

**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	1
1.2. Motivación	3
1.3. Planteamiento del Problema	4
1.4. Alcances y contribuciones	5
1.5. Organización del documento.	6
<b>2. ESTADO DEL ARTE</b>	<b>8</b>
2.1. LabPet II	8
2.2. PET 4D	10
2.3. ATLAS	11
<b>3. SISTEMA DE DETECCIÓN</b>	<b>15</b>
3.1. Detector de Partículas	15
3.2. Estructura	17
3.3. Detector sTGC utilizado	18
3.4. Procedimiento de Operación y Pruebas	20
3.4.1. Dispositivos para lectura de señales	20
3.4.2. Estimación de ruido base	20
3.4.3. Observación de falsas detecciones	21
3.4.4. Observación de eventos provenientes de fuentes radioactivas	21
3.4.5. Observación de eventos provenientes de rayos cósmicos	21
3.5. Interfaz de Lectura	22
<b>4. SISTEMA DE ADQUISICIÓN</b>	<b>23</b>

4.1.	Arquitectura propuesta	23
4.1.1.	Esquema General	23
4.1.2.	Requisitos	25
4.1.3.	Propuesta	26
4.2.	Muestreo de Señales y Discriminación de Eventos	33
4.2.1.	Objetivos	34
4.2.2.	Diagrama de Bloques	34
4.2.3.	Decisiones de Diseño	35
4.3.	Buffer de Eventos	35
4.3.1.	Objetivos	35
4.3.2.	Diagrama de Bloques	36
4.3.3.	Decisiones de Diseño	36
4.4.	Comunicación	36
4.4.1.	Objetivos	36
4.4.2.	Diagrama de Bloques	36
4.4.3.	Decisiones de Diseño	36
<b>5.</b>	<b>SIMULACIONES</b>	<b>37</b>
<b>6.</b>	<b>PRUEBAS</b>	<b>38</b>
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>39</b>
<b>A.</b>	<b>CONTROL DE VERSIONES DE PROYECTOS VIVADO CON GIT</b>	<b>40</b>
<b>B.</b>	<b>CONEXIÓN DE SEÑALES LVDS EN UNA FPGA ARTIX 7</b>	<b>41</b>
	<b>REFERENCIAS</b>	<b>42</b>

---

---

# ÍNDICE DE FIGURAS

1.1.	Representación artística de rayos cósmicos y lluvia de partículas subatómicas sobre la corteza terrestre.	3
1.2.	Imagen referencial de un mapa de calor para representación de densidades en un corte transversal de terreno.	4
1.3.	Diagrama del sistema de muongraffía de terreno para un solo detector. Se incluyen en azul las formas de señal asociadas a la señal de disparo, eventos de detección, y lectura de pulsos.	6
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]	10
2.3.	Diagrama de la interfaz de lectura para detectores de muones [3]. 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.	11
2.4.	Diagrama del sistema de disparo y adquisición de datos en el experimento ATLAS. [4]	12
2.5.	Diagrama de la tarjeta de lectura ROBIN en ATLAS [5].	13
2.6.	Diagrama de bloques de la FPGA en ROBIN [5].	13
3.1.	Diagrama del espectrómetro de muones en el experimento ATLAS [10].	15
3.2.	Fotografía del los detectores sTGC en el espectrómetro de muones del experimento ATLAS [11]. El diámetro de este dispositivo es cercano a 24 metros.	16
3.3.	Estructura interna de un detector TGC [12].	16

- 3.4. 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 [13]. 17
- 3.5. 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. 18
- 3.6. Vista superior del detector. Arriba se observan tubos para el flujo de gas. Abajo se ubican 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. 19
- 3.7. 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  $1\text{cm}^2$ . 19
- 4.1. 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. 24
- 4.2. Diagrama de bloques utilizando una FPGA como alternativa de solución. Se indica una salida serial para transmitir los resultados del análisis básico a algún procesador o memoria de alguna etapa posterior. La señal de sincronización, inspirada en la alternativa ?? tiene como objetivo sincronizar la recolección y procesamiento de eventos, para que estos sean consistentes entre detectores. 27
- 4.3. Representación de la lógica interna de la FPGA. Se agrega una cola de datos para las señales de disparo y una memoria de almacenamiento temporal para los eventos ya estructurados. Ambas implementaciones permiten tener mejor control del flujo de datos, evitando perdidas y asegurando sincronía a pesar de que la lectura de la información sea eventualmente más lenta que la captura de pulsos. Los bloques controlador, estructurador y análisis cumplen las mismas funciones mencionadas en alternativas anteriores: aceptar o descartar pulsos, cuantificar anchos de pulso a los canales asociados y determinar coordenada del cruce de un muón respectivamente. 28

- 
- 4.4. Placa de desarrollo y módulo FPGA a utilizar. A la izquierda se ilustra la placa de desarrollo Trenz TR0703 [6] y a su derecha se ilustra el módulo que va montado en ella: Trenz TR0712 [7] que contiene una FPGA Artix 7 [8]. 30
  - 4.5. Esquema de los canales provenientes de un detector Mini sTGC. Posee 8 tiras adyacentes de 15cm de largo por 1cm de ancho para cada eje coordenado. Cada tira emitirá un pulso analógico si una partícula cargada pasa través de ella. Se emitirán también pulsos de menor amplitud para el caso en que la partícula pase por una tira adyacente del mismo eje coordenado dentro de un radio específico. Este detector se posiciona perpendicularmente respecto a la fuente de radiación y en paralelo a (por debajo o por sobre) el sistema de disparo que indicará si la partícula captada corresponde o no a un muón. 31
  - 4.6. Placa ASD [9] (Amplificador Shaper Discriminator), encargada de captar los 16 pulsos provenientes de un detector y entregar pulsos digitales asociados a ellos en su salida. El detector se conecta en sus entradas DIP ubicadas en su extremo inferior, mientras que las señales LVDS de salida se ubican en el conector de 40 puertos para cable plano en su extremo superior. 32
  - 4.7. Diagrama de bloques utilizando una FPGA como alternativa de solución. Se indica una salida serial para transmitir los resultados del análisis básico a algún procesador o memoria de alguna etapa posterior. La señal de sincronización “Sync” tiene como objetivo sincronizar la recolección y procesamiento de eventos, para que estos sean consistentes entre detectores. 32
  - 4.8. Representación de la lógica interna de la FPGA. Se incluye una cola de datos para las señales de disparo, para los pulsos digitales provenientes de la ASD y una memoria de almacenamiento temporal para los eventos ya estructurados. Los bloques controlador, estructurador y análisis cumplen las funciones de aceptar o descartar pulsos, cuantificar anchos de pulso a los canales asociados y determinar coordenada del cruce de un muon respectivamente. 33
  - 4.9. caption 34

---

---

## **ÍNDICE DE TABLAS**

## Capítulo 1

---

# INTRODUCCIÓN

En este documento se detalla el trabajo realizado en torno al diseño, implementación y validación <sup>1</sup> de un prototipo de <sup>2</sup> sistema de adquisición de datos para detectores de muones. Este sistema fue diseñado en base a indicaciones y requerimientos específicos del Centro Científico Tecnológico de Valparaíso (CCTVal) para aplicaciones de detección de partículas y muonografía de terrenos mineros <sup>3</sup>. El sistema fue implementado en una matriz de puertas lógicas programable en campo, o FPGA (por su sigla en inglés, Field-programmable gate array) <sup>4</sup> utilizando SystemVerilog. <sup>5</sup>

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 incluyen también la organización del documento y los detalles de cada capítulo.

### 1.1. Contexto

6

<sup>1</sup> Gonzalo's comment: entiendo que estarás haciendo el diseño, implementacion, y validacion, cierto

<sup>2</sup> Gonzalo's comment: prototipo? Para acotarlo mas.

<sup>3</sup> Gonzalo's comment: Incluir una breve frase sobre el origen y contexto de uso para el desarrollo. Por ejemplo: "El sistema de adquisicion fue diseñado en base a indicaciones y requerimientos específicos del CERN/CCTval para ser usado en aplicaciones de ....."

<sup>4</sup> Gonzalo's comment: Introducir el acronimo la primera vez que se usa

<sup>5</sup> Gonzalo's comment: borre la frase, pero no es necesario poner hardware en cursivas. Vas a usar demasiados terminos en ingles, asi que quedaria raro el texto. Deja los terminos en fuente normal, y despues se ve cuales vale la pena destacar.

<sup>6</sup> Gonzalo's comment: Articula mejor el texto para que fluya mejor. Estas usando frases cortas separadas por puntos seguidos, que lo hacen ver como un telegrama. Cada vez que termines un texto, leelo en voz alta siguiendo las reglas gramaticales del colegio, y eso te dara una idea de donde poner las puntuaciones. Si se lee muy golpeado o interrumpido es indicacion de que hay demasiados puntos, si te quedas sin aire en algun frase es indicacion de que falta una coma o la frase esta

El planeta tierra es constantemente bombardeado por rayos cósmicos provenientes del espacio exterior. Estos rayos corresponden principalmente a partículas cargadas, como por ejemplo protones y núcleos atómicos.<sup>7</sup> El origen de estos rayos es variado, y aunque la fuente de algunos de ellos es desconocida, la mayor parte de estos rayos provienen de tormentas solares, agujeros negros e incluso de eventos astronómicos asociados al origen del universo. 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 para rayos originados en centros galácticos y agujeros negros.<sup>8</sup>

Los rayos cósmicos inciden en el planeta tierra e interactúan con la atmósfera terrestre, produciendo la ionización del medio y decayendo en partículas secundarias. Estas últimas vuelven a interactuar con otras partículas, generando una efecto en cadena y produciendo así una lluvia de rayos subatómicos sobre la corteza terrestre. La figura 1.1 corresponde a una representación artística de la lluvia de partículas originada por radiación cósmica.

Cerca del 70 % de las partículas que logran llegar a la superficie del planeta corresponden a muones.<sup>9</sup>Estos poseen la misma carga que un electrón, pero con una masa cerca de 200 veces mayor.<sup>10</sup>Esta característica, sumada a su altísima velocidad<sup>11</sup>, permite que los muones pasen a través de la materia.<sup>12</sup>Incluso, son capaces de alcanzar zonas bajo tierra durante el transcurso de su vida media, correspondiente a aproximadamente  $2\mu s$ .

Al atravesar materia, los muones son absorbidos o su energía se ve disminuida. Detectarlos y medir su energía permite entonces conocer propiedades de la materia que ha sido atravesada por estas partículas. Por ejemplo, es posible realizar un mapa de densidad de terreno a partir de los cruces de muones, proceso conocido como muongrafiía o tomografía muónica<sup>13</sup>.

<sup>7</sup>Gonzalo's comment: que es lo que se caracteriza por viajar a grandes velocidades? Esto gramaticalmente se llama un *dangling modifier*. Estudia en que consiste y evitalos en el resto del documento y para el resto de tu vida. Tambien tiene que ver con el exceso de puntuacion.

<sup>8</sup>Gonzalo's comment: Falta tambien un contexto de donde provienen o algo asi (no aparecen de la nada) y por que son relevantes, aunque sea algo intuitivo para el lector comun y corriente.

<sup>9</sup>Gonzalo's comment: dangling modifier

<sup>10</sup>Gonzalo's comment: dangling modifier

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

<sup>12</sup>Gonzalo's comment: dangling modifier. El ultimo que marco. Corregir en todo el documento.

<sup>13</sup>Gonzalo's comment: seria bueno ir dando referencias de literatura para estos conceptos, en caso de que el lector quiera saber mas al respecto. Dar tambien un ejemplo de aplicaciones practicas (mineria, topografia, otros.). Esto es en forma breve, y despues en el resto del capitulo explicas mas detalles de las aplicaciones especificas. Considera la motivacion como un trailer motivacional para que el lector quiera seguir viendo la pelicula. Detectar muones es aburrido, las aplicaciones

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 características físicas de eventos detectados a datos computables y analizables para extracción e interpretación de la información.

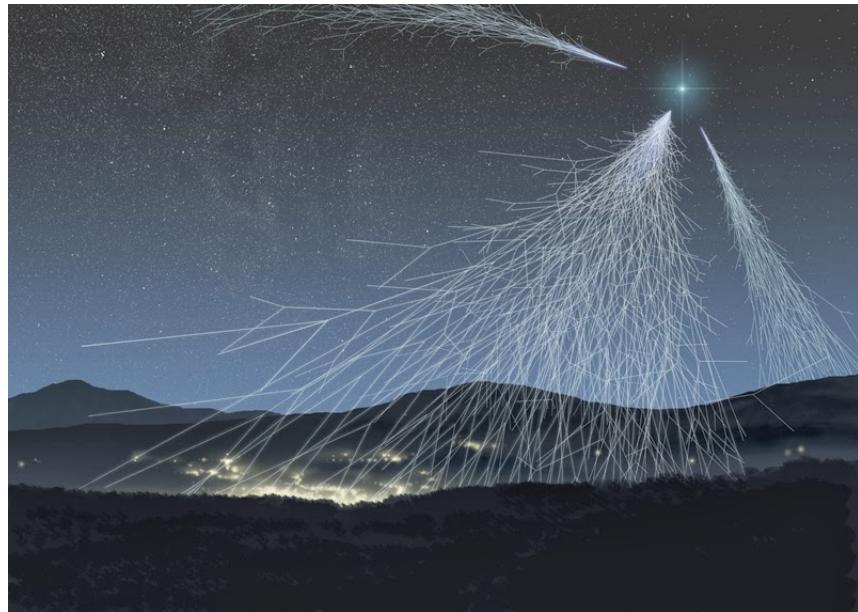


Figura 1.1: Representación artística de rayos cósmicos y lluvia de partículas subatómicas sobre la corteza terrestre.

## 1.2. Motivación

El “Sistema de adquisición de datos para detectores de muones” nace como un requerimiento del Centro Científico Tecnológico de Valparaíso (CCTVal) para aplicaciones de física de partículas, en el marco del proyecto “sTGC Minería”.

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<sup>14</sup>. Estas tomografías sientan las bases para la detección de cavernas subterráneas y estimación de densidad en terrenos mineros. La figura 1.2 corresponde

---

que tiene este tipo de tecnología en entornos productivos es lo interesante desde el punto de vista de ingeniería.

<sup>14</sup>Gonzalo's comment: interesante, pero da una referencia a algun articulo

a una muongrafía de un corte trasversal de terreno.<sup>15</sup>

Producto de la colaboración existente entre CCTVal y el experimento ATLAS, en CERN, el centro cuenta con las herramientas y conocimientos necesarios para la fabricación de detectores de muones en Chile. Los detectores de partículas a utilizar en “sTGC Minería” corresponden precisamente a unos basados en los detectores del espectrómetro de muones presente en el experimento ATLAS.

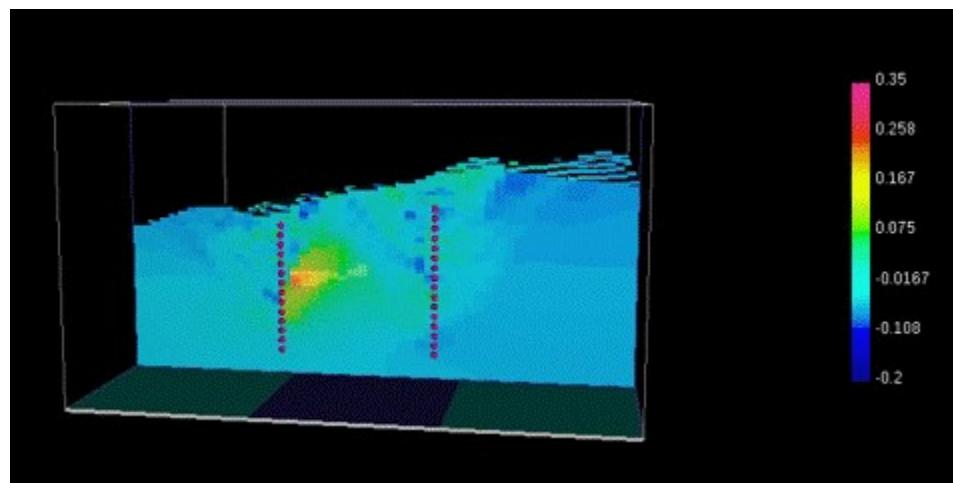


Figura 1.2: Imagen referencial de un mapa de calor para representación de densidades en un corte transversal de terreno.

### 1.3. Planteamiento del Problema

La detección de muones implica una serie de etapas y detectores desarrollados con tecnologías que se utilizan en experimentos tales como ATLAS, en CERN<sup>16</sup>. Particularmente en “sTGC Minería”, se requiere un sistema que sea capaz de captar las señales generadas por los detectores y que determine de manera fiable y precisa<sup>17</sup> aquellas zonas del detector por las cuales ha pasado un muon.

El “Sistema de adquisición de datos para detectores de muones” cumplirá con las funciones de adquirir, discriminar y estructurar la información captada desde el detector, para así contribuir a la tomografía muónica del terreno.

Como objetivo principal se tiene el detectar la posición del paso de muones en

---

<sup>15</sup>Gonzalo's comment: explicar un poco mejor la figura. Que informacion util entrega esa figura?  
Que significa el mapa de colores?

<sup>16</sup>Gonzalo's comment: Introducir los acronimos

<sup>17</sup>Gonzalo's comment: a que te refieres con fiable y precisa?

un detector de configuración matricial, indicando el o los cuadrantes<sup>18</sup> que han sido excitados por el paso de las partículas, de manera fiable y eficiente<sup>19</sup>, logrando captar gran<sup>20</sup> cantidad de señales íntegramente<sup>21</sup>.

La figura 1.3 ilustra el sistema de muongrafía de terreno considerando un solo detector de muones. Para su operación, utiliza dos detectores centelleantes secundarios, un sistema de coincidencias y una interfaz de lectura. El sistema de adquisición de datos capta y discrimina los pulsos generados según se correspondan con la señal de coincidencia asociada a los detectores centelleantes. La información resultante es comunicada a etapas posteriores para análisis de datos.<sup>22</sup>

Es requisito del proyecto que este sistema sea concebido como una herramienta adaptada para operar con detectores de mayor tamaño o con arreglos de detectores individuales, 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 expansible, sobre todo en torno a la cantidad de señales que es capaz de procesar.<sup>23</sup>

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 por el centro.<sup>24</sup>

## 1.4. Alcances y contribuciones

<sup>25</sup> Se espera que este sistema sea capaz de generar información suficiente para representar la ubicación del paso de las partículas en la superficie del detector, determinando cuadrantes de  $1cm^2$  que hayan sido excitados por el cruce de partículas.

<sup>18</sup>Gonzalo's comment: no se han explicado lo de los cuadrantes ni cosa asociadas. Quizas debas mover las especificaciones tecnicas generales antes.

<sup>19</sup>Gonzalo's comment: antes dijiste eficiente y precisa. Se consistente con el lenguaje tecnico, no es un reporte literario ni de poesia (lo cual no quiere decir que puede estar mal escrito).

<sup>20</sup>Gonzalo's comment: cuantas? Evita el uso/abuso de terminos no cuantificables y subjetivos. Da al menos ordenes (decenas, cientos, miles?)

<sup>21</sup>Gonzalo's comment: que es integralmente? que no sean corruptas o eticamente correctas?

<sup>22</sup>Gonzalo's comment: Esto deberia ir antes. Ver comentarios anteriores.

<sup>23</sup>Gonzalo's comment: No queda claro que es lo que ya esta hecho y que es lo que haras tu? Estas haciendo el detector completo, o solo el sistema de adquisicion? Explicar mejor. Tambien dejar claro que es un prototipo de cierto tamaño.

<sup>24</sup>Gonzalo's comment: Esto ultimo deberia plantearse como una motivacion. "Actualmente no se tiene conocimiento sobre esto, por lo que en este proyecto se busca adquirir experiencia practica..."

<sup>25</sup>Gonzalo's comment: Toda esta seccion debe ser mas concreta y especifica.

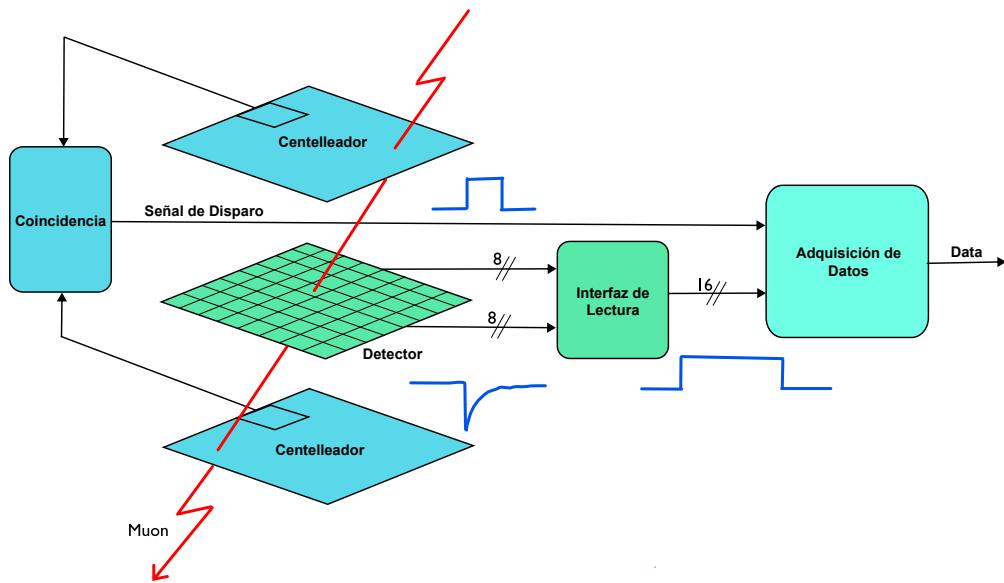


Figura 1.3: Diagrama del sistema de muongrafiía de terreno para un solo detector. Se incluyen en azul las formas de señal asociadas a la señal de disparo, eventos de detección, y lectura de pulsos.

El sistema deberá ser capaz de captar cantidades pares arbitrarias de canales, discriminando partículas mediante la utilización de las señales de disparo disponibles.

La información generada pasará a etapas siguientes de análisis detallado o de representación gráfica, por lo cual es importante que el sistema sea capaz de entregar información pertinente ordenada, procesada y seleccionada para dichos fines.

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 la implementación del diseño 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.

## 1.5. Organización del documento.

Este documento se estructura de la siguiente manera:<sup>26</sup>

- El **Capítulo 2** incluye el estado del arte en cuanto a dispositivos de adquisición de datos para partículas de altas energías.

<sup>26</sup>Gonzalo's comment: demasiados capítulos. No deberían ser más de 5 o 6.

- 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 ??** detalla la primera etapa de diseño de hardware, encargada de tomar muestras de los pulsos digitales provenientes de la etapa inmediatamente anterior.
- El **Capítulo 4** detalla la arquitectura propuesta para la realización de este proyecto y el desarrollo de cada una de sus etapas.
- El **Capítulo 6** incluye pruebas realizadas en el sistema con el fin de comprobar funcionamiento y resultados del dispositivo.
- El **Capítulo 7** 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 desarrollo y diseño de este sistema, es pertinente conocer el estado del arte de sistemas de adquisición de datos para física de partículas, especialmente los utilizados en CERN, para así contrastar y rescatar las diferentes estrategias y tecnologías empleadas actualmente en esta área del conocimiento.

En las siguientes páginas se mencionan distintos 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

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.

Dentro de la variedad de detectores estudiados, LabPet II de Larissa Njejima-na [1] presenta una estructura clara e interesante. Este detector posee un DAQ distribuido en tres FPGAs, contando con etapas para recolectar, procesar y transmitir la información obtenida. Una primera etapa consiste en registrar tiempo, energía y posición de las partículas captadas; una segunda etapa ordena cronológicamente los eventos capturados, mientras que una tercera etapa agrupa detecciones coincidentes, calculando además la tasa de eventos aleatorios ocurridos. La figura 2.1 ilustra este sistema.

Si bien, dicho detector está diseñado para otro tipo de partículas (positrones), la naturaleza de las señales es muy similar, 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  $1\text{cm}^2$ , muy por debajo de lo que se espera en LabPET II.

Del sistema de adquisición para el detector anteriormente mencionado, 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 muchos puertos de entrada o incluir varios del mismo tipo. Además, debido a la frecuencia de eventos, se hace obligatoria la existencia de *buffers* para el almacenamiento de la información, para así 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.

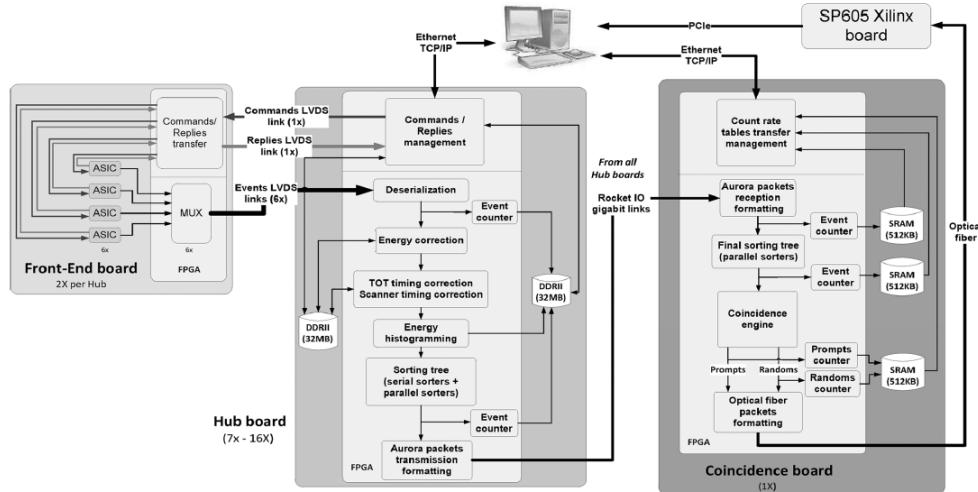


Figura 2.1: Diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos para LabPET II [1]

## 2.2. PET 4D

Otro sistema de referencia es el DAQ para un detector PET 4D [2], similar al LabPET II. Este dispositivo permite capturar gran cantidad de 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 últimas cuenta con 8 o hasta 32 canales para la adquisición de pulsos provenientes del detector, encargándose de capturar, procesar y enviar información a la placa madre.

Las señales son capturadas por ASICs (*Application Specific Integrated Circuits*), muestreadas por conversores análogo-digitales, procesadas por una FPGA y controladas por una FPGA principal (etiquetada como la placa madre). El procesamiento se encarga de calcular energía y datos temporales, mientras que el control final relaciona los eventos que hayan sido temporalmente coincidentes y calcula el tiempo de vuelvo de las partículas con apoyo de un conversor de tiempo a señal digital (TDC).

Este sistema destaca por su modularidad, la cual permite escalamiento. En contraste con LabPET II, se sustituye la serialización de datos con la presencia de varias placas adquisidoras de datos, procesando 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 físicas, requerimiento que no está presente en el sistema que se planea diseñar para este proyecto de titulación. La figura 2.2 ilustra la arquitectura de este sistema.

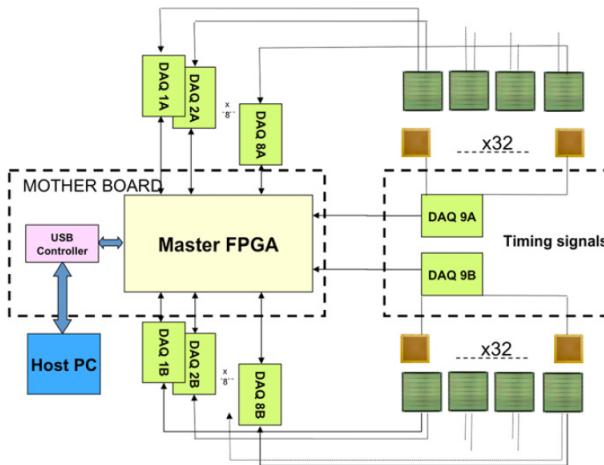


Figura 2.2: Diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos para Detector PET 4D [2]

## 2.3. ATLAS

Finalmente, la referencia más importante corresponde a la del experimento ATLAS, donde se utiliza la misma tecnología de detectores y la misma interfaz de adquisición (ASD) en una de sus etapas, como se mencionada en [3].

Este experimento intercepta grupos de partículas provenientes de haces de protones acelerados en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) en CERN. Estos grupos de partículas producen colisiones espaciadas en el tiempo en aproximadamente  $25\mu s$  entre si, cada una produciendo cerca de 23 interacciones con el detector, que junto a otros factores implica cerca de  $10^9$  eventos cada segundo [5]. La magnitud, tasa de aparición y nivel de energía de estos eventos son las principales razones de la complejidad tecnológica de este detector.

Este detector posee dos etapas previas de selección de eventos, donde la primera etapa involucra detectores de muones y calorímetros, mientras que la segunda involucra algoritmos distribuidos en varios computadores. La figura 2.3 ilustra la interfaz para la captura de los pulsos generados por muones en los detectores (TGC).

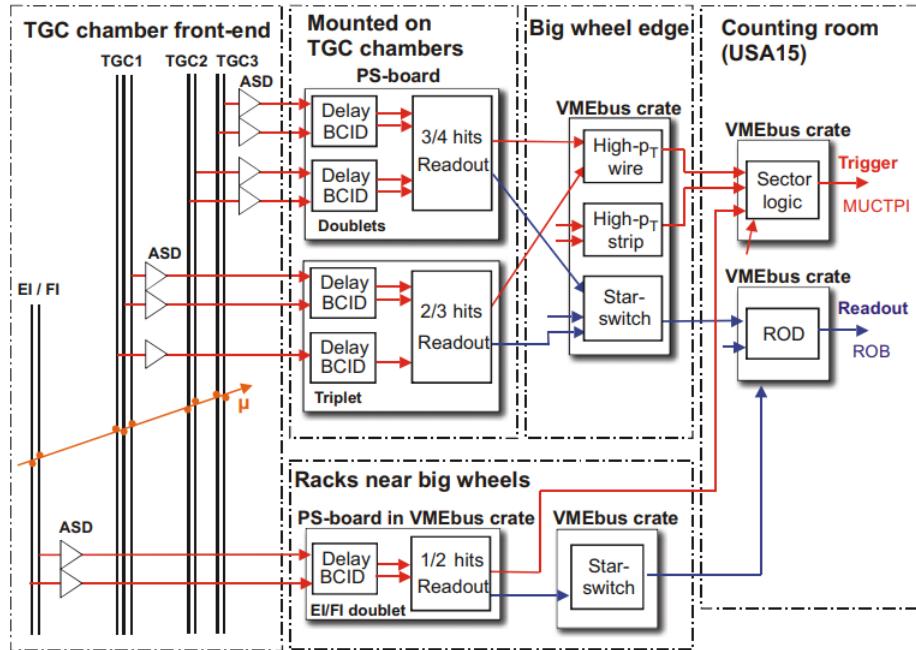


Figura 2.3: Diagrama de la interfaz de lectura para detectores de muones [3]. Los muones se representan con el símbolo  $\mu$ . Existen 3 capas de detectores, por lo tanto se observan 3 bloques que incluyen retardos, selección y captura de los pulsos.

Luego de generarse la primera señal de disparo, se da paso a la adquisición de datos en la tarjeta de lectura del detector (*Readout System*), enviando paralelamente información sobre regiones de interés a analizar, con el fin de llevar a cabo la segunda etapa de selección de eventos mediante el disparo de alto nivel (*High-Level Trigger*). Esta segunda señal de disparo utiliza software distribuido en cerca de 2000 computadores conectados a una red Ethernet y filtra eventos en función a muestras de datos pertenecientes a las regiones de interés calculadas por la etapa de disparo anterior, como se describe en [4]. Finalmente, los eventos seleccionados son trasferidos y almacenados en los bancos de datos del centro de investigación. La figura 2.4 ilustra las etapas mencionadas.

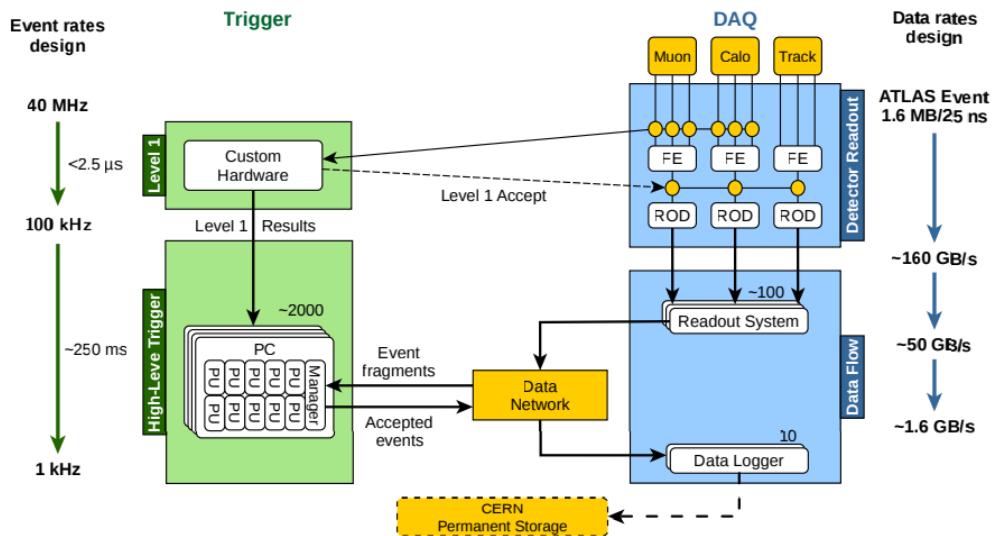


Figura 2.4: Diagrama del sistema de disparo y adquisición de datos en el experimento ATLAS. [4]

Entrando en detalle, según se indica en [5], el verdadero sistema de adquisición de datos para este experimento es el software distribuido en red, capaz de discriminar, procesar y transferir los eventos seleccionados a los bancos de datos. El sistema lectura (*Readout System*) en conjunto con el disparo de primer nivel solo serían un equivalente a una interfaz de captura muy sofisticada, más que las observadas en otros detectores, pero para el caso de esta memoria de titulación es comparable al sistema de adquisición que se desea diseñar.

El sistema de lectura consiste en una tarjeta llamada ROBIN, compuesta de buffers, chips de comunicación, memoria flash, procesador y una FPGA, como se ilustra en la figura 2.5

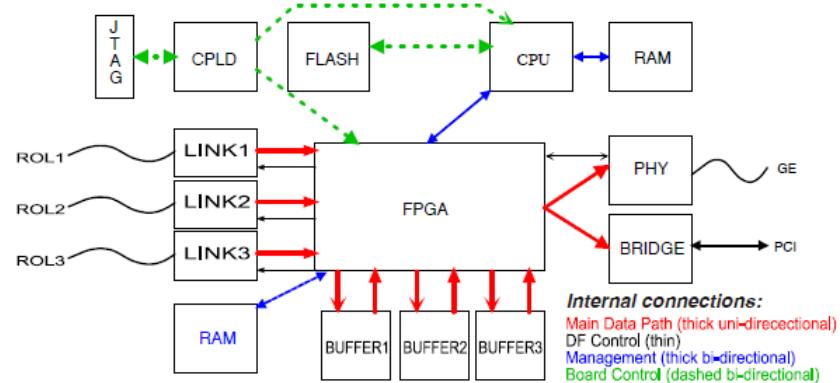


Figura 2.5: Diagrama de la tarjeta de lectura ROBIN en ATLAS [5].

La lógica descrita al interior de dicha FPGA se ilustra en la figura 2.6. Se observa que su 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.

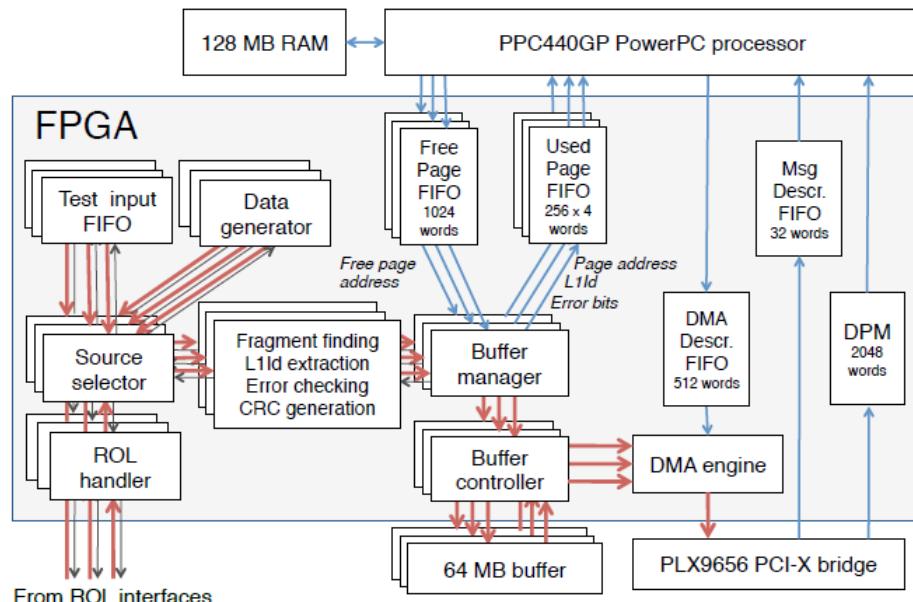


Figura 2.6: Diagrama de bloques de la FPGA en ROBIN [5].

Si bien este detector es comparativamente más complejo que los anteriores, presenta elementos comunes en su composición, sobretodo en la utilización de ASICs y FPGA para captura y control de los datos adquiridos. Se asemeja funcionalmente al PET 4D, en el sentido de implementar múltiples instancias de hardware equivalente, para así lograr manejar mayores cantidades de datos, brindando también mayor control e independencia en cada uno de ellos. El fuerte de este detector radica en su conectividad en red y sistemas distribuidos, necesarios para la gran cantidad de datos simultáneos que deben ser procesados.

## Capítulo 3

---

# SISTEMA DE DETECCIÓN

### 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, en CERN. La sigla significa "small Thin Gap Chamber", y forman parte de un espectrómetro de muones para conocer momento y trayectoria de estas partículas. Esta información permite la reconstrucción de eventos asociados a colisiones de partículas. La figura 3.1 ilustra la ubicación de los detectores de muones dentro del espectrómetro de ATLAS, en el costado superior derecho. La figura 3.2 corresponde a una fotografía de los detectores TGC involucrados en este espectrómetro.

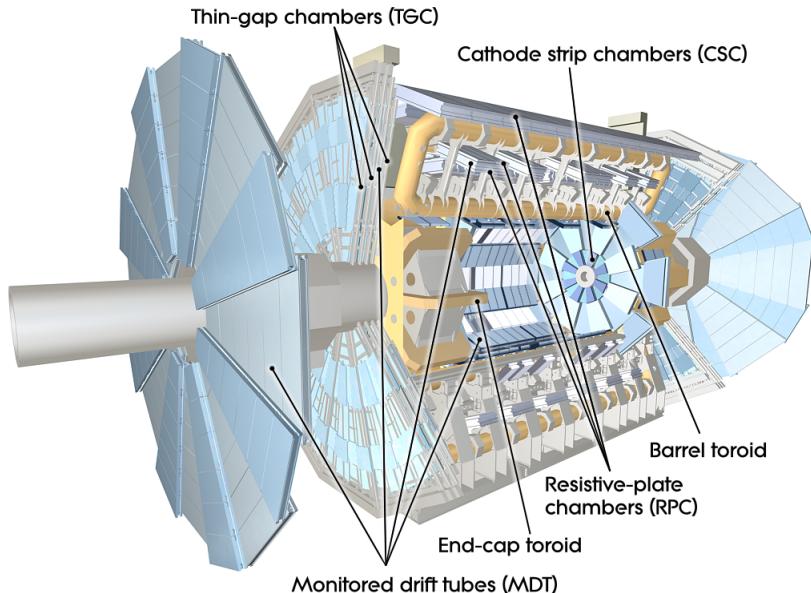


Figura 3.1: Diagrama del espectrómetro de muones en el experimento ATLAS [10].

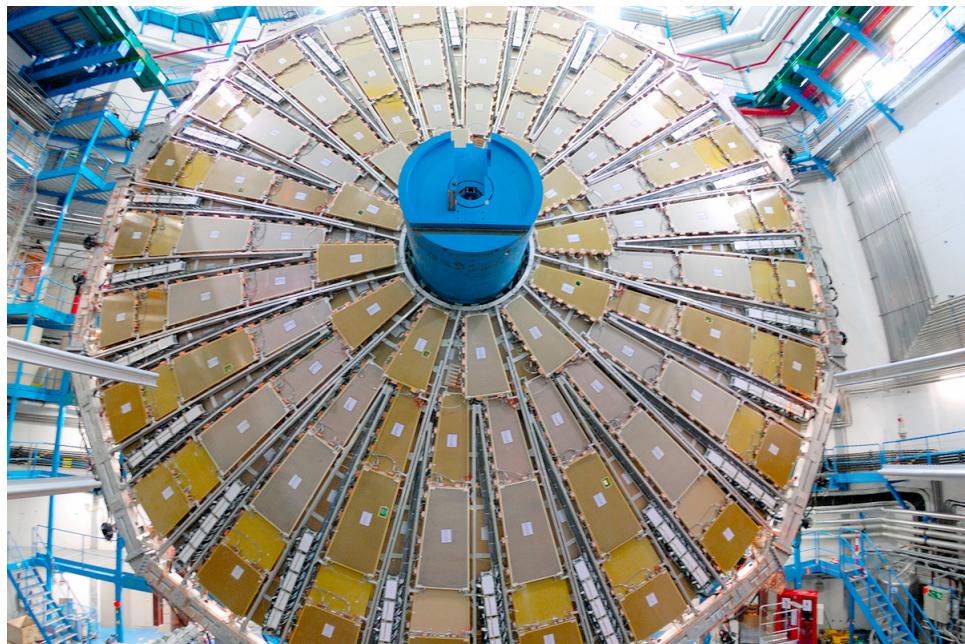


Figura 3.2: Fotografía de los detectores sTGC en el especlrómetro de muones del experimento ATLAS [11]. El diámetro de este dispositivo es cercano a 24 metros.

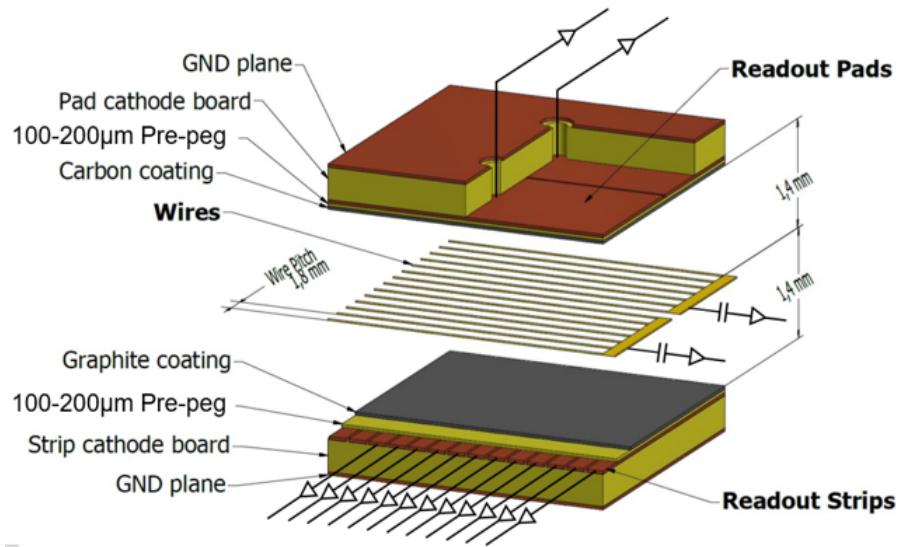


Figura 3.3: Estructura interna de un detector TGC [12].

## 3.2. Estructura

Un TGC está compuesto por dos planos de grafito (cátodos), con múltiples cables en medio (ánodos), como se observa en la figura 3.3. Recubriendo el exterior de ambos cátodos se ubican capas aislantes que los separan de zonas conductoras. Estas son llamadas “*pads*” en la cara superior y “*strips*” en la cara inferior del detector. Los cables 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. La figura 3.4 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 a la vez diferencias de potencial en los cátodos. Estos últimos interactúan con los *pads* y *strips* en el exterior del detector, en los cuales aparecen pulsos de corriente con polaridad inversa respecto a los cables.

La amplitud de los pulsos generados en el detector será mayor en torno a la zona del evento ionizante y menor en zonas lejos de ella. Esto permite relacionar la posición y energía de la partícula con las amplitudes de los pulsos en cada *strip* o cable.

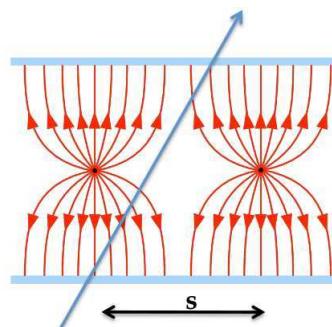


Figura 3.4: Líneas de campo eléctrico observadas en un corte transversal de los cables y cátodos del detector. Los cátodos se ilustran en celeste, los cables se representan en negro, y las líneas de campo corresponden a las flechas de color rojo [13].

### 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. 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.

Para agregar un eje 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*. La figura 3.5 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 3.6. La figura 3.7 indica las etiquetas asociadas para cada canal del detector, desde su vista superior concordante con la figura 3.6.

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.

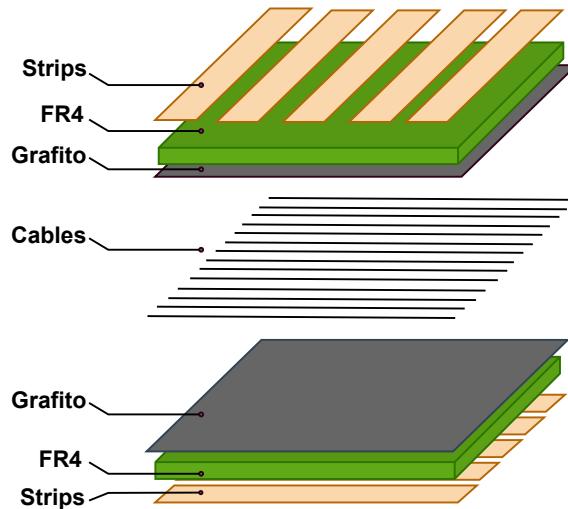


Figura 3.5: Estructura interna de un detector sTGC adaptado para este proyecto de titulación. El gas es contenido entre ambas capas de grafito (cátodos). Los cables internos corresponden a los ánodos.



Figura 3.6: Vista superior del detector. Arriba se observan tubos para el flujo de gas. Abajo se ubican 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.

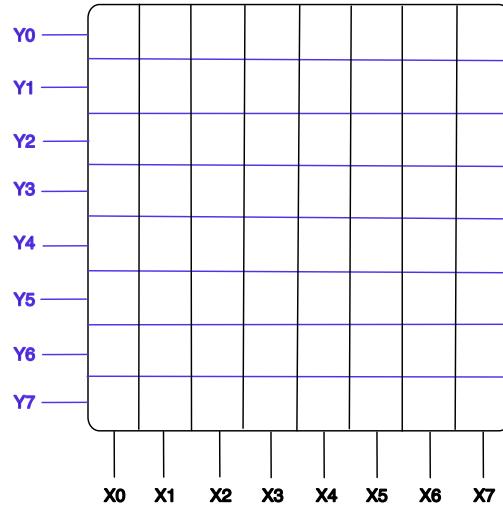


Figura 3.7: Vista superior del detector, en donde se indican las etiquetas asociadas a cada canal en función del eje al que pertenece. Cada cuadro representa un área de detección de  $1\text{cm}^2$ .

## 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.

### 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 (*Amplifier, Shaper, Discriminator*), 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<sup>2</sup>, el detector se encontrará completamente infiltrado con gas en 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, fugas de corriente y pasos de otras partículas cargadas. 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. Observación de eventos provenientes de fuentes radioactivas**

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.

### **3.4.5. Observación de eventos provenientes de rayos cósmicos**

Una última prueba a realizar corresponde a la observación de eventos provenientes de muones cósmicos. Esto puede llevarse a cabo utilizando detectores con material centelleante, fibras colectoras de luz y fotocontadores en su interior. Si bien estos dispositivos pueden detectar de manera confiable el paso de muones, no son capaces de dar una buena resolución espacial.

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.

Estos experimentos de observación permiten conocer amplitudes medias de muones esperados, su distribución y la frecuencia de cruce. Con esta información es posible corroborar e interpretar futuras mediciones.

### **3.5. Interfaz de Lectura**

## Capítulo 4

---

# SISTEMA DE ADQUISICIÓN

Descripción de la etapa de adquisición, sus partes, su relación con la etapa anterior, contenidos del capítulo.

### 4.1. Arquitectura propuesta

En el capítulo anterior, se compararon tres sistemas diferentes para la implementación de adquisición de datos para física de partículas. En ellos destacan aspectos comunes de implementación: etapas de detección de eventos, memorias para almacenamiento temporal, procesamiento de los datos y la utilización de FPGA como herramienta principal para la implementación del hardware.

¿Cuáles son las etapas esenciales que un DAQ debe poseer? En esencia se requiere de una primera etapa de interfaz de lectura directamente de los detectores (*Readout*), las cuales suelen poseer amplificadores, modeladores de pulsos, memorias y digitalizadores. Una segunda etapa suele consistir en el preprocesamiento de las señales, extrayendo la información básica y formando estructuras de datos pertinentes. Finalmente, está la etapa de procesamiento fuera del detector, donde se realiza el análisis e interpretación de los datos.

En este proyecto de titulación, la primera etapa la lleva a cabo la tarjeta acondicionadora ASD (Amplifier Shaper Discriminator), diseñada para detectores del proyecto ATLAS. Las etapas restantes serán diseñadas pensando en la aplicación específica de este proyecto.

#### 4.1.1. Esquema General

Como se indica en la figura 4.1, se requieren al menos tres etapas esenciales: discriminar, procesar y analizar. Discriminar se refiere a distinguir entre aquellos eventos que corresponden a un muón de aquellos que no, descartando estos últimos. Procesar implica utilizar los pulsos escogidos, formar una estructura que los relacione como un solo evento y posiblemente incluir información de ellos, como una marca

temporal y la duración de los pulsos captados en dicho evento.

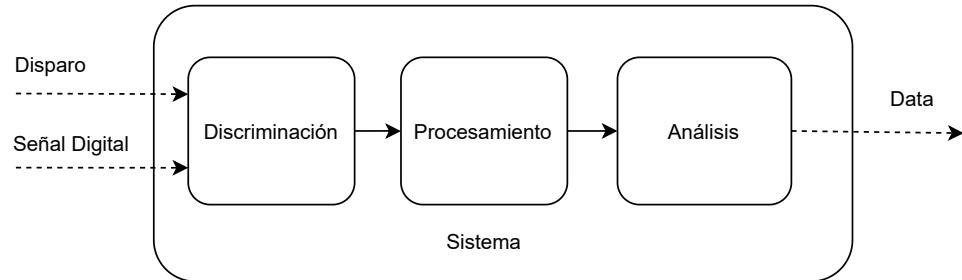


Figura 4.1: El disparo corresponde a la señal digital que indica si la partícula detectada es un muon, mientras que la señal digital corresponde al pulso captado por el detector, luego de haber pasado por la interfaz de lectura.

La etapa de análisis implica mayor complejidad y puede extenderse para abarcar distintos niveles. El análisis más básico implica leer un evento e inferir la región del detector que fue excitada por el paso del muon. Niveles siguientes implicarían estimar la energía del muon, incluir mayor precisión espacial, correlacionar con eventos anteriores o incluso trazar la trayectoria del paso de la partícula al superponer los datos de eventos originados en otros detectores.

#### 4.1.2. Requisitos

- Se debe contar con al menos 32 pares de entradas bajo el estándar LVDS, con el fin de conectar al menos 2 tarjetas ASD (Amplifier Shaper Discriminator) utilizadas cada una como la interfaz de detectores de 16 canales.
- Es importante contar con un reloj presente o sintetizable de una frecuencia mayor a 100[MHz], lo más cercano a 1[GHz] posible, 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 100[ns] respecto al paso real de los muones por el detector, siendo necesaria la implementación de delays para las señales capturadas o un sistema capaz de distinguir la ocurrencia de eventos y disparos en el tiempo.
- Se debe tener la capacidad de mantener señales sincronizadas, guardar información en memorias temporales y llevar cuenta del transcurso del tiempo entre eventos.
- Es requisito que la implementación de la alternativa permita escalamiento para agregar nuevos detectores adyacentes con el fin de aumentar el área de prueba, así como también sincronizarse con detectores paralelos para trazar trayectorias de las partículas captadas.

En cuanto a los requisitos de tiempo y reloj de operación anteriormente indicados, estos se deben esencialmente a que la duración de un pulso digital proveniente de un detector podría estar entre 1[ns] y 40[ns] [9]. 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.

Respecto a la tasa de aparición de pulsos consecutivos, es poco probable que ocurran eventos simultáneos o cercanos. Se espera que la tasa de muones por centímetro cuadrado sea de un muón por minuto, lo que en los  $15[cm^2]$  representados por una señal de detector implicaría cerca de 15 muones por minuto o  $2,5 \times 10^{10}$  muones cada 100 [ns], lo que se traduce a una muy baja probabilidad de eventos simultáneos o incluso cercanos. De hecho, la tasa de detección de muones puede disminuir estando bajo tierra y se planea que la toma de una muongrafiá conlleve un tiempo prolongado de exposición a rayos cósmicos. Esto conduce a la conclusión de que ignorar posibles eventos simultáneos o adyacentes no tendrá implicancias significativas en los resultados de la muongrafiá final.

#### 4.1.3. Propuesta

La alternativa más utilizada en el rubro es la FPGA. Esta ha sido la herramienta que se ha visto con mayor frecuencia en proyectos relativos a física de partículas y adquisición de datos. Las FPGA cuentan con una cantidad significativa de recursos y periféricos. Incluyen además hardware dedicado para comunicación, serialización y almacenamiento de datos. Incluso suelen incluir CPLDs en las placas que las albergan. Una desventaja conocida corresponde a que se basan en memorias volátiles, por lo que el hardware descrito se debe reconfigurar cada vez que se enciende, y los datos importantes deben ser almacenados en memorias externas.

Para esta alternativa se propone el uso de la tarjeta de desarrollo Trenz TR0712 [7] montada en una placa TR0703 [6]. Esta tarjeta en su conjunto se basa en una FPGA Xilinx Artix 7 [8] de cerca de 16.000 celdas lógicas, incluyendo además chips de memoria RAM, reloj de 20[MHz] con hasta 600[MHz] sintetizables, comunicación Ethernet y por supuesto puertos LVDS suficientes para conectar al menos 2 detectores.

Si bien esta tarjeta cuenta con puertos LVDS, será necesario confeccionar un adaptador para conectar las señales del detector hacia la placa Trenz.

La frecuencia de reloj que puede alcanzar esta tarjeta es mucho mayor que cualquiera de las anteriores, siendo entonces la que permite tener mayor precisión en términos de tiempo, sobretodo para determinar la duración de los pulsos provenientes del detector.

La idea en esta alternativa de solución es guardar los datos en memoria temporal hasta la llegada de una señal de disparo. Un módulo que maneja la memoria será el encargado de tomar los pulsos correspondientes al disparo recibido y liberar la memoria de aquellos datos ya leídos u obsoletos, entregando la información útil a una siguiente etapa. Los pulsos aceptados serán entonces relacionados como parte de un mismo eventos y se estimará la duración de estos, generando y guardando así un arreglo de datos con identificador de pulso y duración. La última etapa se encargará de efectuar una operación capaz de determinar la posición del evento a partir de las duraciones medidas y los pulsos detectados, comunicando así un arreglo básico y preprocesado que incluya posición y magnitud aproximada.

Se espera que para lograr el escalamiento se incluya una señal para mantener la lectura de eventos sincronizada entre distintas FPGA. Además, se deberá incluir un modulo de comunicación para entregar la información captada a una etapa posterior con un análisis más detallado, encargado de reunir todos los eventos de diferentes FPGAs.

Las figuras 4.2 4.3 ilustran conexiones y bloques a implementar en esta alternativa de solución.

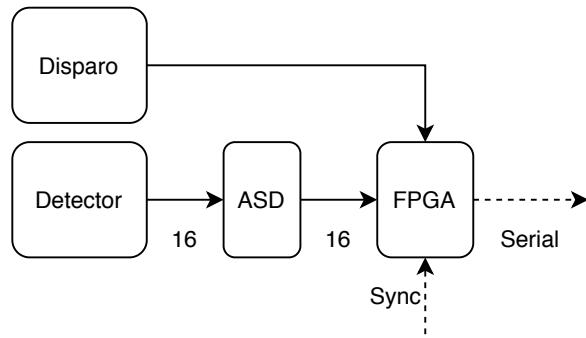


Figura 4.2: Diagrama de bloques utilizando una FPGA como alternativa de solución. Se indica una salida serial para transmitir los resultados del análisis básico a algún procesador o memoria de alguna etapa posterior. La señal de sincronización, inspirada en la alternativa ?? tiene como objetivo sincronizar la recolección y procesamiento de eventos, para que estos sean consistentes entre detectores.

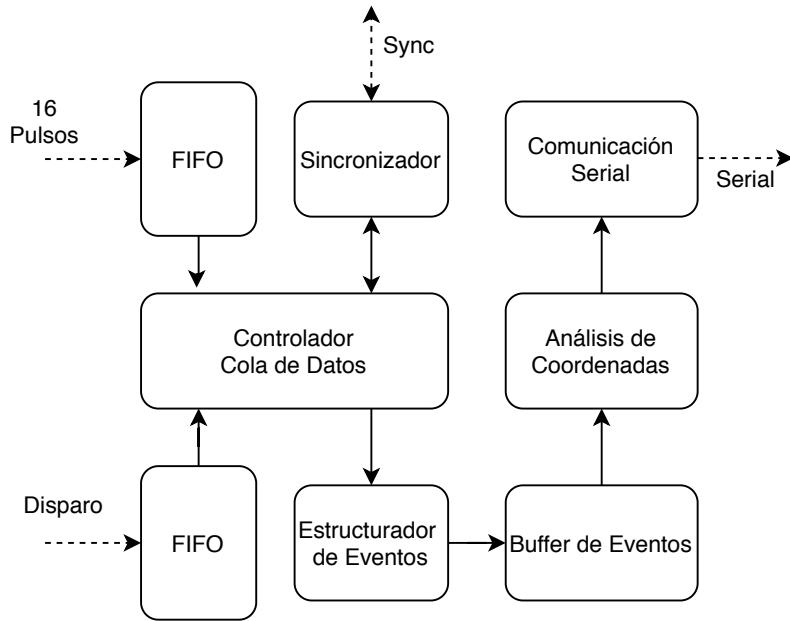


Figura 4.3: Representación de la lógica interna de la FPGA. Se agrega una cola de datos para las señales de disparo y una memoria de almacenamiento temporal para los eventos ya estructurados. Ambas implementaciones permiten tener mejor control del flujo de datos, evitando perdidas y asegurando sincronía a pesar de que la lectura de la información sea eventualmente más lenta que la captura de pulsos. Los bloques controlador, estructurador y análisis cumplen las mismas funciones mencionadas en alternativas anteriores: aceptar o descartar pulsos, cuantificar anchos de pulso a los canales asociados y determinar coordenada del cruce de un muón respectivamente.

### Atributos

- **Simplicidad:** 6 - *Media*. Gran cantidad del sistema concentrado en una sola placa, pero aumenta la dificultad en la descripción de hardware.
- **Desempeño:** 9 - *Alto*. Gran cantidad de recursos lógicos, de almacenamiento y con alta frecuencia de operación (600MHz máximo).
- **Disponibilidad:** 9 - *Alta*. Se cuenta con una en el laboratorio, pero se necesitarán un par de elementos para interconectarla con la placa ASD.
- **Economía:** 6 - *Media*. Una tarjeta de desarrollo de este estilo tiene un costo de aproximadamente US\$400.
- **Flexibilidad:** 10 - *Alta*. Alta flexibilidad en análisis, procesamiento y adquisición.
- **Documentación:** 8 - *Alta* Existe gran cantidad de documentación del fabricante. Además, cuenta con una FPGA Artix 7 ampliamente conocida.

### Ventajas

- Gran cantidad del sistema concentrado en una sola placa.
- Escalable
- Cuenta con puertos LVDS
- Alta densidad de recursos lógicos
- Dispone de memoria suficiente para almacenar eventos
- Posee una alta frecuencia de reloj sintetizable, mejorando precisión temporal.
- Placa con muy buena documentación.

### Desventajas

- Se requiere confeccionar un adaptador para conectar el detector con la tarjeta de desarrollo.
- Se complica el diseño y la implementación del hardware.

Esta alternativa fue seleccionada por sobre las demás debido a su destacado desempeño, ya que cuenta con mayor frecuencia de reloj disponible, gran cantidad

de recursos y suficientes puertos LVDS. Este último requerimiento es necesario para recibir los pulsos digitales capturados por la interfaz ASD [9] provenientes del detector, los cuales se emiten bajo el estándar LVDS para transmisión de señales diferenciales.

Destaca también esta alternativa al ser una plataforma flexible, en 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.

Por último, destaca por la información disponible que existe para operarla. Esta FPGA es ampliamente conocida y además está incluida en un módulo Trenz TR0712 [7] montada en una tarjeta Trenz TR0703 [6] que da acceso a la mayoría de sus puertos y recursos. Ambos elementos cuentan con buena documentación, incluyendo diagramas de conexiones detallados, los cuales facilitarán la descripción del hardware y la interconexión con el detector de muones.

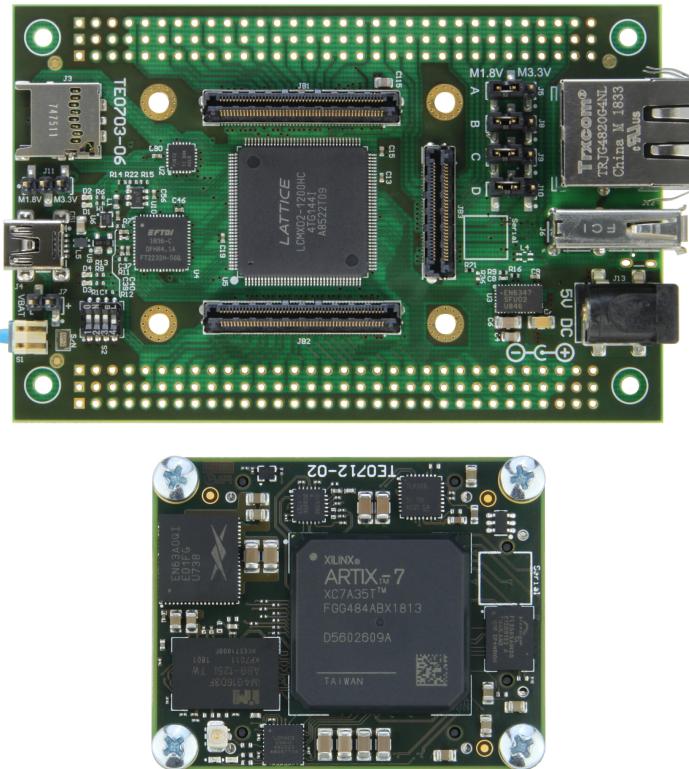


Figura 4.4: Placa de desarrollo y módulo FPGA a utilizar. A la izquierda se ilustra la placa de desarrollo Trenz TR0703 [6] y a su derecha se ilustra el módulo que va montado en ella: Trenz TR0712 [7] que contiene una FPGA Artix 7 [8].

Para esta alternativa de solución se consideran 32 canales de entrada LVDS ya que en el futuro será necesario conectar al menos 2 detectores de 16 canales en una misma FPGA. Para este proyecto en particular se probará el sistema con un solo detector de muones, por lo que la prueba e integración de un segundo detector queda pendiente y no se implementará en esta etapa. La figura 4.5 ilustra los canales que posee un solo detector de muones de  $15cm^2$ .

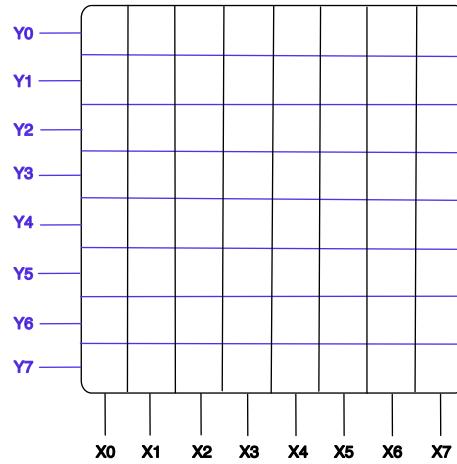


Figura 4.5: Esquema de los canales provenientes de un detector Mini sTGC. Posee 8 tiras adyacentes de  $15cm$  de largo por  $1cm$  de ancho para cada eje coordenado. Cada tira emitirá un pulso analógico si una partícula cargada pasa través de ella. Se emitirán también pulsos de menor amplitud para el caso en que la partícula pase por una tira adyacente del mismo eje coordenado dentro de un radio específico. Este detector se posiciona perpendicularmente respecto a la fuente de radiación y en paralelo a (por debajo o por sobre) el sistema de disparo que indicará si la partícula captada corresponde o no a un muón.

Las señales generadas por un detector son adaptadas por una tarjeta de interfaz ASD [9], ilustrada en la figura 4.6. Esta tarjeta es capaz de capturar 16 señales simultáneas, por lo que es hardware suficiente para captar las señales de ambos ejes de un solo detector de muones.

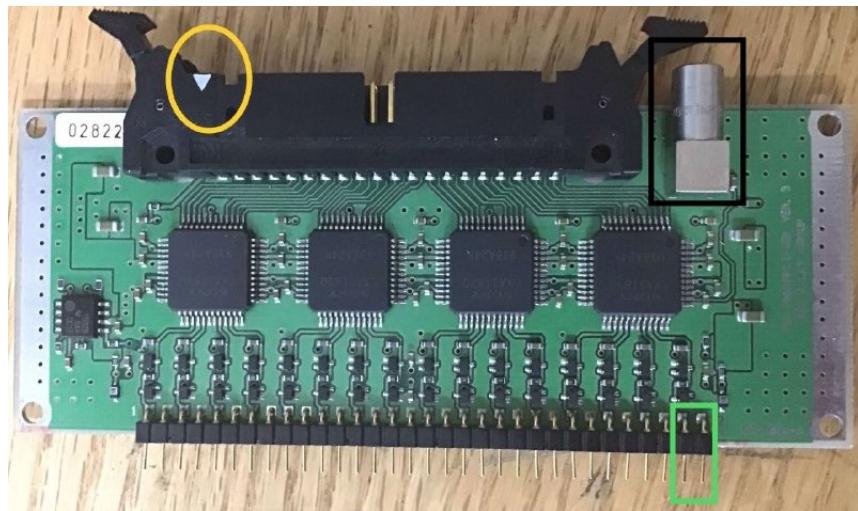


Figura 4.6: Placa ASD [9] (Amplificador Shaper Discriminador), encargada de captar los 16 pulsos provenientes de un detector y entregar pulsos digitales asociados a ellos en su salida. El detector se conecta en sus entradas DIP ubicadas en su extremo inferior, mientras que las señales LVDS de salida se ubican en el conector de 40 puertos para cable plano en su extremo superior.

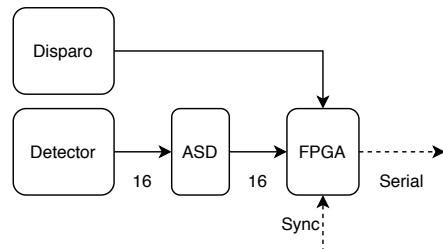


Figura 4.7: Diagrama de bloques utilizando una FPGA como alternativa de solución. Se indica una salida serial para transmitir los resultados del análisis básico a algún procesador o memoria de alguna etapa posterior. La señal de sincronización “Sync” tiene como objetivo sincronizar la recolección y procesamiento de eventos, para que estos sean consistentes entre detectores.

La idea en esta alternativa de solución es guardar los pulsos provenientes de la placa ASD en memoria temporal hasta la llegada de una señal de disparo. Un módulo que maneja la memoria será el encargado de tomar los pulsos correspondientes al disparo recibido y liberar la memoria de aquellos datos ya leídos u obsoletos, entregando la información útil a una siguiente etapa. Los pulsos aceptados serán entonces

relacionados como parte de un mismo eventos y se estimará la duración de estos, generando y guardando así un arreglo de datos con identificador de pulso y duración. La última etapa se encargará de efectuar una operación capaz de determinar la posición del evento a partir de las duraciones medidas y los pulsos detectados, comunicando así un arreglo básico y preprocesado que incluya posición espacial y magnitud aproximada.

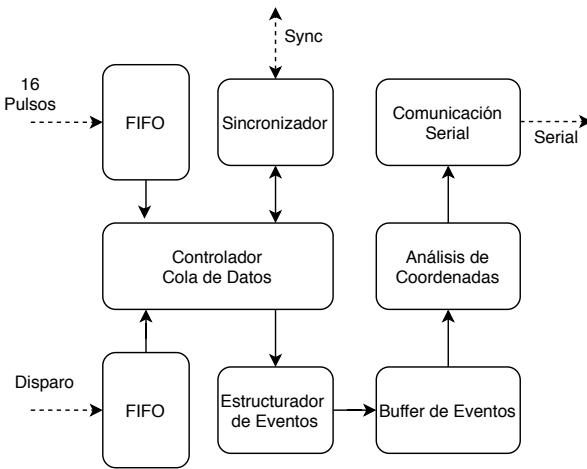


Figura 4.8: Representación de la lógica interna de la FPGA. Se incluye una cola de datos para las señales de disparo, para los pulsos digitales provenientes de la ASD y una memoria de almacenamiento temporal para los eventos ya estructurados. Los bloques controlador, estructurador y análisis cumplen las funciones de aceptar o descartar pulsos, cuantificar anchos de pulso a los canales asociados y determinar coordenada del cruce de un muon respectivamente.

Se espera que para lograr el escalamiento se incluya una señal para mantener la lectura de eventos sincronizada entre distintas FPGA. Además, se deberá incluir un modulo de comunicación para entregar la información captada a una etapa posterior con un análisis más detallado, encargado de reunir todos los eventos de diferentes FPGAs.

## 4.2. Muestreo de Señales y Discriminación de Eventos

La etapa de muestreo y discriminación es la encargada de recibir las señales digitales generadas por la interfaz ASD. Esta etapa muestrea la señal entrante a una frecuencia de 500MHz y asocia las muestras entrantes a las señales de disparo correspondientes.

Para capturar las señales en formato LVDS, se utilizan puertos IBUFDS. Estos puertos deben configurarse para recibir señales LVDS de 2.5V y activar la resistencia interna de terminación para el estándar diferencial. Luego de ser capturadas, las señales se sincronizan con el reloj del circuito, haciéndolas pasar por dos flipflops.

Para el muestreo de señales, se utiliza 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.

El shift-register funciona como buffer y retardo para la señal digital muestreada. Dada la frecuencia de muestreo, cada bit representa 2ns 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 10 y 63 aproximadamente. Esta configuración permite una ventana de 20ns antes de la señal de trigger y aproximadamente 30ns de ventana posterior a la señal muestreada en el caso de más larga duración posible (70ns).

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.

#### 4.2.1. Objetivos

- Muestrear a máxima frecuencia los pulsos digitales.
- Mantener en memoria los pulsos muestreados mientras llega la señal de disparo.
- Pasar una grupo de datos a la etapa siguiente al momento de detectar la señal de disparo.

#### 4.2.2. Diagrama de Bloques



Figura 4.9: caption

#### 4.2.3. Decisiones de Diseño

Se utiliza un shift-register debido a su simplicidad y capacidad de operar a altas frecuencias de reloj. Permite el almacenamiento natural por orden de llegada de cada

bit digital de la señal y es posible entregar la totalidad de los datos contenidos en este shift-register a la etapa siguiente.

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.

La frecuencia de muestreo de 500MHz se escogió por ser la frecuencia más alta sintetizable en el diseño, y por permitir una resolución de tiempo suficiente para distinguir el ancho de los pulsos digitales.

### 4.3. Buffer de Eventos

El buffer de eventos consiste en almacenar provisoriamente los eventos entrantes, hasta que la etapa siguiente solicite la entrega de los eventos capturados. Los eventos son almacenados en una memoria FIFO.

Esta etapa funciona a 125MHz, dado que la memoria FIFO no es capaz de funcionar a altas frecuencias de reloj.

Una vez que es detectada la señal de disparo, se procede a leer los datos de la etapa anterior. Estos se realiza entregando la última fila de la estructura de datos a la entrada de la memoria FIFO. Una vez que es almacenada en memoria, se desplazan los datos de la estructura y se repite el ciclo. Así, en la memoria FIFO cada dato corresponde a un canal consecutivo de 64 bits, donde 16 datos consecutivos corresponden a un mismo evento.

Los eventos son entregados a la etapa siguiente a la llegada del comando correspondiente, entregando la información de cada canal en 2 paquetes de 32bits cada uno. Este formato de entrega facilita la comunicación entre la lógica programable y el procesador.

#### 4.3.1. Objetivos

- Almacenar eventos entrantes
- Entregar eventos solicitados a la etapa de comunicación

#### 4.3.2. Diagrama de Bloques

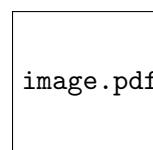


Figura 4.10: caption

### 4.3.3. Decisiones de Diseño

Se escogió una memoria FIFO por adecuarse bien a la naturaleza de los datos. El orden de los eventos es importante y son leídos por orden de llegada. Esta lógica es bien representada por una memoria FIFO. Además, esta memoria permite el almacenamiento de suficientes eventos y sus respectivos canales.

Al guardar un evento, se almacenan sus 16 canales en la memoria FIFO. Estos 16 canales serán consecutivos a los 16 canales del evento anterior. La correcta lectura de datos en grupos de 16 es realizada mediante las máquinas de estados. 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 de una FIFO.

Al momento de leer los datos almacenados en la memoria, se toma cada elemento de 64bits y se divide en 2 partes de 32 bits. Esto facilita la entrega de datos desde la lógica programable hacia el procesador. Esta entrega se hace mediante el GPIO del procesador, con un puerto de 32bits. El GPIO cuenta con puertos limitados, es por eso que no se utiliza simplemente un puerto de 64Bits. Los datos se entregan desde la PL al PS, debido a que el módulo de comunicación UART se encuentra en el procesador.

## 4.4. Comunicación

La etapa de comunicación se encarga de entregar los eventos y sus respectivos canales hacia el mundo exterior.

La comunicación se lleva a cabo mediante la UART en el procesador de la sync, a 115200 baudios. Recibe comandos en formato ASCII y entrega los datos en números enteros sin signo de 32bits. Se envía un evento completo con sus canales consecutivos.

Para comunicar la lógica programable con el procesador se utiliza la GPIO del procesador, destinando 32 bits para datos de entrada y 8 bits para datos de salida. Los datos de entrada serán los bits del evento, mientras que los datos de salida corresponden a los comandos de operación para solicitar el envío de la información.

Dado que los datos de cada canal tienen 64bits de largo, estos son seccionados en dos partes de 32bits. Esto permite enviar la información través del GPIO, tomando dos ciclos de reloj por cada canal a enviar.

### 4.4.1. Objetivos

- Entregar la información capturada a otro dispositivo mediante comunicación serial

#### 4.4.2. Diagrama de Bloques

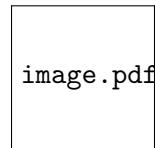


Figura 4.11: caption

#### 4.4.3. Decisiones de Diseño

El baudrate escogido es de 115200 baudios, ya que es el más alto configurable. Esto permite agilizar la comunicación,

Los comandos consisten en letras en formato ASCII. Una letra se compone de 8 bits, lo que justifica la elección del puerto de comunicación de comandos en el GPIO.

El formato en el que se envian los datos corresponde a números enteros de 32bits sin signo, tipo de dato que facilita la interpretación de los bits contenidos en el dato. Esta información será analizada posteriormente por el computador que reciba los datos.

## Capítulo 5

---

# SIMULACIONES

## Capítulo 6

---

# PRUEBAS

## Capítulo 7

---

# CONCLUSIONES

Resultados, alcances, trabajo futuro.

## 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] H. Spieler, “Electronics and data acquisition,” pp. 197–222, 2 2012.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Trenz Electronic, “TR0703 TRM - Trenz Electronic Wiki,” 2019. [Online]. Available: <https://wiki.trenz-electronic.de/display/PD/TE0703+TRM>
- [7] ——, “TR07012 TRM - Trenz Electronic Wiki,” 2019. [Online]. Available: <https://wiki.trenz-electronic.de/display/PD/TE0712+TRM>

- [8] Xilinx and Inc, “7 Series FPGAs Data Sheet: Overview (DS180),” Tech. Rep., 2010. [Online]. Available: [www.xilinx.com](http://www.xilinx.com)
- [9] “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>
- [10] Diehl E, “ATLAS Muon Detector Commissioning,” 2009. [Online]. Available: <http://cds.cern.ch/record/1213055/plots>
- [11] ATLAS Experiment, “Muon Spectrometer,” 2020. [Online]. Available: <http://cds.cern.ch/record/1213055/plots>
- [12] 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 Characteristics and Performances of small-strip, Thin Gap Chambers for the ATLAS New Small Wheel 4 Muon Detector Upgrade,” Tech. Rep., 2014.
- [13] 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>
- [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.