

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA**  
**VALPARAÍSO-CHILE**



**SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA  
DETECTORES DE MUONES**

**JAIRO ESTEBAN GONZÁLEZ CABEZAS**

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO  
CIVIL ELECTRÓNICO**

**PROFESOR GUÍA  
DR. GONZALO CARVAJAL**

**PROFESOR CO-REFERENTE  
DR. HAYK HAKOBYAN**

**MES, AÑO**



---

---

# CONTENIDO

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>III</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>VI</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto general	1
1.2. Motivación	2
1.3. Planteamiento del Problema	4
1.4. Alcances y contribuciones	6
1.5. Organización del documento.	7
<b>2. ESTADO DEL ARTE</b>	<b>8</b>
2.1. LabPet II	8
2.2. 4D PET	10
2.3. ATLAS	11
2.4. Discusión sobre alternativas existentes	15
<b>3. SISTEMA DE DETECCIÓN</b>	<b>17</b>
3.1. Detector de Partículas	18
3.1.1. Estructura general	18
3.1.2. Detector sTGC utilizado	20
3.1.3. Procedimiento de Operación y Pruebas	22
3.2. Interfaz de Lectura	25
3.2.1. Circuito (circuito para que?)	27
3.2.2. Ejemplo de operación	27
<b>4. SISTEMA DE ADQUISICIÓN</b>	<b>30</b>
4.1. Arquitectura propuesta	30
4.1.1. Esquema General (de que?)	32

4.1.2. Plataforma	32
4.1.3. Propuesta	34
4.2. Implementación del Sistema de Adquisición	35
4.2.1. Sampler	37
4.2.2. Event Buffer	41
4.2.3. Event Reader y Comunicación	42
<b>5. SIMULACIONES</b>	<b>44</b>
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>45</b>
<b>A. CONTROL DE VERSIONES DE PROYECTOS VIVADO CON GIT</b>	<b>46</b>
<b>B. CONEXIÓN DE SEÑALES LVDS EN UNA FPGA ARTIX 7</b>	<b>47</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>48</b>

---

---

# ÍNDICE DE FIGURAS

1.1.	Representación artística de rayos cósmicos y lluvia de partículas subatómicas sobre la corteza terrestre.	3
1.2.	Diagrama del experimento ATLAS. CCTVal colabora en la actualización de la zona indicada como "New small Wheel", que contiene detectores sTGC.	4
1.3.	Fotografía correspondiente al montaje de detectores sTGC en la New Small Wheel del proyecto ATLAS.	5
1.4.	Fotografía de la fabricación de detectores sTGC en laboratorios de CCTVal. Cada una de placas observadas en la imagen corresponde a capas constitutivas de un detector.	6
1.5.	Diagrama del sistema de muongraña de terreno utilizando un solo detector.	7
2.1.	Diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos para Lab-PET II [?]	9
2.2.	Diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos para Detector PET 4D [?]	11
2.3.	Layout del experimento ATLAS, donde se indica la posición de la Small Wheel y la Big Wheel [?]	12
2.4.	Diagrama de la interfaz de captura para detectores de muones TGC [?]. Los muones se representan con el símbolo $\mu$ . Existen 3 capas de detectores, por lo tanto se observan 3 bloques que incluyen retardos, selección y captura de los pulsos.	13
2.5.	Diagrama del sistema de disparo y adquisición de datos en el experimento ATLAS. [?]	14
2.6.	Diagrama de la tarjeta de lectura ROBIN en ATLAS [?].	14
2.7.	Diagrama de bloques de la FPGA en ROBIN [?].	15

3.1.	Diagrama del sistema de muongrafía de terreno utilizando un solo detector.	18
3.2.	Estructura interna de un detector TGC [?].	19
3.3.	Lineas de campo eléctrico observadas en un corte transversal de los cables y cátodos del detector. Los cátodos se ilustran en celeste, los cables se representan en negro <b>No se ve el negro</b> , y las lineas de campo corresponden a las flechas de color rojo [?].	20
3.4.	Estructura interna de un detector sTGC adaptado para este proyecto de titulación. El gas es contenido entre ambas capas de grafito (cátodos). Los cables internos corresponden a los ánodos.	21
3.5.	Vista superior del detector prototipo.	22
3.6.	Vista superior del detector, en donde se indican las etiquetas asociadas a cada canal en función del eje al que pertenece. Cada cuadro representa un área de detección de $1\text{cm}^2$ .	22
3.7.	Interfaz de lectura ASD. Se destacan en la imagen sus canales (hit) del 0 al 15, su salida analógica LEMO y el primer pin en su conector de 40 posiciones.	25
3.8.	Detalle de los puertos en el conector 40 posiciones de la interfaz ASD.	26
3.9.	Diagrama de bloques del circuito principal para un canal de la interfaz ASD. Se indican la etapa de preamplificación, el amplificador principal de ganancia 7, y el comparador.	28
3.10.	Captura de pantalla de un pulso de voltaje con carga equivalente a $0.3\text{pC}$ , medido en un osciloscopio.	29
3.11.	Captura de pantalla de un osciloscopio, en la cual se ilustra un pulso de voltaje proveniente de la salida analógica LEMO de la interfaz ASD luego de haber recibido un pulso de $0.3\text{pC}$ de carga eléctrica.	29
4.1.	Diagrama del esquema general para el sistema de adquisición a diseñar. El disparo corresponde a la señal digital que indica si la partícula detectada es un muon, mientras que la señal digital corresponde al pulso captado por el detector, luego de haber pasado por la interfaz de lectura. Los datos son la información asociada a eventos seleccionados, que serán enviados a un dispositivo externo.	32
4.2.	Tarjeta de desarrollo y módulo Zynq a utilizar. A la izquierda se ilustra la placa de desarrollo Trenz TR0703 [?] y a su derecha se ilustra el módulo que va montado en ella: Trenz TR0720 [?] que contiene un SoC Zynq 7000 [].	34

4.3.	Diagrama de la arquitectura de hardware propuesta para el diseño de un sistema de adquisición de datos asociado a un solo detector de muones.	35
4.4.	Block Design del sistema de adquisición de datos implementado en el módulo TE0720.	36
4.5.	Diagrama de la vista superior de la tarjeta de desarrollo utilizada, indicando la nomenclatura de los pines correspondientes a sus conectores VG96. Los pines utilizados para conectar la interfaz ASD se encuentran enmarcados en el recuadro rojo. <b>el cuadro rojo se sobre-pone a los circulos, no queda clara el area de interes.</b>	38
4.6.	Diagrama simplificado del módulo <i>Sampler</i> , ejemplificado para una sola señal LVDS.	41
4.7.	Diagrama simplificado del módulo <i>Event Buffer</i> .	42
4.8.	Diagrama simplificado del módulo <i>Event Reader</i> y el módulo de comunicación en el procesador.	43

---

---

# ÍNDICE DE TABLAS

4.1. Mapeo de conexiones entre Zynq e interfaz ASD.	39
---	----

## Capítulo 1

---

# INTRODUCCIÓN

En este documento se detalla el trabajo realizado en torno al diseño, implementación y validación de un prototipo de un sistema de adquisición de datos para detectores sTGC (small-strip Thin Gap Chamber), cuya función es detectar muones. Este sistema fue diseñado en base a indicaciones y requerimientos específicos del CCTVal (Centro Científico Tecnológico de Valparaíso) para aplicaciones de detección de partículas y muongrafía de terrenos mineros. El sistema fue implementado en una FPGA (Field-programable gate array) utilizando el lenguaje de descripción de hardware SystemVerilog.

El presente capítulo relata el contexto, las principales motivaciones que originan este proyecto de titulación, el planteamiento del problema, sus alcances y las contribuciones asociadas. Al final del capítulo se incluye también la organización de este informe.

### 1.1. Contexto general

El planeta tierra es constantemente bombardeado por rayos cósmicos provenientes del espacio exterior, correspondiendo principalmente a partículas cargadas como protones y núcleos atómicos. El origen de estos rayos cósmicos es variado, y aunque la fuente de algunos es desconocida, la mayor parte de ellos provienen de tormentas solares, agujeros negros e incluso de eventos astronómicos asociados al origen del universo [1]. La velocidad alcanzada por estas partículas cósmicas es tan grande que entran en la categoría de partículas de altas energías, alcanzando desde unos cuantos GeV (Giga Electron Volts) en partículas provenientes del sol, hasta más de 1000 TeV (Tera Electron Volts) para rayos originados en centros galácticos y agujeros negros [2].

Los rayos cósmicos inciden en el planeta tierra e interactúan con la atmósfera terrestre, produciendo partículas secundarias y la ionización del medio. Estas partículas secundarias decaen en nuevas partículas o vuelven a interactuar con otras

a su paso, generando una efecto en cadena y produciendo así una lluvia de partículas subatómicas sobre la corteza terrestre, entre las cuales se encuentran los muones. La Figura 1.1 corresponde a una representación artística que ayuda a ilustrar una lluvia de partículas originada por radiación cósmica.

Los muones corresponden al 70 % de las partículas que logran llegar a la superficie del planeta. Un muon posee una carga eléctrica equivalente a la de un electrón, pero su masa equivale a casi 200 electrones. Los muones viajan a velocidades cercanas a la de la luz, lo que sumado a su gran masa, les permite atravesar la materia casi sin interactuar con ella. Durante sus cerca de  $2\mu\text{s}$  de vida media [1] (desde su origen hasta su decaimiento), los muones son incluso capaces de llegar a zonas bajo tierra.

Al interactuar con la materia, los muones son absorbidos o su energía se ve disminuida. Detectarlos y medir su energía restante permite conocer las propiedades de la materia que ha sido atravesada por estas partículas. Dado que la probabilidad de interacción de los muones es directamente proporcional a la densidad de la materia atravesada, se puede realizar un mapa de densidad de terreno a partir de la reconstrucción de vértices de interacción entre la materia y los muones, proceso conocido como muongrafiá o tomografía muónica, útil en áreas como la arqueología, vulcanología, geología y minería. [3] [4].

Para llevar a cabo mediciones y análisis de detección de muones se requieren detectores, interfaces de lectura, análisis computacional, y por supuesto, un sistema de adquisición de datos capaz de transformar las detecciones a datos computables y analizables para extracción e interpretación de la información.

## 1.2. Motivación

El “Sistema de adquisición de datos para detectores de muones” nace como un requerimiento del CCTVal para aplicaciones de física de partículas en el marco del proyecto “sTGC Minería”, cuyo nombre se debe al tipo de detector utilizado, llamado ”small-strip Thin Gap Chamber”.

Uno de los objetivos principales de “sTGC Minería” es realizar tomografías muónicas de terreno minero detectando partículas que provengan de radiación cósmica, método similar al que se utiliza para encontrar criptas y cavernas en pirámides egipcias [5]. Estas tomografías sientan las bases para la detección de cavernas subterráneas y estimación de densidad en terrenos mineros.

Producto de la colaboración existente entre CCTVal y el experimento ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) en CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire), CCTVal cuenta con las herramientas y conocimientos necesarios para la fabricación de detectores de muones. Esta colaboración internacional consiste en la

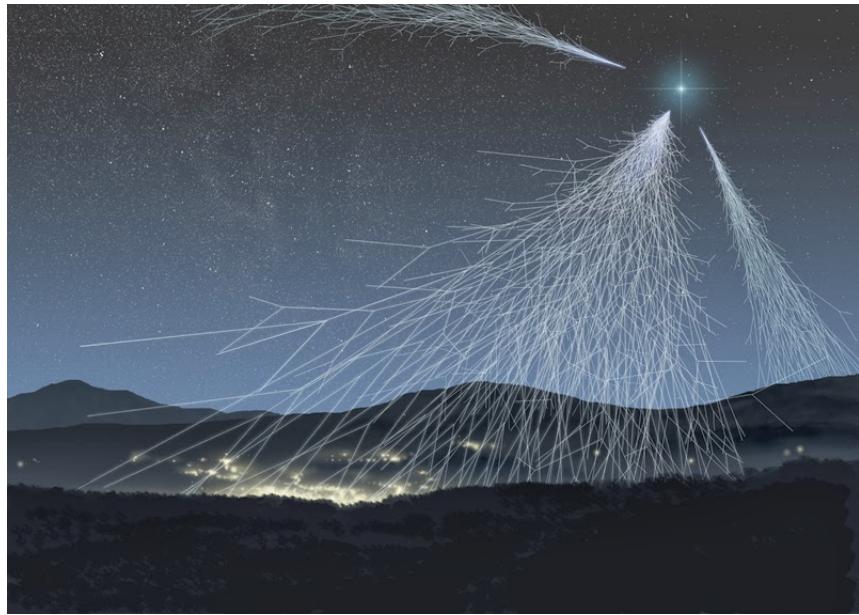


Figura 1.1: Representación artística de rayos cósmicos y lluvia de partículas subatómicas sobre la corteza terrestre.

actualización de un sector del experimento ATLAS, llamado Small Wheel, cuyos detectores son fabricados solamente en Chile y otros cuatro países. La Figura 1.2 ilustra el diagrama del experimento, indicándose la Small Wheel en el sector central del instrumento. La Figura 1.3 corresponde a un fotografía del proceso de montaje de la Small Wheel. Los trapecios dorados (marcado en rojo) que se observan en dicha imagen corresponden a los detectores sTGC, donde los tercios superiores (marcado en azul) de cada trapecio son los detectores fabricados en CCTVal. La Figura 1.4 ilustra una fotografía de los detectores sTGC en su etapa de fabricación. La tecnología utilizada para confeccionar estos detectores es la misma a utilizar en “sTGC Minería”, aplicándose a detectores prototipo de tan solo  $15\text{cm}^2$  de superficie.

Actualmente, CCTVal cuenta con el conocimiento para fabricación de detectores, pero no cuenta con toda la experiencia respecto al manejo de datos provenientes de ellos. El diseño de un sistema de adquisición representa uno de los primeros pasos para adquirir experiencia práctica. Esta experiencia será valiosa para este y futuros proyectos relacionados con detección de partículas.

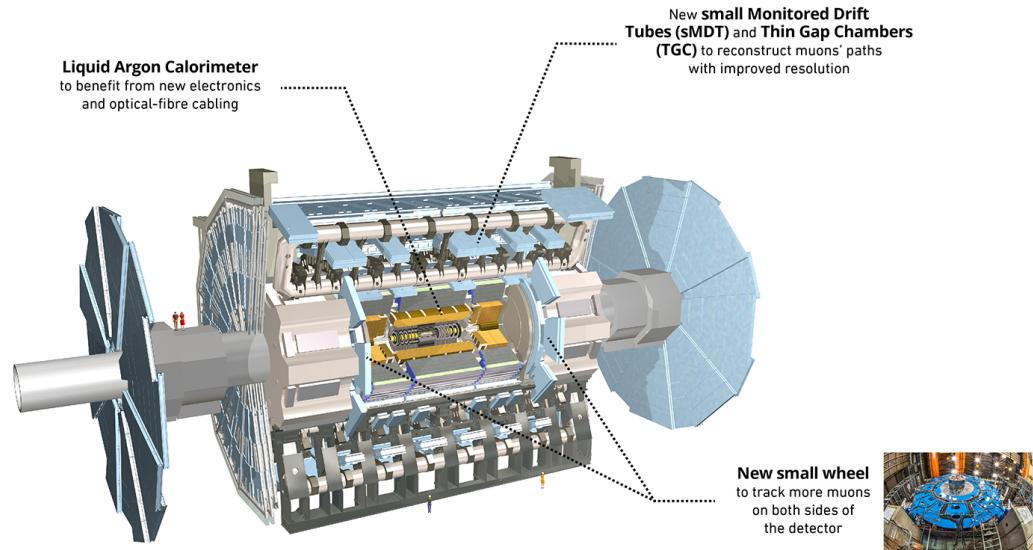


Figura 1.2: Diagrama del experimento ATLAS. CCTVal colabora en la actualización de la zona indicada como "New small Wheel", que contiene detectores sTGC.

### 1.3. Planteamiento del Problema

La detección de muones requiere una serie de etapas y variados detectores, tales como los utilizados en el experimento ATLAS en el CERN. Las etapas esenciales incluyen la generación de una señal de disparo, la detección de partículas y la adquisición de los datos. En “sTGC Minería” ya se cuenta con un sistema de disparo y de detección, pero hace falta diseñar un sistema de adquisición. Es este sistema de adquisición el que se desarrollará en este proyecto de titulación. Se espera que este sistema de adquisición sea capaz de captar las señales generadas por los detectores y determinar los vértices de interacción entre los muones y el detector, proceso que será explicado en el Capítulo 3.

El “Sistema de adquisición de datos para detectores de muones” cumplirá con las funciones de adquirir, discriminar y transferir la información captada por el detector, para contribuir a la tomografía muónica del terreno. La Figura 1.5 ilustra el sistema de muongrafía de terreno considerando un solo detector de muones. Para su operación, el sistema utiliza detectores secundarios (centelladores), una unidad de coincidencia, un detector sTGC y una interfaz de lectura. Los dos primeros corresponden a la etapa de generación de señal de disparo (en azul), mientras que los últimos dos corresponden a la etapa de detección (en verde). La etapa de adquisi-

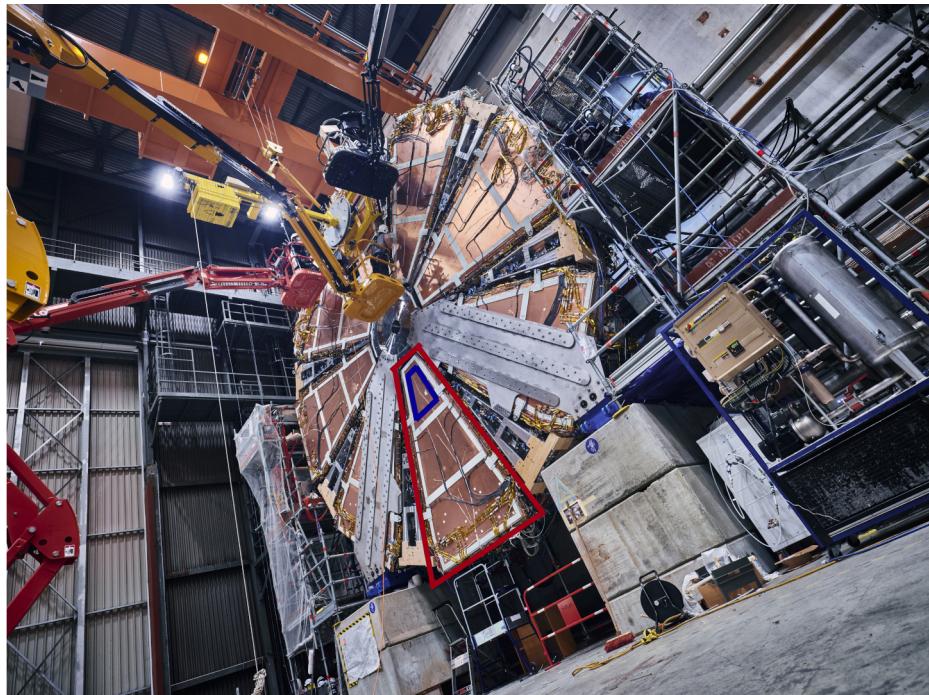


Figura 1.3: Fotografía correspondiente al montaje de detectores sTGC en la New Small Wheel del proyecto ATLAS.

ción de datos, (correspondiente al sistema a diseñar) capta y discrimina los pulsos generados por el sistema de detección. La información resultante será comunicada a etapas posteriores para análisis de datos.

Si bien en este prototipo funcional solo se realizarán pruebas a pequeña escala, se requiere que este sistema sea capaz de operar con detectores de mayor tamaño o con arreglos de varios detectores, permitiendo el análisis de zonas de mayor área o el estudio de trayectorias de partículas con detectores superpuestos. Esto implica que el sistema debe ser de naturaleza modular y escalable, sobre todo en torno a la cantidad de señales que es capaz de procesar.

El objetivo principal del sistema a diseñar es determinar los vértices de interacción en el detector. Como objetivo secundario, el proyecto debe ser una herramienta replicable que esté disponible para ser utilizada en nuevos proyectos y experimentos del centro de investigación. Así mismo, el desarrollo y la documentación del proceso debe ser un aporte al conocimiento sobre la implementación de sistemas electrónicos para la detección y análisis de partículas utilizando estas tecnologías, ya que es uno de los primeros en ser desarrollados y probados en CCTVal.



Figura 1.4: Fotografía de la fabricación de detectores sTGC en laboratorios de CCT-Val. Cada una de placas observadas en la imagen corresponde a capas constitutivas de un detector.

#### 1.4. Alcances y contribuciones

Se espera que este sistema sea capaz de generar información suficiente para representar la ubicación de los vértices de interacción en la superficie del detector, con una resolución de al menos  $1\text{cm}^2$ .

El sistema deberá ser capaz de captar al menos 8 pares de señales, con la opción de ampliarlo a más canales, discriminando interacciones con partículas no deseadas mediante la interpretación de la señal de disparo.

La información generada pasará a etapas siguientes de análisis o de representación gráfica, por lo cual es importante que el sistema sea capaz de entregar información pertinentemente ordenada y seleccionada para dichos fines. La información debe ser enviada de manera tal que permita distinguir un evento de otro y reconocer el canal del detector asociado a cada señal captada.

Finalmente, uno de los principales aportes recae en la documentación respecto a entorno, operación y desarrollo del sistema en cuestión. Esto con el fin de facilitar su implementación en nuevos sistemas, permitir profundizar y mejorar la propuesta diseñada y entregar las herramientas al centro y a futuros estudiantes para operar dispositivos que posean etapas equivalentes. Esto incluye documentación sobre la operación de la interfaz de lectura, el manejo de señales digitales y el software empleado para el diseño del hardware. Además, el diseño desarrollado estará disponible en un repositorio, permitiendo así replicar los experimentos y extender el sistema

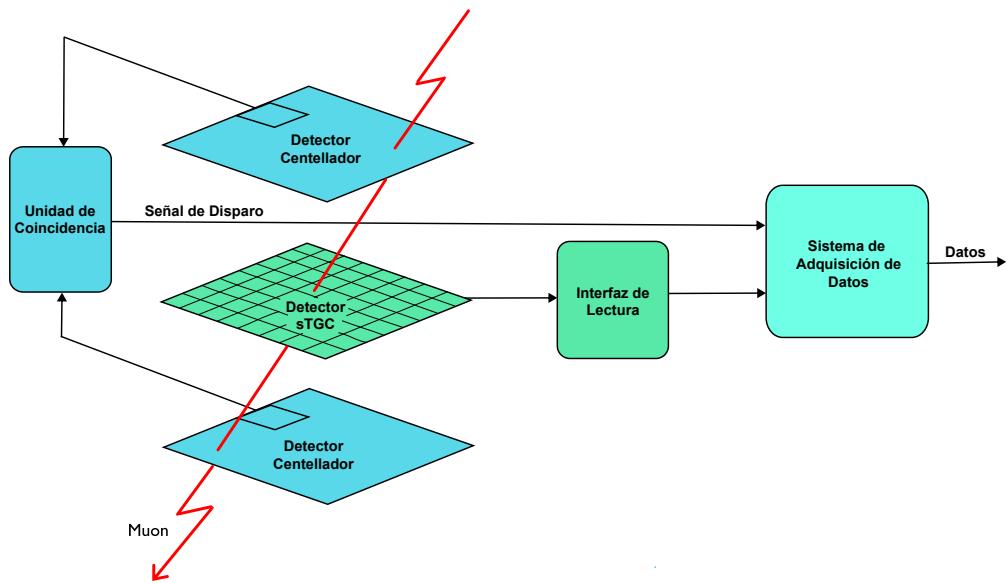


Figura 1.5: Diagrama del sistema de muongraffía de terreno utilizando un solo detector.

de adquisición partiendo de una base ya probada.

## 1.5. Organización del documento.

Este documento se estructura de la siguiente manera:

- El **Capítulo 2** incluye el estado del arte en cuanto a dispositivos de adquisición de datos para partículas de altas energías.
- El **Capítulo 3** describe las características del detector de partículas utilizado y resume las especificaciones del sistema de lectura para señales provenientes del detector, además de explicar su estructura y funcionamiento.
- El **Capítulo 4** detalla la arquitectura propuesta para la realización del sistema de adquisición, detallando el desarrollo de cada una de sus etapas.
- El **Capítulo 5** incluye pruebas realizadas en el sistema con el fin de comprobar funcionamiento y resultados del dispositivo.
- El **Capítulo 6** incluye las conclusiones finales y trabajo futuro propuesto a partir de lo realizado en este proyecto de titulación.

## Capítulo 2

---

# ESTADO DEL ARTE

Previo al diseño del sistema de adquisición de datos para detectores de muones, es pertinente conocer el estado del arte de otros sistemas de adquisición para física de partículas, con el fin de contrastar y rescatar las diferentes estrategias y tecnologías empleadas en la actualidad.

Como referencia para el diseño del sistema de adquisición, se han investigado detectores como los descritos en [?] y [?], enfocados a detección de partículas en diferentes rubros y condiciones. En este capítulo se describen tres sistemas relacionados a esta temática, destacando ideas sobre el esquema general de adquisición de datos, tecnologías que se utilizan actualmente para construirlos y métodos para adquirir y procesar las señales captadas.

### 2.1. LabPet II

Uno de los detectores estudiados es LabPet II [?], detector que posee un DAQ (Data Acquisition system) distribuido en tres etapas donde cada una de ellas está compuesta por una FPGA, tal como se ilustra en la Figura 2.1. Una primera etapa llamada *Front-End board* se encarga de registrar tiempo, energía y posición de las partículas captadas; una segunda etapa llamada *Hub board* ordena cronológicamente los eventos capturados, mientras que una tercera etapa llamada *Coincidence board* agrupa detecciones coincidentes, calculando además la tasa de eventos aleatorios ocurridos. Esta última etapa es capaz de recibir datos desde múltiples Hub boards para luego enviarlos a un computador.

Si bien los detectores de LabPet II están diseñados para otro tipo de partículas (positrones), la naturaleza de las señales es muy similar a los muones, y por lo tanto la lógica para su adquisición y procesamiento es comparable. Aún así, la cantidad de señales que es capaz de manejar dicho dispositivo ronda las 64 señales por módulo, a tasas cercanas a los 2 millones de eventos por segundo, las que comparativamente sobrepasarían las necesidades del sistema a desarrollar en este proyecto de titulación. Por ejemplo, los rayos muones cruzan la corteza terrestre a aproximadamente 1

muon por minuto en un área de  $1 \text{ cm}^2$  [3]<sup>1</sup>, muy por debajo de lo que se espera en LabPET II. Replicar un sistema como LabPet II para sTGC minería sería factible, pero implicaría un uso de recursos mayor al realmente necesario<sup>2</sup>, ya que se podrían alcanzar los objetivos propuestos para sTGC minería con un sistema de menor tamaño, por ejemplo utilizando solo una FPGA por módulo de detección en vez de dos o tres.

Del sistema de adquisición para LabPet II se destaca la utilización de multiplexores, serializadores/deserializadores y memorias de almacenamiento temporal (*buffer*). Dada la naturaleza y cantidad de eventos, se hace necesario serializar la información, ya que de otro modo sería necesario construir dispositivos con múltiples puertos de entrada o incluir varios del mismo tipo. Además, debido a la frecuencia de los eventos, se hace obligatoria la existencia de *buffers* para el almacenamiento de la información, permitiendo procesarlos y transmitirlos hacia etapas posteriores a tasas menores. Es destacable también la utilización de métodos para ordenar cronológicamente los eventos y la implementación del método TOT (Time-over-threshold) [?] para el cálculo de energía y datos temporales de pulsos analógicos. Este último es el método utilizado por la interfaz de lectura presente en el proyecto sTGC Minería.

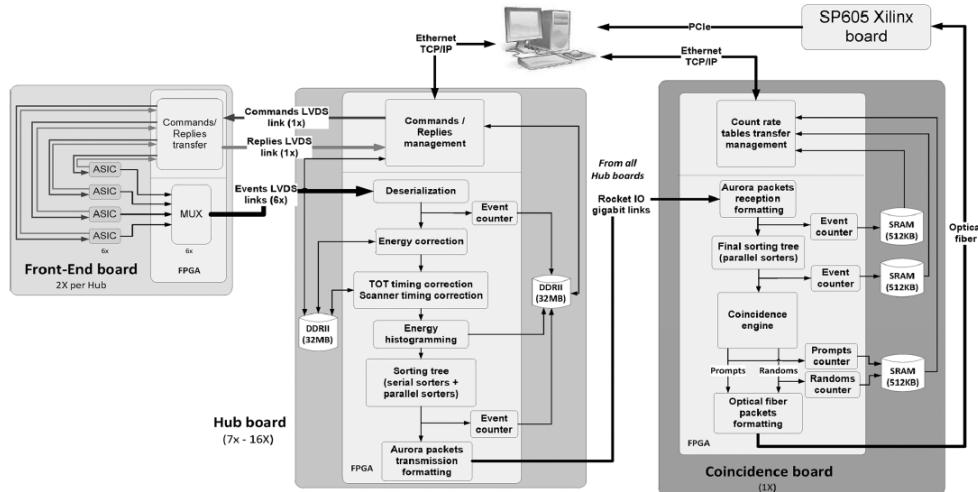


Figura 2.1: Diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos para LabPET II [?]

<sup>1</sup> Gonzalo's comment: em y otras unidades no deberian ir en italicas. Italicas es para variables en expresiones matematicas. Corregir en todo el documento.

<sup>2</sup> Gonzalo's comment: poco optimo? puede ser mas optimo? y mas mejor o menos mejor?

## 2.2. 4D PET

Otro sistema de referencia es el DAQ para el sistema modular 4D PET [?]. Este dispositivo permite capturar entre 144 a 576 señales provenientes de arreglos matriciales de fotomultiplicadores. Se caracteriza principalmente por poseer una tarjeta madre central, en la cual es posible conectar hasta 18 tarjetas de adquisición. Cada una de estas tarjetas tiene de 8 a 32 canales para adquisición de señales, y su función es capturar, procesar y enviar información a la placa madre. La Figura 2.2 ilustra la arquitectura de este sistema.

Las señales son capturadas por ASICs (*Application Specific Integrated Circuits*), muestreadas por conversores análogo-digitales y procesadas por una FPGA, mientras que una FPGA principal (etiquetada como Master FPGA) se encarga de controlar a las FPGAs anteriores y de recibir los datos capturados. El procesamiento inicial de las señales se encarga de calcular energía y datos temporales asociados a las partículas detectadas, mientras que el procesamiento final relaciona los eventos que hayan sido temporalmente coincidentes entre sí y a su vez calcula el tiempo de vuelo de las partículas, mediante un conversor de tiempo a señal digital (TDC).

Este sistema destaca por su modularidad, la cual permite un fácil escalamiento. En contraste con LabPET II, se utilizan varias placas adquisidoras paralelas en vez de utilizar serialización de datos, permitiendo procesar la información antes de llegar a la FPGA principal. Cabe destacar que esta arquitectura está relacionada con la necesidad de encontrar múltiples eventos simultáneos en distintas ubicaciones, requerimiento que no está presente en el sistema que se planea diseñar para este proyecto de titulación.

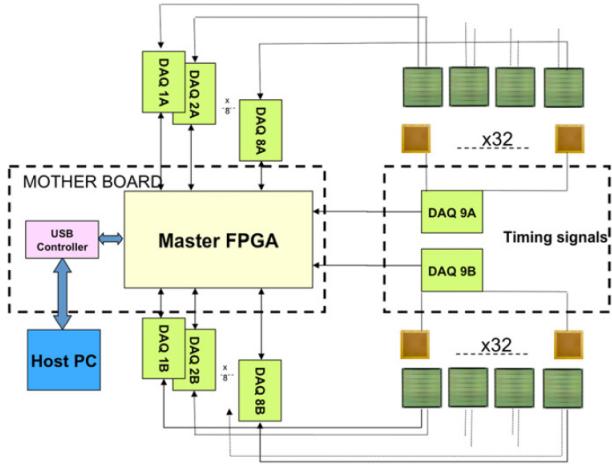


Figura 2.2: Diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos para Detector PET 4D [?]

### 2.3. ATLAS

Finalmente, la referencia más importante corresponde al experimento ATLAS [?], ya que una de sus etapas utiliza detectores sTGC, mientras que otra de sus etapas utiliza la misma interfaz de lectura que será utilizada en sTGC Minería.

El experimento ATLAS se encarga de interceptar grupos de partículas provenientes de haces de protones acelerados en el LHC (Large Hadron Collider) en CERN, con el objetivo de estudiar las colisiones de partículas ocurridas a su paso. Las colisiones se generan aproximadamente cada  $25\mu\text{s}$  [?], y cada colisión produce cerca de 23 interacciones con el detector, que junto a otros factores implica cerca de  $10^9$  eventos cada segundo. La tasa de aparición y nivel de energía de estos eventos son las principales razones por las que este detector es tecnológicamente complejo.

El estudio de colisiones tiene como objetivo medir partículas conocidas y deducir la existencia de partículas nuevas. Para lograrlo, es necesario reconstruir las trayectorias e interacciones de todas las partículas medibles mediante múltiples y variados sistemas de detección. Uno de estos sistemas corresponde al Espectrómetro de Muones [?], el cual permite determinar la validez de los eventos y trazar la trayectoria de los muones emitidos en las colisiones.

El Espectrómetro de Muones se compone de múltiples tecnologías de detección diferentes, una de las cuales corresponde a los detectores sTGC ubicados en la Small Wheel, mencionada en la sección 1.2. Otra de las tecnologías de detección que componen al Espectrómetro corresponde a los detectores TGC (Thin Gap Chamber), los cuales se diferencian de los detectores sTGC en el tamaño de sus componentes. Los

detectores TGC están ubicados en el sector denominado Big Wheel, indicado en la Figura 2.3, y sus datos son obtenidos gracias a una interfaz de lectura llamada ASD (Amplificador-Shaper-Discriminator). Esta interfaz de lectura, en conjunto con detectores sTGC, da vida al proyecto sTGC Minería en CCTVal, y su funcionamiento será explicado con mayor detalle en el Capítulo 3.

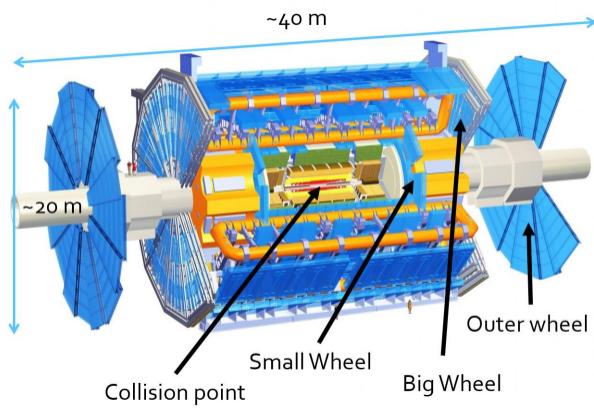


Figura 2.3: Layout del experimento ATLAS, donde se indica la posición de la Small Wheel y la Big Wheel [?]

La Figura 2.4 ilustra el sistema de captura de datos para detectores TGC del Big Wheel en el Espectrómetro de Muones. Los muones son representados con el símbolo  $\mu$  y cruzan tres capas de detectores TGC, cada una de las cuales cuenta con sus interfaces de lectura ASD. Los bloques posteriores se encargan de pre-procesar los pulsos capturados y entregarlos a las posteriores etapas de lectura y de selección de eventos.

En ATLAS, la selección de eventos a ser estudiados se lleva a cabo en dos etapas. La primera de ellas, llamada *Level 1 Trigger*, involucra al Espectrómetro de Muones y calorímetros. La segunda etapa involucra algoritmos distribuidos en varios computadores y se le conoce como *High-level Trigger*. La Figura 2.5 ilustra ambas etapas en paralelo a los sistemas de lectura de datos. El sistema de lectura de datos ilustrado en 2.4 corresponde al cuadro amarillo ubicado en la esquina superior derecha de la Figura 2.5, etiquetado como *Muon*. Si el Level 1 Trigger aprueba un evento detectado por el Espectrómetro y los calorímetros, entonces inicia la adquisición de estos datos en la tarjeta de lectura (etiquetada como *Readout System* en la Figura 2.5). Además, el Level 1 Trigger envía información sobre regiones de interés a analizar, con el fin de llevar a cabo la segunda etapa de selección (*High-Level Trigger*). Esta segunda etapa de selección utiliza software distribuido en cerca de 2000 computadores conectados a una red Ethernet y filtra eventos en función a muestras

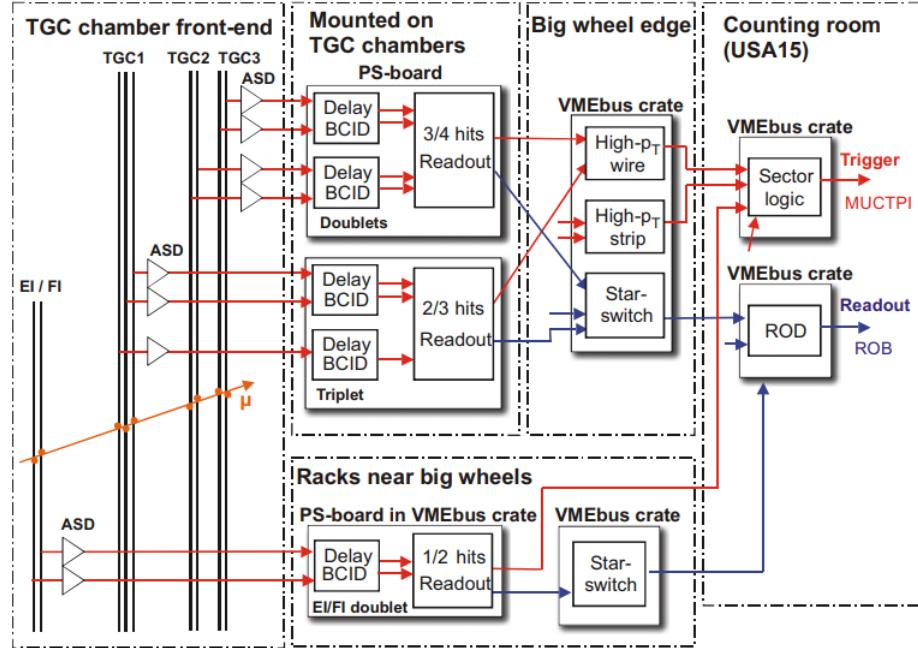


Figura 2.4: Diagrama de la interfaz de captura para detectores de muones TGC [?]. Los muones se representan con el símbolo  $\mu$ . Existen 3 capas de detectores, por lo tanto se observan 3 bloques que incluyen retardos, selección y captura de los pulsos.

de datos pertenecientes a las regiones de interés calculadas por el Level 1 Trigger [?]. Finalmente, los eventos seleccionados son trasferidos y almacenados en los bancos de datos del centro de investigación.

Entrando aún más en detalle respecto a la Figura 2.5, el verdadero sistema de adquisición de datos en ATLAS es un software distribuido en red [?], capaz de discriminar, procesar y transferir los eventos seleccionados hacia los bancos de almacenamiento de datos. El sistema de lectura (*Readout System*), en conjunto con el Level 1 Trigger, solo sería un equivalente a una interfaz de captura muy sofisticada. Para el caso de esta memoria de titulación, el Readout System del experimento ATLAS sería comparable, en términos de sus niveles de complejidad y de los bloques lógicos que los componen, al sistema de adquisición de datos que se desea diseñar para sTGC Minería.

El Readout System de ATLAS consiste en una tarjeta llamada ROBIN, compuesta de buffers, chips de comunicación, memoria flash, un procesador y una FPGA, como se ilustra en la Figura 2.6.

La lógica implementada en la FPGA se ilustra en la Figura 2.7. Se observa que su

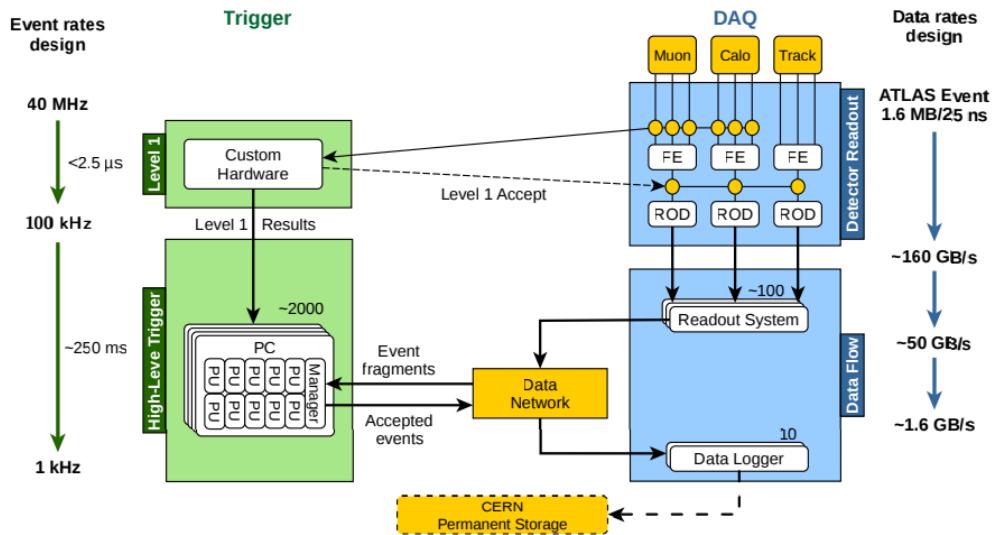


Figura 2.5: Diagrama del sistema de disparo y adquisición de datos en el experimento ATLAS. [?]

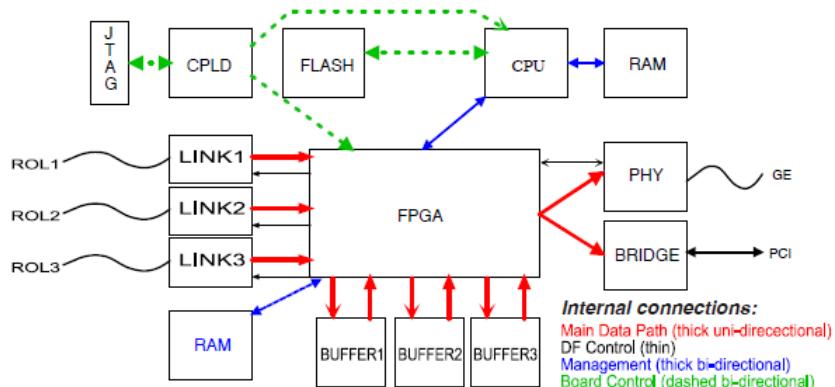


Figura 2.6: Diagrama de la tarjeta de lectura ROBIN en ATLAS [?].

labor es principalmente controlar los buffers de datos, traspasar los eventos captados hacia la siguiente etapa y eliminar los datos descartados por la señal de disparo de alto nivel.

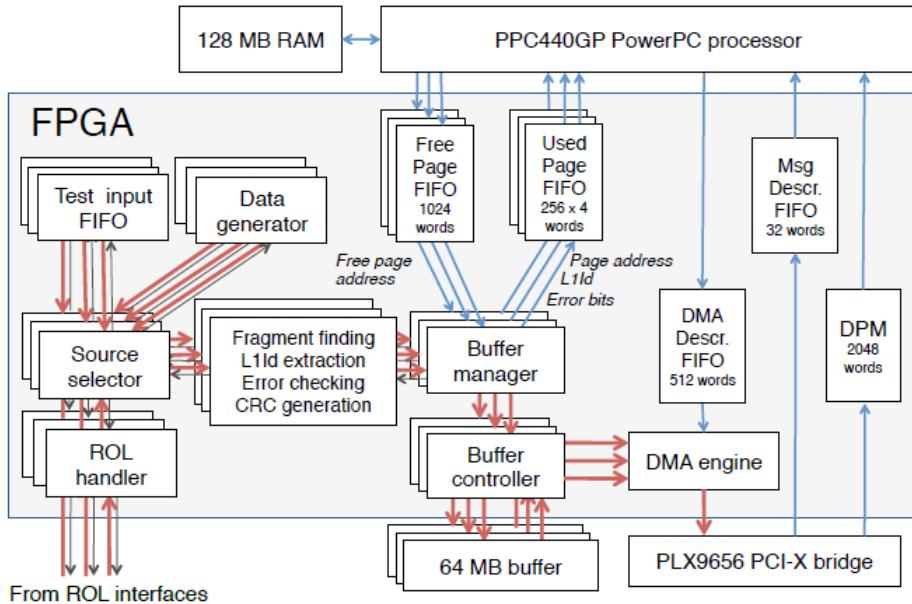


Figura 2.7: Diagrama de bloques de la FPGA en ROBIN [?].

Si bien ATLAS es un proyecto con detectores comparativamente más complejos que los descritos en las secciones 2.1 y 2.2, ATLAS presenta elementos comunes con ellos en su composición, sobretodo en cuanto a la utilización de ASICs y FPGAs para captura y control de los datos adquiridos. ATLAS se asemeja funcionalmente al 4D PET, en el sentido de implementar múltiples instancias de hardware equivalente, para así lograr manejar mayor cantidad de datos y brindar mayor control en cada uno de ellos. El fuerte de ATLAS radica en su conectividad en red y sistemas distribuidos, necesarios para la gran cantidad de datos simultáneos que deben ser procesados.

## 2.4. Discusión sobre alternativas existentes

Es claro que la tendencia en desarrollo de sistemas de adquisición es la utilización de ASICs en etapas de primera lectura, mientras que se utilizan FPGAs en etapas de manejo de datos y preprocesamiento, principalmente debido a la magnitud temporal de las señales, a la alta necesidad de precisión en su sincronización, y a la gran cantidad de señales de entrada que deben ser atendidas.

Los elementos más utilizados y recomendados a implementar son los buffers de almacenamiento, principalmente para ajustar la tasa de transmisión de datos de la captura hacia las siguientes etapas de procesamiento, que suelen ser más lentas. En

el sistema que se planea diseñar esto no es un problema, ya que la tasa de eventos es muy baja en comparación a los detectores estudiados. Aún así, los buffers pueden ser útiles para el escalamiento de los detectores en el futuro.

El concepto de serialización de datos estuvo principalmente presente en el detector LabPET II. Es pertinente considerarlo, sobretodo para el escalamiento del detector de muones. En caso de requerir cubrir un área mayor o con varias capas superpuestas de detectores, será necesario captar mayor cantidad de señales. Es allí donde se debe decidir si es recomendable comenzar con serialización de datos o con paralelismo de hardware.

En resumen, es conveniente diseñar el sistema en una FPGA dedicada a la adquisición de datos, incluyendo buffers de almacenamiento para los eventos capturados y replicando este sistema para cada detector adicional.

## Capítulo 3

---

# SISTEMA DE DETECCIÓN

El proyecto sTGC Minería se compone de tres sistemas principales: disparo, detección y adquisición, como se ilustra en la Figura 3.1. Como se introdujo en la Sección 1.3, el sistema de disparo [?] (ilustrado en azul), está formado por dos detectores centelladores y una unidad de coincidencias que emite una señal digital de disparo (indicada en celeste) cuando un muon traspasa ambos detectores centelladores. Esta señal de disparo es necesaria para discriminar eventos captados por el detector sTGC y descartar interacciones procedentes de otras partículas cargadas que no sean muones.<sup>1</sup>

Si bien los detectores centelladores presentes en el sistema de disparo son capaces de detectar exclusivamente el paso de muones, estos no son capaces de determinar la ubicación del vértice de interacción. Para cumplir con este requerimiento de localización, se utilizan los detectores complementarios al sistema de detección sTGC (ilustrados en verde en la Figura 3.1)<sup>2</sup>, sistema que es capaz de determinar la ubicación de los vértices de interacción gracias a su tecnología de fabricación.

En este capítulo se detalla la forma y funcionamiento del sistema de detección, describiendo el prototipo de detector sTGC utilizado en sTGC Minería y describiendo también la interfaz de lectura ASD<sup>3</sup> que lo sucede.<sup>4</sup> Es necesario conocer las características de estas etapas, ya que determinan la cantidad y tipos de señales a leer en el sistema de adquisición de datos a ser diseñado en este proyecto de titulación.

5

---

<sup>1</sup>Gonzalo's comment: (Para discutir) Este sistema de detección ya se encuentra fabricado? Por que no se trata en este trabajo?

<sup>2</sup>Gonzalo's comment: revisar colores

<sup>3</sup>Gonzalo's comment: introdujiste ASD?

<sup>4</sup>Gonzalo's comment: Clarificar explicitamente si esto ya esta implementado o haras algo con esto en tu memoria.

<sup>5</sup>Gonzalo's comment: Estudiar este sistema fue parte de tu memoria?

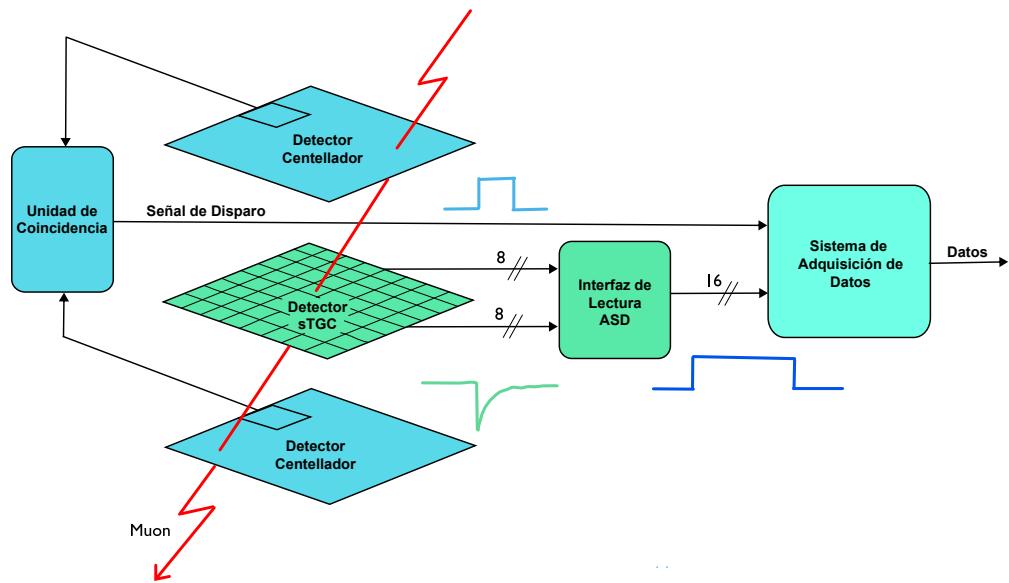


Figura 3.1: Diagrama del sistema de muongraffía de terreno utilizando un solo detector.

### 3.1. Detector de Partículas

La detección de muones en este proyecto es realizada mediante un detector de partículas inspirado en los detectores sTGC del experimento ATLAS, como se mencionó en la sección <sup>6</sup> 1.2. Los detectores originales se ubican en la llamada Small Wheel de ATLAS, formando parte del Espectrómetro de Muones, el cual se encarga de determinar el momento y la trayectoria de los muones emitidos por las colisiones. Para el proyecto sTGC minería se construyó <sup>7</sup> un prototipo de detector sTGC a menor escala, pero con la misma tecnología de fabricación utilizada para los detectores originales. En esta sección se describe la estructura de un sTGC original y la del prototipo en cuestión, incluyendo información sobre el funcionamiento y operación del prototipo de detector sTGC fabricado en CCTVal.

#### 3.1.1. Estructura general

<sup>8</sup>

Un sTGC está compuesto por dos planos de grafito (cátodos), con múltiples

<sup>6</sup>Gonzalo's comment: Cuando hablas de una sección o figura específica (con numero), debe ir con mayuscula.

<sup>7</sup>Gonzalo's comment: quien, cuando, donde?

<sup>8</sup>Gonzalo's comment: subsecciones

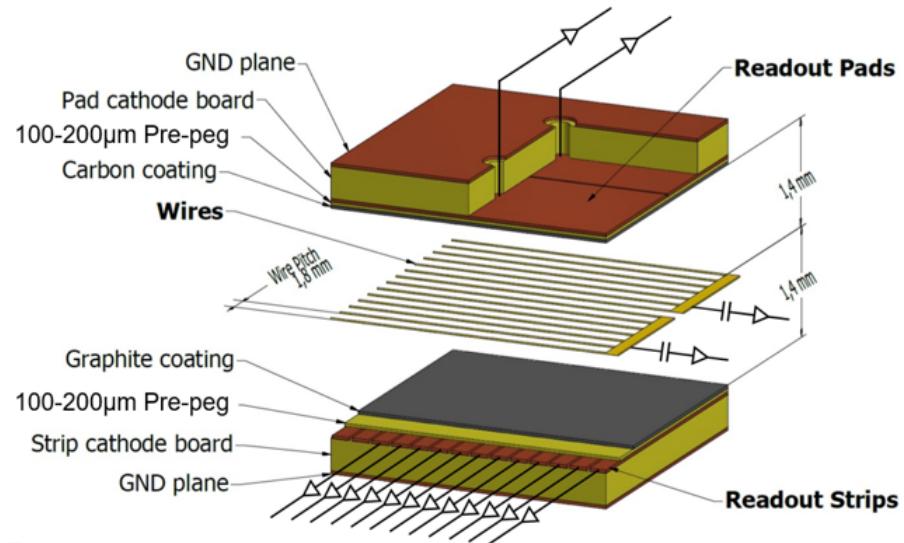


Figura 3.2: Estructura interna de un detector TGC [?].

cables en medio (ánodos) [?], tal como se observa en la figura 3.2. Recubriendo el exterior de ambos cátodos se ubican capas aislantes que separan los cátodos de las zonas conductoras, llamadas “*pads*” en la cara superior y “*strips*” en la cara inferior del detector<sup>9</sup>. Los cables al interior del detector se encuentran orientados perpendicularmente respecto a los *strips*.

Al interior del detector, entre los planos de grafito, se infiltra un gas compuesto por dióxido de carbono y n-pentano [?]. Mediante la aplicación de alto voltaje, se genera un campo eléctrico entre ánodos y cátodos. Se utilizan 3000 V<sub>DC</sub> entre cátodos y ánodos para generar el campo eléctrico, limitando la corriente a 50uA. El gas en su interior puede ser dióxido de carbono puro, con el compromiso de generar mayor cantidad de descargas no asociadas a muones. La figura 3.3 representa un corte transversal de un detector y sus líneas de campo eléctrico desde ánodo (cables) hasta cátodos (lámina de grafito superior e inferior).

El paso de muones a través del detector genera la ionización del gas y la liberación de electrones, los cuales son captados por los cables del detector gracias al campo eléctrico. El flujo de electrones en el gas ionizado genera pulsos de corriente en los cables, produciendo diferencia de potencial en los cátodos. Esta diferencia de potencial interactúa con los *pads* y *strips* en el exterior del detector, generando pulsos de voltaje en estas zonas conductoras, pero con polaridad inversa respecto a la corriente presente en los cables. En la Figura 3.1, este pulso de voltaje correspon-

<sup>9</sup>Gonzalo's comment: cual es la diferencia entre ambos? Como esta escrito, pareciera que la unica diferencia es que unos estan arriba y otros estan abajo.

diente a la señal de salida de un canal de detección está representado por el pulso verde dibujado en la zona central de la imagen.

La amplitud de los pulsos generados en el detector será mayor en torno al vértice de interacción y menor en zonas lejos de él. Esto permite relacionar la posición y energía de la partícula con las amplitudes de los pulsos en cada *strip* o cable medido.

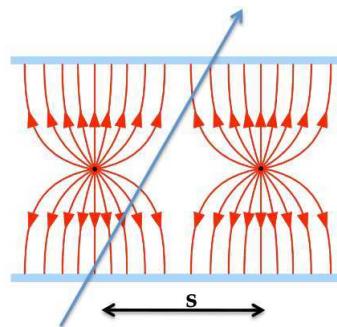


Figura 3.3: Lineas de campo eléctrico observadas en un corte transversal de los cables y cátodos del detector. Los cátodos se ilustran en celeste, los cables se representan en negro No se ve el negro, y las lineas de campo corresponden a las flechas de color rojo [?].

### 3.1.2. Detector sTGC utilizado

En ATLAS se leen señales provenientes de cátodos y ánodos a la vez. Esto permite trazar coordenadas de posición para cada evento, ya que los *strips* son perpendiculares a los cables. Por ejemplo, es posible trazar cuadrantes de strips Vs cables<sup>10</sup> para determinar los vértices de interacción: si un muon interactúa con un cable y un strip al mismo tiempo, entonces significa que el vértice de interacción se ubica en las cercanías de la intersección entre ese cable y ese strip. En este proyecto de titulación se leerán solo las señales provenientes de los *strips*, por los que solo se estaría midiendo un eje de posición, siendo necesario agregar un segundo eje coordenado para determinar los vértices de interacción.

Para agregar un eje coordenado adicional, se reemplazan los *pads* de la cara superior por *strips* perpendiculares a los del plano contrario. Así se logra tener información bidimensional del paso de una partícula leyendo solo las señales provenientes de *strips* perpendiculares entre si. La figura 3.4 ilustra la composición del detector capa por capa y detalla la orientación de cables y *strips*.

En particular, el detector utilizado cuenta con 8 *strips* útiles<sup>11</sup> por cada cara, de

<sup>10</sup>Gonzalo's comment: No se entiende esto.

<sup>11</sup>Gonzalo's comment: hay strips inutiles?

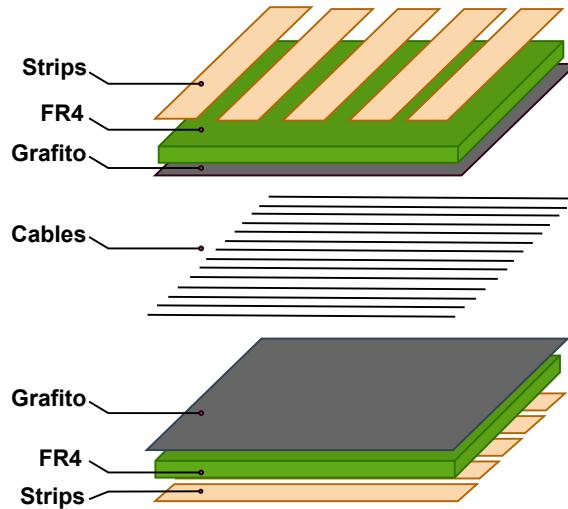


Figura 3.4: Estructura interna de un detector sTGC adaptado para este proyecto de titulación. El gas es contenido entre ambas capas de grafito (cátodos). Los cables internos corresponden a los ánodos.

15cm largo y 1cm de ancho cada uno. Una fotografía de este detector se incluye en la figura 3.5. En la parte superior de la fotografía se observan tubos para el flujo de gas. Por abajo se observan 8 cables coaxiales conectados a los *strips* de la cara superior del detector. A la izquierda están situados los otros 8 cables correspondientes a los *strips* de la cara inferior. En el costado derecho existe una red resistiva para la lectura de cables internos del detector, los cuales no serán utilizados en este proyecto<sup>12</sup>.

Dado que los *strips* de la cara superior del detector son perpendiculares a los de la cara inferior, es posible interpretar el detector como un cuadrante de ejes coordinados según se ilustra en la Figura 3.6. En esta figura, cada cuadro representa un área de detección de  $1\text{cm}^2$ , la cual corresponde a la precisión para la determinación de los vértices de interacción. Como el detector posee 8 *strips* por cara, se tiene un total de 16 canales de detección, los que en su conjunto forman 64 zonas de detección de  $1\text{cm}^2$ . Los *strips* de la cara superior se nombrarán como el eje X, mientras que los *strips* correspondientes a la cara inferior del detector serán asociados al eje Y, siendo el cuadro (0,0) aquel que se ubica en la zona de detección inferior izquierda.

<sup>12</sup>Gonzalo's comment: marcar claramente estas componentes en la figura.



Figura 3.5: Vista superior del detector prototipo.

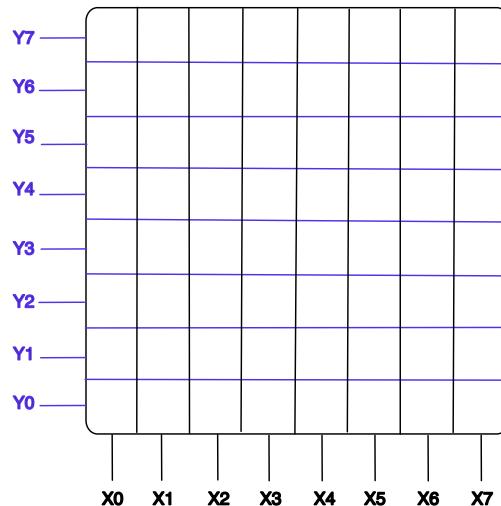


Figura 3.6: Vista superior del detector, en donde se indican las etiquetas asociadas a cada canal en función del eje al que pertenece. Cada cuadro representa un área de detección de 1cm<sup>2</sup>.

### 3.1.3. Procedimiento de Operación y Pruebas

Antes de poner en marcha mediciones o experimentos con un nuevo detector, se deben realizar ajustes, caracterizaciones y pruebas que permitan corroborar el correcto funcionamiento del dispositivo. Para esto, se recomienda llevar a cabo una secuencia de experimentos con el fin de comprobar el funcionamiento de cada canal y medir el ruido base, la frecuencia de detección y las amplitudes medias esperadas.

### A. Dispositivos para lectura de señales

Para observar los pulsos captados por el detector, es necesario contar con un sistema de lectura adecuado. Este dispositivo deberá poseer una baja impedancia, menor a  $100\Omega$  para evitar atenuaciones y reflexiones, así como también deberá contar con una etapa de amplificación tal que permita medir sin problemas las señales captadas con un osciloscopio, digitalizador o un sistema para adquisición de datos. Las señales emitidas por el detector rondan el orden de los milivoltios, lo cual significa que el sistema de lectura debe poseer una ganancia tal que la magnitud de la señal de salida esté dentro de la resolución de voltaje del aparato de medición.

Un ejemplo de sistema de lectura es la interfaz ASD mencionada en 2.3<sup>13</sup>, que será utilizada en este proyecto de titulación. Está diseñada para la correcta lectura de *strips* y cables provenientes de detectores TGC.<sup>14</sup> Cuenta con una amplificación inicial de  $0.8V/pC$  de carga y con una segunda etapa capaz de amplificar 7 veces la señal entrante. Además, la primera etapa de amplificación de la ASD se encarga de darle forma al pulso captado, con el fin extender la señal en el tiempo y facilitar su muestreo.

### B. Estimación de ruido base

Una vez escogidos los métodos de lectura y las herramientas de muestreo a utilizar, es necesario medir el ruido base del detector. Este ruido corresponde a distorsiones propias del dispositivo, como fugas de corriente, conducción indeseada y ruido electromagnético. Conocerlo<sup>15</sup> permite filtrar el ruido para el análisis de eventos de interés.

Para realizar la medición de ruido base se debe hacer circular el dióxido de carbono (o mezcla de dióxido de carbono y N-Pentano) en el detector. Antes de proceder a realizar mediciones, es necesario esperar a que el detector haya sido llenado totalmente de gas. Dada su área interior cercana a los  $225cm^2$ , el detector se encontrará completamente infiltrado con gas tras 20 minutos de operación.<sup>16</sup>

Cuando el detector se encuentra totalmente lleno de gas, se procede a medir el ruido base en cada uno de sus canales, sin conectar el detector a su fuente de alto voltaje. Estas mediciones permiten generar histogramas de ruido, los cuales han de tener una distribución gaussiana en condiciones normales de operación.<sup>17</sup>

---

<sup>13</sup>Gonzalo's comment: figura, sección?

<sup>14</sup>Gonzalo's comment: revisar la escritura de todo este parrafo.

<sup>15</sup>Gonzalo's comment: Escritura... dangling

<sup>16</sup>Gonzalo's comment: Especificar que estos son pasos y procedimientos para el detector en particular. Como están, suenan muy absolutos, como que siempre se deb hacer así y no hay otra forma.

<sup>17</sup>Gonzalo's comment: Puedes mostrar resultados de esto?

La amplitud del ruido base definirá una zona que deberá ser considerada en los análisis de eventos. Pulsos dentro de este rango de amplitudes no serán correctamente captados. Por otro lado, se espera que el ruido sea menor que la amplitud media de los eventos generados por cruce de muones en el detector.

Conocer tanto la amplitud del ruido base como la de los pulsos originados por muones, permite escoger señales de disparo en la tarjeta ASD, o filtros digitales en las etapas de análisis.

### C. Observación de falsas detecciones

Para una fiel interpretación de la información captada por un detector, es importante conocer la distribución y frecuencia de detecciones que no correspondan a cruce de muones. La medición de estos parámetros requiere la generación del campo eléctrico dentro del detector conectando su respectiva fuente de alto voltaje.

Una vez generado el campo eléctrico, es posible captar falsas detecciones o disparos aleatorios producto de la conductividad de los materiales o fugas de corriente. Estos eventos suelen tener una distribución normal y ser de amplitudes mayores a la de interés (muones). Conocer esta información permite ignorar señales sobre un umbral tal que se correspondan con amplitudes de eventos no deseados.

### D. Detección de partículas

Para comprobar el correcto funcionamiento del detector, es de gran utilidad utilizar fuentes radioactivas para generar pulsos de prueba. Aunque una fuente radioactiva de rayos Gamma genera pulsos de mayor amplitud que eventos producidos por muones, esta permite comprobar la correcta operación de cada canal y la distribución de carga del evento en cada canal adyacente.

Para el caso de detección de muones, es importante contar con un sistema de disparo para ignorar detecciones provenientes de otras partículas cargadas capaces de ionizar el gas al interior del detector. Para el caso de sTGC, se cuenta con el sistema de detectores centelladores mencionados con anterioridad e ilustrados en la Figura 3.1. Se recomienda posicionar uno de estos detectores sobre el detector sTGC, cubriendo un área igual a la que abarque el sTGC. De ser factible, se recomienda incluir un segundo detector centellador por debajo, para generar una señal de disparo conjunta con el centellador superior. Esto permite descartar incidencias casi horizontales de muones, pasando por un centellador pero no por el detector sTGC.

## 3.2. Interfaz de Lectura

La interfaz de lectura ASD [?] es un sistema de 16 canales utilizado para la lectura de detectores TGC en la Big Wheel del experimento ATLAS, como se mencionó en la sección 2.3. El propósito principal de esta interfaz es detectar pulsos de alta frecuencia provenientes de detectores TGC, los cuales forman parte del Level-1 Trigger en el Espectrómetro de muones. Cada canal se corresponde con un strip o cable de un detector, por lo que al analizar las señales de salida de esta tarjeta permite determinar los vértices de interacción<sup>18</sup> de muones con el detector.

La Figura 3.7 corresponde a una fotografía de esta interfaz, destacando sus conectores principales y sus canales de entrada. Los canales son llamados *Hits* y se enumeran del 0 al 15. Posee<sup>19</sup> un conector de 40 pines para cable plano para conexión a su fuente de voltaje, para la transmisión de las señales de salida y para el ingreso de pulsos de prueba<sup>20</sup>. El detalle de cada pin se ilustra en la Figura 3.8<sup>21</sup>

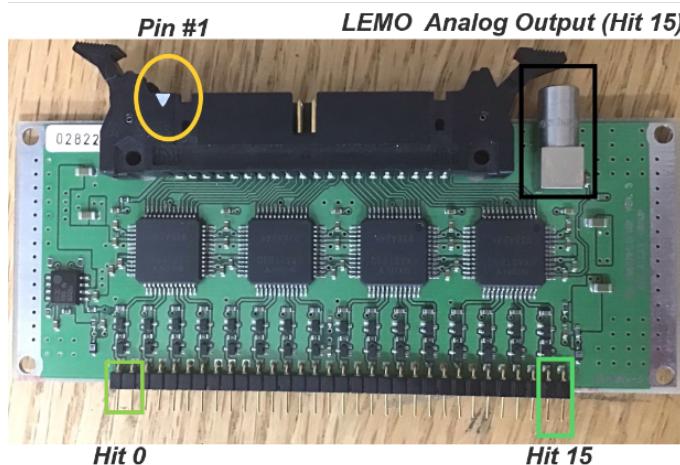


Figura 3.7: Interfaz de lectura ASD. Se destacan en la imagen sus canales (hit) del 0 al 15, su salida analógica LEMO y el primer pin en su conector de 40 posiciones.

Como su acrónimo lo indica, la interfaz ASD (Amplifier-Shaper-Discriminator)

<sup>18</sup>Gonzalo's comment: Revisa la gramática, en particular tildes. Ya he corregido varios directamente en el texto, pero ya parece algo sistemático y no puedo estar corrigiendo uno por uno.

<sup>19</sup>Gonzalo's comment: dangling. Quien posee? Último que corrige, ya hemos discutido como 100 veces esto

<sup>20</sup>Gonzalo's comment: Revisar esto, demasiados para, para, para...

<sup>21</sup>Gonzalo's comment: y el punto? Mejorar la resolución de la figura. Es una tabla. Sería mejor hacerla directo en latex. En general, se nota que aca escribiste a la rápida sin revisar, y se nota una diferencia entre este texto y el resto (como pegado con chicle). Debes evitar que eso se refleje en el documento.

**Table A-2** Pin assignment.

pin No.	name	name	pin No.
1	GND	Vth	2
3	-3.0 V	GND	4
5	+3.0 V	+3.0 V	6
7	test pulse	test pulse	8
9	hit 0	hit 0	10
11	hit 1	hit 1	12
13	hit 2	hit 2	14
15	hit 3	hit 3	16
17	hit 4	hit 4	18
19	hit 5	hit 5	20
21	hit 6	hit 6	22
23	hit 7	hit 7	24
25	hit 8	hit 8	26
27	hit 9	hit 9	28
29	hit 10	hit 10	30
31	hit 11	hit 11	32
33	hit 12	hit 12	34
35	hit 13	hit 13	36
37	hit 14	hit 14	38
39	hit 15	hit 15	40

Figura 3.8: Detalle de los puertos en el conector 40 posiciones de la interfaz ASD.

<sup>22</sup> amplifica la carga eléctrica captada desde un canal de un detector; <sup>23</sup> modifica la forma del pulso eléctrico en cuanto a su tiempo de duración y a su amplitud de corriente con el fin de simplificar su posterior medición; y discrimina la amplitud del pulso mediante un circuito comparador. Esta comparación se realiza respecto a un nivel de voltaje ajustable para así descartar eventos de energía que estén por debajo el umbral de interés, y también para generar una señal de salida digital LVDS (Low-Voltage Differential signal) cuya duración sea proporcional a la amplitud de pulso que ha estado por sobre el umbral de voltaje configurado. Esta técnica se conoce como TOT <sup>24</sup> y es la misma técnica utilizada en el detector LabPet II descrito en la sección 2.1. En la Figura 3.1, este pulso digital se representa como el pulso digital azul entre la interfaz de lectura y el sistema de adquisición de datos.

La interfaz ASD será utilizada conectándola a los strips de los detectores sTGC

<sup>22</sup>Jairo's comment: Decidi introducir de nuevo esta sigla, a pesar de que ya la defini anteriormente en la sección 2.3

<sup>23</sup>Gonzalo's comment: por que semicolon?

<sup>24</sup>Gonzalo's comment: acronimo?

fabricados para sTGC Minería. Dado que la interfaz posee 16 canales de entrada, es posible conectar los 16 canales de detección proveniente de un mismo detector prototipo sTGC. Así, con un solo detector y una interfaz es posible determinar vértices de interacción en un área de  $15\text{cm}^2$ . Para un futuro escalamiento, utilizando dos detectores superpuestos y sus respectivas interfaces es posible determinar la trayectoria de los muones detectados. Además, analizar la duración de cada pulso emitido por las interfaces permite estimar la amplitud de la carga eléctrica depositada por el muon en el detector excitado.

### 3.2.1. Circuito (circuito para que?)

La interfaz de lectura ASD tiene 16 canales que reciben impulsos de carga eléctrica provenientes de strips o cables de detectores TGC, y emite señales digitales representando estos pulsos en formato LVDS según la norma IEEE LVDS Standard 1596.3-1996 [?].

Esta interfaz requiere una fuente de voltaje de  $-+3\text{V}$  [?] <sup>25</sup>, es capaz de recibir pulsos entre  $-1.2\text{pC}$  a  $+2.0\text{pC}$  sin saturarse y posee una frecuencia de entrada recomendada <sup>26</sup> de hasta  $100\text{KHz}$ . La interfaz cuenta con una entrada para pulsos de pruebas y una señal analógica de monitoreo proveniente de la etapa de preamplificación del canal 15, implementada con un conector LEMO.

En la Figura 3.9 <sup>27</sup> se ilustra el circuito principal incluido en cada canal de la Interfaz <sup>28</sup>. Cada canal tiene su propio preamplificador, un amplificador principal y un comparador [?], donde la etapa de preamplificación tiene una ganancia de  $0.8\text{V/pC}$  y el amplificador principal tiene una ganancia de 7 veces la señal entrante. La etapa de comparación compara la señal con un nivel de voltaje externo llamado  $V_{th}$ . Si el pulso entrante tiene una amplitud de voltaje superior a  $\frac{V_{th}}{2}$ , el comparador emite una señal LVDS con una duración equivalente al tiempo durante el cual la amplitud del pulso entrante se mantuvo por sobre  $\frac{V_{th}}{2}$ .  $V_{th}$  puede configurarse en un rango desde  $-0.5\text{V}$  a  $+0.5\text{V}$ , resultando en un umbral real de  $-0.25\text{V}$  a  $+0.25\text{V}$  en el comparador [?].

### 3.2.2. Ejemplo de operación

Por ejemplo, para un pulso proveniente de un cátodo (pulso de polaridad positiva) de  $0.3\text{pC}$ , el voltaje esperado a la salida de la etapa de preamplificación es  $240\text{mV}$ . La salida analógica LEMO podría reflejar un voltaje menor debido a la

<sup>25</sup>Gonzalo's comment: ver notacion para +

<sup>26</sup>Gonzalo's comment: solo una recomendacion? No es una especificacion?

<sup>27</sup>Gonzalo's comment: mejorar la resolucion

<sup>28</sup>Gonzalo's comment: por que mayuscula?

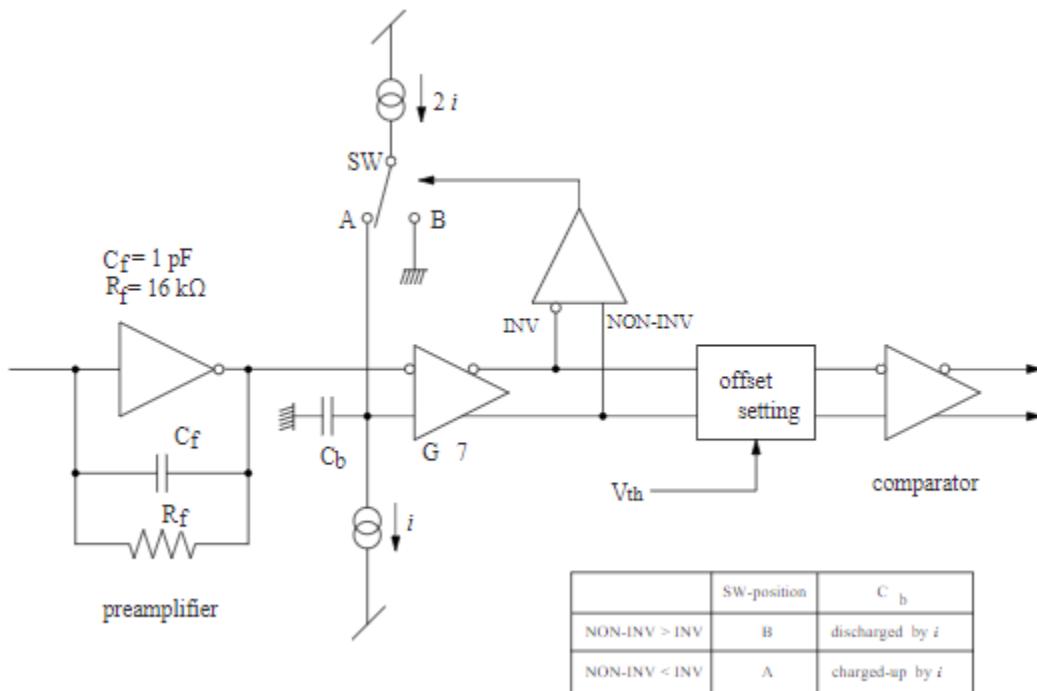


Figura 3.9: Diagrama de bloques del circuito principal para un canal de la interfaz ASD. Se indican la etapa de preamplificación, el amplificador principal de ganancia 7, y el comparador.

impedancia de la carga conectada para su lectura. Con una ganancia de 7 veces, el voltaje esperado a la salida del amplificador principal sería de 1,68V. La duración del pulso analógico sería aproximadamente 70ns, suponiendo un canto de subida con 10ns de duración y una carga proporcional a la carga de entrada. Con un voltaje  $V_{th}$  de 180mV, la señal digital de salida tendría una duración de aproximadamente 50ns.

La Figura 3.10 incluye un pulso de 0.3pC de carga eléctrica, mientras que la Figura 3.11 muestra la señal analógica en el conector LEMO. La salida LEMO presenta una amplitud de 180mV, 25 % más bajo de lo esperado, probablemente debido a la impedancia de entrada del osciloscopio utilizado para su medición

<sup>29</sup>Gonzalo's comment: y esto es relevante? afecta el funcionamiento? Falta tambien una frase de cierre que concluya y conecte con la siguientes seccion.

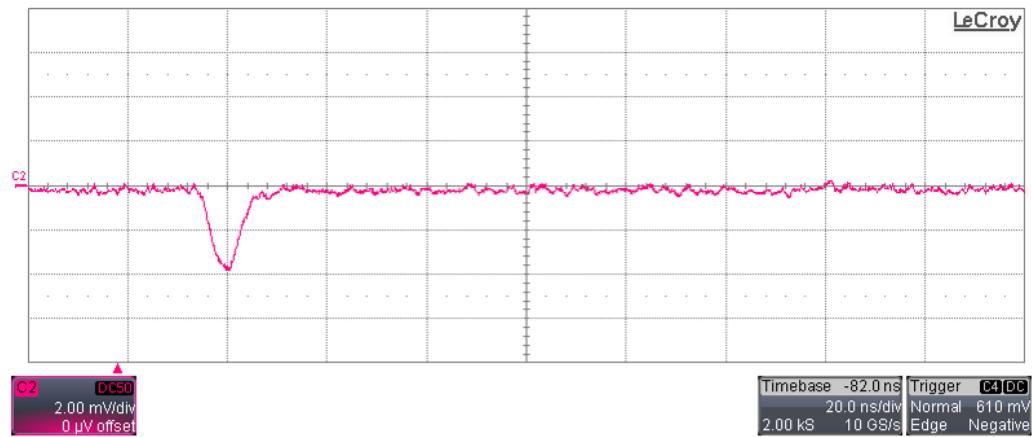


Figura 3.10: Captura de pantalla de un pulso de voltaje con carga equivalente a 0.3pC, medido en un osciloscopio.

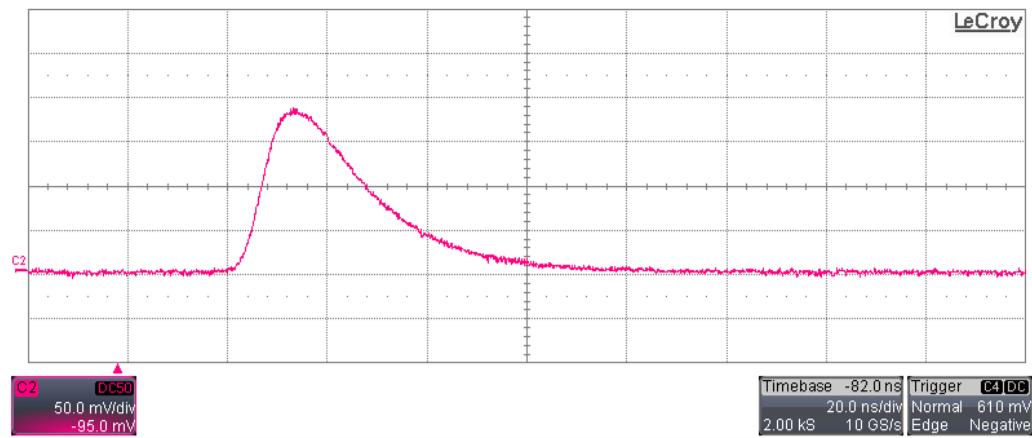


Figura 3.11: Captura de pantalla de un osciloscopio, en la cual se ilustra un pulso de voltaje proveniente de la salida analógica LEMO de la interfaz ASD luego de haber recibido un pulso de 0.3pC de carga eléctrica.

## Capítulo 4

---

# SISTEMA DE ADQUISICIÓN

Luego de describir el sistema de detección en el Capítulo 3, es posible entender el funcionamiento de los detectores y definir los requisitos para el diseño de la etapa siguiente: el sistema de adquisición de datos, etapa que se encargará de recibir los pulsos digitales provenientes de la interfaz de lectura ASD y del sistema de disparo, con el fin de muestrear los eventos detectados y facilitar la determinación de los vértices de interacción en una posterior etapa de análisis.

En este capítulo se presenta la arquitectura propuesta para la implementación del sistema de adquisición y se detalla el desarrollo de cada una de sus etapas.

### 4.1. Arquitectura propuesta

En el Capítulo 2 se compararon tres sistemas diferentes para la implementación de sistemas de adquisición de datos en el contexto de física de partículas. En diferentes sistemas destacan aspectos comunes de implementación: etapas de detección de eventos, memorias para almacenamiento temporal, procesamiento de los datos y la utilización de FPGAs como la principal herramienta para la implementación del hardware<sup>1</sup>. Las principales etapas identificadas en los sistemas de adquisición estudiados son: el acondicionamiento de señal, la adquisición misma de los datos, la discriminación de eventos y la comunicación de los datos obtenidos para posteriores análisis.

En sTGC Minería, la etapa de acondicionamiento de señal es realizada mediante la interfaz de lectura ASD descrita en la Sección 3.2<sup>2</sup>. Las etapas de adquisición, discriminación y comunicación serán entonces las etapas a implementar en el sistema de adquisición de datos desarrollado en este proyecto de titulación.

Tomando como antecedente los objetivos del proyecto descritos en la Sección

---

<sup>1</sup>Gonzalo's comment: y las otras cosas, memorias y componentes no son hardware?

<sup>2</sup>Gonzalo's comment: especificar/recordar si estas ya estaban diseñadas o se hizo algo con esto en la memoria

1.3, junto con las características del sistema de detección descrito en el Capítulo 3, se definen lo siguientes requisitos para el diseño del sistema de adquisición de datos para detectores de muones:

- Debe incluir al menos 16 entradas compatibles con el estándar LVDS, con el fin de conectar al menos una interfaz de lectura ASD asociada a un detector de 16 canales.
- Es importante contar con un reloj presente o sintetizable de una frecuencia mayor a 100MHz, siendo lo más cercano a 1GHz posible <sup>3</sup>, con el fin de captar la duración de los pulsos y el momento de aparición de un evento con la mayor precisión disponible.
- Se debe considerar que la señal de disparo que entrará al sistema estará desfasada cerca de 100ns [?] respecto al paso real de los muones a través el detector, siendo necesaria la implementación de retardos para las señales capturadas o un sistema capaz de asociar la simultaneidad de eventos detectados con la señal de disparo.
- Se debe tener la capacidad de mantener sincronizadas las señales de detección y disparo, además de guardar la información en memorias temporales.
- Es requisito que la implementación del sistema de adquisición permita escalamiento para agregar nuevos detectores adyacentes con el fin de aumentar el área de prueba o para leer detectores superpuestos.

Respecto a los requisitos de tiempo y reloj de operación anteriormente indicados, se deben esencialmente a que la duración de un pulso digital proveniente de un detector podría estar entre 1ns y 60ns [?]. Este ancho de pulso tiene correlación con la amplitud del pulso análogo original y el error en su medición implicaría menor precisión en la estimación de esta variable. <sup>4</sup>

Respecto a la tasa de aparición de pulsos consecutivos, es poco probable que ocurran eventos simultáneos o cercanos. Se espera que el flujo de muones por centímetro cuadrado sea de un muon por minuto [3], lo que en los  $15\text{cm}^2$  de área de un strip implicaría cerca de 15 muones por minuto o  $0,25\text{E}^{-9}$  muones cada 1ns, traduciéndose en una muy baja probabilidad de eventos simultáneos o cercanos en el tiempo (adyacentes) si se considera un muestreo ideal a 1GHz. Dado que la tasa de detección de muones disminuye bajo tierra y dado que la toma de una muongrafía conlleva

---

<sup>3</sup>Gonzalo's comment: por que estos numeros

<sup>4</sup>Gonzalo's comment: poner esto antes de las especificaciones. Las specs deben ser consecuencia de los requerimientos.

un tiempo prolongado de exposición a rayos cósmicos, se concluye que ignorar posibles eventos simultáneos o adyacentes no tendrá implicancias significativas en los resultados de la muongrafía final.<sup>5</sup>

#### **4.1.1. Esquema General (de que?)**

Como se indica en la figura 4.1, se requieren al menos tres etapas esenciales: adquirir, discriminar y comunicar. Adquirir corresponde a muestrear las señales digitales asociadas a eventos de detección y mantenerlas en memoria hasta ser discriminadas. Discriminar se refiere a descartar aquellos eventos que no corresponden a la interacción de un muon con el detector leyendo la señal de disparo. Comunicar corresponde a enviar los datos de eventos seleccionados hacia un dispositivo externo, para así almacenarlos o analizarlos. En las secciones siguientes se describe el dónde y cómo implementar cada una de estas tres etapas.

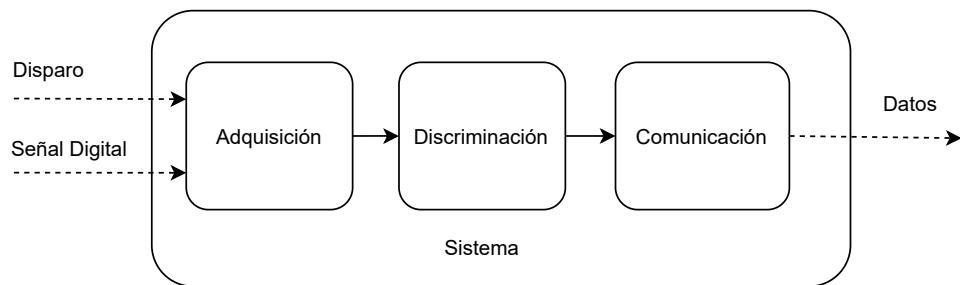


Figura 4.1: Diagrama del esquema general para el sistema de adquisición a diseñar. El disparo corresponde a la señal digital que indica si la partícula detectada es un muon, mientras que la señal digital corresponde al pulso captado por el detector, luego de haber pasado por la interfaz de lectura. Los datos son la información asociada a eventos seleccionados, que serán enviados a un dispositivo externo.

#### 4.1.2. Plataforma

Según los casos de estudio presentados en el Capítulo 2, la alternativa más utilizada para la implementación de hardware<sup>6</sup> es la FPGA, herramienta que se ha visto con mayor frecuencia en proyectos relativos a física de partículas y adquisición de datos. Las FPGAs cuentan con una cantidad significativa de recursos y periféricos, incluyendo además hardware dedicado para comunicación, serialización y almacenamiento de datos. Una desventaja conocida corresponde a que se basan en memorias volátiles, por lo que el hardware descrito debe ser reconfigurado cada

<sup>5</sup> Gonzalo's comment: lo mismo anterior.

<sup>6</sup> Gonzalo's comment: especificar propiedades del hardware a implementar en la FPGA.

vez que se enciende, por lo que los datos importantes deben ser almacenados en memorias externas.

Dado que el laboratorio de electrónica en CCTVal cuenta con placas de desarrollo marca Trenz<sup>7</sup>, en este proyecto de titulación se utilizará un módulo Trenz TE0720 [?] montado en una tarjeta de desarrollo Trenz TE0703 [?], ambas ilustradas en la Figura 4.2. El módulo TE0720 contiene un SoC (System on a Chip) Xilinx Zynq 7000 [?] que incluye lógica programable (PL) equivalente a una FPGA Xilinx Artix 7 [?] y un procesador (PS) ARM Cortex Cortex-A9 de dos núcleos, con múltiples periféricos como memoria flash, comunicación UART y un GPIO (General Purpose Input/Output) de 32 bits.

Una de las principales ventajas de usar el módulo TE0720 es que permite concentrar todo el diseño de hardware en un solo lugar sin necesidad de FPGAs o ASICs adicionales, ya que posee 85.000 celdas lógicas, 4.9Mb de Block RAM, una frecuencia de reloj de 33.3MHz con hasta 600MHz sintetizables y 152 puertos de entrada y salida compatibles con el estándar LVDS, suficientes como para conectar hasta 4 interfaces de lectura ASD. Este módulo también destaca por ser una plataforma flexible, en el sentido de brindar las posibilidades de adaptar el diseño propuesto sin tener que adquirir nuevo equipamiento. Esta versatilidad es intrínseca de las FPGAs, las cuales se caracterizan por permitir un gran control en el diseño del hardware a bajo nivel. Finalmente, al ser una tecnología conocida en CCTVal, se cuenta con acceso a su documentación, lo que facilita el desarrollo del hardware en esta plataforma por sobre otras alternativas comerciales.

---

<sup>7</sup>Gonzalo's comment: Da un poco mas de contexto sobre el uso de Trenz. No es solo porque *es lo que hay*.

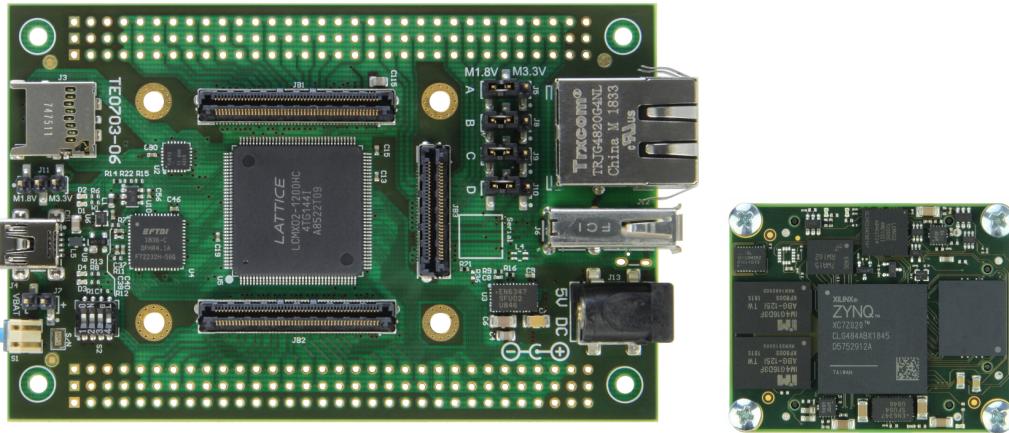


Figura 4.2: Tarjeta de desarrollo y módulo Zynq a utilizar. A la izquierda se ilustra la placa de desarrollo Trenz TR0703 [?] y a su derecha se ilustra el módulo que va montado en ella: Trenz TR0720 [?] que contiene un SoC Zynq 7000 [].

#### 4.1.3. Propuesta

La arquitectura del sistema de adquisición que se implementará en el módulo Trenz se ilustra en la Figura 4.3. Se propone utilizar un módulo de muestreo (*sampler*), un buffer de eventos (*Event Buffer*, FIFO), un módulo de lectura para comunicar los datos (*Event Reader*), y un módulo de comunicación implementado en el procesador (GPIO, UART). Este sistema permite la adquisición de datos provenientes de un solo detector de muones, conectándose directamente a la interfaz ASD y a la señal generada por el sistema de disparo.

El módulo *Sampler* se encarga de muestrear los 16 pulsos LVDS provenientes de la interfaz ASD a la máxima frecuencia de reloj posible, para mantenerlos en un registro de desplazamiento (shift register) utilizado como buffer de datos. En este registro se mantendrán los datos muestreados a la espera de la señal de disparo para ser traspasados al siguiente módulo. Mientras no llegue la señal de disparo, los datos seguirán avanzando en el registro de desplazamiento, descartando automáticamente los datos más antiguos.

El *Event Buffer* se encarga de tomar los datos coincidentes con la señal de disparo y los almacena en una memoria FIFO (First In, First Out). En esta memoria FIFO se guardan los eventos por orden de llegada, almacenando los datos asociados a cada canal de manera consecutiva. Es decir, cada vez que un evento es almacenado, se utilizan 16 direcciones de memoria, una para cada canal del evento guardado.

El módulo *Event Reader* lee los datos almacenados en la memoria FIFO y los envía hacia el módulo de comunicación mediante el GPIO del procesador. La lectura

de los datos inicia al recibir la solicitud desde el módulo de comunicación a través del GPIO. Una vez leídos los datos, estos son enviados a un computador externo (PC) para su almacenamiento definitivo y posterior análisis.

Para un futuro escalamiento del sistema, con el fin de conectar más detectores de muones, bastaría con replicar los módulos *Sampler*, *Event Buffer* y FIFO, ajustando a la vez el módulo *Event Reader* y el módulo de comunicación, para así coordinar la lectura de cada una de las memorias FIFO asociadas a cada detector.

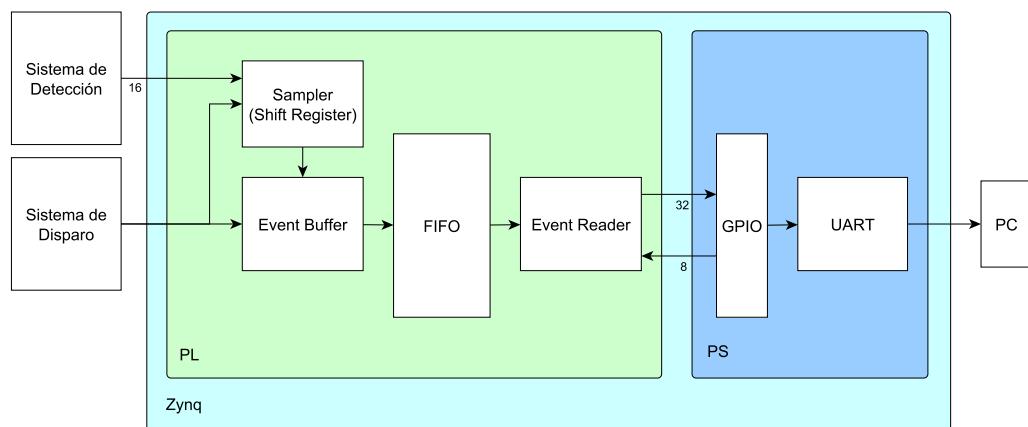


Figura 4.3: Diagrama de la arquitectura de hardware propuesta para el diseño de un sistema de adquisición de datos asociado a un solo detector de muones.

## 4.2. Implementación del Sistema de Adquisición

La implementación del sistema de adquisición de datos en el módulo TE0720 se realizó mediante el software Vivado Design Suite y Vivado SDK<sup>8</sup> para la descripción de hardware en lógica programable y para la programación de software en el procesador, respectivamente.

La descripción de hardware se llevó a cabo en el HDL (Hardware Description Language) SystemVerilog y la integración de cada módulo se hizo mediante *Block Design*, correspondiente a un método de descripción de hardware en formato de diagrama de bloques, el cual permite automatizar algunos procesos de instanciación de módulos e interconexión de puertos. En la Figura 4.4<sup>9</sup> se ilustra el diagrama de bloques del sistema de adquisición implementado en el módulo TE0720, donde se observan los diferentes bloques utilizados. El bloque *ZYNQ7 Processing System*

<sup>8</sup>Gonzalo's comment: version

<sup>9</sup>Gonzalo's comment: no se ve bien por temas de escala. Podrias dejarla en una sola pagina en formato lateral.

corresponde al procesador, donde se ubica el módulo de comunicación. El bloque *top\_wrapper* agrupa los módulos *Sampler*, *Event Reader* y *Event Buffer*, que junto con los bloques *FIFO Generator*, *Clocking Wizard* y *clk\_divider* corresponden a los módulos implementados en la lógica programable. Los módulos *AXI GPIO* corresponden a los puertos de entrada de datos y salida de comandos del sistema de comunicación incluido al interior del procesador, donde el módulo *axi\_gpio\_0* está asociado a los 32bits de entrada de datos, mientras que el módulo *axi\_gpio\_1* corresponde a los 8 bits de salida para comandos de lectura. Los bloques *Processor System Reset* y *AXI Interconnect* son módulos auxiliares instanciados de manera automática por el software y permiten generar las señales de reset y habilitar la comunicación con la GPIO del procesador respectivamente. Por último, la señal *trigger* corresponde a la señal de disparo, mientras que los arreglos de señales *Ch\_A\_P[15:0]* y *Ch\_A\_N[15:0]* corresponden a los puertos de entrada para las señales de detección LVDS con sus terminales positivos y negativos respectivamente.

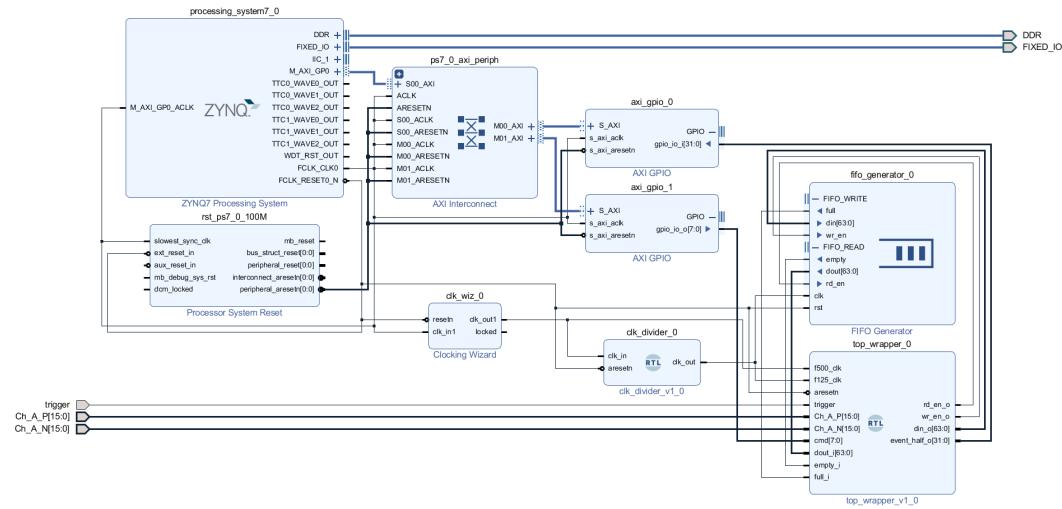


Figura 4.4: Block Design del sistema de adquisición de datos implementado en el módulo TE0720.

A continuación se detalla del desarrollo de cada módulo, su funcionamiento, los puertos asociados y sus diagramas pertinentes.<sup>10</sup>

<sup>10</sup>Gonzalo's comment: discutir detalles tecnicos una vez este entregado el informe.

#### 4.2.1. Sampler

El módulo *Sampler* corresponde a la etapa de muestreo y discriminación, encargándose de recibir las señales digitales generadas por la interfaz ASD. Esta etapa muestrea cada señal entrante y asocia los datos a la señal de disparo correspondiente. Los principales objetivos de este módulo son:

- Muestrear a máxima frecuencia <sup>11</sup> los pulsos digitales.
- Mantener en memoria los pulsos muestreados mientras llega la señal de disparo.
- Transferir los pulsos muestreados hacia la etapa siguiente al momento de detectar la señal de disparo.

Para interconectar la interfaz ASD con la tarjeta de desarrollo, se identificaron los conectores de cada dispositivo y se les asignaron etiquetas. Para el caso de la interfaz ASD se le asignó la letra “A” por ser la primera en ser conectada, nombrándose cada señal como “JA-n”, donde “n” corresponde al número del pin de cada señal ubicada en el conector de 40 posiciones según la Figura 3.8 de la Sección 3.2.

En el caso de la tarjeta de desarrollo <sup>12</sup>, esta cuenta con dos conectores tipo VG96. La nomenclatura para cada pin se ilustra en la Figura 4.5, destacándose en rojo los pines escogidos para interconectar la interfaz ASD. Estos pines se escogieron estratégicamente con el fin de estar ubicados en un extremo accesible, con puertos cercanos entre si, ordenados de manera consecutiva, y dejando espacio disponible para conectar otros detectores en el futuro.

---

<sup>11</sup>Gonzalo's comment: cuanto es maxima frecuencia?

<sup>12</sup>Gonzalo's comment: especifica que te refieres a la trenz

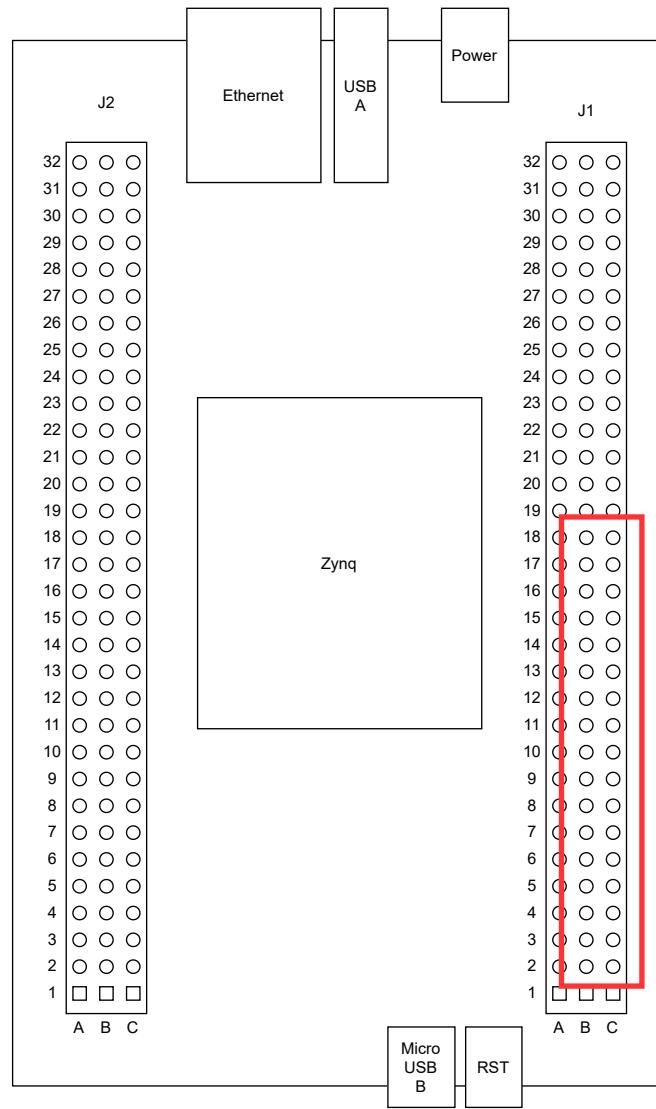


Figura 4.5: Diagrama de la vista superior de la tarjeta de desarrollo utilizada, indicando la nomenclatura de los pines correspondientes a sus conectores VG96. Los pines utilizados para conectar la interfaz ASD se encuentran enmarcados en el re-cuadro rojo. **el cuadro rojo se sobreponen a los circulos, no queda clara el area de interes.**

En la lógica programable, cada señal se recibe en los arreglos de puertos “Ch\_A.P[15:0]” y “Ch\_A.N[15:0]”, donde “Ch” significa canal, “A” indica que corresponden la interfaz de lectura “A”, “P” indica que son señales de polaridad positiva y “N” significa que son señales de polaridad negativa.

Zynq Pin	Sch. Name	Conn. VG96	Conn. 40p ASD	Channel	Array
F16	B35_L1_P	J1-C2	JA-9	0	Ch_A_P[0]
E16	B35_L1_N	J1-C3	JA-10	0	Ch_A_N[0]
G17	B35_L6_P	J1-B3	JA-11	1	Ch_A_P[1]
F17	B35_L6_N	J1-B4	JA-12	1	Ch_A_N[1]
E15	B35_L3_P	J1-C4	JA-13	2	Ch_A_P[2]
D15	B35_L3_N	J1-C5	JA-14	2	Ch_A_N[2]
F18	B35_L5_P	J1-B5	JA-15	3	Ch_A_P[3]
E18	B35_L5_N	J1-B6	JA-16	3	Ch_A_N[3]
G19	B35_L20_P	J1-C6	JA-17	4	Ch_A_P[4]
F19	B35_L20_N	J1-C7	JA-18	4	Ch_A_N[4]
F21	B35_L23_P	J1-B7	JA-19	5	Ch_A_P[5]
F22	B35_L23_N	J1-B8	JA-20	5	Ch_A_N[5]
G15	B35_L4_P	J1-C8	JA-21	6	Ch_A_P[6]
G16	B35_L4_N	J1-C9	JA-22	6	Ch_A_N[6]
C17	B35_L11_P	J1-B9	JA-23	7	Ch_A_P[7]
C18	B35_L11_N	J1-B10	JA-24	7	Ch_A_N[7]
E19	B35_L21_P	J1-C10	JA-26	8	Ch_A_P[8]
E20	B35_L21_N	J1-C11	JA-25	8	Ch_A_N[8]
B16	B35_L8_P	J1-B11	JA-27	9	Ch_A_P[9]
B17	B35_L8_N	J1-B12	JA-28	9	Ch_A_N[9]
D16	B35_L2_P	J1-C12	JA-29	10	Ch_A_P[10]
D17	B35_L2_N	J1-C13	JA-30	10	Ch_A_N[10]
G20	B35_L22_P	J1-B13	JA-31	11	Ch_A_P[11]
G21	B35_L22_N	J1-B14	JA-32	11	Ch_A_N[11]
A21	B35_L15_P	J1-C14	JA-33	12	Ch_A_P[12]
A22	B35_L15_N	J1-C15	JA-34	12	Ch_A_N[12]
B21	B35_L18_P	J1-B15	JA-35	13	Ch_A_P[13]
B22	B35_L18_N	J1-B16	JA-36	13	Ch_A_N[13]
H22	B35_L24_P	J1-C16	JA-37	14	Ch_A_P[14]
G22	B35_L24_N	J1-C17	JA-38	14	Ch_A_N[14]
A18	B35_L10_P	J1-B17	JA-39	15	Ch_A_P[15]
A19	B35_L10_N	J1-B18	JA-40	15	Ch_A_N[15]

Tabla 4.1: Mapeo de conexiones entre Zynq e interfaz ASD.

En base a las nomenclaturas anteriores e incluyendo los propios nombres de los pines descritos en los esquemáticos eléctricos de la tarjeta de desarrollo TE0703 [?] y los pines internos de la Zynq, se realizó la interconexión ASD-Zynq según lo indicado en la Tabla 4.1.

Una vez definida la nomenclatura de puertos, es posible interconectar las tarjetas

y proceder con la toma de muestras. Para capturar las señales LVDS, se declaran puertos IBUFDS (Input Buffer for Differential Signals) en la lógica programable, configurándolos para recibir señales LVDS de 2.5V y activando la resistencia interna de  $100\Omega$  para adaptar la terminación al estándar diferencial. Luego de ser capturar las señales, estas se sincronizan con el reloj del circuito pasando a través de dos Flip-flops consecutivos (Synchonizer).

El muestreo<sup>13</sup> de las señales se realiza a 400MHz por ser la frecuencia más alta sintetizable antes de producir errores de *timing*<sup>14</sup>, además de dar una resolución de tiempo de 2,5ns para distinguir el ancho de los pulsos digitales. Esta resolución cumple con los requisitos descritos en la Sección 4.1.

El método de muestreo utilizado consiste en un shift-register de 64 bits, el cual representa la ventana de adquisición del pulso digital capturado. Los 64 bits de este shift-register serán entregados a la siguiente etapa en el instante en que se reciba la señal de disparo. Considerando 16 canales con un buffer de 64 bits cada uno, el shift-register consiste en un arreglo bidimensional de 16 filas con 64 bits de ancho cada una.

El shift-register funciona como buffer y retardo para la señal digital muestreada. Dada la frecuencia de muestreo, cada bit representa 2,5ns de la señal muestreada. Considerando que la señal de disparo posee un retardo de 100ns, a la llegada del disparo la señal queda ubicada entre el bit 24 y 63 aproximadamente. Esta configuración permite una ventana de 60ns antes de la señal de disparo y aproximadamente 30ns de ventana posterior a la señal muestreada en el caso de muestrear el pulso de más larga duración posible (70ns). Se utiliza un shift-register debido a su simplicidad, su capacidad de operar a altas frecuencias de reloj y por permitir el almacenamiento natural por orden de llegada de cada bit digital de la señal, haciendo posible entregar la totalidad de los datos contenidos en este shif-register a la etapa siguiente.

Al detectar la señal de disparo, esta etapa registra los datos de todos los canales en un arreglo bidimensional y mantiene su estado hasta recibir la señal de que han sido guardados correctamente por la etapa siguiente. Mientras esto no suceda, el shift-register seguirá muestreando datos, pero se ignorarán las señales de disparo.

La Figura 4.6 ilustra un diagrama simplificado del módulo *sampler* considerando la lógica para una sola señal LVDS entrante.<sup>15</sup>

---

<sup>13</sup>Gonzalo's comment: typo. Revisr cuidadosamente todo el texto. Ya habia corregido directamente un par.

<sup>14</sup>Gonzalo's comment: especificar un poco mas sobre timing.

<sup>15</sup>Gonzalo's comment: especificar en alguna parte, quizas al inicio de la sección o capítulo, que la descripción entregada en el informe escrito es simplificada para dar un contexto, pero la implementación se encuentra en un repositorio donde se pueden ver todos los detalles técnicos.

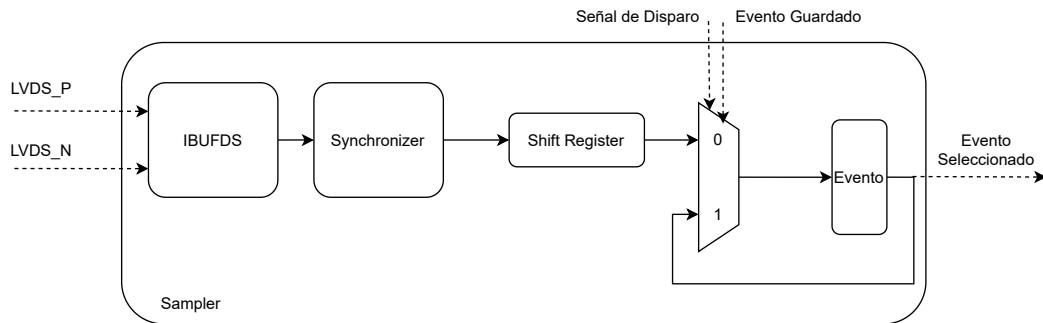


Figura 4.6: Diagrama simplificado del módulo *Sampler*, ejemplificado para una sola señal LVDS.

#### 4.2.2. Event Buffer

El buffer de eventos se encarga de almacenar provisoriamente los eventos entrantes en una memoria FIFO hasta que la etapa siguiente solicite la entrega de los eventos capturados. El buffer funciona a 100MHz, dado que la memoria FIFO no es capaz de trabajar a altas frecuencias de reloj.

Si se recibe una señal de disparo, el *Event Buffer* procede a leer los datos provenientes de la etapa anterior (*sampler*). En cada ciclo de reloj se guarda en la memoria FIFO la última fila del arreglo bidimensional que representa al evento seleccionado. Una vez que la información es almacenada en memoria, se desplazan los datos del arreglo bidimensional (Shift) y se repite el ciclo 16 veces. Así, en la memoria FIFO cada dirección de memoria corresponderá a canales consecutivos de un mismo evento, donde cada canal es representado en 64 bits de datos. Se decidió operar de esta manera para simplificar la implementación del hardware y debido a que no es posible almacenar un arreglo bidimensional en una sola dirección de memoria FIFO. Además, se escogió una memoria FIFO para implementar este buffer por adecuarse bien a la naturaleza de los datos: el orden de los eventos es importante y con esta memoria los eventos son leídos por orden de llegada. Además, esta memoria permite el almacenamiento de mas de 50 eventos y sus respectivos canales.

La Figura 4.7 ilustra el módulo *Event Buffer* de manera simplificada, ejemplificando el flujo de información desde el evento seleccionado por el módulo *sampler* hasta la fila de 64bits a ser guardada en la memoria FIFO por cada ciclo de reloj hasta completar las 16 filas que componen el evento que está siendo guardado. Existe un contador que lleva la cuenta de las veces que se ha desplazado el arreglo bidimensional que contiene al evento y cuenta con lógica combinacional que coordina el flujo de la información. El módulo emite una señal para indicarle al módulo *Sampler* que el evento ha sido guardado por completo en la memoria FIFO.

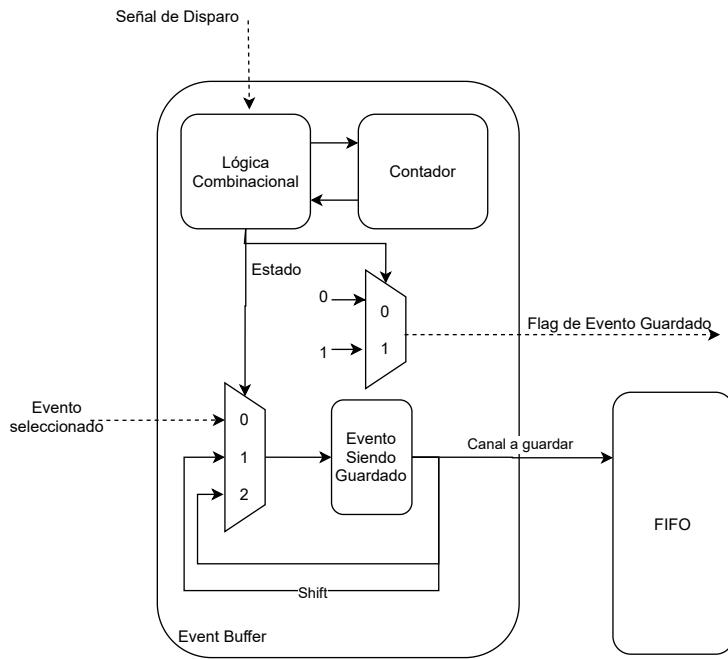


Figura 4.7: Diagrama simplificado del módulo *Event Buffer*.

#### 4.2.3. Event Reader y Comunicación

El modulo *Event Reader*, ilustrado en el costado izquierdo de la Figura 4.8 cumple la función de leer los eventos almacenados en la memoria FIFO cada vez que reciba un comando de 8 bits desde el módulo de comunicación. Al recibir el comando, el módulo comienza a leer cada dirección de la memoria FIFO hasta leer las 16 direcciones consecutivas que componen a un mismo evento. Cada dirección almacena un canal de detección en 64bits, pero el *Event Reader* separa esta información en 2 paquetes de 32bits cada uno, demorando dos ciclos de reloj por cada canal que se desee enviar. Este formato de entrega permite la comunicación entre la lógica programable y el procesador mediante el GPIO, utilizando un puerto de precisamente 32bits. Dado que el GPIO del procesador cuenta con puertos limitados, no es posible utilizar un puerto de 64Bits de manera directa, debiendo realizarse en dos pasos. Por otro lado, los datos se entregan desde la PL al PS y no al revés debido a que el módulo de comunicación UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) está ubicado en el procesador, mientras que los datos están almacenados en la lógica programable.

Complementariamente, la etapa de comunicación ilustrada en el costado derecho de la Figura 4.8 se encarga de entregar los eventos recibidos desde el *event reader* hacia el mundo exterior mediante la UART presente en el procesador de la Zynq, a

una tasa de transferencia de 115200bps (baudios por segundo). Este módulo recibe comandos en formato ASCII desde un computador externo (que serán traspasados al módulo *event reader*) y entrega los datos provenientes de la lógica programable al computador solicitante en forma de números enteros sin signo de 32bits.

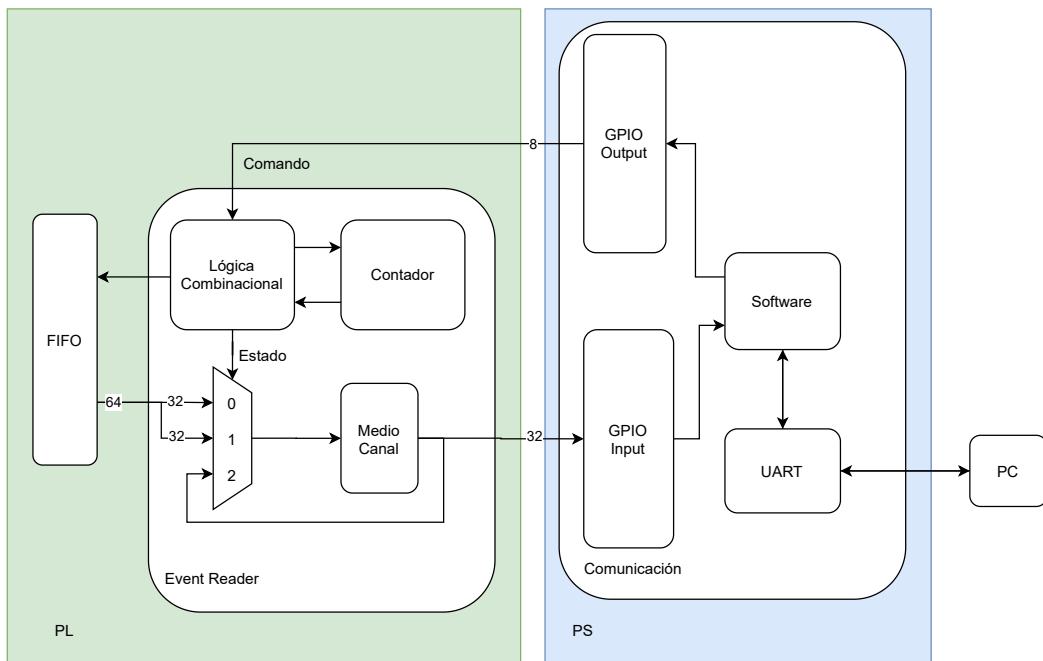


Figura 4.8: Diagrama simplificado del módulo *Event Reader* y el módulo de comunicación en el procesador.

Siendo estas todas las etapas del sistema de adquisición de datos, es posible operar el sistema y capturar pulsos de prueba, leer los datos muestrados y contrastar la integridad de la información entre los pulsos iniciales y los datos leídos por comunicación serial.

## Capítulo 5

---

# SIMULACIONES

## Capítulo 6

---

# CONCLUSIONES

## Apéndice A

---

# **CONTROL DE VERSIONES DE PROYECTOS VIVADO CON GIT**

Apéndice B

---

## **CONEXIÓN DE SEÑALES LVDS EN UNA FPGA ARTIX 7**

---

---

## REFERENCIAS

- [1] M. Tanabashi, K. Hagiwara, K. Hikasa, K. Nakamura, Y. Sumino, F. Takahashi, J. Tanaka, K. Agashe, G. Aielli, C. Amsler, M. Antonelli, D. M. Asner, H. Baer, S. Banerjee, R. M. Barnett, T. Basaglia, C. W. Bauer, J. J. Beatty, V. I. Belousov, J. Beringer, S. Bethke, A. Bettini, H. Bichsel, O. Biebel, K. M. Black, E. Blucher, O. Buchmuller, V. Burkert, M. A. Bychkov, R. N. Cahn, M. Carena, A. Ceccucci, A. Cerri, D. Chakraborty, M. C. Chen, R. S. Chivukula, G. Cowan, O. Dahl, G. D'Ambrosio, T. Damour, D. De Florian, A. De Gouvêa, T. Degrand, P. De Jong, G. Dissertori, B. A. Dobrescu, M. D'Onofrio, M. Doser, M. Drees, H. K. Dreiner, D. A. Dwyer, P. Eerola, S. Eidelman, J. Ellis, J. Erler, V. V. Ezhela, W. Fettscher, B. D. Fields, R. Firestone, B. Foster, A. Freitas, H. Gallagher, L. Garren, H. J. Gerber, G. Gebauer, T. Gershon, Y. Gershtein, T. Gherghetta, A. A. Godizov, M. Goodman, C. Grab, A. V. Gritsan, C. Grojean, D. E. Groom, M. Grunewald, A. Gurtu, T. Gutsche, H. E. Haber, C. Hanhart, S. Hashimoto, Y. Hayato, K. G. Hayes, A. Hebecker, S. Heinemeyer, B. Heltsley, J. J. Hernández-Rey, J. Hisano, A. Höcker, J. Holder, A. Holtkamp, T. Hyodo, K. D. Irwin, K. F. Johnson, M. Kado, M. Karliner, U. F. Katz, S. R. Klein, E. Klempert, R. V. Kowalewski, F. Krauss, M. Kreps, B. Krusche, Y. V. Kuyanov, Y. Kwon, O. Lahav, J. Laiho, J. Lesgourges, A. Liddle, Z. Ligeti, C. J. Lin, C. Lippmann, T. M. Liss, L. Littenberg, K. S. Lugovsky, S. B. Lugovsky, A. Lusiani, Y. Makida, F. Maltoni, T. Mannel, A. V. Manohar, W. J. Marciano, A. D. Martin, A. Masoni, J. Matthews, U. G. Meißner, D. Milstead, R. E. Mitchell, K. Mönig, P. Molaro, F. Moortgat, M. Moskovic, H. Murayama, M. Narain, P. Nason, S. Navas, M. Neubert, P. Nevski, Y. Nir, K. A. Olive, S. Pagan Griso, J. Parsons, C. Patrignani, J. A. Peacock, M. Pennington, S. T. Petcov, V. A. Petrov, E. Pianori, A. Piepke, A. Pomarol, A. Quadt, J. Rademacker, G. Raffelt, B. N. Ratcliff, P. Richardson, A. Ringwald, S. Roesler, S. Rölli, A. Romanouk, L. J. Rosenberg, J. L. Rosner, G. Rybka, R. A. Ryutin, C. T. Sachrajda, Y. Sakai, G. P. Salam, S. Sarkar, F. Sauli, O. Schneider, K. Scholberg, A. J. Schwartz, D. Scott, V. Sharma, S. R. Sharpe, T. Shutt, M. Silari, T. Sjöstrand,

- P. Skands, T. Skwarnicki, J. G. Smith, G. F. Smoot, S. Spanier, H. Spieler, C. Spiering, A. Stahl, S. L. Stone, T. Sumiyoshi, M. J. Syphers, K. Terashi, J. Terning, U. Thoma, R. S. Thorne, L. Tiator, M. Titov, N. P. Tkachenko, N. A. Törnqvist, D. R. Tovey, G. Valencia, R. Van De Water, N. Varelas, G. Venanzoni, L. Verde, M. G. Vincter, P. Vogel, A. Vogt, S. P. Wakely, W. Walkowiak, C. W. Walter, D. Wands, D. R. Ward, M. O. Wascko, G. Weiglein, D. H. Weinberg, E. J. Weinberg, M. White, L. R. Wiencke, S. Willocq, C. G. Wohl, J. Womersley, C. L. Woody, R. L. Workman, W. M. Yao, G. P. Zeller, O. V. Zenin, R. Y. Zhu, S. L. Zhu, F. Zimmermann, P. A. Zyla, J. Anderson, L. Fuller, V. S. Lugovsky, and P. Schaffner, “Review of Particle Physics,” 8 2018.
- [2] A. De, A. Mário, and J. Martins Pimenta, “Undergraduate Lecture Notes in Physics Introduction to Particle and Astroparticle Physics,” Tech. Rep. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/8917>
- [3] P. L. Rocca, D. L. Presti, and F. Riggi, “Cosmic Ray Muons as Penetrating Probes to Explore the World around Us,” in *Cosmic Rays*. InTech, 8 2018.
- [4] C. Grupen and I. Buvat, Eds., *Handbook of Particle Detection and Imaging*. Springer, 2012, vol. 2.
- [5] L. W. Alvarez, J. A. Anderson, F. El Bedwei, J. Burkhard, A. Fakhry, A. Girgis, A. Goneid, F. Hassan, D. Iverson, G. Lynch, Z. Miligy, A. Hilmy Moussa, and L. Yazolino, “Search for Hidden Chambers in the Pyramids,” Tech. Rep.