la medición del ángulo de dispersión que presentan los muones en un volumen pequeño, colocando dos detectores, uno en la parte inferior del objeto y el otro en la superior, esta medición es altamente sensible a materiales con numero atómico elevado y es usada por ejemplo para detectar Urano dentro de contenedores por cuestiones de seguridad [12].

El segundo acercamiento usa los mismos principios básicos de una radiografía médica estándar: medición de la atenuación de la radiación que fluye en una determinada dirección (muones o rayos X) cuando atraviesa materia (roca o músculos y tejido humano) usando un instrumento apto para la aplicación. En este caso se usa solo un detector ubicado en la superficie cercana al objeto a estudiar. La medición permite conocer la opacidad de la estructura comparando el flujo de muones después de atravesar el objeto con el flujo a cielo abierto en el mismo ángulo de visión.

1.3. Hodoscopios

Un hodoscopio es un dispositivo que traza el camino de una partícula cargada mediante un grupo de subdetectores de partículas que proporcionan una información posicional y

¹sr: siglas de *steradian*, un estereoradian es una unidad de ángulo sólido.

direccional precisa. La palabra proviene del griego *hodos*, que significa camino y *skopos*, que significa observador [13].

Para determinar cuál es la posición donde se produce la interacción de la partícula con el detector se construye un Área Activa (AA) de detección con una forma y tamaño establecidos según los requerimientos de la aplicación. El AA suele estar pixelada a modo de matriz o bien confeccionada con distintos planos o zonas de detección. Así, el sistema queda dividido en distintos sub-detectores, cada uno de los cuales proporciona una respuesta distinta (señales con diferente amplitud) ante la incidencia de radiación [10]. Por ejemplo, en la Figura 2 se muestra como se activa un pixel del hodoscopio cuando es atravesado por una partícula cargada.

En determinados estudios puede ser interesante, además de la posición, conocer la dirección de la partícula. En estos casos, el diseño del sistema consta de dos o más planos de detección. Obteniendo la posición de interacción de la partícula con cada plano, se puede calcular el ángulo entre ambas posiciones y determinar su dirección [13], en la Figura 3 se muestra un hodoscopio con dos planos de detección, el mapeo en cada plano y la dirección de la partícula que es determinada usando el vector r y los ángulos que este forma con el detector, indicados como α , β y γ en el eje de coordenadas donde e_1 , e_2 y e_3 , son los vectores unitarios en las direcciones de los ejes X, Y y Z, respectivamente. Estos ángulos internos del detector se relacionan geométricamente con los ángulos cenital y azimutal (θ y φ) que serán finalmente los que determinan la dirección de la partícula. Adicionalmente se muestra la separación entre paneles de detección (D) que determinará el ángulo máximo en el que una partícula puede ser detectada por los dos paneles del detector (ángulo de aceptancia) [1].

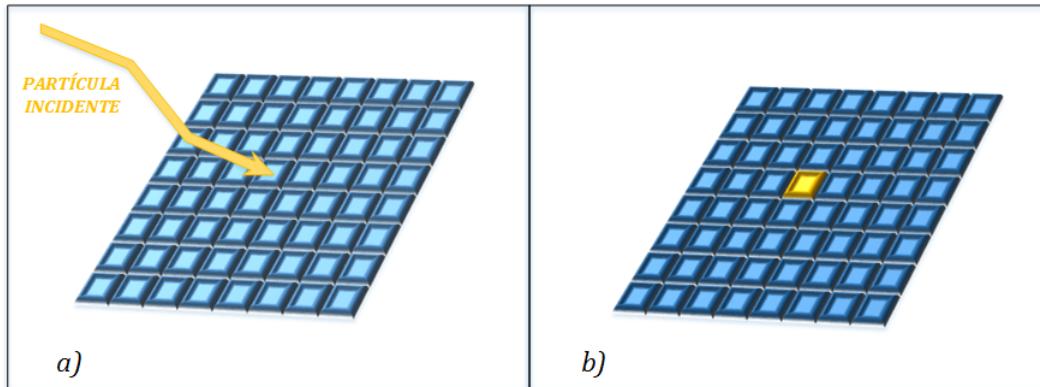


Figura 2: Ejemplo de sistema de detección que proporciona el punto de incidencia de una partícula. Cada cuadrado representa un subdetector. En la figura a) la partícula incidente atraviesa la zona central del detector, en la figura b) El subdetector proporciona la ubicación del píxel activado por la incidencia de la partícula (color amarillo).

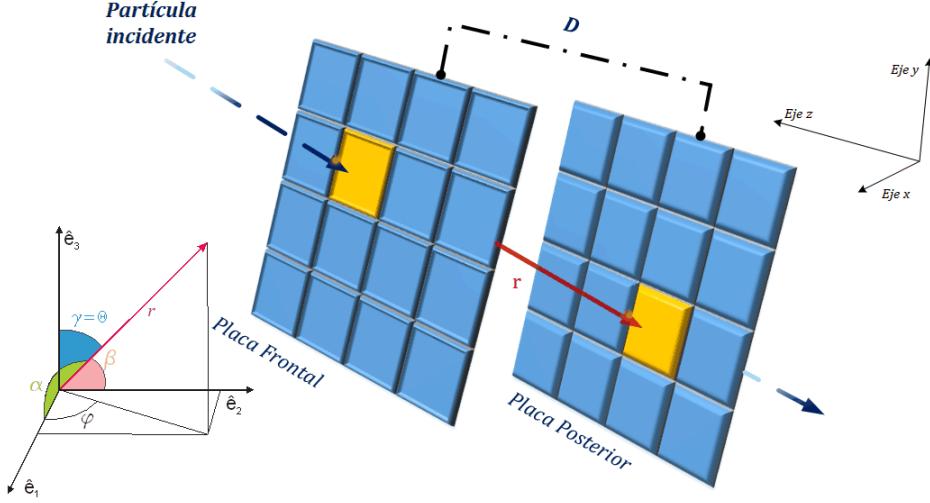


Figura 3: Hodoscopio con dos planos de detección, el mapeo en cada plano (pixel amarillo) y la dirección de la partícula que es determinada usando el vector r (color vino) y los ángulos que este forma con el detector mostrados como α , β y γ en el eje de coordenadas donde e_1 , e_2 y e_3 , son los vectores unitarios en las direcciones de los ejes X, Y y Z, respectivamente. Los ángulos, cenital θ y azimutal φ serán los que finalmente determinan la dirección de la partícula. D es la distancia entre paneles que influye en el ángulo de aceptancia del detector.

1.4. Materiales Centelladores

Un material centellador es aquel que centellea (exhibe luminiscencia) al ser atravesado por radiación ionizante. El material absorbe parte de la energía incidente y la reemite en forma de luz, típicamente en el espectro visible o en los alrededores del mismo.

La emisión de luz se rige por dos fenómenos. La fluorescencia, donde el proceso de luminiscencia es rápido (ns a μs) y la fosforescencia que es un proceso de producción de luminiscencia lento (μs a ms, o incluso horas), en la práctica solo la fluorescencia es útil para detectar radiación ionizante [14].

Los materiales centelladores se dividen principalmente en dos familias. Por una parte se encuentran los inorgánicos que son cristales de haluros alcalinos, tienen en general alta densidad y alto número atómico Z, por lo que son principalmente empleados para la detección de partículas γ y en general, no se emplean en la detección de partículas cargadas.

Por otro lado, los centelladores orgánicos pertenecen a la clase de los compuestos aromáticos. Son moléculas planares construidas con anillos de benceno como el tolueno y antraceno. Se forman combinando una sustancia en mayor concentración, el solvente, y uno o varios componentes en menor concentración, los solutos, que generalmente son los responsables del centelleo. Se utilizan principalmente para detección de partículas β y electrones rápidos. Se pueden encontrar en forma de cristales, soluciones líquidas, plásticos centelladores y en estado gaseoso [15] [16].

A continuación se describen algunas generalidades del plástico centellador utilizado en el detector:

1.4.1. Centelladores plásticos

Los centelladores plásticos son ampliamente usados en física nuclear y de altas energías. Estos constan de un plástico base con un material centellador disuelto. Los plásticos base

mas utilizados son el poliestireno, el polimetilmetacrilato (acrílico) y poliviniltolueno.

El material centellador se conforma con una concentración del orden de 1 % en peso del centellador primario (por ejemplo, PPO) y de 0,03 % en peso del corredor de longitud de onda (WLS por sus siglas del inglés "wavelength shifter") (por ejemplo, POPOP)¹. Cuando una partícula ionizante atraviesa el centellador, el material primario emite en el ultravioleta (UV). El WLS absorbe los fotones UV y reemite en una longitud de onda más larga. Según lo demande la aplicación, se puede agregar un segundo WLS, para ajustar el espectro de la luz de centelleo con la respuesta espectral del foto-detectador. Algunos ejemplos de barras de plástico centellador fabricadas por Fermilab [17] se muestran en la Figura 4a y en la Figura 4b se muestra los espectros de absorción y emisión de fluorescencia para PPO y POPOP.

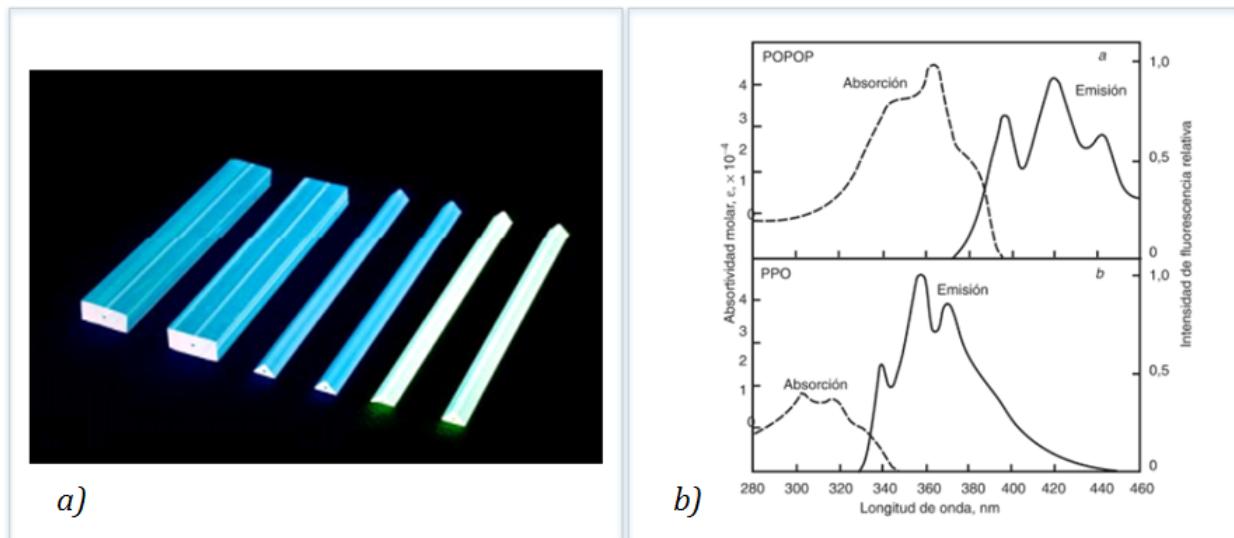


Figura 4: a) Barras centelladoras plásticas fabricadas por Fermilab, fuente: [18]; b) Espectros de absorción y emisión de fluorescencia: a. del PPO, b. del POPOP, fuente: [19, pag. 519]

1.5. Detectores de Centelleo

Cuando una partícula cargada atraviesa la materia, disipa su energía al ionizar y/o excitar las moléculas del material. Esta ionización y/o excitación es la base la mayoría de instrumentos utilizados para la detección y medición de dichas partículas [16]. Existe gran variedad de instrumentos detectores de radiación ionizante, en este apartado se revisa la teoría básica de detectores de centelleo.

La detección de la radiación ionizante por luz de centelleo es una de las técnicas más antiguas registradas [15]. La propiedad de centelleo fue descubierta por Sir William Crooks en 1903, estudiada junto a Erich Regener durante los años 1908 a 1930 y observada durante sus experimentos al bombardear una pantalla de sulfuro de zinc con rayos α , estos primeros intentos fueron registrados con el ojo humano como detector [16].

El principio de medición de los detectores de centelleo ha permanecido esencialmente sin cambios. La función de un centellador es doble: primero, generar luz causada por la excitación de sus moléculas; y, segundo, debe transferir esta luz ya sea directamente o a través de una guía de luz a un receptor óptico (fotomultiplicador, fotodiodo, etc.) [20]. En la Figura 5 se

¹PPO centellador primario 2,5-difelinoxazol y POPOP centellador primario 5-feniloxazol [19].

ilustra el proceso de centelleo en las barras usadas en el proyecto DIAPHANE [21]. La luz que emite el plástico centellador es de color azul (photon bleu), la fibra óptica recolecta la luz y la reemite en color verde (photon vert) y actúa como guía de luz para dirigir el fotón hasta el fotomultiplicador. Las paredes del centellador están cubiertas con un reflector (basado en TiO₂) para evitar pérdidas de fotones.

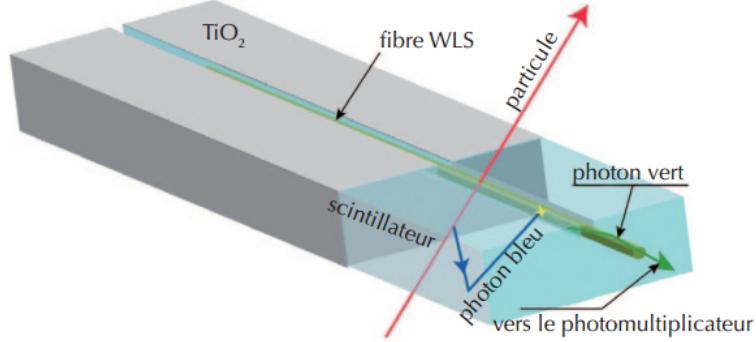


Figura 5: Proceso de centelleo en las barras usadas en el proyecto DIAPHANE [21]. La luz que emite el plástico centellador es de color azul (photon bleu), la fibra óptica reemite en color verde (photon vert) y dirige el fotón hasta el fotomultiplicador. El compuesto TiO₂ es una cubierta reflectora para evitar pérdida del fotón generado. Las siglas WLS provienen de "wavelength shifter". Fuente: [22]

1.6. Foto detectores de alta sensibilidad (Foto multiplicadores de Silicio - SiPM)

El SiPM (*silicon photomultiplier*) pertenece a la familia de los MPPCs (*multi-pixel photon counter*). Es un dispositivo opto-semiconductor que usa múltiples píxeles con diodos de avalancha APD (*avalanche photodiode*) operados en modo Geiger. Cuando la tensión de polarización aplicada a un fotodiodo de avalancha es configurada en un valor mayor que la tensión de ruptura, una salida saturada (descarga Geiger) es producida para una entrada específica de luz. La condición donde el APD opera a ese nivel de tensión es llamado “modo Geiger”. Una vez que la descarga Geiger es iniciada, continua tanto tiempo como el campo eléctrico en el APD sea mantenido. Para detener la descarga Geiger es necesario un elemento externo al APD que estabilice el valor de su tensión, para esto se usa la técnica del “resistor de quenching” conectado en serie con el APD para detener rápidamente el crecimiento de la avalancha dentro del mismo. Por tanto, la forma de onda de salida será un pulso con un tiempo de subida muy corto causado por la descarga Geiger y un tiempo de decaimiento o descarga relativamente largo debido al proceso de detención de la avalancha Geiger, hecho por la resistencia de quenching¹ [Figura 7b].

La estructura básica (un píxel) es la combinación de un APD en modo Geiger y una resistencia de quenching, en la Figura 6a se muestra la estructura básica de un MPPC, un gran número de píxeles conectados en paralelo y arreglados en dos dimensiones. Cada píxel en un MPPC entrega un pulso de la misma amplitud cuando detecta un fotón. Los pulsos generados por detección de múltiples píxeles se superponen en un único pulso de salida, teniendo así una amplitud proporcional al número de fotones detectados simultáneamente. En la Figura 7b se muestran los pulsos de salida característicos de un MPPC obtenidos al ser iluminado con un haz de luz discreto al nivel adecuado para contar fotones y usando el esquema mostrado en la Figura 7a. Se observa que los pulsos están separados entre sí acorde al número de fotoelectrones detectados (1 p.e, 2 p.e y 3 p.e) [23]. En el caso de la

presente propuesta, el MPPC que usado es el S13360-1350CS de Hamamatsu [24][Figura 6a] aplicado para detectar el centelleo, de manera que el conteo de fotones será relevante para configurar el umbral de discriminación óptimo, es decir, durante el proceso de caracterización del instrumento (fuera del alcance del proyecto). Para mayor información sobre los SiPM el lector puede revisar las referencias [25] [26].

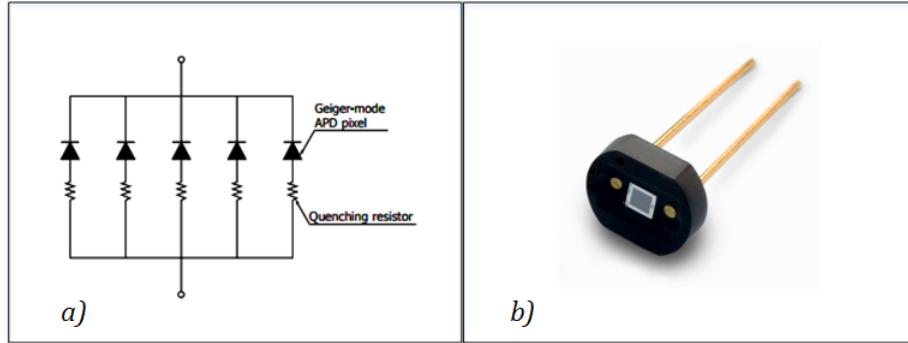


Figura 6: a) Estructura simplificada del SiPM, fuente: [23] y b) MPPC de la serie S13360 de Hamamatsu, fuente: [24]

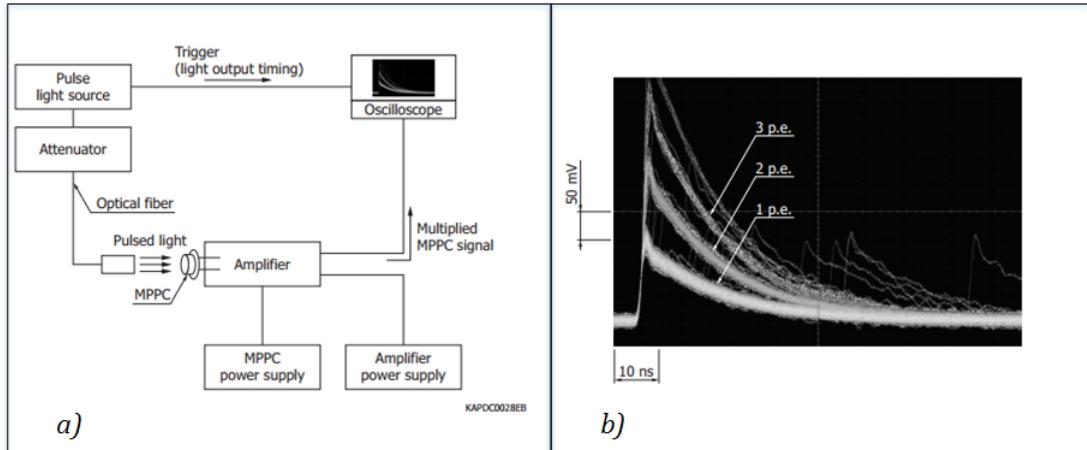


Figura 7: a) Diagrama de bloques para evaluar un MPPC usando osciloscopio y b) Forma de pulso cuando se amplifica 120 veces, las diferentes curvas corresponden a la cantidad de fotoelectrones detectados (p.e). Fuente: [23]

1.7. Estado del arte

A continuación se presenta un breve recorrido por dos proyectos con gran trayectoria en la muongráfía. Existen otros proyectos que pueden ser de interés para el lector y que puede revisar en las referencias [27] [12] [4] [5] [28].

1.7.1. Proyecto Mu-Ray

El mayor objetivo de la colaboración MU-RAY es la construcción de un telescopio de muones con una resolución angular elevada, adquisición de datos en tiempo real y área activa

¹Quenching: palabra del idioma inglés que significa terminar o extinguir

(AA) amplia, que sea capaz de funcionar en las zonas aledañas a un volcán. El proyecto MU-RAY usa barras centelladoras con forma triangular[Figura 8a] que le dan al telescopio una resolución espacial elevada en comparación al uso de barras con sección trasversal rectangular. La luz de centelleo es recolectada por fibras ópticas y leída por SiPM's. El telescopio de muones está compuesto por dos módulos X-Y principales con un área sensible (AA) de 4 m^2 , un módulo auxiliar es usado para realizar mediciones de posibles eventos en fondo ocasionados por cascadas de rayos cósmicos, permitiendo la medición del tiempo de vuelo del muon¹. La electrónica de adquisición está basada en el chip SPIROC (SiPM Read-Out Chip) ASIC, este chip ha sido desarrollado por el grupo OMEGA², específicamente para lectura de SiPM a una baja potencia, diseñado para entregar información de tiempo y amplitud de digitalización de cada uno de sus 36 canales. La tarjeta donde se encuentra este chip (*slave board*) es controlada por una tarjeta madre que se encarga de la lectura y transferencia de datos. En modelos actuales del telescopio, el chip SPIROC ha sido actualizado con el chip EASIROC que tiene 32 canales.

Este proyecto fue inicialmente ideado para el volcán Vesuvius en la bahía de Nápoles (Italia) por el alto riesgo de erupción y antecedentes de dicho volcán. La transmisión de datos en ese volcán se realiza usando los recursos tecnológicos del *Vesuvian Observatory*. En la Figura 8b se muestra un panel del detector Mu-Ray y en la Figura 8c se muestra la estructura modular, la dirección puede ser ubicada usando la base giratoria de la estructura. Algunos resultados obtenidos en el monte Vesuvius son observados en la Figura 9. Para mayor información, el lector puede dirigirse a las referencias [9] [7] [3] [29].

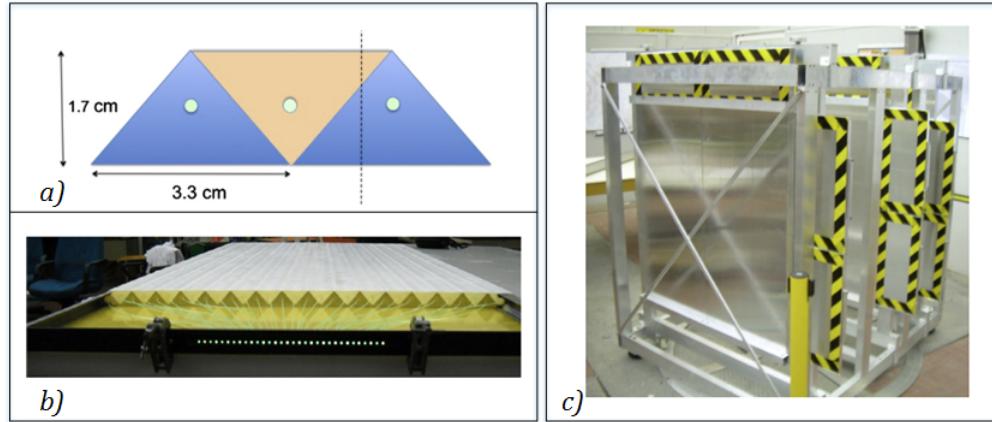


Figura 8: a) Barras de sección transversal triangular usadas en el proyecto Mu-Ray, fuente: [7]; b) Vista de un modulo con 32 barras centelladoras, la fibra óptica y su conector es visible; c) La estructura del detector con los tres planos X-Y montados. Para orientar la plataforma se usa la base giratoria visible en la parte inferior de la imagen,fuente: [9] [3].

¹Tiempo de vuelo del muón: tiempo que tarda el muón en atravesar el detector

²OMEGA (Organisation de Micro-Electronique Génrale Avancée)

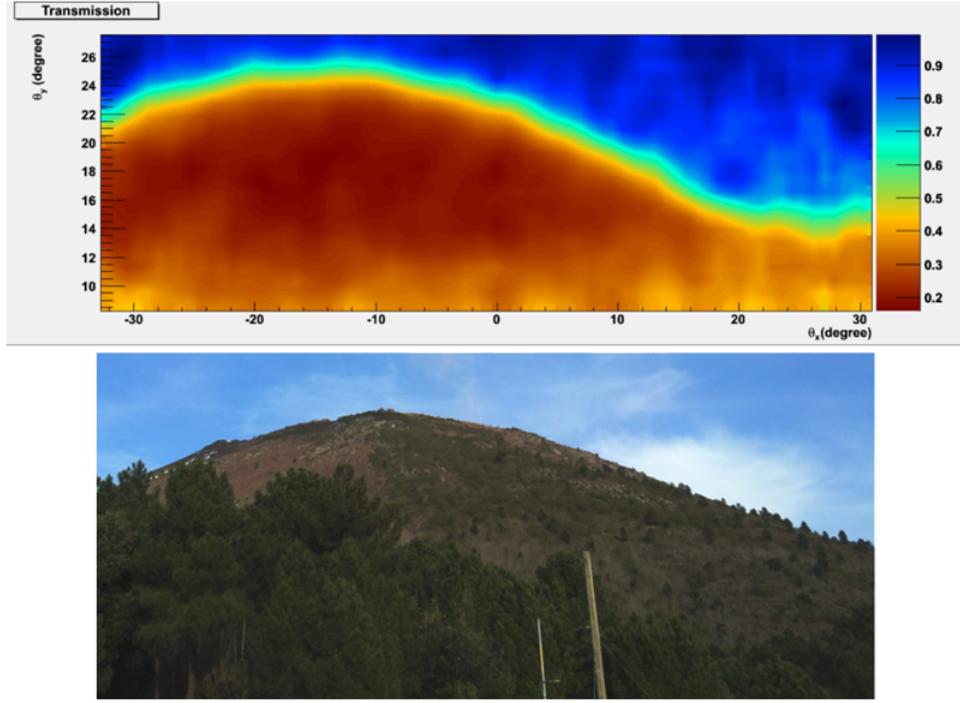


Figura 9: En la parte superior, un histograma de transmisión del Mt. Vesuvius después de una semana de instalación del detector. En la parte inferior, una foto del Mt. Vesuvius tomada desde el punto de observación del detector. Fuente: [9]

1.7.2. Proyecto DIAPHANE

DIAPHANE es el primer proyecto europeo de tomografía aplicada a la volcanología. Comenzó en 2008 con la colaboración de tres instituciones francesas: IPG Paris, IPM Lyon y Géosciences Rennes para promover la muongrafía en las comunidades científicas *French Earth Science y Particle Physics*. Los primeros objetivos del proyecto fueron realizar elecciones tecnológicas para el telescopio de muones y definir un diseño adecuado para las condiciones geográficas difíciles de los volcanes en las Antillas Menores, en particular en las islas de Guadalupe y Martinica. El diseño del telescopio usa centelladores plásticos de sección transversal rectangular que forman píxeles, fibras ópticas, fotomultiplicadores y electrónica de lectura que cuenta con un módulo de sincronización de reloj comandado por un GPS. La forma y el diseño mecánico tienen límites en peso y construcción de módulos aptos para las normas de transporte, ya que para acceder a algunas de las zonas de detección de los volcanes se debe usar helicóptero. Un detector estándar comprende tres planos de detección XY autónomos, con bajo consumo de potencia y registro automático de la estampa de tiempo. La construcción de eventos es quasi-online con procesos de análisis de coincidencias vía software y transferencia de datos vía WiFi, accesibles directamente de forma remota. El detector es alimentado a través de paneles solares para hacerlo autónomo [22].

Para mayor información, el lector puede referirse a las referencias: [8] [21] [22]. En la Figura 10 se muestra un detector del proyecto DIAPHANE instalado en el lado sur del volcán La Soufrière y en la Figura 11 se muestra el resultado obtenido en el mismo volcán con una resolución de 20 metros.

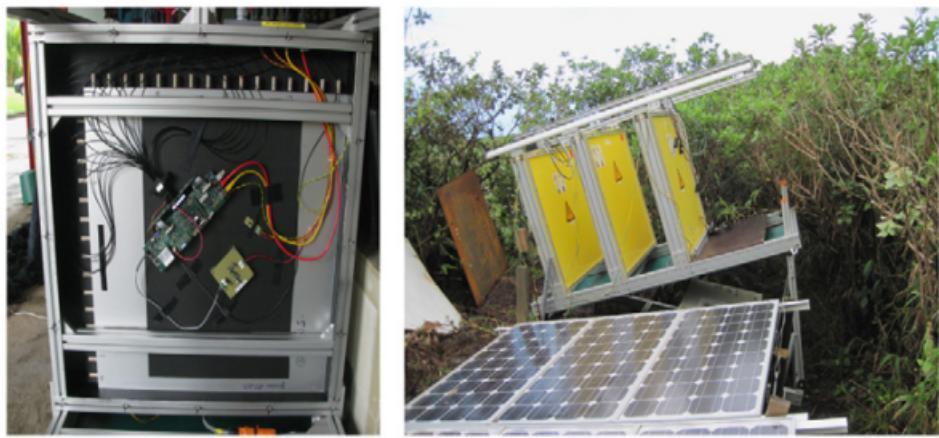


Figura 10: A la izquierda: Plano de detección con 16×16 barras centelladoras, conectadas mediante fibras ópticas a los fotomultiplicadores y al sistema R/O. A la derecha: un detector de 3 planos instalado en La Soufrière (Zona Sur).Fuente: [21]

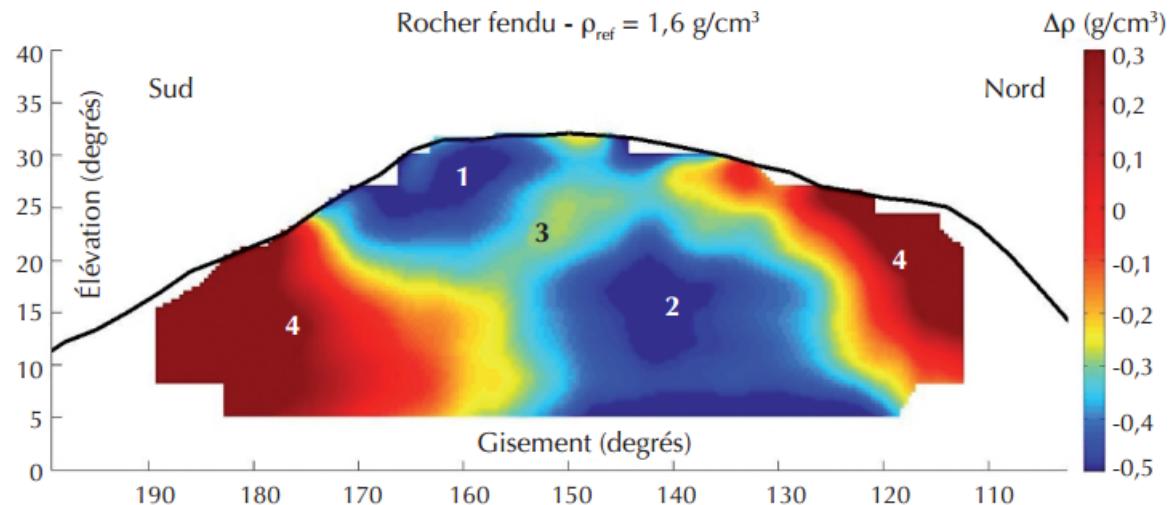


Figura 11: Radiografía de la densidad media de La Soufrière de Guadalupe en el plano norte-sur, obtenida con el detector DIAPHANE.Fuente: [22]

Capítulo 2

Metodología y resultados parciales

A continuación se describe la metodología del diseño planteado en esta tesis. El instrumento construido es un detector de centelleo formado por doce barras de plástico centellador distribuidas en dos paneles y organizadas en dos planos X-Y de tres barras que forman 9 píxeles. La luz generada por la interacción de una partícula cargada con cada una de las barras es recolectada por una fibra óptica, la cual, en uno de sus extremos esta acoplada a un fotomultiplicador de silicio (SiPM) que convierte la señal lumínica en una señal eléctrica. Posteriormente, un sistema electrónico acondiciona, discrimina, digitaliza y registra los eventos asociados a estas partículas que atraviesan el instrumento. Estos datos junto con el tiempo de ocurrencia, geolocalización del detector, presión atmosférica y temperatura, se agrupan en un archivo con formato de alta portabilidad y se entregan para su posterior análisis. Es necesario recalcar que este proyecto de investigación está limitado a la entrega del sistema electrónico que permite generar el archivo de datos, este archivo no será analizado ni interpretado por los autores.

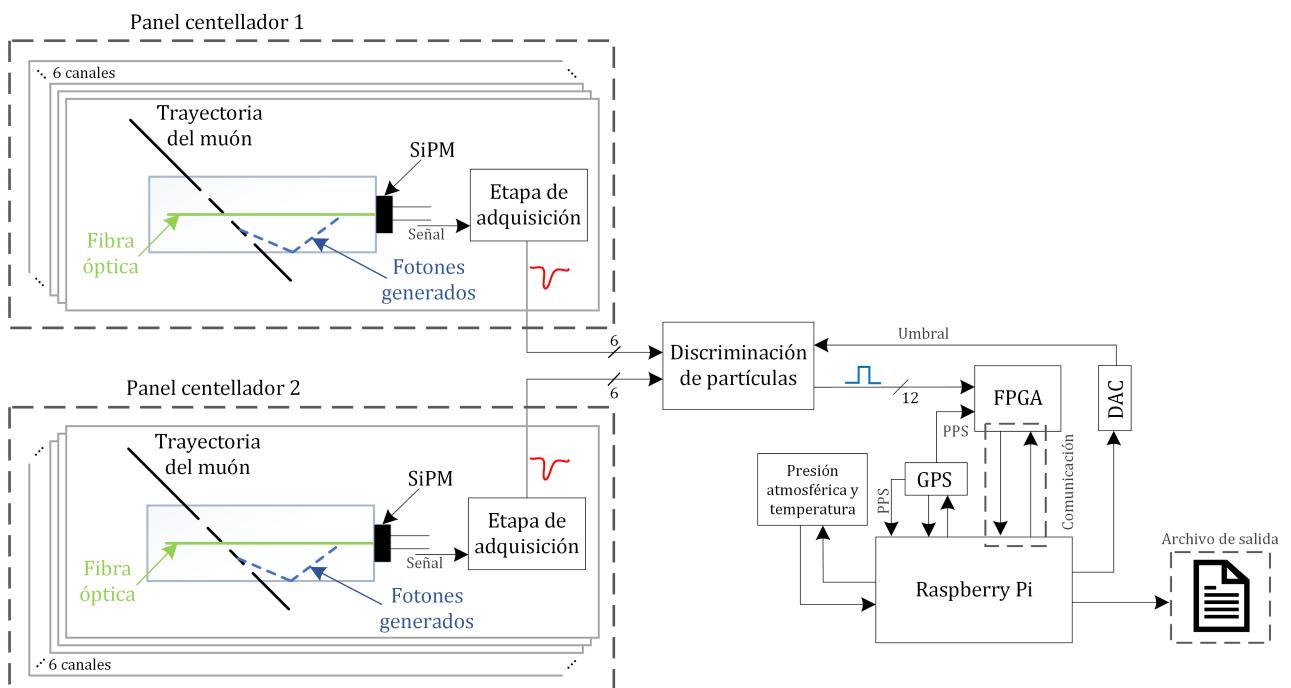


Figura 12: Esquema General del proyecto

En la Figura 12 se muestra el esquema general del proyecto producto de esta tesis, para facilidad de presentación de metodología y resultados parciales obtenidos, se divide este esquema general en dos grandes etapas que abarcan el sistema analógico y el sistema digital por separado; seguidamente se ahondará en cada uno de ellos.

2.1. Interfaz Analógica

La etapa analógica es la primera parte del detector y abarca los subsistemas contenidos en el recuadro amarillo mostrado en la Figura 13, esta conformada por la “etapa de adquisición” y la “discriminación de partículas”, en este apartado se encontrará con la metodología de implementación y los resultados parciales de esta interfaz.

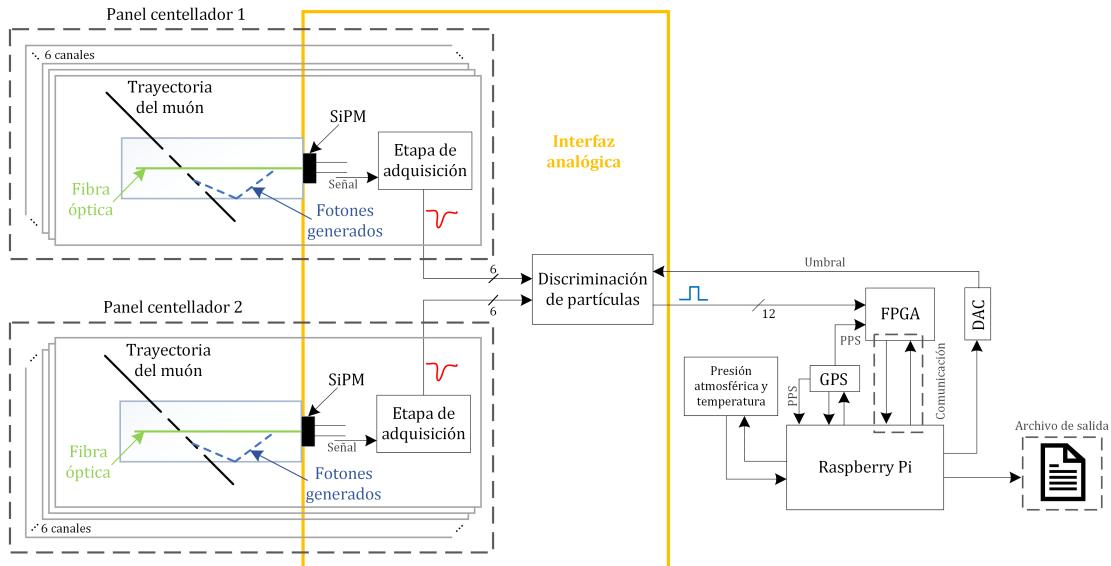


Figura 13: Esquema general del proyecto con énfasis en la etapa analógica

2.1.1. Etapa de adquisición

La etapa de adquisición se asocia a las tarjetas de circuito impreso en las que funcionan los foto-multiplicadores de silicio (SiPM). Esta etapa es el primer tratamiento que se le da a la señal obtenida del sensor principal (SiPM) y fue entregada a los autores completamente funcional, de manera que, se hizo muy importante analizar su diseño para conocer los requerimientos de la siguiente etapa y plantear mejoras en cuanto a distribución y cableado dentro del panel. A continuación se presentan en detalle los análisis, diseños y ensambles que se realizaron para esta etapa.

2.1.1.1. Caracterización del circuito de adquisición

Inicialmente se realizó un análisis del diseño electrónico para caracterizar esta etapa y determinar parámetros de la señal eléctrica que se va a tratar en la siguiente parte. En la Figura 14 se muestra el circuito correspondiente a la etapa de adquisición; el diodo D_1 representa al SiPM, y la fuente HV (*High Voltage*) corresponde a la fuente de polarización programable dedicada a los SiPM (56V) del fabricante *Hamamatsu*.

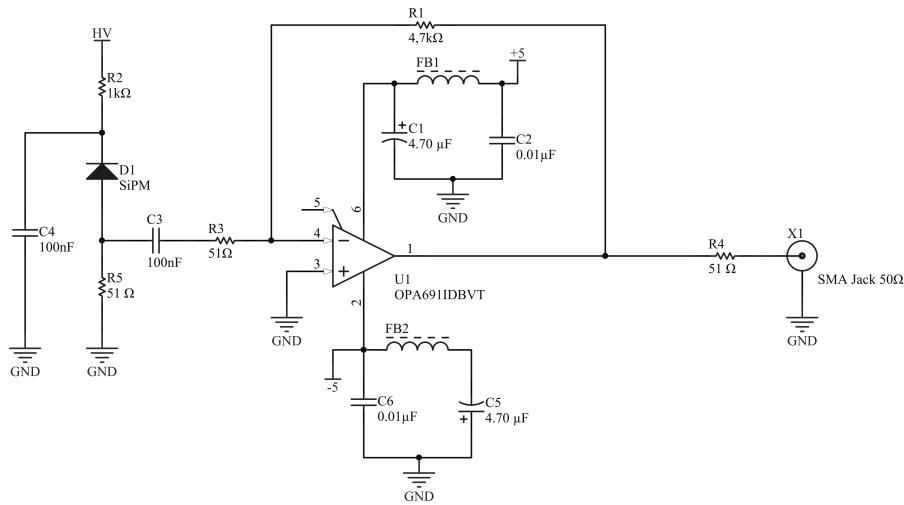


Figura 14: Circuito de adquisición

En la parte izquierda del esquemático de la Figura 14 se encuentra el filtro de alimentación, que se utiliza para eliminar las componentes de altas frecuencias que pueda provenir de la fuente Hamamatsu, la función de transferencia de este filtro se puede observar en la ecuación 2.1, con esta función y el valor de R_2 y C_4 se analizó el ancho de banda del filtro y la respuesta a un escalón unitario (este ocurre al momento de encender la fuente) con las funciones “bode” y “step” de MATLAB, las gráficas se pueden observar en la Figura 15.

$$H(s) = \frac{1}{s + \frac{1}{R_2 C_4}} \quad (2.1)$$

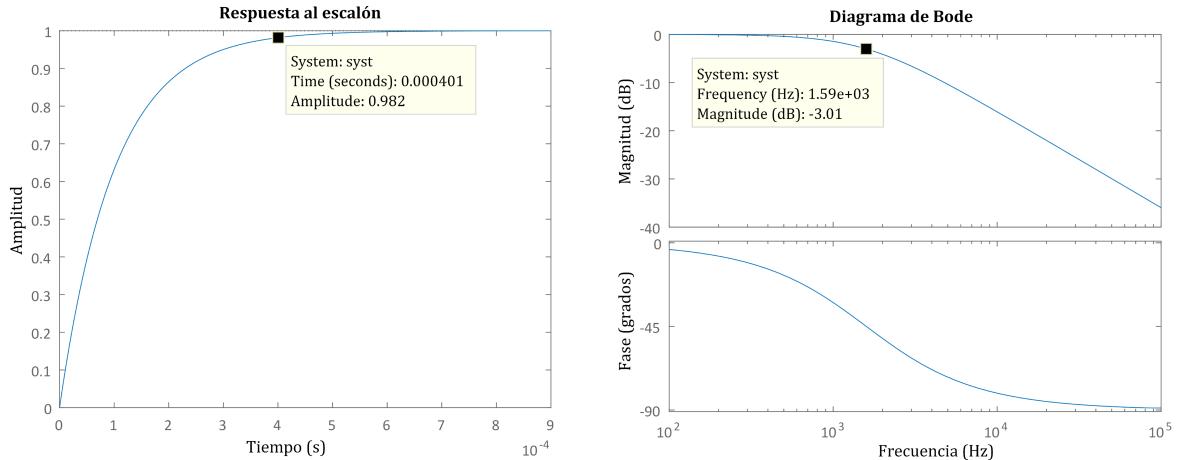


Figura 15: A la derecha, el diagrama de bode del filtro pasa bajas con $R_2 = 1k\Omega$ y $C_4 = 100nF$. A la izquierda, la respuesta del filtro al escalón unitario.

En el diagrama de bode de la Figura 15 se puede apreciar que la frecuencia de corte se encuentra en $1,59kHz$, de manera que no se verán variaciones de alta frecuencia en la polarización del SiPM. Por otro lado, la gráfica de la respuesta al escalón unitario entrega la información del tiempo que tarda el sistema (filtro pasa-bajas R_2C_4) en llegar al voltaje impuesto por la fuente *Hamamatsu*, este tiempo es de aproximadamente de $400\mu s$ y debe ser considerado para comenzar a registrar datos validos del SiPM.

Al avanzar en el análisis de los elementos del circuito, se determinó la función de transferencia del filtro pasa altas de entrada al amplificador operacional (ecuación 2.2) que, a su vez, se refiere a la corriente por el capacitor C_3 en función de la corriente por el SiPM; Z_3 representa la impedancia formada por C_3 y R_3 .

$$\frac{I_{Z_3}}{I_{SiPM}} = \frac{C_3 R_5 s}{C_3 (R_5 + R_3) s + 1} \quad (2.2)$$

$$V_{out} = -R_1 I_{Z_3} \quad (2.3)$$

Llegados a este punto, la tensión de salida del operacional (2.3) dependerá de la corriente I_{Z_3} y del valor de la resistencia de realimentación R_1 elegida. En efecto, se llega a la forma característica de la configuración usada, un *derivador*, esta configuración es ideal para amplificar exclusivamente el cambio de corriente en el SiPM, rechazando las componentes de baja frecuencia o corriente continua que provienen de la corriente inversa en el SiPM; en la figura 16 se observa el filtro pasa-altas modelado con la ecuación 2.2, resaltando la frecuencia de corte ($15,6\text{kHz}$). Finalmente, cabe anotar que la resistencia R_4 se coloca para acoplar impedancias con las líneas de transmisión elegida.

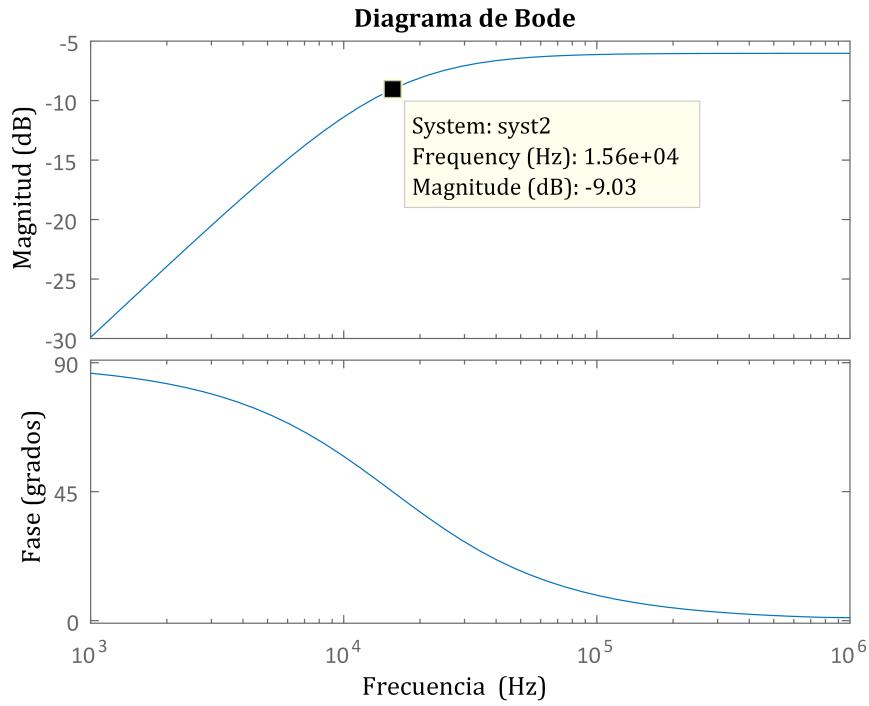


Figura 16: Filtro pasa-altas característico de la configuración derivativa, usada en el circuito de adquisición

2.1.1.2. Caracterización señal de salida etapa de adquisición

Inicialmente, se buscó comprender el comportamiento en frecuencia de la señal de salida de la etapa de adquisición, para ello, se registró la señal correspondiente a un evento asociado al paso de una partícula cargada por un canal del detector y con la ayuda de MATLAB se le aplicó la transformada rápida de Fourier, FFT, (Ver Figura 17), con la que se puede deducir el ancho de banda de la señal analizada; esta información es muy útil para la elección de componentes en la siguiente etapa (discriminación de partículas).

La señal roja en la figura 17 se obtuvo del osciloscopio a $500MS/s$, permitiendo que la FFT, señal azul, tenga una mayor aproximación a su forma continua. En la misma figura se aprecia un recuadro amarillo que contiene el valor que se usó como ancho de banda de la señal analizada ($20MHz$).

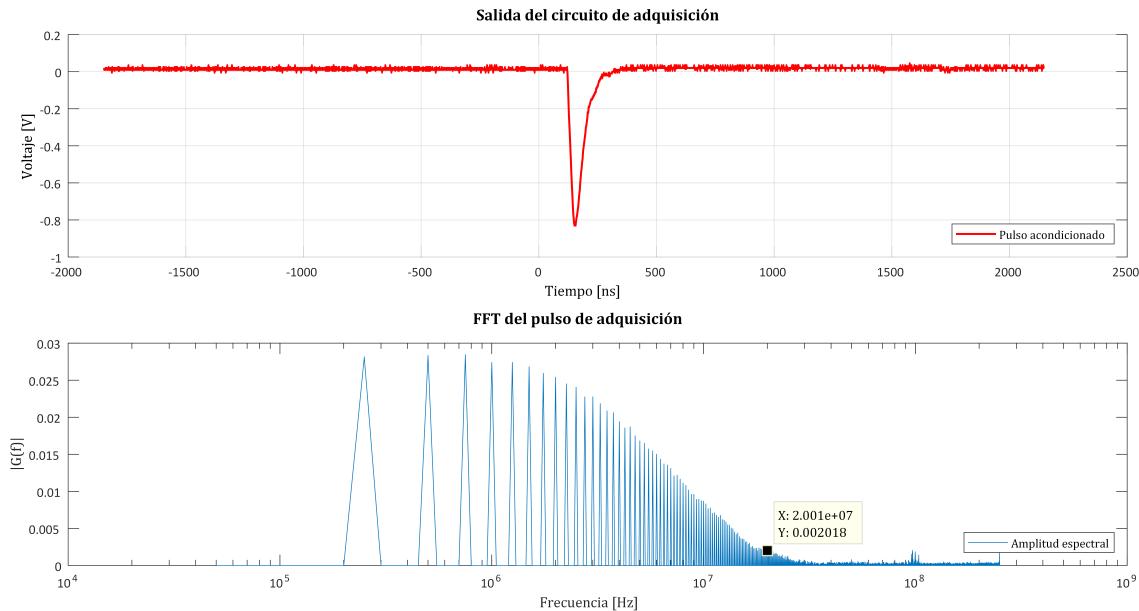


Figura 17: En la parte superior, el pulso acondicionado (salida de la etapa de adquisición) y en la parte inferior: su espectro en frecuencia para $R_1 = 4,7k\Omega$

Continuando con el análisis de la señal de salida de esta etapa, se observó su comportamiento en tiempo. En la Figura 18 se aprecia la caracterización temporal del pulso de adquisición; este análisis permitió obtener criterios de diseño (ganancia máxima y *slew rate*) para la siguiente etapa de discriminación de partículas.

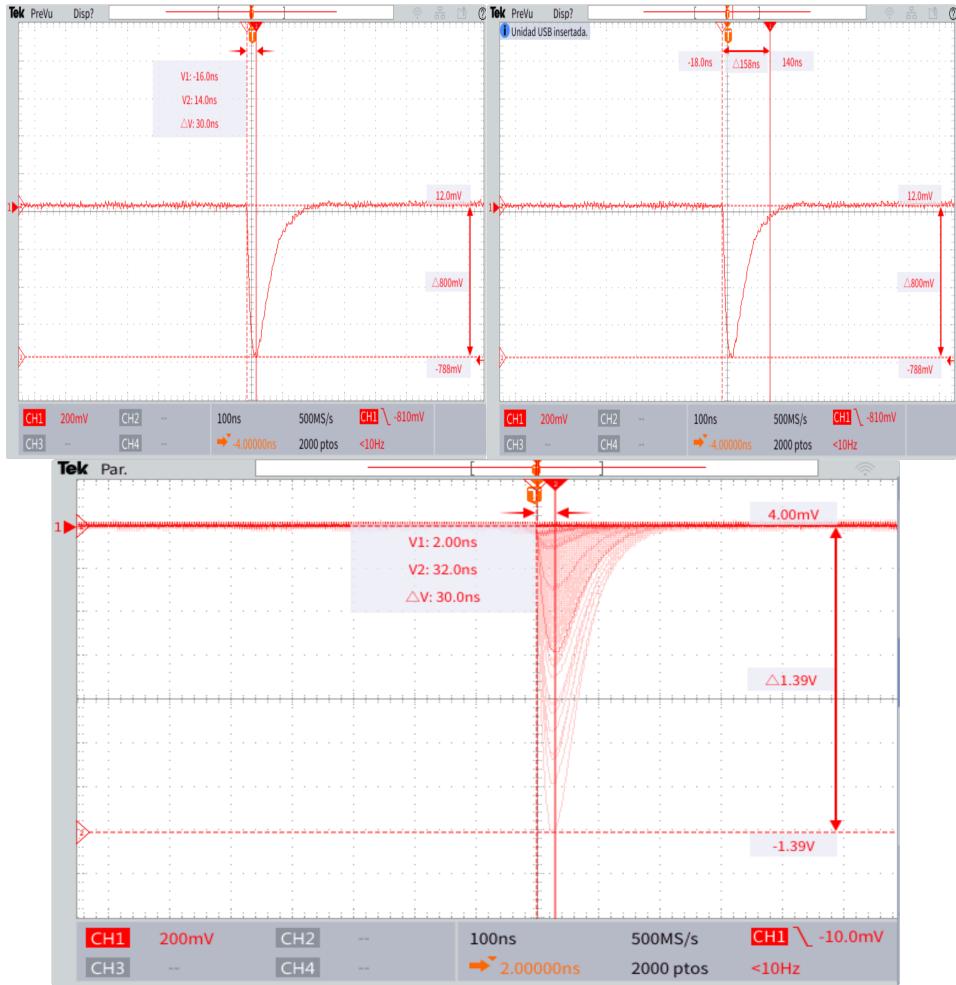


Figura 18: En la parte superior izquierda se muestra el tiempo de bajada de un pulso; en la parte superior derecha la duración total del pulso y su amplitud; en la parte inferior se muestra una toma de datos con persistencia infinita, resaltando la amplitud máxima observada y el tiempo de bajada de las señales medidas.

Resulta provechoso resaltar en la Figura 18 que la amplitud de los pulsos es variable y depende de la cantidad de energía depositada por la partícula que incida en el detector. También se observa que el tiempo de bajada de la mayoría de los pulsos es igual, esta es una característica dada por el conjunto barra centelladora, fibra óptica y SiPM, es decir, una característica propia del detector.

2.1.1.3. Construcción del segundo panel centellador

Anteriormente se explicó que la etapa de adquisición se resume en las tarjetas de circuito impreso que funcionan dentro de los paneles centelladores, así que, para su construcción se realizó un diseño pensado para la optimización del cableado que distribuye la alimentación, con el fin de mejorar el método de ensamble de los paneles centelladores; en la Figura 19 se puede apreciar el diseño y el resultado final de las tarjetas.

Seguidamente, se fabricaron y ensamblaron 6 canales que conforman el panel centellador 2, mostrado en la parte superior izquierda de la Figura 20, en dicha figura también se aprecia la optimización lograda con el cableado de alimentación al comparar los dos paneles. Con el fin de reducir la cantidad de cables dentro del panel, se agregaron tarjetas impresas que hacen puentes de alimentación entre las tarjetas principales; en la parte inferior de la Figura 20 se

observa el panel centellador 2 en proceso de ensamble con énfasis en las tarjetas mencionadas.

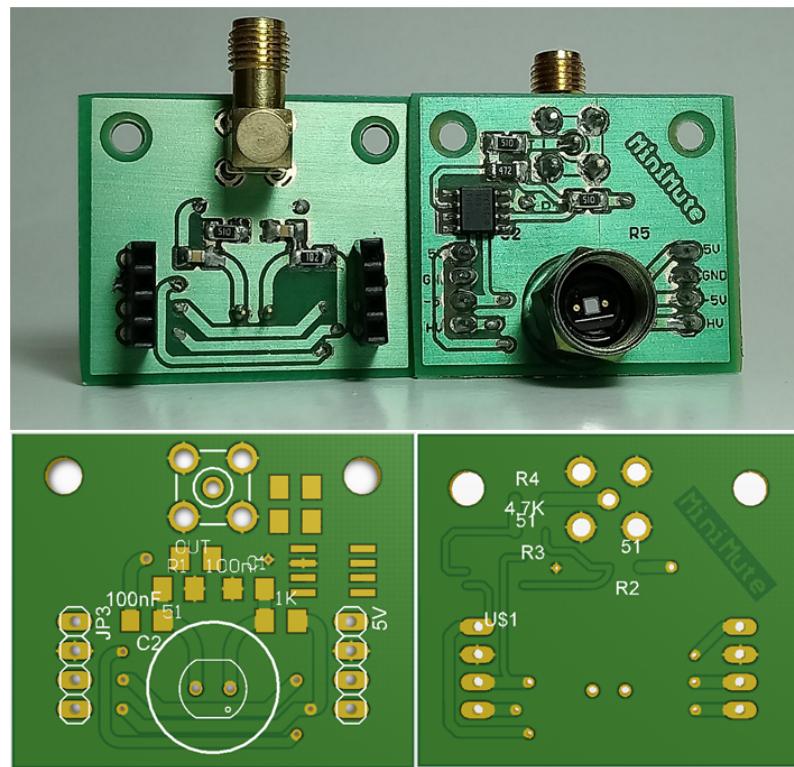


Figura 19: *Fotografía tarjetas de adquisición, en la parte superior se observa la implementación de las tarjetas y en la parte inferior el 3D del diseño planteado correspondiente al esquema de la Figura 14*

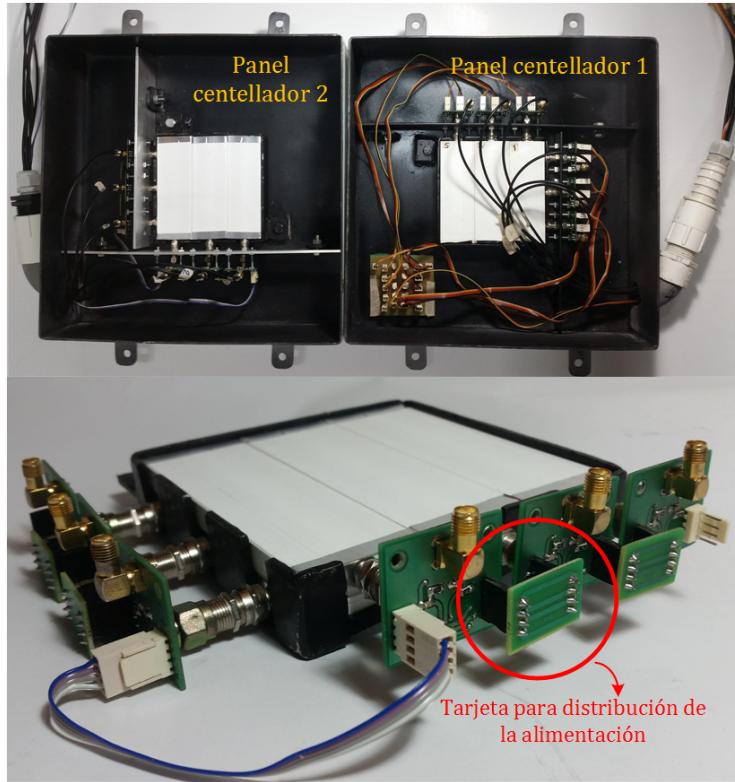


Figura 20: *Fotografía paneles centelladores, en la parte superior los paneles en sus cajas y en la parte inferior un acercamiento de la electrónica de adquisición*

2.1.2. Discriminación de partículas

Avanzando en el desarrollo del proyecto, entramos en la siguiente etapa analógica (discriminación de partículas), en donde se desarrolló una interfaz que permite discriminar la amplitud del pulso adquirido al interpretarlo como una señal binaria que indica presencia o ausencia de partículas cargadas que atravesen los píxeles del detector. Para ello, se hizo necesario convertir las señales eléctricas con duración del orden de centenas de nanosegundos y variaciones de nivel en milivoltios, provenientes de la etapa de adquisición, en cambios de nivel digital (señal binaria); estos cambios de nivel digital son compatibles con los niveles lógicos de tensión en las entradas de la siguiente etapa (niveles CMOS), que corresponde a la interfaz digital (ver sección 2.2). Adicionalmente, el tiempo de bit es menor o igual que el tiempo del pulso para evitar aumentar el tiempo muerto del detector (característica relevante en materia de detectores).

Para lograr esta clasificación se usó un umbral de detección variable que garantiza un registro libre del ruido característico de los sensores usados (fotomultiplicadores de silicio(SiPM)) y además permite a los usuarios finales del detector, realizar diversos estudios físicos y estadísticos. Dicho lo anterior, ahora se mostrará detalladamente la forma como los autores estructuraron el diseño y lo desarrollaron.

2.1.2.1. Diseño electrónico

El reto para los autores fue desarrollar un sistema electrónico de bajo costo con componentes de alta disponibilidad en el mercado que cumplieran con los requerimientos identificados en velocidad, ganancia, ancho de banda, niveles lógicos adecuados de salida, entre otros (ver

tabla 2.1); los autores propusieron diversos diseños que mejoraron con el avance del proyecto y la revisión del estado del arte, si el lector esta interesado en los diseños propuestos que no se presentan en este reporte, puede dirigirse al repositorio del proyecto en GitHub

Tabla 2.1: Criterios de diseño iniciales para la etapa de discriminación

Criterio	Valor
Ancho de banda	$>>20MHz$
Slew Rate	$>>110V/\mu s$
Tiempo de bit	$>20ns$
Nivel lógico de salida	Niveles CMOS 3,3V
Ganancia	$\leq 2,38V$

Con los criterios identificados y una revisión técnica de electrónica de discriminación en detectores(citar libro de electrónica de detectores, amiga, lago), se llegó al diseño mostrado en la figura 21, una etapa de inversión para acondicionar el pulso y el comparador que hace las veces de discriminador usando la tensión de referencia V_{ref} como umbral de detección.

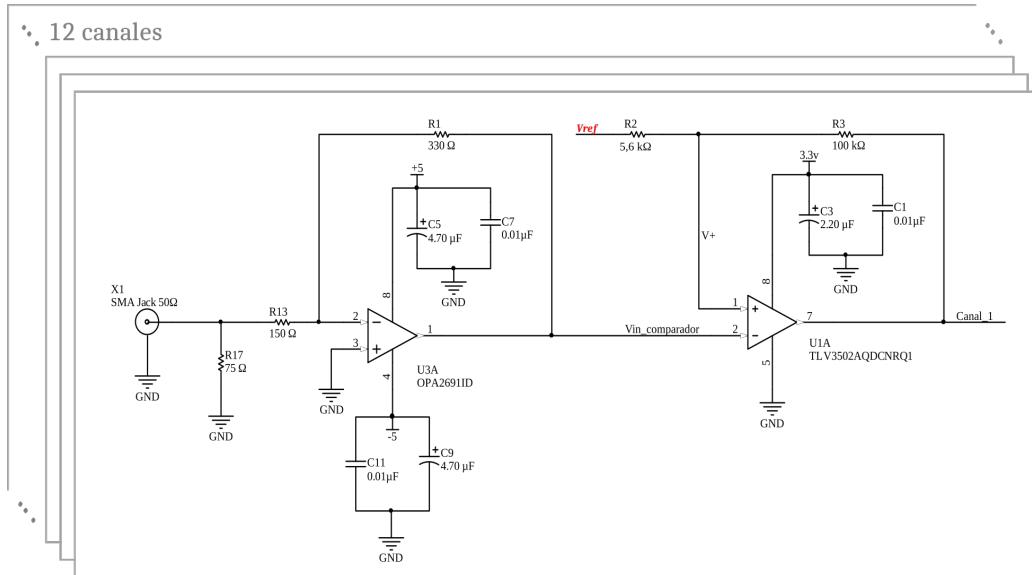


Figura 21: Circuito de discriminación, en el recuadro se muestra el diseño para un canal y se indica que la tarjeta analógica tiene 12 canales. La tensión de referencia V_{ref} viene de un circuito que proporciona la tensión de umbral desde un conversor digital-analógico(ver sección 2.2.2) que se omite en la figura por simplicidad

Para la elección de los componentes se usó el método de figuras de merito, al tener en cuenta parámetros de selección que cumplieran con los criterios de diseño requeridos; en caso de que el lector desee profundizar en esta selección, las figuras de merito de los componentes se encuentran disponibles en el repositorio de GitHub. Ahora, se realizará un recorrido por los aspectos de mayor relevancia en el diseño presentado.

Las señales que vienen de la etapa de adquisición son transmitidas mediante líneas con impedancia característica de 50Ω , estos cables coaxiales deben tener la misma longitud para evitar retardos en las líneas, son conectadas a la tarjeta analógica que contiene los 12 canales por medio de conectores tipo SMA con la precaución de acoplar las impedancias para evitar reflexiones indeseadas.

Posteriormente, estas señales ingresan a una etapa de inversión con ganancia de 2,2; esta etapa se trata de un amplificador operacional(OPAM) en configuración inversora, la resistencia de entrada y de realimentación se calcularon teniendo en cuenta la ganancia máxima y las recomendaciones del fabricante del operacional.

Una vez que la señal ha sido invertida, ingresa al discriminador; esta parte consta de un comparador con histéresis; se optó por este tipo de comparación para lograr dos niveles de referencia que garanticen menor probabilidad de error en la detección de eventos. Para ello, se le agrega al comparador una realimentación positiva, configurando la comutación en dos momentos diferentes.

Para la asignación de valores de resistencias de histéresis (R_2 y R_3 en el esquema de la figura 21) se realizó el análisis del circuito en los momentos de cambio de estado, llegando a la ecuación 2.4 que representa el ancho de histéresis (V_{HD}).

$$V_{HD} = V_{pol} \frac{R_2}{R_3 + R_2} \quad (2.4)$$

Para determinar el valor del ancho de histéresis, los autores recurren a los conceptos de física de partículas asociados al detector, para este caso particular se deseaba colocar un umbral mínimo que garantizara separar los foto-electrones generados en el SiPM que se asocian a los fotones producidos en las barras centelladoras, de los foto-electrones que se asocian a ruido de diferentes fuentes propias del SiPM [23].

Este valor límite de tensión mínima se asignó al calcular el voltaje equivalente de salida de la etapa de inversión (ecuación 2.4) para la tensión $V_1 = 90mV$ obtenida de la etapa de adquisición; esta cantidad se relaciona con 3 foto-electrones generados por el SiPM (30mV se asocian a un foto-electrón) que, de acuerdo a la literatura, es un indicador adecuado(**¿qué libro citamos Jesus!?**).

$$V_{HD} = 2,2(V_1) = 90 \times 10^{-3} \times 2,2 \quad (2.5)$$

$$V_{HD} = 0,198V \quad (2.6)$$

De esta manera, con el valor de V_{HD} y de V_{pol} se obtuvo una relación para asignar el valor a las resistencias de histéresis (ecuación 2.7).

$$R_3 = 17,7R_2 \quad (2.7)$$

Además, se logró concluir que a la resistencia R2 se le debe asignar un valor alto debido a su comportamiento como carga del circuito generador de umbral de detección, ya que esta podría afectar su característica de DC, por otro lado R3 no puede tener un valor significativo, puesto que forma un filtro pasa-bajas con la capacitancia parásita de entrada al comparador (pin 1, V+, en circuito de la Figura 21), el tiempo de restablecimiento de este filtro, no puede superar la duración promedio de la salida discriminada.

Finalmente, es importante resaltar que tanto los OPAM's, como los comparadores tienen filtros en la alimentación (capacitores de desacoplo) para evitar ruido en la polarización y los valores asignados son recomendados por el fabricante. Además, los dispositivos usados para el diseño son duales, es decir, cada uno soporta dos canales; esto con el fin de reducir costo y tamaño de la tarjeta analógica.

2.1.2.2. Resultados de pruebas sobre la interfaz analógica

Después de describir la forma del diseño implementado por los autores, ahora se presentan las señales eléctricas obtenidas con el sistema analógico bajo pruebas. El diseño seleccionado (figura 21) se simuló en el software TINA TI (basado en spice) usando el pulso de salida de la etapa de adquisición (señal roja en la figura 17), como entrada al esquema de simulación; de esta forma, se pudo observar la respuesta de los dispositivos ante una señal real.

Inicialmente, se muestra el resultado general de las señales analógicas obtenidas en simulación y las señales medidas desde la electrónica diseñada y construida por los autores (figura 22).

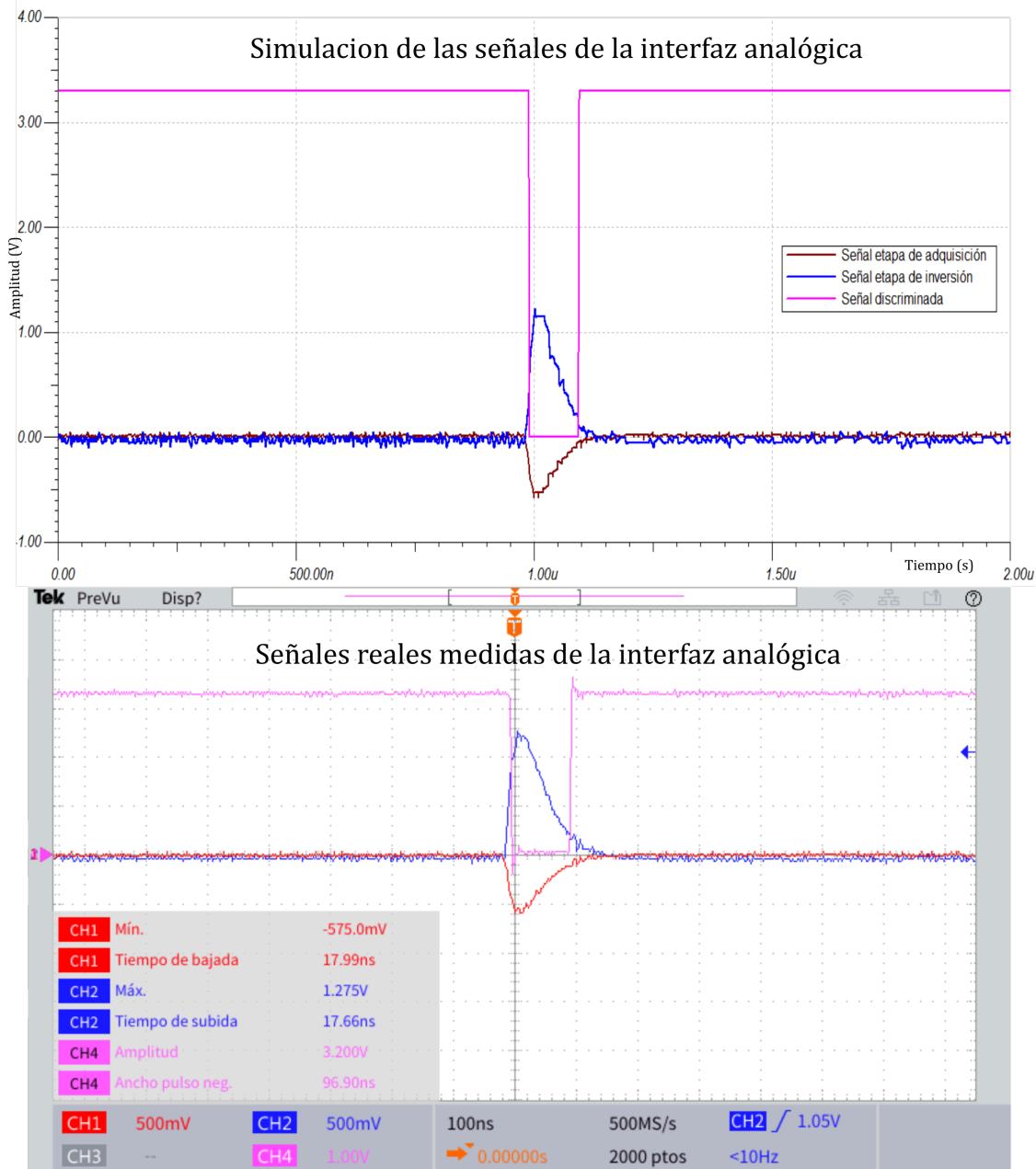


Figura 22: Señales de la interfaz analógica; en la parte superior se muestra el resultado de simulación y en la parte inferior la imagen tomada desde el osciloscopio con las señales reales medidas bajo pruebas.

De la Figura 22 se puede observar por inspección la similitud de las señales medidas y

simuladas con ayuda de los indicadores mostrados en la imagen; es importante notar que los resultados coinciden con los cálculos realizados y características deseadas, por ejemplo, la amplitud del pulso de color azul (señal etapa de inversión) es $-2,2$ veces la amplitud el pulso rojo (señal etapa de adquisición); en efecto, coinciden tanto en forma como en características temporales con las señales esperadas para esta etapa. A continuación, se muestran con más detalle las comparaciones realizadas.

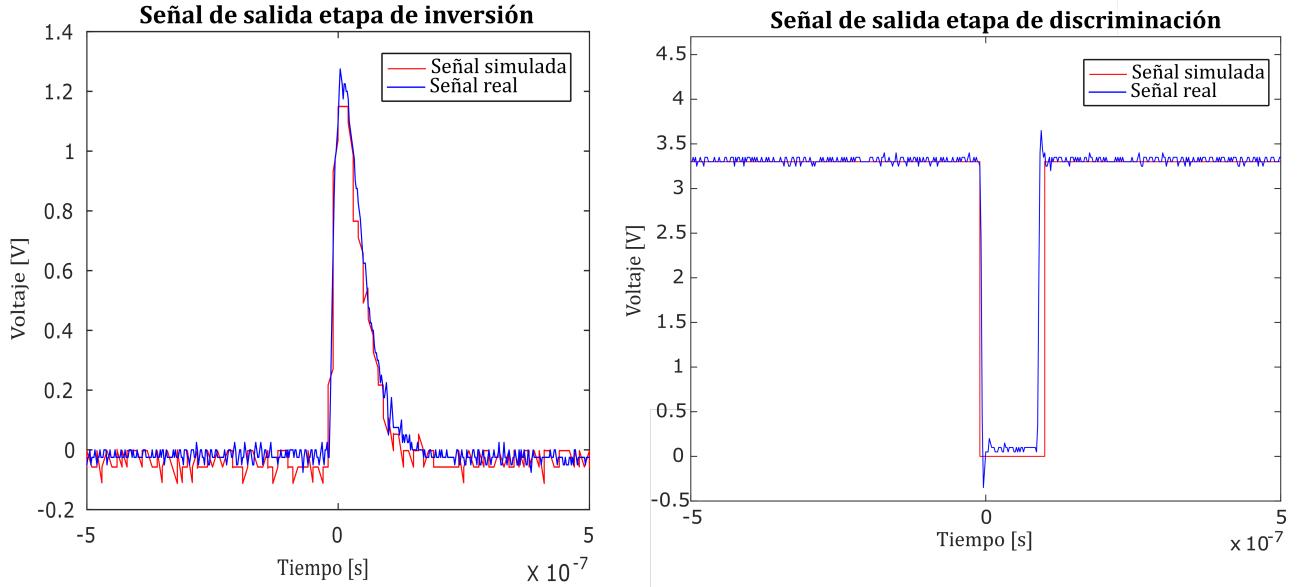


Figura 23: Comparación simulación y señales reales de la etapa de discriminación, a la izquierda se muestra la salida de la etapa de inversión y a la derecha la señal de salida de la etapa de discriminación o comparación.

En la Figura 23 se graficaron sobre la misma imagen las señales medidas y las señales simuladas del bloque “discriminación de partículas” para poder compararlas apropiadamente; a la izquierda del gráfico mencionado se observa la señal de salida de la etapa de inversión, la señal simulada (color rojo) no alcanza la misma amplitud de la señal real, este podría ser un efecto de la resolución en voltaje del osciloscopio; en los demás aspectos, como, tiempos de subida, duración del pulso y forma general, se puede apreciar que se obtuvo el comportamiento similar y aceptable para los resultados esperados.

En cuanto a la parte derecha de la Figura 23 se observa la señal de salida del comparador o discriminador donde se aprecian los sobreimpulsos de la señal real que no se ven en simulación, además que el tiempo de bajada en la conmutación es ligeramente mayor en la señal real al igual que el tiempo de subida; estas diferencias muestran los efectos inevitables de la implementación.

Otra parte importante del diseño que se mencionó en la sección 2.1.2.1 es la tensión de umbral que ingresa al comparador y es el nivel usado para discriminar partículas, este umbral no es un nivel único, ya que, como se describió anteriormente, el comparador tiene histéresis. Así que , la conmutación se realiza en dos momentos diferentes, como se muestra en la figura 24.

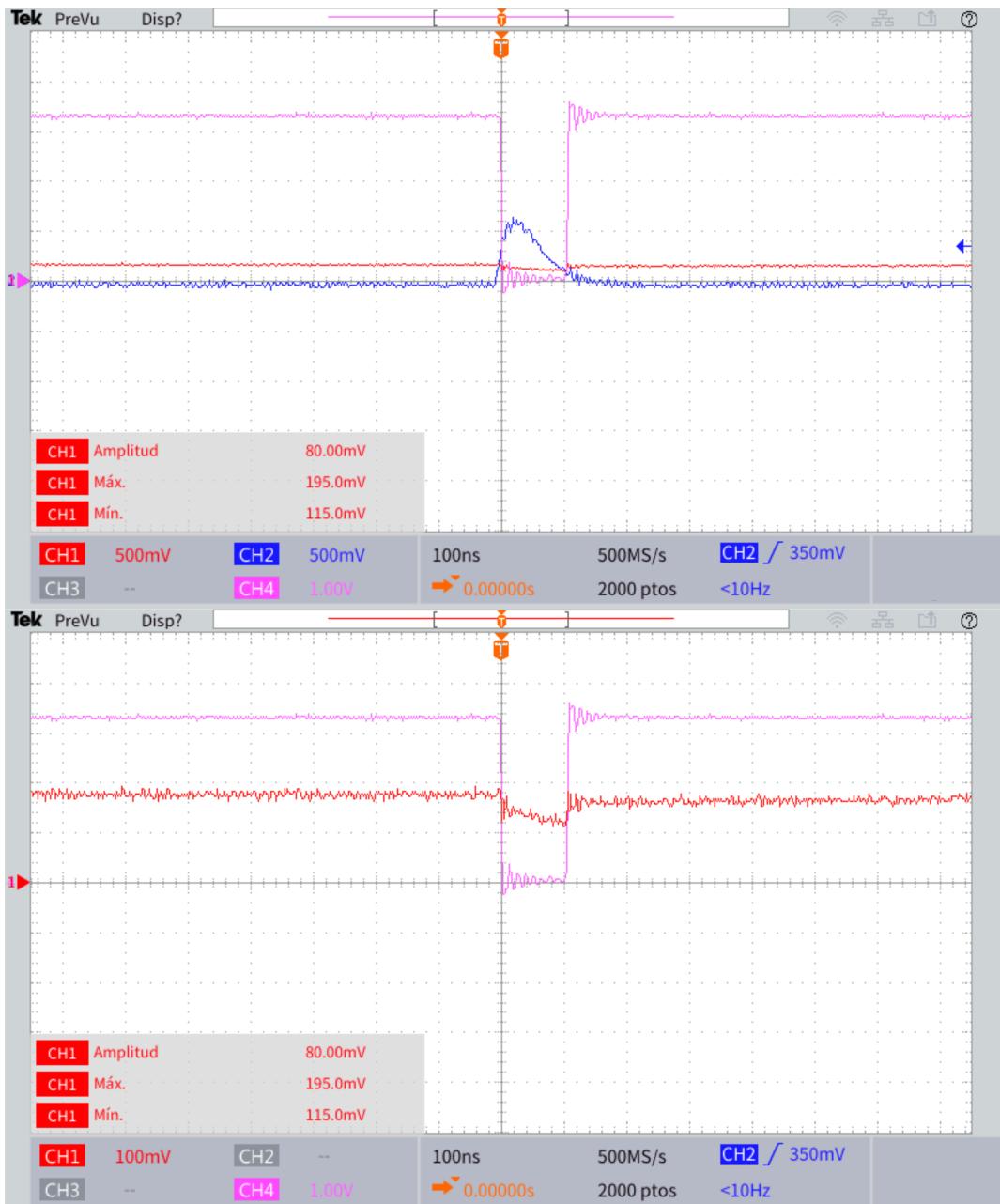


Figura 24: Umbral de discriminación, en la parte superior se muestran las señales de entrada y salida del comparador, en azul la señal de salida de la etapa de inversión, en rojo el umbral de detección y en fucsia la señal de salida del comparador o discriminador; en la parte inferior se muestra un acercamiento a la señal de umbral

Finalmente, la salida de la interfaz analógica es el pulso cuadrado con niveles lógicos CMOS 3,3V mostrado en la figura 25, este pulso tiene lógica inversa por la forma en la que se usa el comparador, la cual es recomendada por el fabricante; en la parte superior izquierda se muestra el ancho del pulso en la escala de tiempo predeterminada(100ns) para observarlo junto a las demás señales de la etapa analógica; en seguida, en la parte superior derecha se amplió la escala de tiempo a 20ns para poder observar el valor de los sobreimpulsos generados. En la parte inferior se muestran los tiempos de bajada (izquierda) y de subida(derecha) que son iguales a 5,6ns. Aunque el valor en tiempo de subida y bajada es de 1,5ns de acuerdo al datasheet (referencia datasheet) y el modelo de simulación del dispositivo comparador usado

(TLV3502), los resultados en amplitud, forma y duración son aceptados como correctos para ingresar a la siguiente etapa, la interfaz digital.

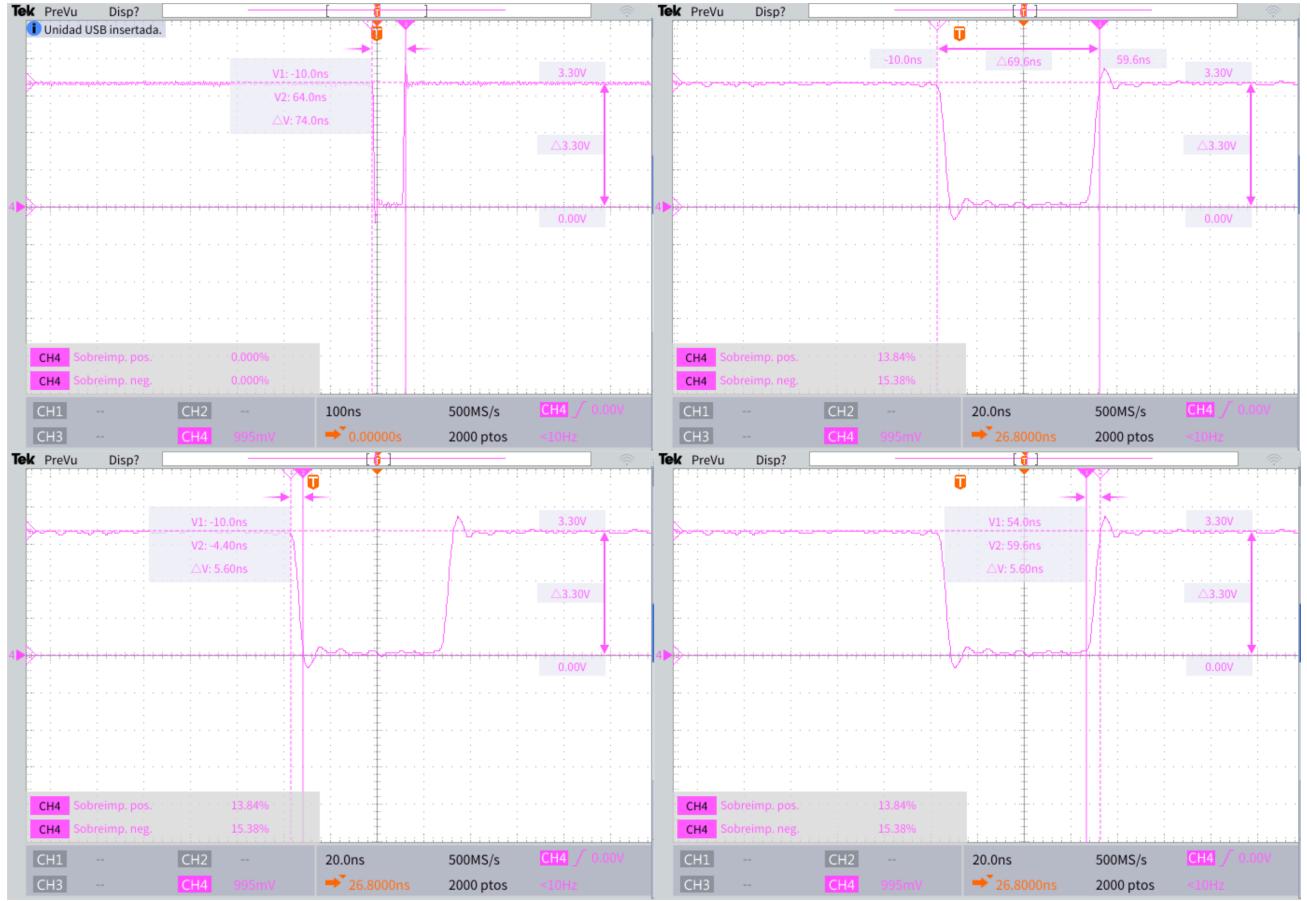


Figura 25: Señal de salida de la interfaz analógica mostrando sus niveles de salida y características temporales

2.2. Interfaz Digital

La interfaz digital inicia con las 12 señales de salida de la interfaz analógica (señales discriminadas); esta parte está implementada, en esencia, con una FPGA Spartan 6 sobre la tarjeta *Mimas V2*¹ y una Raspberry Pi 2. Con la FPGA se recolectan las señales discriminadas por un voltaje de umbral generado desde un DAC (Digital-to-Analog-Converter), que es controlado desde la Raspberry Pi 2; estas señales se concatenan con una estampa temporal dada por la señal PPS (por sus siglas en inglés *Pulse Per Second*) de un GPS y el reloj interno de la FPGA², la información registrada en la FPGA es recolectada de forma síncrona por la Raspberry mediante el estándar de comunicación SPI (Synchronous Peripheral Interface) y cumpliendo con el protocolo establecido para la comunicación con el procesador descrito en la FPGA. Además, la Raspberry contiene una interfaz de usuario que permite interactuar con el detector, al visualizar información relevante y generar un archivo de alta portabilidad de forma sencilla; este archivo de salida contiene la información recolectada de los eventos, datos de temperatura, presión atmosférica y geolocalización entre otras variables relevantes

para el detector.

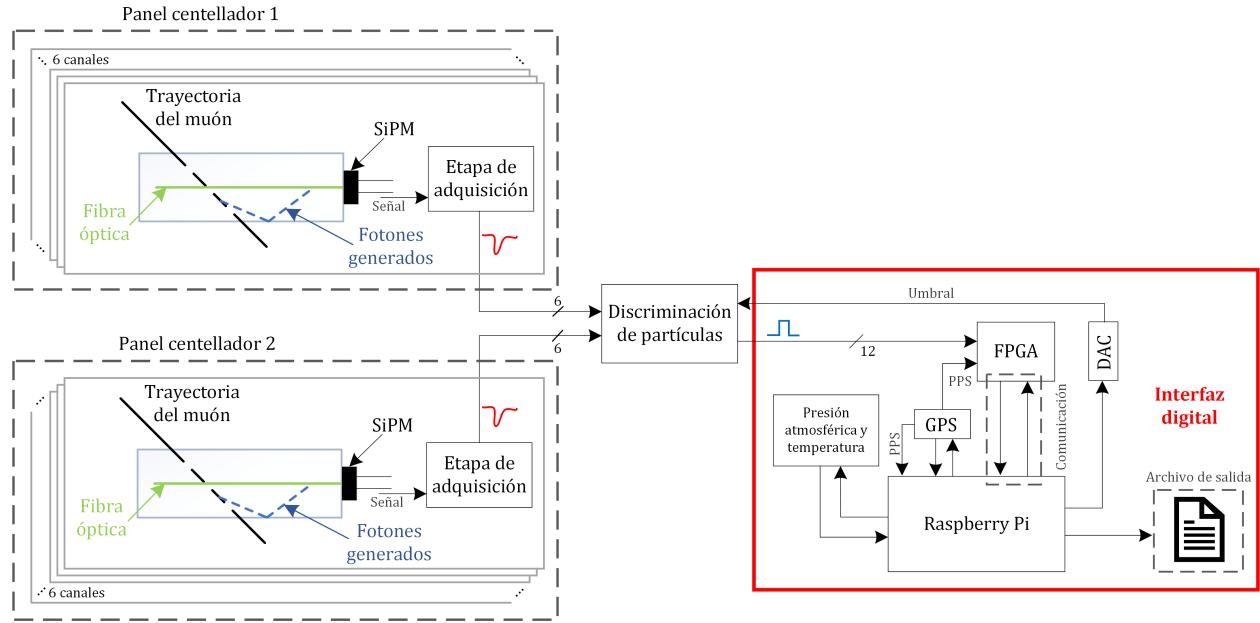


Figura 26: Esquema general del proyecto resaltando la interfaz digital en el recuadro rojo

En esta sección el lector encontrará la descripción de los elementos que componen la interfaz digital; en la figura 26 se muestra el esquema general del proyecto y se hace énfasis (en rojo) a esta interfaz. En primera instancia, se describen los elementos que tienen relación directa con la interfaz analógica, el DAC (Digital to Analog Converter) y la FPGA(Field-Programmable Gate Array).

En principio, en la FPGA se encuentra el procesador de propósito específico, que se diseñó para llevar un conteo de eventos (ver sección 2.2.1.2) y almacenarlos de forma ordenada en el interior de una memoria RAM (ver sección 2.2.1.3); además del protocolo de comunicación dispuesto para obtener la información asociada al evento desde la Raspberry pi.

Por otro lado, el DAC seleccionado permite entregar la tensión de umbral necesaria para la discriminación y es controlado desde la Raspberry pi. También encontrará la descripción y características de los sensores utilizados para las mediciones de variables atmosféricas y de geolocalización. Finalmente, se explicará la estrategia implementada en la Raspberry pi para la adquisición, registro y almacenamiento de toda esta información en un archivo portable. Después de este preámbulo se ahondará en cada uno de los elementos.

2.2.1. FPGA

En la Figura 27 se puede observar el procesador de propósito específico que se diseñó para retener y agregar una estampa temporal a los eventos (partículas cargadas que atraviesan el detector); principalmente, esta compuesto por 4 bloques; comenzando por el bloque “Protocolo de comunicación”, que se encarga de la comunicación mediante el estándar SPI

²Numato Mimas v2 - <https://numato.com/product/mimas-v2-spartan-6-fpga-development-board-with-ddr-sdram>

³El reloj de la tarjeta utilizada es de 100MHz por defecto, sin embargo este se puede aumentar haciendo uso de overclock

que se dispuso para que la Raspberry pueda interactuar con la FPGA; en segundo lugar, el bloque “Despliegue y contadores” que, por un lado, lleva el conteo de partículas que atraviesan el detector, el flujo por segundo de partículas y el conteo de errores en la comunicación Raspberry-FPGA, y por otro lado se encarga del despliegue de los conteos mencionados en el display y leds dispuestos en la tarjeta *Mimas V2*.

En tercer lugar, el bloque “Banco de memoria” que contiene una memoria RAM en la cual se registra la información de los eventos, el conteo de errores en la comunicación y el flujo por segundo, este bloque también genera una señal que indica un evento registrado en la memoria RAM; por último, se tiene el bloque “Gestión de Funciones” que contiene una maquina de estados encargada de administrar los eventos provenientes de la comunicación (flancos de subida o bajada de las señales SPI), paso de partículas (eventos) o del mismo sistema (posición máxima en la RAM, fallos en la comunicación, entre otros) y, a su vez, es responsable de controlar los 3 bloques descritos anteriormente. En realidad, esta es una representación simplificada del contenido del procesador, si el lector desea profundizar puede dirigirse repositorio de GitHub.

DESCRIPCIÓN DEL PROCESADOR EN LA FPGA

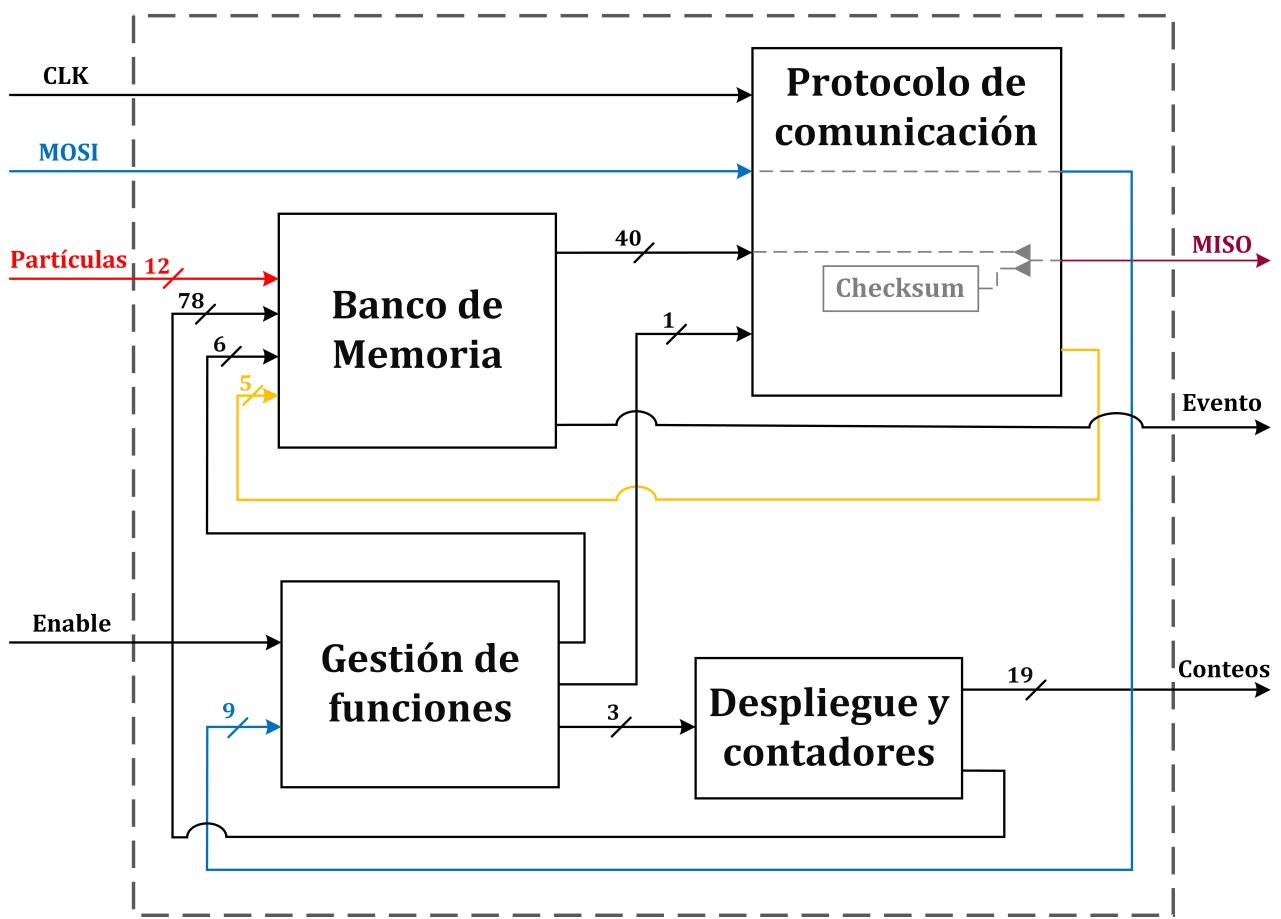


Figura 27: Procesador de propósito específico descrito en la FPGA Spartan 6; en rojo se pueden observar las 12 señales de la etapa de discriminación (Partículas), en *Banco de memoria* se detectan los cambios de alto a bajo de dichas señales y se envía una alerta (Evento) a la Raspberry, esta iniciará la conversación con la FPGA teniendo en cuenta el protocolo de comunicación (ver sección 2.2.1.4) por medio de las entradas Enable, CLK y MOSI(en azul); en caso de que los datos sean incorrectos, la corroboración de bits (checksum) aumentará en uno los errores de comunicación y volverá a corroborar, en caso contrario, el bloque *Gestión de funciones* cargará la posición de memoria solicitada en el *Protocolo de comunicación* y agregará la trama de checksum correspondiente a los datos para enviarlos por la linea MISO(señal vinotinto) hacia la Raspberry pi.

2.2.1.1. Gestión de funciones

Este bloque contiene principalmente una maquina de estados, que permite:

- Desplegar en los periféricos de visualización el número de partículas registradas en la FPGA, el número de partículas registradas el segundo inmediatamente anterior y el número de errores en la comunicación (Ver Figura 28).
- Iniciar o detener la comunicación y cargar los bits de la posición de RAM solicitada en el bloque de *Protocolo de Comunicación* (Ver sección 2.2.1.4) en caso de que la corroboración (checksum) sea correcta.
- Reiniciar la RAM y los contadores, es decir, lleva a cero la posición de la RAM y los conteos.

- Controlar la dinámica de registro de la información referente a cada evento, además de almacenar en la RAM los bits correspondientes al número de eventos registrados, el flujo de partículas y el número de errores en la comunicación (ver Figura 29).

La maquina de estados es compleja y por simplicidad se omite en este reporte, en caso de tener interés en la estructura completa puede dirigirse al repositorio de GitHub.

2.2.1.2. Despliegue y contadores

Este bloque contiene tres contadores, uno para el número de partículas que atraviesan el detector, otro para el número de eventos el segundo inmediatamente anterior y por ultimo uno para el número de errores en la comunicación; cada contador esta formado por un contador BCD de tres dígitos y uno binario de 27 bits, esta forma del contador se implementó para desplegar cantidades enteras en los display 7 segmentos y los leds de la FPGA. El despliegue de dichos indicadores se controla desde la Raspberry por medio del protocolo de comunicación descrito en la FPGA y finalmente es el bloque *Gestión de funciones* quien selecciona cual indicador mostrar, estas tres cantidades se pueden extraer a través de las posiciones 31 y 32 de la RAM de la FPGA, por medio del protocolo de comunicación implementado.

La forma como se visualizan los resultados de los conteos se puede apreciar en la Figura 28.

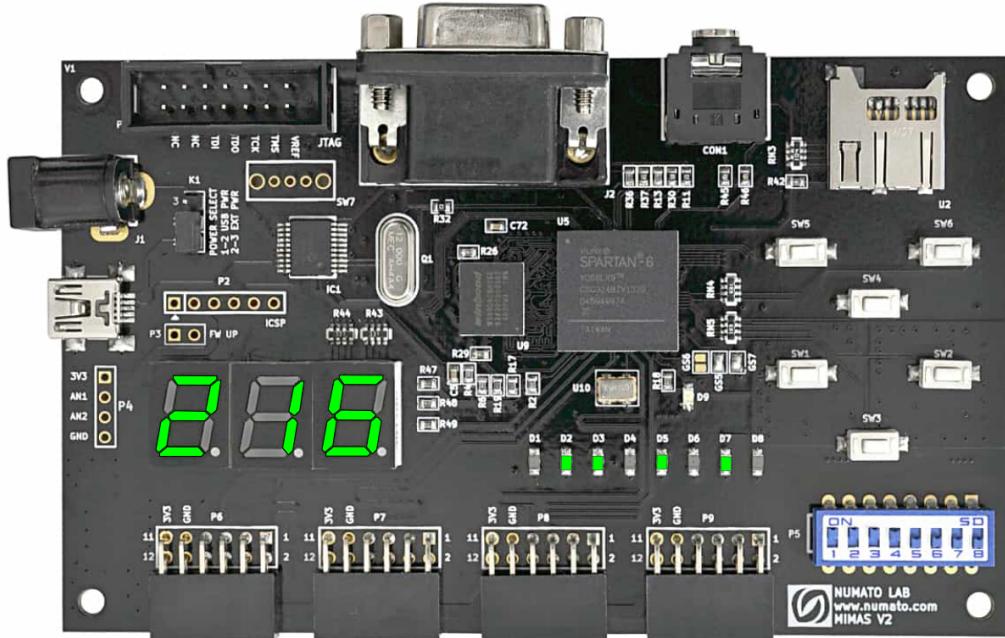


Figura 28: Forma de visualización de contadores disponibles; en la imagen se muestra un ejemplo de como se visualizan los números desplegados desde la FPGA *Mimas V2*, para este ejemplo el numero que se esta desplegando es el 106216, las unidades de mil se despliegan en los leds y las centenas en los display de 7 segmentos

2.2.1.3. Banco de memoria

Este bloque contiene la memoria RAM como elemento central, y otras estructuras que aseguran una correcta dinámica de registro y almacenamiento de datos asociados con partículas incidentes en el detector. Dentro de las estructuras mencionadas se encuentran, por ejemplo, contadores y multiplexores; por simplicidad se muestra la forma de organización y disposición de la RAM y se deja la oportunidad al lector de profundizar en el bloque al ingresar al repositorio de GitHub.

Con cada evento proveniente de la discriminación y detectado por la FPGA, se genera una señal para cambiar de posición de escritura en la RAM; al realizar este cambio se mantiene la información del evento en la posición inmediatamente anterior, lo que quiere decir que los datos relacionados con eventos de partículas incidentes se almacenan y los nuevos eventos se escriben en diferentes posiciones para evitar perdida de información. La memoria RAM tiene capacidad para mantener la información en 30 posiciones diferentes antes de retornar a la posición inicial. Adicionalmente, esta memoria tiene 2 posiciones reservadas para otros datos relevantes del detector.

Es importante resaltar la forma definida para empaquetar la información en los bits de cada posición de la RAM, ya que estos datos son enviados por el protocolo de comunicación comenzando por el bit más significativo (bit 0) hasta el menos significativo (bit 39) y deben ser claros para que la Raspberry pi pueda identificarlos e interpretarlos correctamente. En la figura 29 se ilustra la dinámica de la RAM y la distribución de bits asignada; se observan las 32 posiciones de la RAM, cada una con 39 bits. La estructura de los datos almacenados en la RAM se puede observar en los recuadros azul y verde; en el caso de los eventos (encerrado en azul) los primeros 12 bits son los canales de las barras centelladoras que conforman los dos paneles, los siguientes 28 bits corresponden al tiempo transcurrido (con precisión de aproximadamente 10ns) desde el último flanco de reloj de la señal PPS del GPS utilizado y finalmente el ultimo bit estará en alto si en el segundo inmediatamente anterior llegó la señal PPS, o bajo si ha pasado más de un segundo y la señal PPS se ha mantenido en bajo.

Memoria RAM

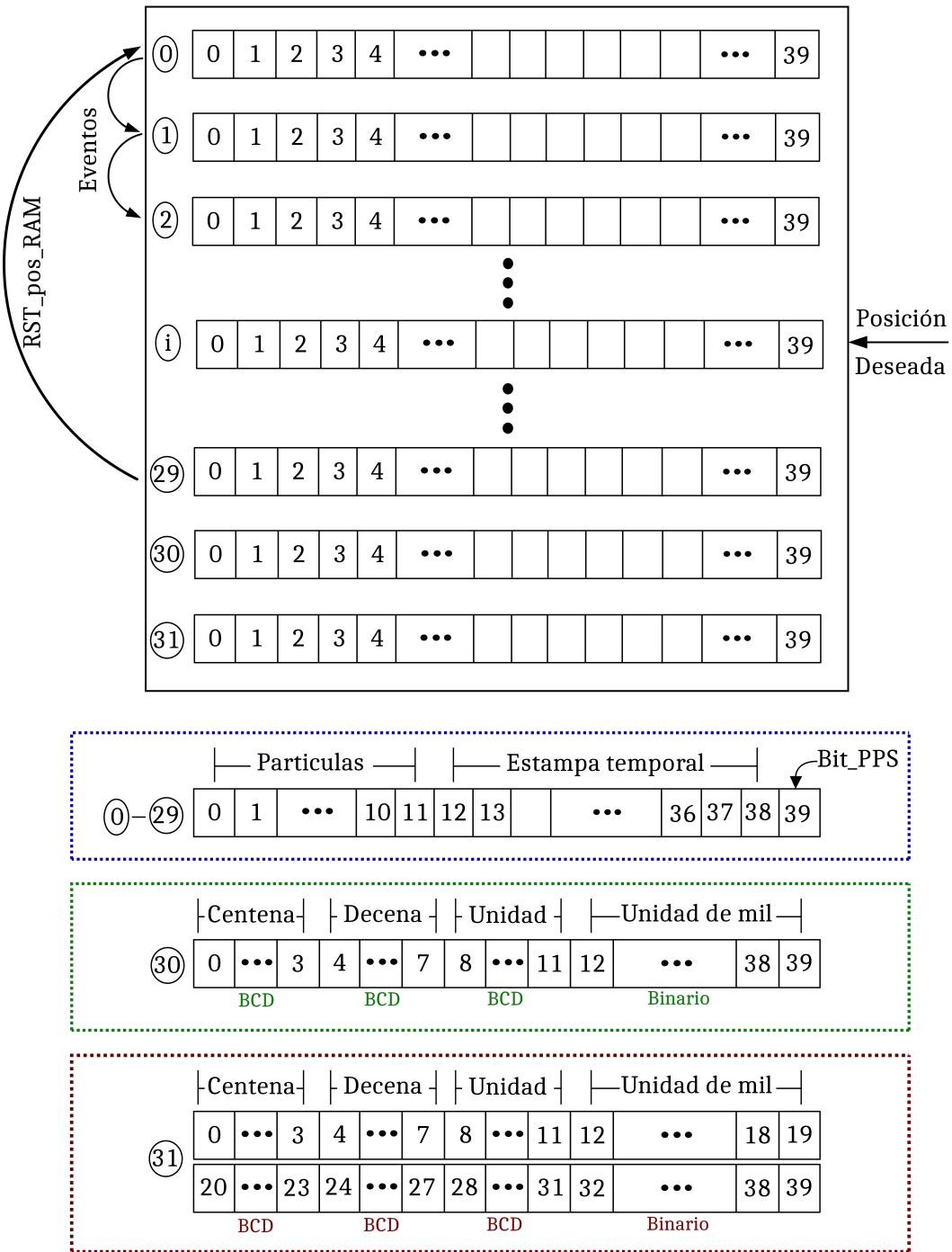


Figura 29: Mapa de memoria y dinámica de registro

2.2.1.4. Protocolo de comunicación

En este bloque se ejecuta la comunicación de la FPGA con la Raspberry para la transmisión y recepción de información; el protocolo se basa en el estándar SPI, con la Raspberry como maestro y la FPGA como esclavo; este bloque tiene la capacidad de:

- Transformar una entrada en paralelo en una salida serial, eliminando el bit más significativo.

nificativo y agregando el checksum, calculado al final de la trama serial; esta salida corresponde a la señal MISO.

- Entregar un vector de bits en paralelo a partir de una entrada serial correspondientes a la señal MOSI; donde el primer bit serial será el más significativo de la salida. Además verifica el checksum del mensaje para definir si los bits llegaron correctamente.

Para lograr cumplir con estas capacidades, este bloque contiene otros en su interior, si el lector desea profundizar en este tema puede dirigirse al repositorio de GitHub.

Los bloques anteriormente mencionados en conjunto con el resto del procesador descrito en la FPGA permiten comunicar la FPGA con dispositivos programables e inteligentes (en el caso de este proyecto una Raspberry pi) que puedan generar las señales de la Figura 30, la comunicación está basada en el estándar SPI que junto a las tramas de checksum para corroboración de datos y los bits definidos en la Tabla 2.2 conforman el protocolo designado para comunicarse de manera exitosa con la FPGA.

Tabla 2.2: Tabla de comunicación FPGA

Bit MSB	Bits Acción	Checksum	Función
1	10000	010	Borrar RAM
1	11000	011	Reinicia los contadores (Errores, partículas y flujo por segundo)
1	11100	100	Desplegar Errores
1	11110	101	Desplegar Conteo
0	Pos_RAM	suma de bits	Entrega por MISO lo que se encuentra en la posición de RAM solicitada.

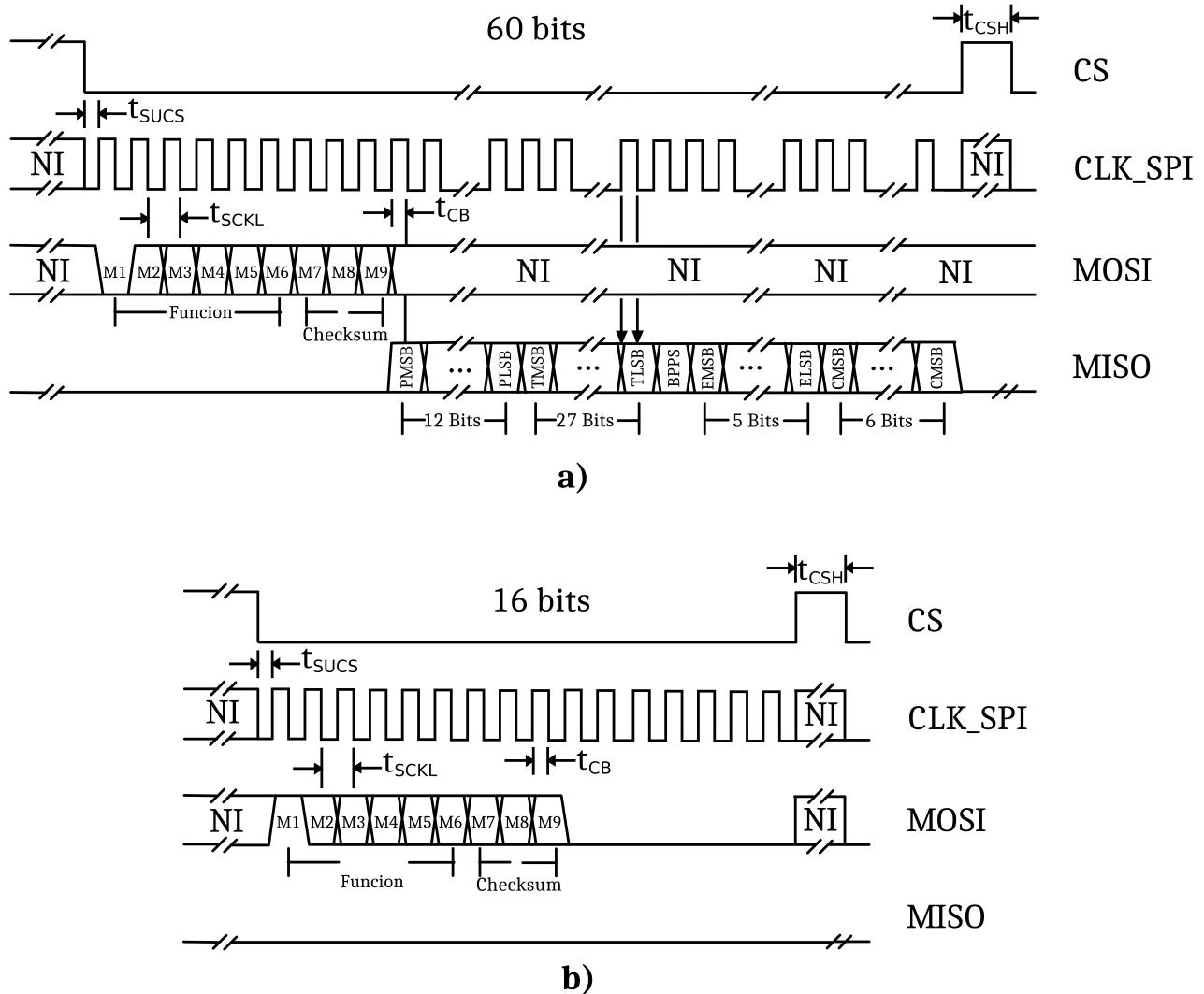


Figura 30: Forma de comunicación con FPGA del detector; para iniciar la comunicación con la FPGA se debe utilizar el estándar SPI, la primera trama de bits M1-M6 son los bits de información, los tres siguientes M7,M8,M9 son los bits de checksum (estos se envían desde la Raspberry), (ver tabla 2.2); a) si el primer bit está en bajo se deberán adquirir los 59 bits siguientes, donde PMSB a PLSB son los bits correspondiente a las barras centelladoras, los bits de TMSB a TLSB son los correspondientes a la estampa de tiempo asignada en la FPGA, mientras que los bits de EMSB a ELSB son la posición de escritura actual en la posición de RAM y finalmente CMSB a CLSB son los bits de checksum. b) Si el primer bit (M1) está en alto, solo será necesario escribir los nueve primeros bits ya que la FPGA no responderá nada. En la Tabla 2.3 se puede observar los tiempos t_{SUCS} , t_{SCLK} y t_{CS}

Tabla 2.3: Parámetros de tiempo

Parámetro	Símbolo	Mínimo	Unidades
CS en bajo antes del primer flanco de subida de CLK_SPI	t_{SUCS}	20	ns
Periodo de CLK_SPI	t_{SCLK}	40	ns
Tiempo de carga de bits	t_{CB}	30	ns
Tiempo en alto de CS	t_{CSH}	30	ns

2.2.2. Umbral de detección

Para generar la tensión de umbral requerida en la etapa de discriminación, se utilizó un convertidor digital a análogo (DAC6551) de 12 bits con interfaz serial de comunicación de tres hilos por medio del estándar SPI. Este DAC esta probado para aplicaciones industriales y garantiza una buena linealidad al reducir el error DNL (Differential nonlinearity).

Es importante mencionar que este DAC necesita un voltaje de referencia externo, para este caso 3,3V; y que la Raspberry se comunica con el por medio del puerto auxiliar del SPI, ya que se prefería dejar el puerto principal dedicado para la comunicación Raspberry-FPGA y de esta manera reducir la longitud de las pistas de CLK,MOSI,MISO con el objetivo de maximizar la tasa de BPS (Bits por segundo) en la transmisión de datos principal.

En la Figura 31 se puede apreciar un circuito para aumentar la corriente de la tensión de referencia, puesto que la salida del DAC es de baja potencia, podría deformarse por las cargas vistas en las resistencias de histéresis en el circuito de discriminación (referencia circuito discriminación), por ello, se vio la necesidad de agregar una configuración extra a la salida que aumente la potencia entregada. Este esquema es básicamente un seguidor de tensión, que por medio de un transistor BJT y una carga capacitiva, aumenta la potencia de salida total y mitiga el ruido provocado por el cambio de impedancia durante la conmutación del comparador. Pensando en que el voltaje de umbral es DC (corriente continua) se optó por usar un amplificador de instrumentación (INA128), que es destacable por sus parámetros de alta impedancia de entrada, lo que reduce la carga del DAC mejorando su rendimiento. Por otro lado el *offset* de entrada ($500\mu V$) es un valor aceptable que no afecta la precisión del voltaje de comparación, correspondiente a $800\mu V$, este valor viene de la tensión de referencia es de 3,3V dividida en los 12 bits de resolución del DAC.

Los capacitores de desacoplo en la polarización del DAC y del operacional se colocaron siguiendo las recomendaciones del fabricante.

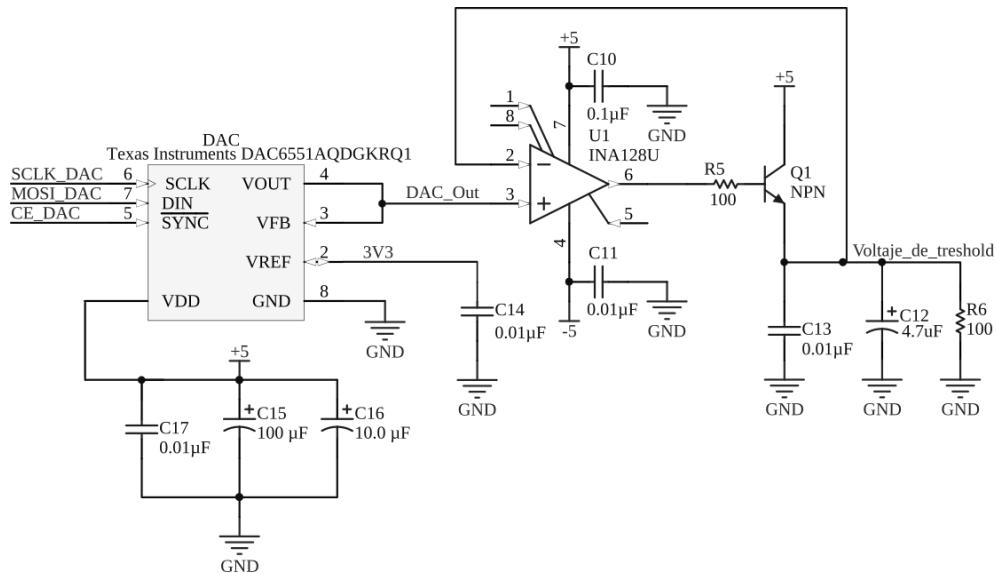


Figura 31: Circuito para generar la tensión de umbral

2.2.2.1. Sensores adicionales

En este apartado se describen los sensores adicionales usados para el proyecto, los cuales realizan mediciones esenciales para el funcionamiento del detector; en primera instancia, la electrónica es capaz de realizar mediciones de temperatura y presión atmosférica con el sensor BMP180, estas medidas son importantes para conocer las condiciones atmosféricas básicas bajo las cuales estará trabajando el detector, ya que las variaciones significativas de la temperatura pueden afectar el comportamiento normal de los SiPM, generando eventos que no corresponden a partículas cargadas atravesando el detector.

Por otra parte, se utilizó un GPS para conocer las condiciones de geo-posicionamiento del detector cuando sea llevado a campo; además, es fundamental para la sincronización temporal de la interfaz digital al usar la señal PPS (Pulse-Per-Second). A continuación se describen las características más relevantes de los sensores usados.

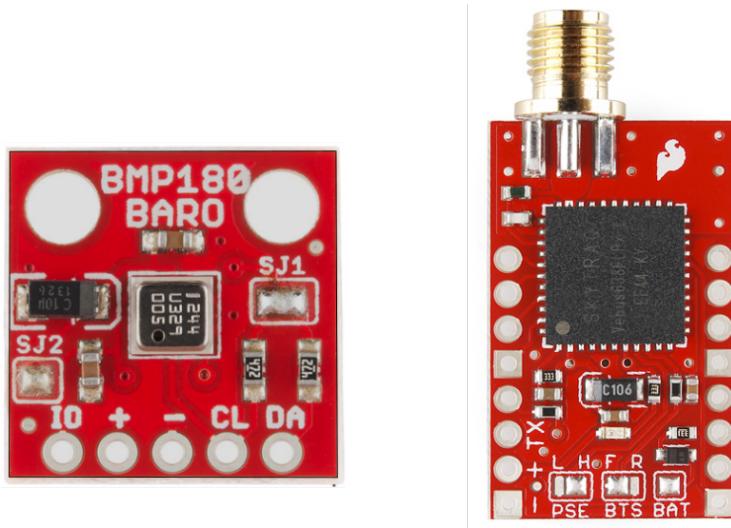


Figura 32: Sensores adicionales. En el lado izquierdo se encuentra el sensor de temperatura y humedad utilizado (BMP180), en el lado derecho el GPS elegido (Venus638FLPx)

2.2.2.1.1. Temperatura y presión atmosférica El sensor de temperatura y presión atmosférica utilizado es el BMP180 de *Bosch*, sobre la tarjeta impresa desarrollada por *Sparkfun*, el BMP180 consta de un sensor piezo-resistivo, un convertidor analógico a digital (con 16 bits de resolución) y una unidad de control con EEPROM que contiene bits de calibración para compensar el offset, la dependencia de la temperatura y otros parámetros; estas características son configurables desde una interfaz serial *I₂C*, usada para la comunicación con el sensor.

2.2.2.1.2. GPS Un criterio para la configuración *Raspberry-GPS-FCPA* (ver Figura 26) es la necesidad de generar un archivo de datos que contenga una referencia temporal global con una muy buena precisión y resolución, ya que estos datos permiten hacer estudios donde el tiempo es muy importante. Asimismo, las variables de geo-posicionamiento pueden ser un factor que afecte el flujo de partículas por el detector con parámetros como la altura a nivel del mar y la latitud.

Por lo anterior, era necesario la elección de un GPS que tuviese la señal PPS(Pulso Por Segundo) como uno de sus periféricos. Con esta señal y haciendo uso del reloj de la

FPGA, se agrega otra estampa temporal con resolución de 10 ns y rango de un segundo a cada partícula cargada detectada. Por el lado de la Raspberry se obtiene el tiempo UTC (<https://time.is/es/UTC>) dispuesto en un registro del GPS y con la señal PPS se realiza la corrección de este tiempo cada segundo, con esta información el tiempo global del sistema operativo (Raspbian) instalado en la Raspberry sera el mismo UTC, esto es relevante ya que si en un futuro se desea implementar dos detectores y se ubican en puntos distantes, la forma como se correlacionarían los datos, sera con el tiempo agregado (UTC) mas el tiempo añadido por la FPGA) a cada partícula detectada.

El GPS utilizado es el Venus638FLPx, este se encuentra en la tarjeta impresa diseñada por *SparkFun* y contiene entre sus periféricos la señal PPS, una interfaz serial y otra *I₂C* para la comunicación con el GPS, adicionalmente se realza entre sus similares ya que cuenta con un TTFF(*Time To First Fix*) de 29 segundos el cual es aceptable para nuestro detector y se debe tener en cuenta para comenzar el registro de datos.

2.2.3. Raspberry Pi

Como plataforma principal se utilizó la Raspberry Pi que en resumen es un ordenador del tamaño de una tarjeta de crédito, este dispositivo se compone de una placa base sobre la que se monta un procesador³, un chip gráfico, memoria RAM y algunos periféricos que dependen del modelo elegido.

Los primeros modelos fueron lanzados en 2006 por la *Fundación Raspberry Pi*⁴ con el objetivo de estimular la enseñanza de las ciencias informáticas en las escuelas de todo el mundo, por su bajo costo, facilidades de uso y tamaño.

Para este proyecto se eligió el modelo *Raspberry Pi 2 Model B* ya que cumplía con los requerimientos necesarios para desarrollar el proyecto y existían unidades en el *Grupo Halley*, este modelo fue lanzado en 2014. Esta plataforma tiene la capacidad de correr diversos sistemas operativos GNU/Linux incluso versiones de Windows, para este caso utiliza Raspbian 9⁵(Distribución de GNU/Linux basado en *Debian* para Raspberry Pi).

En este punto, el reto planteado fue cómo adquirir las variables de interés (atmosféricas, geo-posicionamiento y datos de la FPGA) de forma eficiente (utilizando pocos recursos de CPU), eficaz y sencilla para generar un archivo con toda la información relevante y adicionalmente brindar una interfaz amigable como herramienta para que los interesados puedan interactuar con el detector.

Para resolver este problema se indagó en varias librerías que permitieran el uso de los pines GPIO(*General Purpose Input Output*) con un lenguaje de medio nivel (*C o C++*) para hacer uso eficiente de los recursos del sistema, de tal manera que el procesador no se ocupe en procesos innecesarios, entre las librerías consultadas se hizo una preselección de las más relevantes; estas fueron, primero *WiringPi*⁶, que contiene funciones similares a la plataforma de *Arduino* y por tanto es la más popular, sencilla y limitada en cuanto a las utilidades de los pines GPIO.

Al continuar con la consulta, se encontró la librería BCM2835⁷, la de más bajo nivel

⁴Broadcom BCM2835 - <https://www.raspberrypi.org/app/uploads/2012/02/BCM2835-ARM-Peripherals.pdf>

⁵Fundación Raspberry Pi - <https://www.raspberrypi.org>

⁶Raspbian - <https://www.raspbian.org/>

entre sus semejantes, que brinda control sobre las interrupciones del sistema y el acceso a los registros del kernel ⁸de la Raspberry Pi , y por esta razón es la más eficiente pero aun así no la más eficaz, pues el esfuerzo y tiempo para cumplir con el objetivo propuesto en la parte digital era mucho mayor que con la librería *PiGPIO* ⁹, librería con la cual se resolvió el problema en las fechas establecidas y con un rendimiento favorable, esta última librería contiene mayor utilidad de los pines GPIO que *WiringPi* y es más sencilla que *BCM2835* pues la administración de las interrupciones y manejo de pines GPIO se ejecutan desde funciones preestablecidas sin la necesidad de recurrir a los registros del kernel, pero brindando un rendimiento muy similar al uso directo de ellos.

Teniendo definidas las herramientas para el uso de los pines GPIO, se procedió a establecer la plataforma de desarrollo para implementar la interfaz de usuario; esta elección se realizó por tres razones; el soporte, compatibilidad y rendimiento de los *frameworks* para desarrollo de aplicaciones (*Eclipse*, *NetBeans*, *Qt* y *CodeLite*) en *Raspbian*, bajo estos tres criterios se decidió utilizar *Qt*, que es un entorno de programación amigable basado en C++ y tiene numerosas librerías que agilizan la creación de aplicaciones sin descuidar el rendimiento de la CPU.

En síntesis, el trabajo realizado por los autores se ilustra gráficamente en la Figura 33 al interior del recuadro amarillo y se puede describir en los siguientes incisos:

1. La creación de una clase envoltorio (*Wrapper class*) con la cual se pueda utilizar las funciones de la librería *PiGPIO* necesarias para adquirir la información generada por el detector y administrar los eventos y ejecuciones en multihilo utilizadas por dicha librería pero incompatibles con el funcionamiento de *Qt*, es decir, una clase que enlace la librería *PiGPIO* con el entorno *Qt*.
2. Diseñar una interfaz que brinde las herramientas u opciones para que los usuarios finales desarrollos las investigaciones y/o pruebas con un grado mínimo de complejidad y también tengan la posibilidad de modificar las condiciones relevantes para cada prueba (Ver Figura 36).
3. Integrar la interfaz diseñada junto a la clase creada bajo dinámica de ejecución de aplicaciones *Qt*(Ver Figura 34), para generar un archivo .csv con la información requerida por el usuario (ver Figura 35).

⁸Libreria WiringPi - <http://wiringpi.com/>

⁹Libreria BCM2835 - <http://www.airspayce.com/mikem/bcm2835/>

⁹Broadcom BCM2835 - <https://www.raspberrypi.org/app/uploads/2012/02/BCM2835-ARM-Peripherals.pdf>

⁹Libreria PiGPIO- <http://abyz.me.uk/rpi/pigpio/>

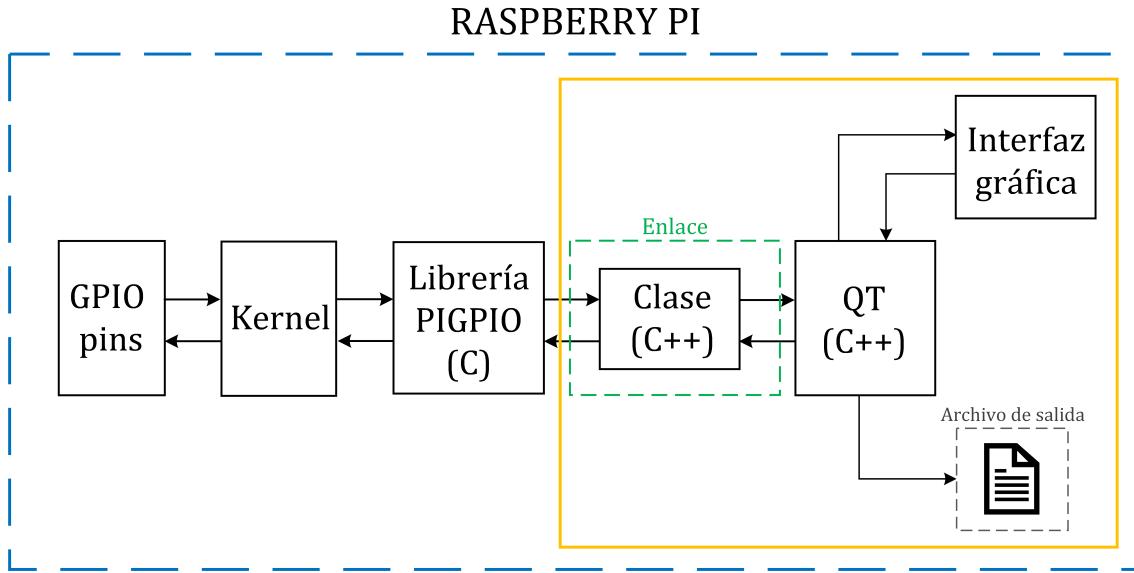


Figura 33: Esquema de funcionamiento desde la interfaz hasta la lectura y escritura de los pines GPIO en la Raspberry pi; en amarillo se aprecia el trabajo realizado por los autores en la Raspberry pi.

Hasta ahora se ha resumido el trabajo realizado, ahora se explicarán los conceptos estudiados y estructuras implementadas para la consecución del mismo. Para comenzar, es necesario tener claro el concepto de clases y objetos en C++ (se recomienda el texto de la referencia **Referencia el libro thinking in c++**), ya que al manejarlos surge la pregunta ¿Cómo comunicarse entre objetos?; desde ahí parte la solución dada por los autores, que esta basada en la figura 34 y es una respuesta eficaz encontrada en *Qt*. Así que, para responder esa pregunta se recurrió al concepto de *Signals & Slots* (señales y ranuras) en *Qt* y que cada objeto puede o no contenerlas; una señal es básicamente una alerta con información que un objeto emite en alguna situación sin preocuparse de su relevancia para otro objeto, por ejemplo, el clic en un *widget* o el fin de una ejecución multihilo; mientras que una ranura es una forma de introducirse en un objeto para cambiar una propiedad o ejecutar alguna función desde otro objeto, la forma como se accede a dichas ranuras es por medio de señales. Teniendo estos conceptos claros, una de las funciones principales de la clase creada para que *Qt* interactuara con la librería *PIGPIO* fue el enlace de procesos en multihilo provenientes de eventos por flancos de subida, bajada o por tiempo de los pines GPIO, esto es de alta relevancia pues mediante la señal “Evento”(Ver Figura 27) se da una alerta para iniciar la comunicación oportuna con la FPGA para extraer la información depositada en la RAM de la FPGA (ver Figura 29) que corresponde a datos de partículas incidentes en el detector.

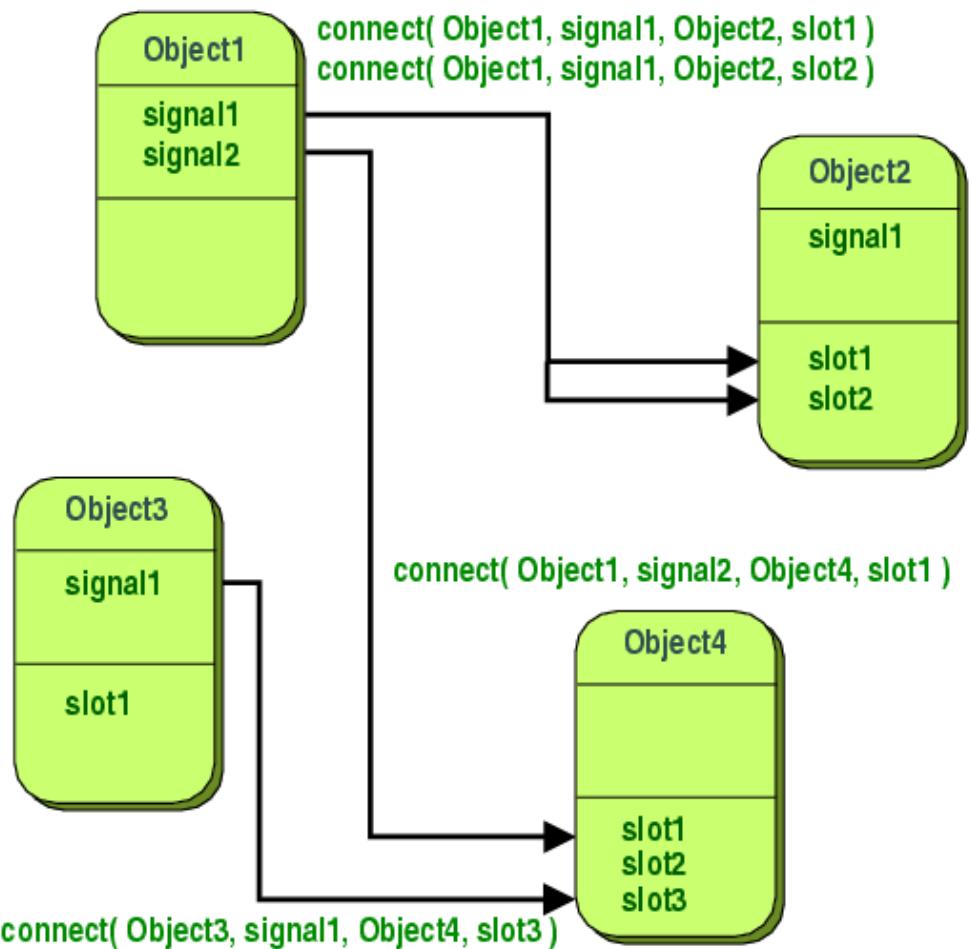


Figura 34: Comunicación entre objetos mediante “señales y ranuras” en inglés “signals and slots”.

Bajo los conceptos anteriormente mencionados se desarrolló gran parte del aplicativo que se muestra a continuación y, con el cual se puede generar el archivo de datos del detector de partículas descrito en este documento (si el lector desea profundizar puede dirigirse al repositorio de Github dispuesto para este proyecto).

2.2.3.1. Estructura del archivo de datos

Partículas										Panel 1		Panel 2		Tiempo FPGA [ns]		Tiempo UTC		GPS		Variables Atmosféricas							
1H	2H	3H	4H	5H	6H	1H	2H	3H	4H	5H	6H	C	C	C	C	C	C	AA-MM-DD	H-M-S	Día de la semana	Día del año	Latitud	Longitud	Presión	Temperatura		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	4567	16/05/18 09:08	Wednesday	136	7.139267	-73.121268	880 hPa	28°
0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	921923	16/05/18 09:08	Wednesday	136	7.139267	-73.121268	880 hPa	28°
0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	234	16/05/18 09:08	Wednesday	136	7.139267	-73.121268	880 hPa	28°		
0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	54545	16/05/18 09:08	Wednesday	136	7.139267	-73.121268	880 hPa	28°
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	454545	16/05/18 09:08	Wednesday	136	7.139267	-73.121268	880 hPa	28°
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	845452	16/05/18 09:08	Wednesday	136	7.139267	-73.121268	880 hPa	28°
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	50587	16/05/18 09:08	Wednesday	136	7.139267	-73.121268	880 hPa	28°
0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	90054	16/05/18 09:08	Wednesday	136	7.139267	-73.121268	880 hPa	28°
0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	202545	16/05/18 09:08	Wednesday	136	7.139267	-73.121268	880 hPa	28°
0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	654451	16/05/18 09:08	Wednesday	136	7.139267	-73.121268	880 hPa	28°
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	874	16/05/19 09:08	Thursday	137	7.139267	-73.121268	882 hPa	23°
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	64554	17/05/19 09:08	Thursday	137	7.139267	-73.121268	882 hPa	23°
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	546545	18/05/19 09:08	Thursday	137	7.139267	-73.121268	882 hPa	23°
1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	54545	19/05/19 09:08	Thursday	137	7.139267	-73.121268	882 hPa	23°
0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	455456	20/05/19 09:08	Thursday	137	7.139267	-73.121268	882 hPa	23°
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	62121	21/05/19 09:08	Thursday	137	7.139267	-73.121268	882 hPa	23°
0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	115	22/05/19 09:08	Thursday	137	7.139267	-73.121268	882 hPa	23°
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	15154	23/05/19 09:08	Thursday	137	7.139267	-73.121268	882 hPa	23°
1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	454545	24/05/19 09:08	Thursday	137	7.139267	-73.121268	882 hPa	23°
0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	788746	25/05/19 09:08	Thursday	137	7.139267	-73.121268	882 hPa	23°

Figura 35: Estructura de datos en el archivo .csv generado, en verde estarían los posibles eventos de partículas que atravesaron el detector.

2.2.3.2. Interfaz de usuario

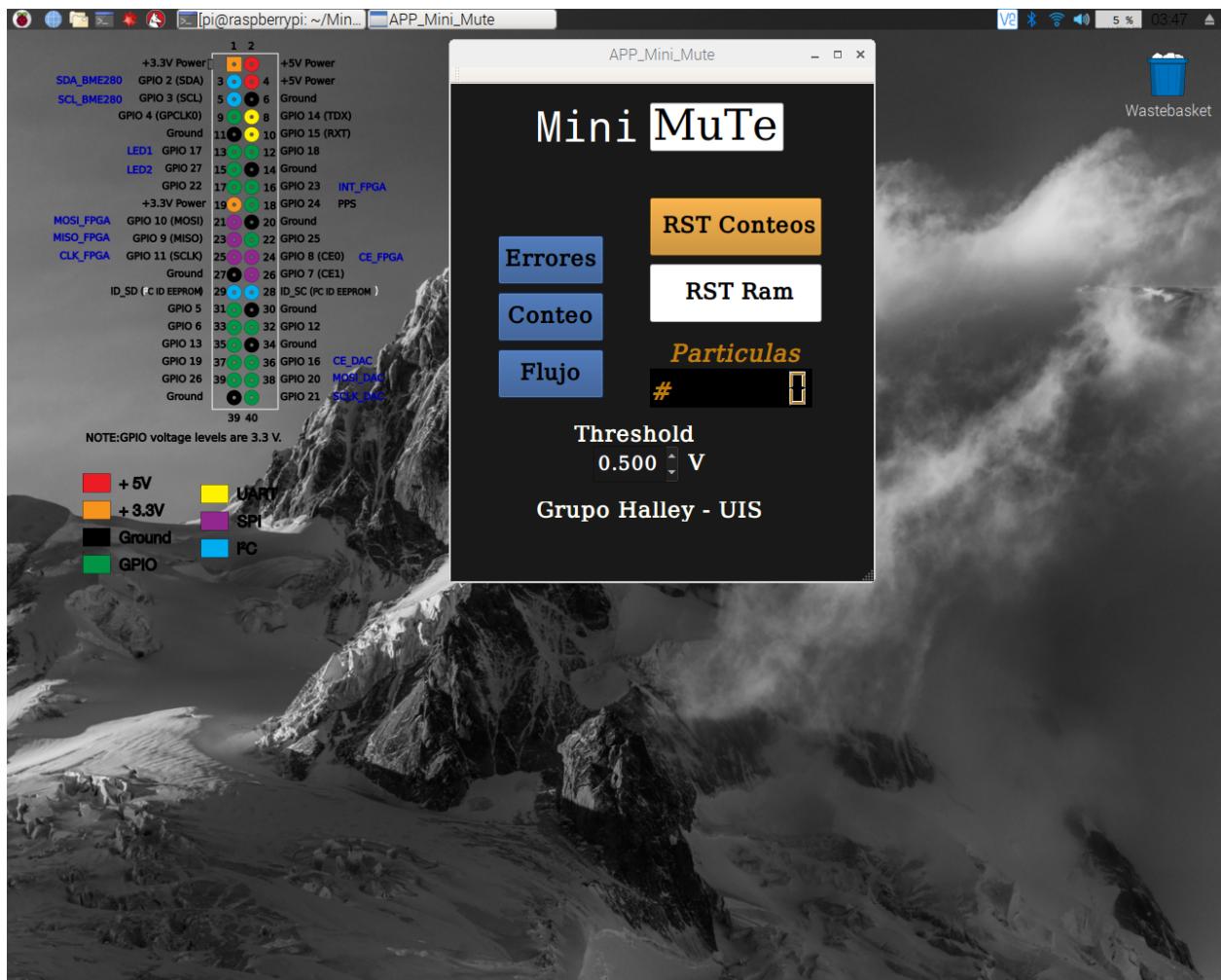


Figura 36: Aplicación desarrollada en Qt y ejecutándose en la Raspberry pi 2 dispuesta para el detector.
nota: Esta no es la final, esta imagen se actualizara prontamente

Bibliografía

- [1] D. Sierra *et al.*, “Cálculo de parámetros para el telescopio de muones, mute-uis.” Reporte-Halley-UIS-MuTe-001-2016., 2016.
- [2] F. Halzen, A Martin, *Quarks and leptons*. New York, USA: John Wiley and Sons, 1984.
- [3] P. Noli, F. Ambrosino, L. Bonechi, A. Bross, L. Cimmino, *et al.*, “Muography of the Puy de Dôme,” *ANNALS OF GEOPHYSICS*, vol. 604401, no. 1, 2017.
- [4] G. Jonkmans, V. Anghel, C. Jewett, and M. Thompson, “Nuclear waste imaging and spent fuel verification by muon tomography,” *Annals of Nuclear Energy*, vol. 53, no. Supplement C, pp. 267 – 273, 2013.
- [5] J. Perry, M. Azzouz, J. Bacon, K. Borozdin, E. Chen, *et al.*, “Imaging a nuclear reactor using cosmic ray muons,” *Journal of Applied Physics*, 2013.
- [6] L. W. Alvarez, J. A. Anderson, F. El Bedwei, J. Burkhard, A. Fakhry, A. Girgis, *et al.*, “Search for Hidden Chambers in the Pyramids,” *SCIENCE*, no. 167, pp. 832–839, 1970.
- [7] A. Anastasio, F. Ambrosino, D. Basta, L. Bonechi, M. Brianzi, *et al.*, “The MU-RAY detector for muon radiography of volcanoes,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 732, pp. 423–426, 2013.
- [8] N. Lesparre, D. Gibert, and J. Marteau, “Bayesian dual inversion of experimental telescope acceptance and integrated flux for geophysical muon tomography,” *Geophysical Journal International*, vol. 188, no. 2, pp. 490–497, 2012.
- [9] F. Ambrosino, A. Anastasio, D. Basta, L. Bonechi, M. Brianzi, *et al.*, “The mu-ray project: Detector technology and first data from mt. vesuvius,” vol. 9, pp. C02029–C02029, 02 2014.
- [10] M. Spurio, *Particles and Astrophysics*. Versoix, Switzerland: Springer, 2015.
- [11] P. data group, *Review of particle physics*. California,USA: Regents of the University of California, 2010.
- [12] S. Riggi, V. Antonuccio-Delogu, M. Bandieramonte, U. Becciani, A. Costa, P. L. Rocca, P. Massimino, C. Petta, C. Pistagna, F. Riggi, E. Sciacca, and F. Vitello, “Muon tomography imaging algorithms for nuclear threat detection inside large volume containers with the muon portal detector,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 728, no. Supplement C, pp. 59 – 68, 2013.

- [13] J. M. Blasco, *Contribuciones al procesado hardware de la señal para detectores de radiación de alta resolución espacial con lectura por matriz de fotodiodos: diseño de un prototipo funcional basado en FPGA*. PhD thesis, Departamento de Ingeniería Electrónica. Universidad de Valencia, 2013.
- [14] C. Leroy and P. Rancoita, *Principles of radiation interaction in matter and detection*. Toh Tuck Link, Singapore: World Scientific, 2012.
- [15] G. F. Knoll, *Radiation detection and measurement*. USA: John Wiley and Sons, 4 ed., 2010.
- [16] J. B. Birks, D. W. Fry, L. Costrell, and K. Kandiah, *The Theory and Practice of Scintillation Counting*. London, England: Elsevier, 1964.
- [17] A. Pla-Dalmau, A. Bross, and V. Rykalin, “Extruding plastic scintillator at fermilab,” vol. 1, pp. 102 – 104 Vol.1, 11 2003.
- [18] A. Pla-Dalmau, A. D. Bross, and K. L. Mellott, “Low-cost extruded plastic scintillator,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 466, no. 3, pp. 482–491, 2001.
- [19] M. Wilches, L. F. Ruiz, and M. Hernandez, *Bioingeniería VI*. Medellin, Colombia: Universidad de Antioquia, 2007.
- [20] C. Grupen, B. Shwartz, *et al.*, *Particle Detectors*. Cambridge, USA: C. Grupen and B. A. Shwartz, 2 ed., 2008.
- [21] J. Marteau, D. Gibert, N. Lesparre, F. Nicollin, P. Noli, and F. Giacoppo, “Muons tomography applied to geosciences and volcanology,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 695, no. Supplement C, pp. 23 – 28, 2012. New Developments in Photodetection NDIP11.
- [22] D. Gibert, K. Marteau-Bazouni, and J. Marteau, “Radiographier les volcans avec les rayons cosmiques,” *Reflets de la Physique*, no. 32, pp. 14 – 18, 2013.
- [23] Hamamatsu Photonics K.K, *Handbook Si APD, MPPC*.
- [24] Hamamatsu Photonics K.K, *MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) S13360 series datasheet*.
- [25] V. Golovin and V. Saveliev, “Novel type of avalanche photodetector with geiger mode operation,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 518, no. 1, pp. 560 – 564, 2004. Frontier Detectors for Frontier Physics: Proceedin.
- [26] B. P. *et al.*, “Digital electronics for the pierre auger observatory amiga muon counters,” *ICFA Instrum. Bull.*, vol. 23, p. 28, 2001.
- [27] A. Clarkson, D. Hamilton, M. Hoek, D. Ireland, J. Johnstone, R. Kaiser, T. Keri, *et al.*, “Geant4 simulation of a scintillating-fibre tracker for the cosmic-ray muon tomography of legacy nuclear waste containers,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*

Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 746, no. Supplement C, pp. 64–73, 2014.

- [28] V. A. Kudryavtsev, N. J. Spooner, J. Gluyas, C. Fung, and M. Coleman, “Monitoring subsurface co₂ emplacement and security of storage using muon tomography,” *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 11, no. Supplement C, pp. 21 – 24, 2012.
- [29] F. Beauducel, A. Bross, S. Buontempo, L. D’Auria, Y. Déclais, *et al.*, “The mu-ray project: Summary of the round-table discussions,” *Earth, Planets and Space*, vol. 62, pp. 145–151, Feb 2010.