

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

ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABLAS	v
1. INTRODUCCIÓN	1
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
2. ESTADO DEL ARTE	8
2.1. LabPet II	8
2.2. 4D PET	10
2.3. ATLAS	11
2.4. Discusión sobre alternativas existentes	15
3. SISTEMA DE DETECCIÓN	17
3.1. Detector de Partículas	17
3.2. Estructura general	18
3.3. Detector sTGC utilizado	19
3.4. Procedimiento de Operación y Pruebas	21
3.4.1. Dispositivos para lectura de señales	22
3.4.2. Estimación de ruido base	23
3.4.3. Observación de falsas detecciones	23
3.4.4. Detección de partículas	23
3.5. Interfaz de Lectura	24
3.5.1. Circuito	25
3.5.2. Ejemplo de operación	26

4. SISTEMA DE ADQUISICIÓN	29
5. SIMULACIONES	30
6. CONCLUSIONES	31
A. CONTROL DE VERSIONES DE PROYECTOS VIVADO CON GIT	32
B. CONEXIÓN DE SEÑALES LVDS EN UNA FPGA ARTIX 7	33
REFERENCIAS	34

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 [1]	9
2.2.	Diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos para Detector PET 4D [2]	11
2.3.	Layout del experimento ATLAS, donde se indica la posición de la Small Wheel y la Big Wheel [3]	12
2.4.	Diagrama de la interfaz de captura para detectores de muones TGC [4]. Los muones se representan con el símbolo μ . 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. [5]	14
2.6.	Diagrama de la tarjeta de lectura ROBIN en ATLAS [6].	14
2.7.	Diagrama de bloques de la FPGA en ROBIN [6].	15

3.1.	Diagrama del sistema de muongrafía de terreno utilizando un solo detector.	18
3.2.	Estructura interna de un detector TGC [7].	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, y las lineas de campo corresponden a las flechas de color rojo [8].	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.	21
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^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.	27
3.10.	Captura de pantalla de un pulso de voltaje con carga equivalente a 0.3pC, medido en un osciloscopio.	28
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.	28

ÍNDICE DE TABLAS

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 [9]. 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 [10].

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 [9] (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. [11] [12].

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 [13]. 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

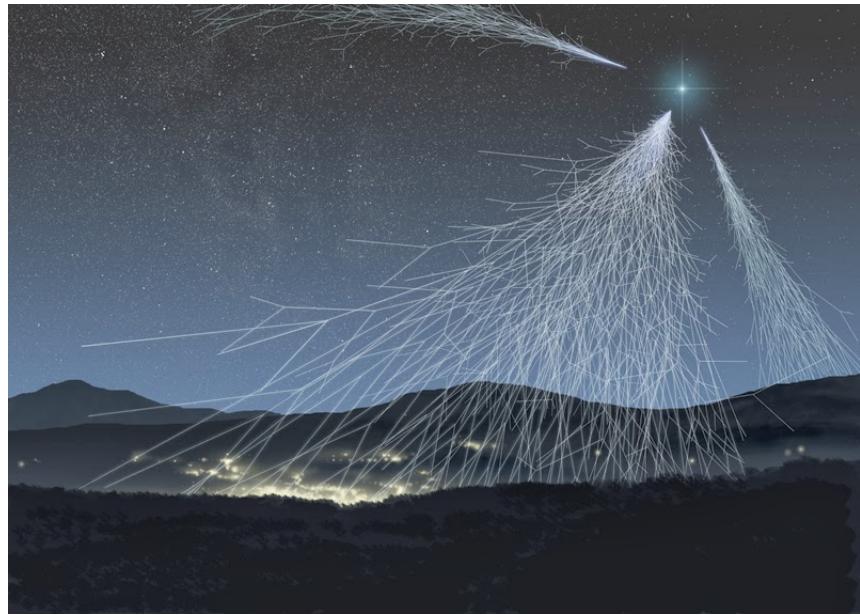


Figura 1.1: Representación artística de rayos cósmicos y lluvia de partículas subatómicas sobre la corteza terrestre.

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 15cm^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.

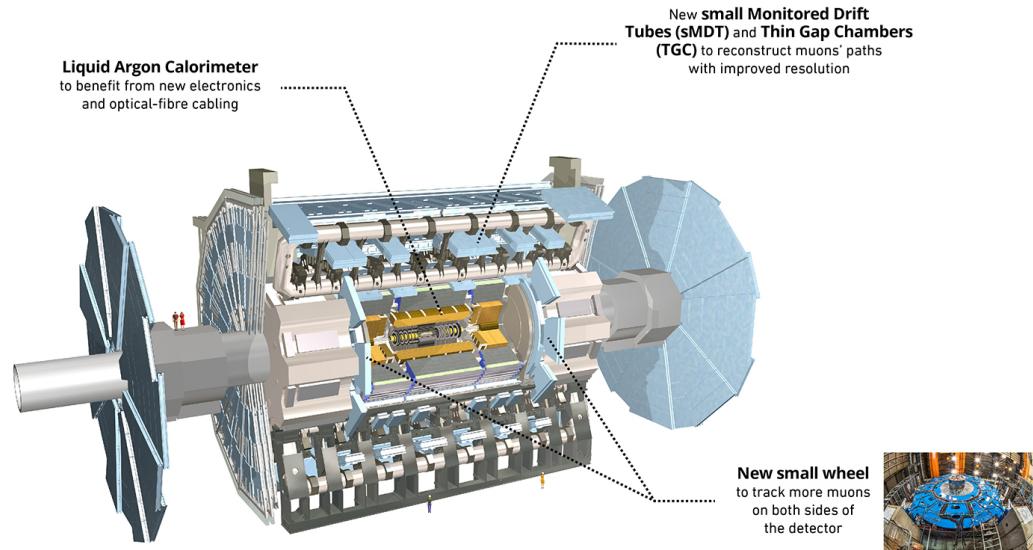


Figura 1.2: Diagrama del experimento ATLAS. CCTVal colabora en la actualización de la zona indicada como "New small Wheel", que contiene detectores sTGC.

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 cap:sdet.

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-

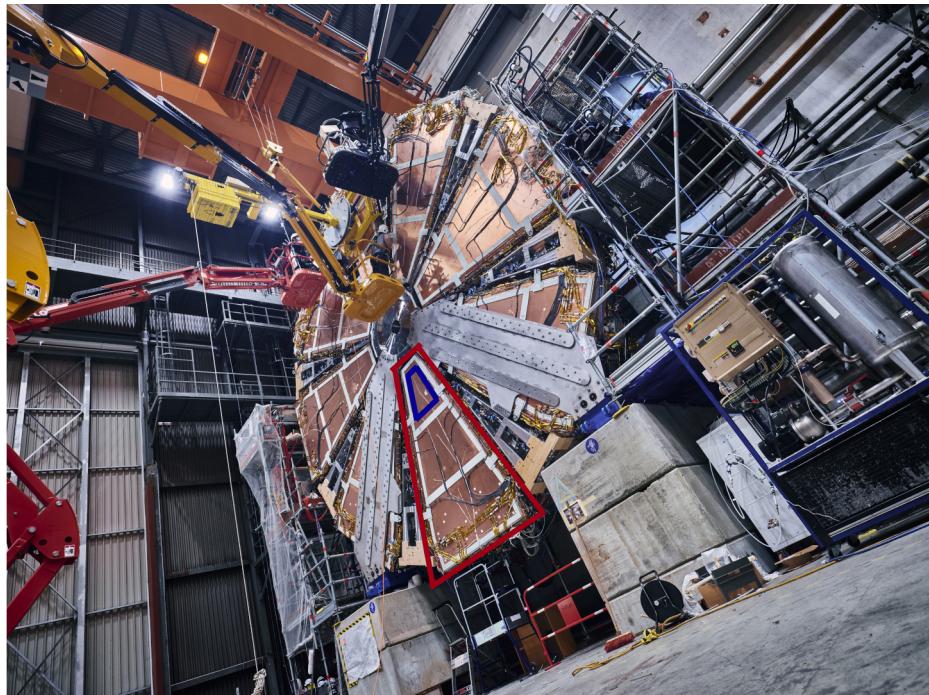


Figura 1.3: Fotografía correspondiente al montaje de detectores sTGC en la New Small Wheel del proyecto ATLAS.

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 1cm^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 detecto 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

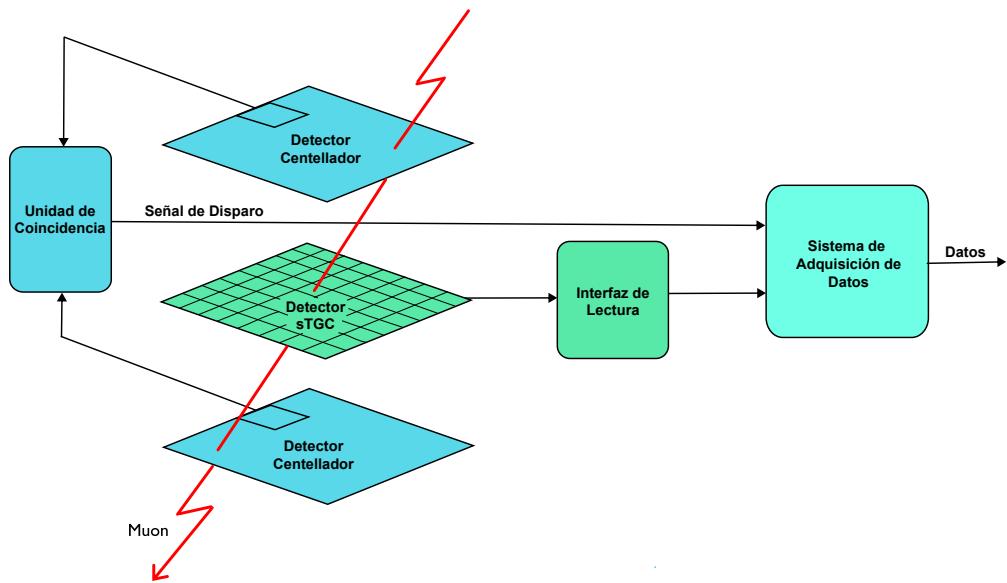


Figura 1.5: Diagrama del sistema de muongraffía de terreno utilizando un solo detector.

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 [14] y [15], 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 [1], 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 cósmicos cruzan el planeta tierra a aproximadamente 1 rayo

cósmico por minuto en un área de 1 cm^2 ¹, 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 necesario², 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) [16] 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.

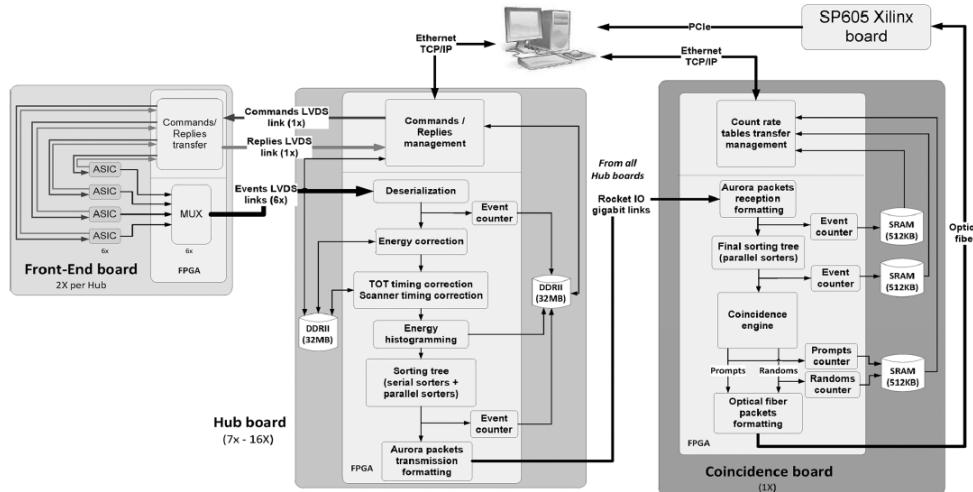


Figura 2.1: Diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos para LabPET II [1]

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

² 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 [2]. 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.

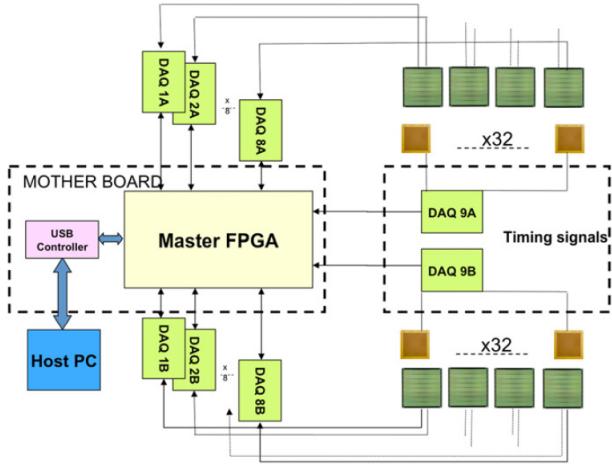


Figura 2.2: Diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos para Detector PET 4D [2]

2.3. ATLAS

Finalmente, la referencia más importante corresponde al experimento ATLAS [4], 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 $25\mu\text{s}$ [6], 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 [17], 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.

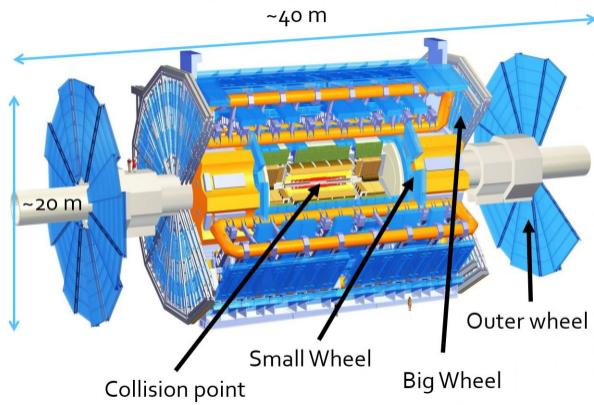


Figura 2.3: Layout del experimento ATLAS, donde se indica la posición de la Small Wheel y la Big Wheel [3]

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 μ 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

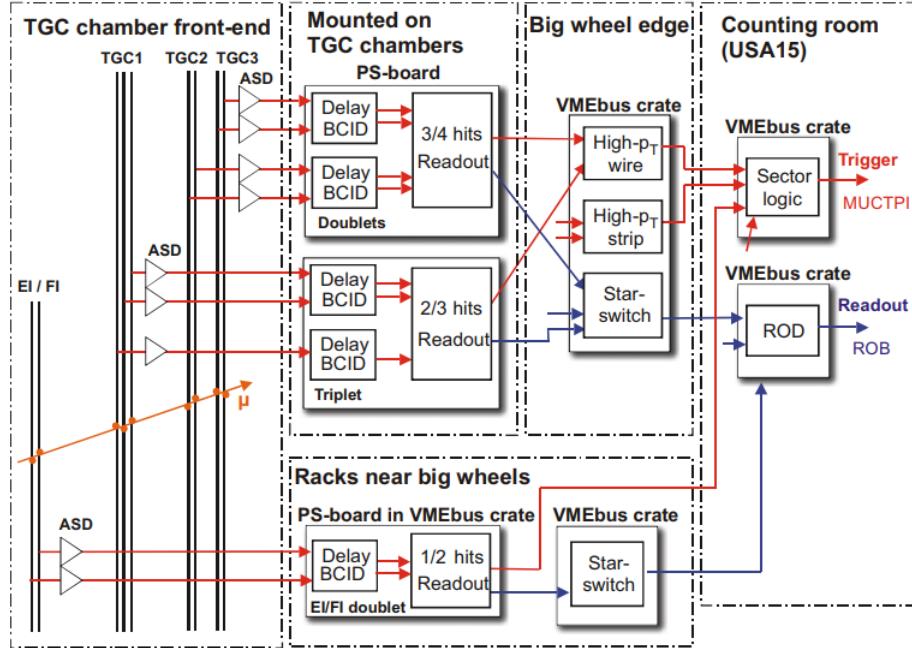


Figura 2.4: Diagrama de la interfaz de captura para detectores de muones TGC [4]. Los muones se representan con el símbolo μ . Existen 3 capas de detectores, por lo tanto se observan 3 bloques que incluyen retardos, selección y captura de los pulsos.

de datos pertenecientes a las regiones de interés calculadas por el Level 1 Trigger [5]. 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 [6], 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

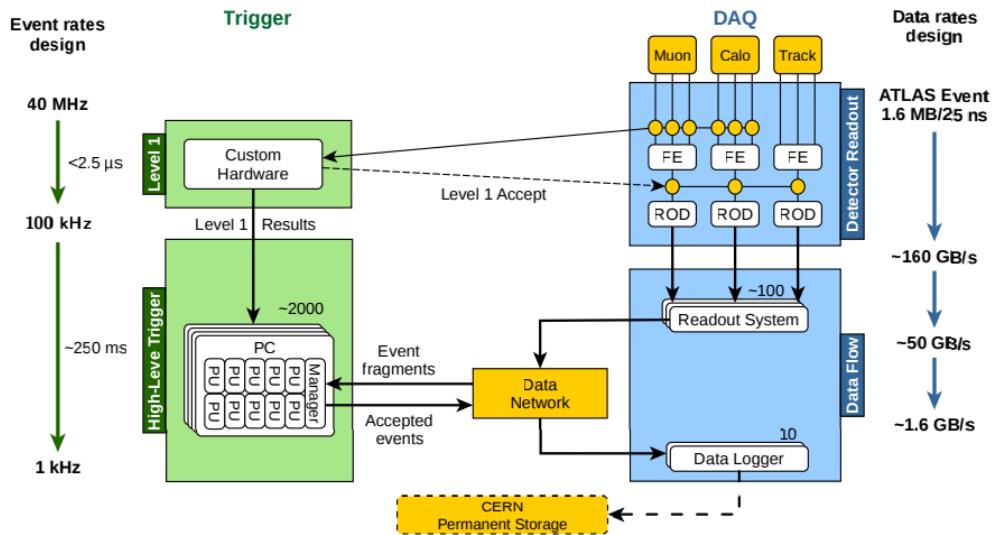


Figura 2.5: Diagrama del sistema de disparo y adquisición de datos en el experimento ATLAS. [5]

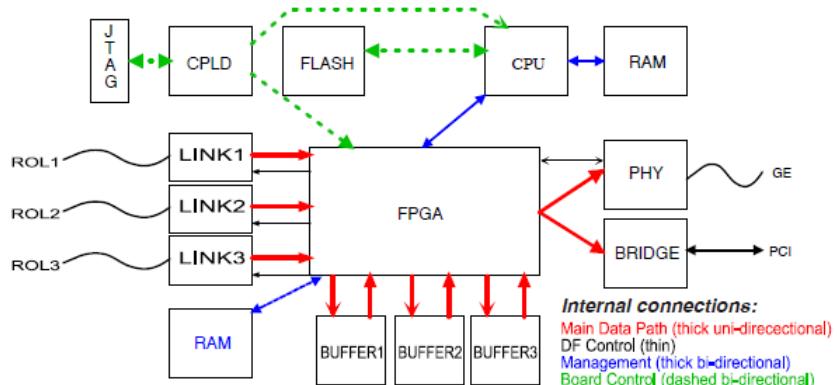


Figura 2.6: Diagrama de la tarjeta de lectura ROBIN en ATLAS [6].

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.

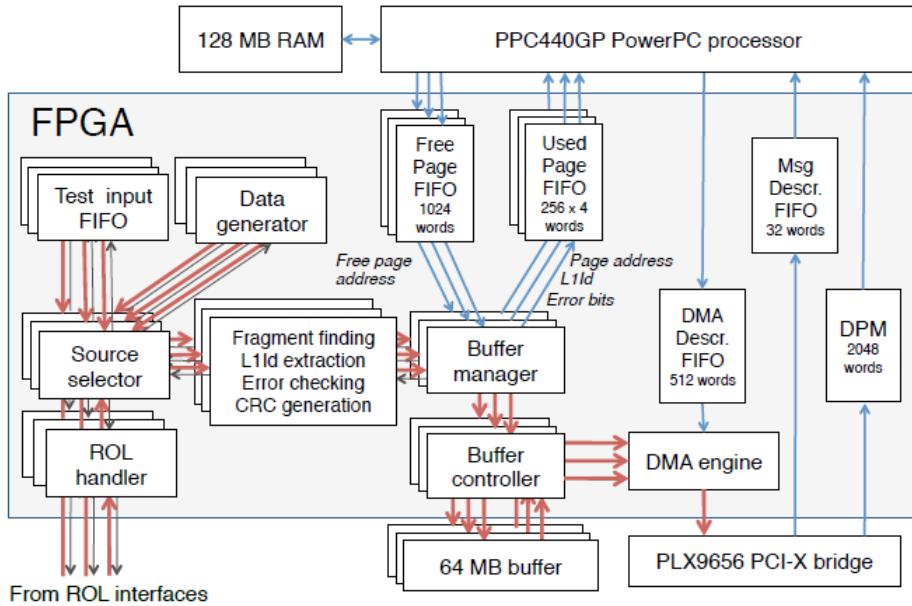


Figura 2.7: Diagrama de bloques de la FPGA en ROBIN [6].

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: disparo, detección y adquisición, como se ilustra en la Figura 3.1. El sistema de disparo [18] ilustrado en azul, como se introdujo en la sección 1.3, está constituido por dos detectores centelladores y una unidad de coincidencias que emite una señal digital de disparo (indicada en celeste) cuando un muón 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.

Si bien los detectores centelladores presentes en el sistema de disparo son capaces de detectar exclusivamente el paso de muones, en esta configuración experimental no son capaces de determinar la ubicación del vértice de interacción. Es por eso que son detectores complementarios al sistema de detección sTGC (ilustrado en verde en la Figura 3.1), 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 que lo sucede. 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.

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 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.

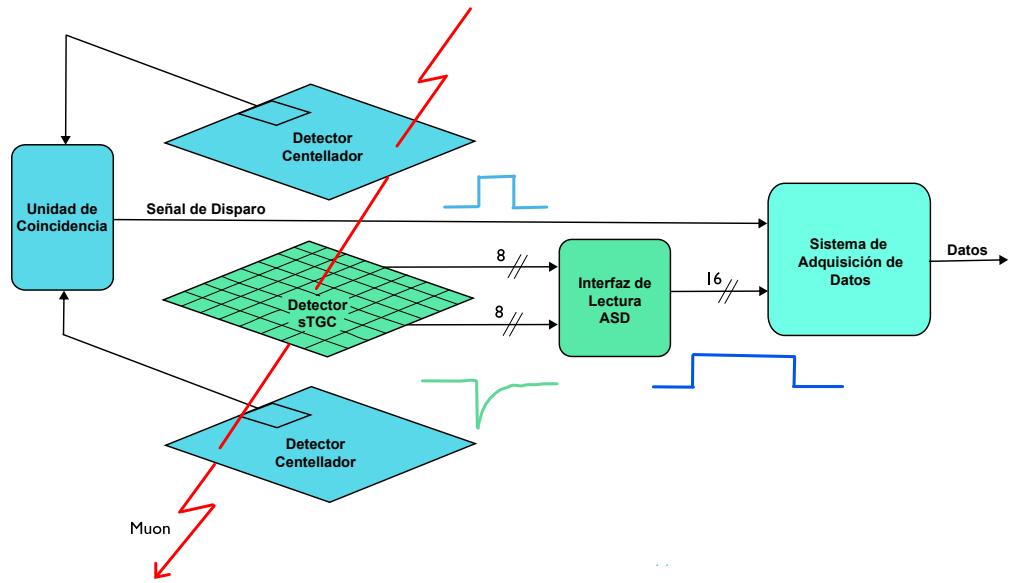


Figura 3.1: Diagrama del sistema de muonografía de terreno utilizando un solo detector.

Para el proyecto sTGC minería se construyó 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.

3.2. Estructura general

Un sTGC está compuesto por dos planos de grafito (cátodos), con múltiples cables en medio (ánodos) [3], 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. Estas zonas conductoras son llamadas “*pads*” en la cara superior y “*strips*” en la cara inferior del detector. 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 [3]. Mediante la aplicación de alto voltaje, se genera un campo eléctrico entre ánodos y cátodos. Se utilizan 3000 V_{DC} 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

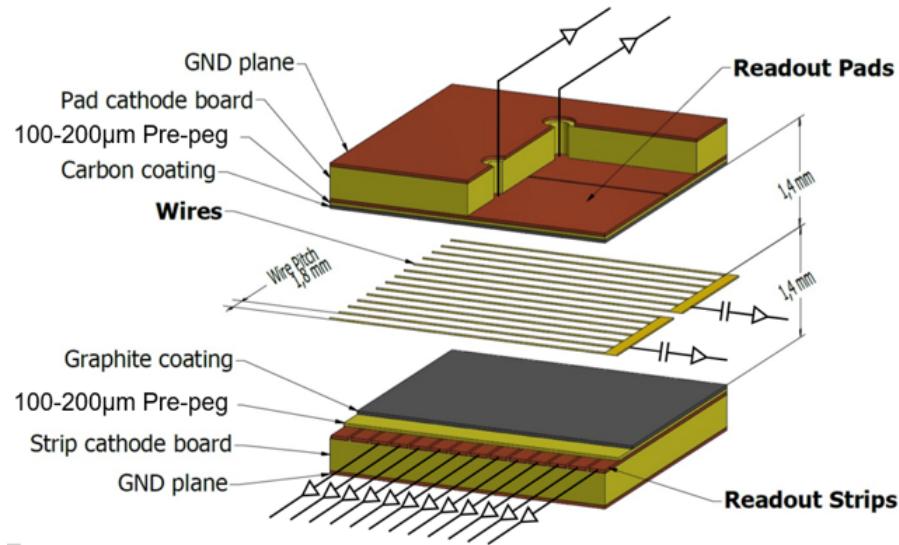


Figura 3.2: Estructura interna de un detector TGC [7].

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 correspondiente 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.

3.3. 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 para determinar los vértices de interacción: si un muón interactúa con un cable y un *strip* al mismo tiempo, entonces significa que el vértice de interacción se

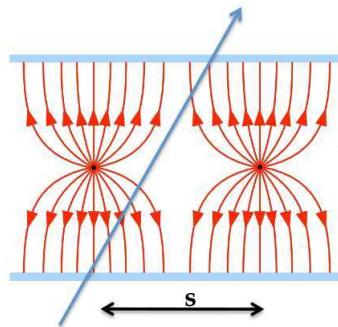


Figura 3.3: Lineas de campo eléctrico observadas en un corte transversal de los cables y cátodos del detector. Los cátodos se ilustran en celeste, los cables se representan en negro, y las lineas de campo corresponden a las flechas de color rojo [8].

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 por lado, de 15 centímetros largo y 1 centímetro 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 una cara 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.

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 1cm^2 , lo 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 1cm^2 . Se nombrarán los *strips* de la cara superior 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) el ubicado en la zona de detección inferior izquierda.

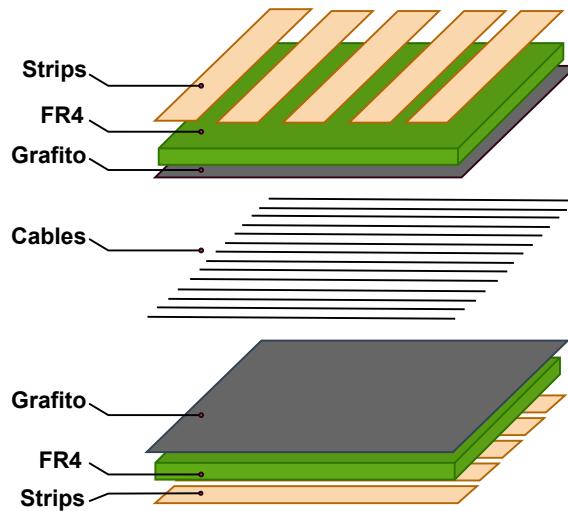


Figura 3.4: Estructura interna de un detector sTGC adaptado para este proyecto de titulación. El gas es contenido entre ambas capas de grafito (cátodos). Los cables internos corresponden a los ánodos.



Figura 3.5: Vista superior del detector prototipo.

3.4. 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.

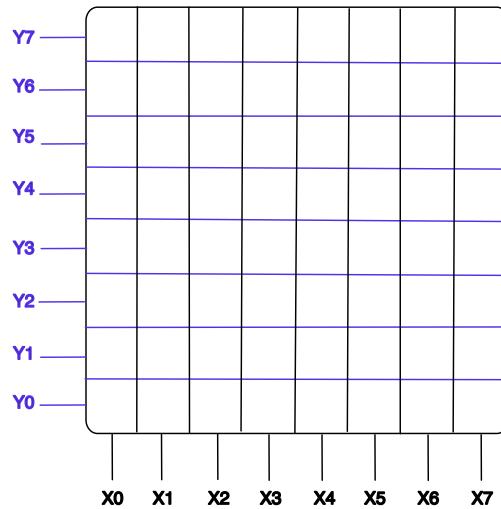


Figura 3.6: Vista superior del detector, en donde se indican las etiquetas asociadas a cada canal en función del eje al que pertenece. Cada cuadro representa un área de detección de 1cm^2 .

3.4.1. 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 impedancia de entrada adecuada para evitar reflexiones, así como también deberá contar con una ganancia tal que permita medir sin problemas las señales captadas con un osciloscopio, digitalizador o un sistema para adquisición de datos.

Un ejemplo es la tarjeta ASD mencionada en 2.3, que será utilizada en este proyecto de titulación. Está diseñada para la correcta lectura de *strips* y cables provenientes de detectores TGC. 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 se encarga de darle forma al pulso captado, con el fin extender la señal en el tiempo y facilitar su muestreo.

Esta tarjeta cuenta con salidas digitales de tipo LVDS. Estas señales representan el tiempo que la señal permanece por sobre un umbral arbitrario configurado, el cual será proporcional a la amplitud y por tanto a la carga del pulso medido. Cuenta también con una única señal análoga conectada al canal 16 (*Hit 15*), proveniente de la pre-amplificación. Esta es una señal de monitoreo ideal para realizar pruebas de funcionamiento.

3.4.2. 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 permite filtrarlo o ignorarlo en el análisis de eventos.

Para realizar esta medición se debe hacer circular el dióxido de carbono (o mezcla de dióxido de carbono y N-Pentano). 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 15cm^2 , el detector se encontrará completamente infiltrado con gas tras 20 minutos de operación.

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.

La amplitud del ruido base definirá una zona que deberá ser considerada en los análisis de eventos. Pulso 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.

3.4.3. 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.

3.4.4. 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 TGC, cubriendo un área igual a la que abarca este último. Si es posible, se recomienda incluir un segundo detector centelleante por debajo, para generar una señal de disparo conjunta con el centelleante superior. Esto permite descartar incidencias casi horizontales de muones, pasando por un centelleante pero no por el detector TGC.

3.5. Interfaz de Lectura

La interfaz de lectura ASD [19] 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 principal propósito 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 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 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. El detalle de cada pin se ilustra en la Figura 3.8

Como su acrónimo lo indica, la interfaz ASD (Amplifier-Shaper-Discriminator)¹ amplifica la carga eléctrica captada desde un canal de un detector, modifica la forma del pulso eléctrico en cuanto a su tiempo de duración y 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 y es la misma técnica utilizada en el detector LabPet II descrito en la

¹Jairo's comment: Decidí introducir de nuevo esta sigla, a pesar de que ya la defini anteriormente en la sección 2.3

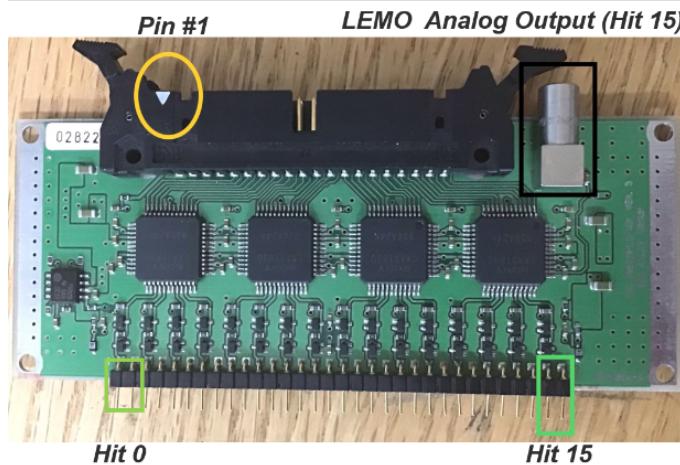


Figura 3.7: Interfaz de lectura ASD. Se destacan en la imagen sus canales (hit) del 0 al 15, su salida analógica LEMO y el primer pin en su conector de 40 posiciones.

sección 2.1. En la Figura 3.1, este pulso digital se representa como el pulso digital cuadrado azul entre la interfaz de lectura y el sistema de adquisición de datos.

Esta interfaz será utilizada conectándola a los strips de los detectores sTGC 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 prototípico sTGC. Así, con un solo detector y una interfaz es posible determinar vértices de interacción en un área de 15cm^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.

3.5.1. Circuito

Esta interfaz 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 [20].

Esta interfaz requiere una fuente de voltaje de $-+3\text{V}$ [19], es capaz de recibir pulsos entre -1.2pC a $+2.0\text{pC}$ sin saturarse y posee una frecuencia de entrada recomendada de hasta 100KHZ. 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 se ilustra el circuito principal incluido en cada canal de la

Table A-2 Pin assignment.

pin No.	name	name	pin No.
1	GND	V _{th}	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.

Interfaz. Cada canal tiene su propio preamplificador, un amplificador principal y un comparador [19], donde la etapa de preamplificación tiene una ganancia de 0.8V/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 -0.5V a +0.5V, resultando en un umbral real de -0.25V a +0.25V en el comparador [19].

3.5.2. Ejemplo de operación

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

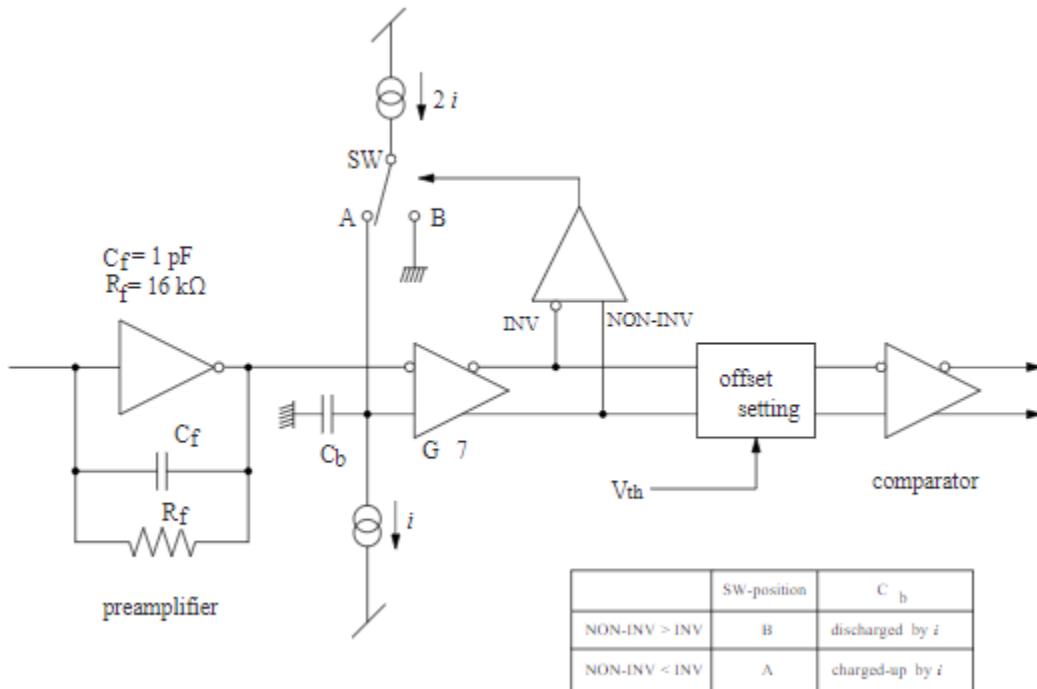


Figura 3.9: Diagrama de bloques del circuito principal para un canal de la interfaz ASD. Se indican la etapa de preamplificación, el amplificador principal de ganancia 7, y el comparador.

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 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 del preamplificador entonces presenta una amplitud de 180mV, 25 % más bajo de lo esperado, probablemente debido a la impedancia de entrada del osciloscopio utilizado para su medición

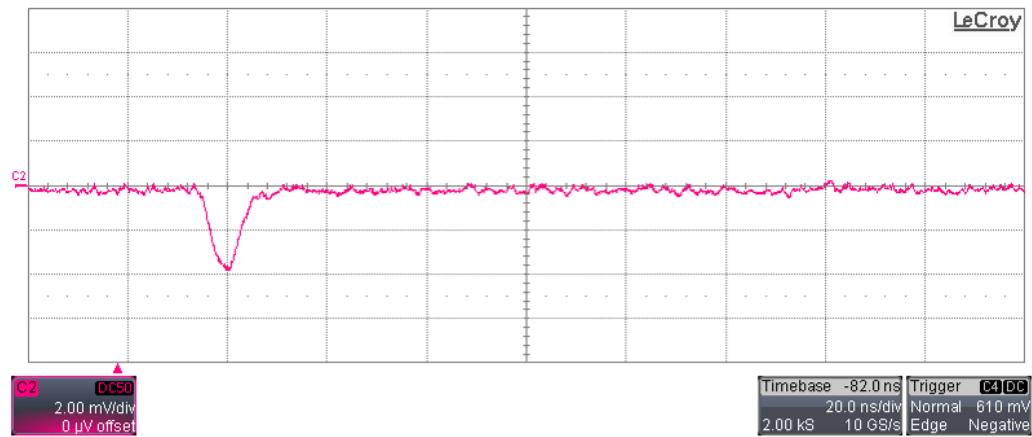


Figura 3.10: Captura de pantalla de un pulso de voltaje con carga equivalente a 0.3pC, medido en un osciloscopio.

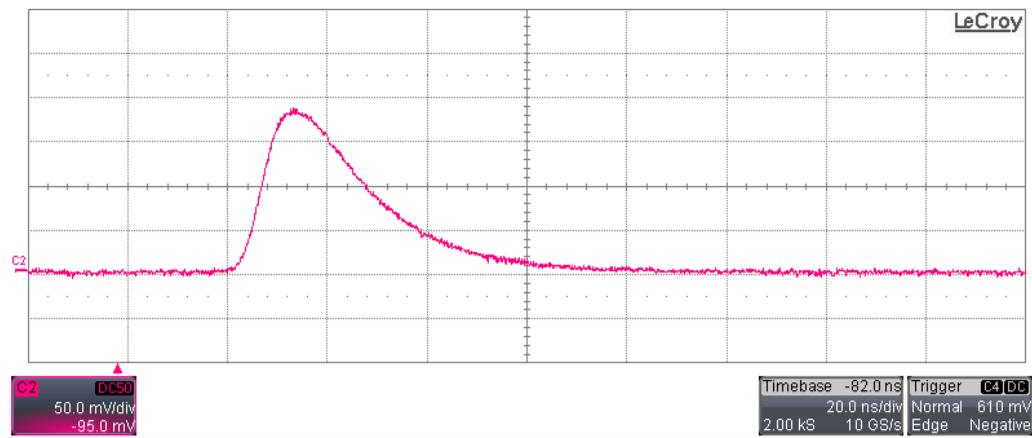


Figura 3.11: Captura de pantalla de un osciloscopio, en la cual se ilustra un pulso de voltaje proveniente de la salida analógica LEMO de la interfaz ASD luego de haber recibido un pulso de 0.3pC de carga eléctrica.

Capítulo 4

SISTEMA DE ADQUISICIÓN

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] L. Njejimana, M. A. Tetrault, L. Arpin, A. Burghgraeve, P. Maille, J. C. Lavoie, C. Paulin, K. C. Koua, H. Bouziri, S. Panier, M. W. Attouch, M. Abidi, J. Cadorette, J. F. Pratte, R. Lecomte, and R. Fontaine, “Design of a real-time fpga-based data acquisition architecture for the labpet ii: An apd-based scanner dedicated to small animal pet imaging,” *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 60, no. 5, pp. 3633–3638, 2013.
- [2] S. Marcatili, N. Belcari, M. G. Bisogni, G. Collazuol, G. Ambrosi, F. Corsi, M. Foresta, C. Marzocca, G. Matarrese, G. Sportelli, P. Guerra, A. Santos, and A. Del Guerra, “Development and characterization of a modular acquisition system for a 4D PET block detector,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 659, no. 1, pp. 494–498, 12 2011.
- [3] L. Formenti, “CERN Summer Student Report,” McGill University, Tech. Rep., 2018.
- [4] H. Spieler, “Electronics and data acquisition,” pp. 197–222, 2 2012.
- [5] T. Colombo, “Data-flow performance optimisation on unreliable networks: The ATLAS data-acquisition case,” in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 608, no. 1. Institute of Physics Publishing, 5 2015.
- [6] D. Whiteson, F. J. Wickens, W. Wiedenmann, M. Wielers, P. A. Wijeratne, F. Winklmeier, K. S. Woods, S. L. Wu, X. Wu, B. Wynne, S. Xella, A. Yakovlev, Y. Yamazaki, U. Yang, L. Yao, Y. Yasu, L. Yuan, A. Zaitsev, L. Zanello, H. Zhang, J. Zhang, L. Zhao, N. Zhou, H. Zobernig, and N. M. Zur, “The ATLAS Data acquisition and high level trigger system,” 6 2016.
- [7] J. Chapman, T. Dai, E. Diehl, H. Feng, L. Guan, G. Mikenberg, V. Smakhtin, J. Yu, B. Zhou, J. Zhu, and Z. Zhao, “ATLAS NOTE Simulation Studies of Charac-

- teristics and Performances of small-strip, Thin Gap Chambers for the ATLAS New Small Wheel 4 Muon Detector Upgrade,” Tech. Rep., 2014.
- [8] V. De Smet, “Study of a GEM tracker of charged particles for the Hall A high luminosity spectrometers at Jefferson Lab,” 2011. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/318016226>
- [9] 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. Gerbier, 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. Klempt, 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. Ver-

- de, 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.
- [10] 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>
- [11] 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.
- [12] C. Grupen and I. Buvat, Eds., *Handbook of Particle Detection and Imaging*. Springer, 2012, vol. 2.
- [13] 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.
- [14] S. G. Basiladze, “Methods for data readout, acquisition, and transfer in experimental nuclear physics setups (A Review, Part 1),” *Instruments and Experimental Techniques*, vol. 60, no. 4, pp. 463–521, 7 2017.
- [15] ——, “Methods for data readout, acquisition, and transfer in experimental nuclear physics setups (A review, part 2),” pp. 615–678, 9 2017.
- [16] T. Orita, A. Koyama, M. Yoshino, K. Kamada, A. Yoshikawa, K. Shimazoe, and H. Sugawara, “The current mode Time-over-Threshold ASIC for a MPPC module in a TOF-PET system,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 912, pp. 303–308, 12 2018.
- [17] L. Pontecorvo, “The ATLAS muon spectrometer,” *European Physical Journal C*, vol. 34, pp. s117–s128, 2004.
- [18] H. Oyanadel, “Sistema de Disparo para Detectores sTGC,” Valparaíso, 3 2020.
- [19] “ATLAS Thin Gap Chamber Production Readiness Review Report Amplifier-Shaper-Discriminator ICs,” Tech. Rep., 1999. [Online]. Available: <http://online.kek.jp/~sosamu/ASD-PRR.pdf>

- [20] “IEEE Standard for Low-Voltage Differential Signals (LVDS) for Scalable Coherent Interface (SCI) Microprocessor and Microcomputer Standards Committee of the IEEE Computer Society,” Tech. Rep., 1996.