

**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	II
ÍNDICE DE TABLAS	III
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto general	1
1.2. Motivación	3
1.3. Planteamiento del Problema	5
1.4. Alcances y contribuciones	7
1.5. Organización del documento.	8
<b>2. ESTADO DEL ARTE</b>	<b>9</b>
<b>3. SISTEMA DE DETECCIÓN</b>	<b>10</b>
3.1. Detector de Partículas	10
3.2. Interfaz de Lectura	10
<b>4. SISTEMA DE ADQUISICIÓN</b>	<b>11</b>
<b>5. SIMULACIONES</b>	<b>12</b>
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>13</b>
<b>A. CONTROL DE VERSIONES DE PROYECTOS VIVADO CON GIT</b>	<b>14</b>
<b>B. CONEXIÓN DE SEÑALES LVDS EN UNA FPGA ARTIX 7</b>	<b>15</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>16</b>

---

---

# ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Representación artística de rayos cósmicos y lluvia de partículas subatómicas sobre la corteza terrestre.	3
1.2. Diagrama del experimento ATLAS. CCTVal colabora en la actualización de la zona indicada como "New small Wheel", que contiene detectores sTGC.	4
1.3. Fotografía correspondiente al montaje de detectores sTGC en la New Small Wheel del proyecto ATLAS.	5
1.4. Fotografía de la fabricación de detectores sTGC en laboratorios de CCTVal. Cada una de placas observadas en la imagen corresponde a capas constitutivas de un detector.	6
1.5. Diagrama del sistema de muongrafía 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.	7

---

# ÍNDICE DE TABLAS

# 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 Centro Científico Tecnológico de Valparaíso (CCTVal) 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 <sup>1</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 incluye también la organización de este informe.

### 1.1. Contexto general

El planeta tierra es constantemente bombardeado por rayos cósmicos provenientes del espacio exterior. Estos <sup>2</sup> rayos corresponden principalmente a partículas cargadas, como por ejemplo protones y núcleos atómicos. Su <sup>3</sup> origen es variado, y aunque la fuente de algunos 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>4</sup>.

---

<sup>1</sup>Gonzalo's comment: El trabajo principal fue solo diseño en HDL? Verificar.

<sup>2</sup>Gonzalo's comment: dangling modifier

<sup>3</sup>Gonzalo's comment: dangling modifier

<sup>4</sup>Gonzalo's comment: Trata de dar referencias para todos los datos que pones como verdad absoluta y que son relevantes.

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 un efecto en cadena y produciendo así una lluvia de partículas subatómicas sobre la corteza terrestre. 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 <sup>5</sup>. 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  $2\mu s$  de vida media <sup>6</sup>, 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 muonografía o tomografía muónica <sup>7</sup>. <sup>8</sup>

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.

---

<sup>5</sup>Gonzalo's comment: electrones no lleva tilde

<sup>6</sup>Gonzalo's comment: medido de cuando hasta cuando? Desde su origen? Desde que ingresan a la tierra?

<sup>7</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 (minería, topografía, 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 que tiene este tipo de tecnologia en entornos productivos es lo interesante desde el punto de vista de ingeniería.

<sup>8</sup>Gonzalo's comment: en que areas es relevante esto? Da ejemplos.



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)<sup>9</sup> 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 [?]. 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) del CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire), el centro<sup>10</sup> cuenta con las herramientas y conocimientos necesarios para la fabricación de detectores de muones. Esta colaboración, de la cual Chile es uno de los pocos países participantes<sup>11</sup>, consiste en la actualización de un sector del ex-

<sup>9</sup>Gonzalo’s comment: ya introdujiste este acronimo.

<sup>10</sup>Gonzalo’s comment: cual centro?

<sup>11</sup>Gonzalo’s comment: efectivamente son pocos paises? Quizas sea mejor destacar el rol local de



perimento ATLAS, llamado Small Wheel. La figura <sup>12</sup> 1.2 ilustra el diagrama del experimento, indicandose la Small Wheel en el sector central del instrumento. La figura 1.3 corresponde a una fotografía del proceso de montaje de la Small Wheel. Los trapezoides <sup>13</sup> que se observan en dicha imagen corresponden a los detectores sTGC, donde los tercios superiores de cada trapezoide 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”.

Actualmente, el centro <sup>14</sup> 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 es <sup>15</sup> valiosa para este y futuros proyectos relacionados con detección de partículas.

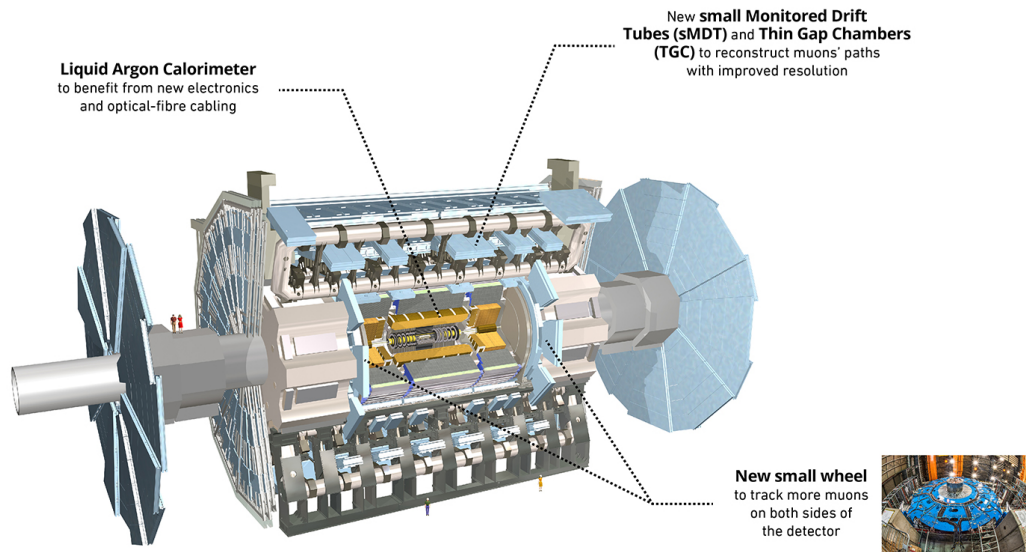


Figura 1.2: Diagrama del experimento ATLAS. CCTVal colabora en la actualización de la zona indicada como "New small Wheel", que contiene detectores sTGC.

la region.

<sup>12</sup>Gonzalo's comment: figura en mayuscula cuando te refieras a una figura especifica con numero.

<sup>13</sup>Gonzalo's comment: editar la figura para marcar estas partes. No es evidente encontrar los trapezoides. No es un juego de donde esta Wally.

<sup>14</sup>Gonzalo's comment: cual centro?

<sup>15</sup>Gonzalo's comment: será



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

### 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 del CERN <sup>16</sup>. Las etapas más básicas <sup>17</sup> corresponden son <sup>18</sup> la generación de señal de disparo, la detección de partículas y la adquisición de los datos. En “sTGC Minería” ya se cuenta con un sistema disparo y 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 <sup>19</sup>.

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

<sup>16</sup> Gonzalo's comment: Hay algo cojo en esta oracion

<sup>17</sup> Gonzalo's comment: suena mal básicas. Debe haber un mejor termino

<sup>18</sup> Gonzalo's comment: Hay algo raro en la escritura

<sup>19</sup> Gonzalo's comment: los detalles de este proceso los explicaras en un capitulo posterior?



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.

sistema de muongrafía de terreno considerando un solo detector de muones. Para su operación, el sistema utiliza detectores secundarios (centelladores), un sistema de coincidencias, 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 adquisición de datos, (correspondiente al sistema a diseñar) capta y discrimina los pulsos generados por el sistema de detección. La información resultante es comunicada a etapas posteriores para análisis de datos.<sup>20</sup>

<sup>21</sup> Es requisito del proyecto que este sistema de adquisición 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 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

<sup>20</sup> Gonzalo's comment: ~~Esto debería ir antes. Ver comentarios anteriores.~~

<sup>21</sup> Gonzalo's comment: Parte con algo como *Si bien en este trabajo solo se realizaran pruebas a pequeña escala... (especificar un poco mas*

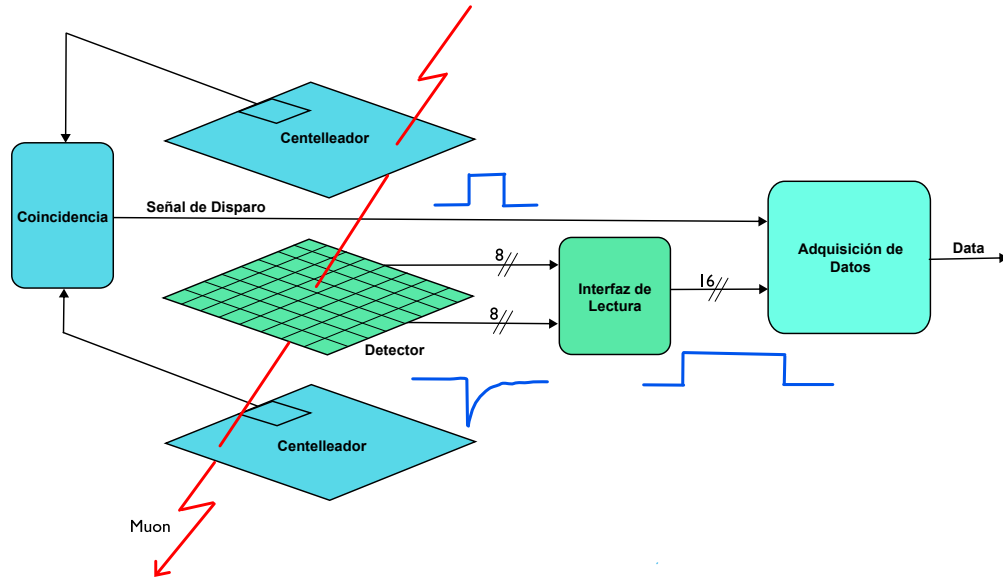


Figura 1.5: Diagrama del sistema de muongrafía de terreno para un solo detector. Se incluyen en azul las formas de señal asociadas a la señal de disparo, eventos de detección, y lectura de pulsos.

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>22</sup>.

## 1.4. Alcances y contribuciones

<sup>23</sup> Se espera que este sistema sea capaz de generar información suficiente para representar la ubicación de los vértices de interacción en la superficie del detector, con una resolución de al menos  $1\text{cm}^2$ .

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

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

<sup>22</sup> Gonzalo's comment: cual centro?

<sup>23</sup> Gonzalo's comment: ~~Toda esta seccion debe ser mas concreta y especifica.~~

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. <sup>24</sup>

## 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.

---

<sup>24</sup>Gonzalo's comment: se dejara el diseño en un repositorio para que los experimentos sean repetibles y se pueda extender el sistema partiendo de una base probada?

# ESTADO DEL ARTE

# **SISTEMA DE DETECCIÓN**

## **3.1. Detector de Partículas**

## **3.2. Interfaz de Lectura**

# **SISTEMA DE ADQUISICIÓN**



# **SIMULACIONES**

## CONCLUSIONES

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

# **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 ods 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] Diehl, E, “ATLAS Muon Detector Commissioning,” 2009. [Online]. Available: <http://cds.cern.ch/record/1213055/plots>
- [7] ATLAS Experiment, “Muon Spectrometer,” 2020. [Online]. Available: <http://cds.cern.ch/record/1213055/plots>

- [8] 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,” 2014.
- [9] V. D. 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>
- [10] 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.
- [11] —, “Methods for data readout, acquisition, and transfer in experimental nuclear physics setups (A review, part 2),” *Instruments and Experimental Techniques*, vol. 60, no. 5, pp. 615–678, 9 2017.
- [12] L. Arpin, M. Bergeron, M. A. Tétrault, R. Lecomte, and R. Fontaine, “A sub-nanosecond time interval detection system using FPGA embedded I/O resources,” in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 57, no. 2 PART 1, 4 2010, pp. 519–524.