

**PROCEDIMIENTO DE INSTALACIÓN, CALIBRACIÓN Y  
SINCRONIZACIÓN DEL ARREGLO DE DETECTORES  
CHERENKOV DE AGUA (GUANE), PARA LA DETECCIÓN  
Y ESTUDIO DE RAYOS CÓSMICOS EN BUCARAMANGA.**

SANDRA PATRICIA HERNÁNDEZ BARAJAS  
YESID FABIÁN LEÓN CARREÑO

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

PROCEDIMIENTO DE INSTALACIÓN, CALIBRACIÓN Y  
SINCRONIZACIÓN DEL ARREGLO DE DETECTORES  
CHERENKOV DE AGUA (GUANE), PARA LA DETECCIÓN  
Y ESTUDIO DE RAYOS CÓSMICOS EN BUCARAMANGA.

SANDRA PATRICIA HERNÁNDEZ BARAJAS  
YESID FABIÁN LEÓN CARREÑO

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

Director  
JESÚS PEÑA RODRÍGUEZ  
M.Sc. en Ing. Electrónica

Codirector  
LUIS ALBERTO NÚÑEZ DE VILLAVICENCIO MARTÍNEZ  
Ph.D. en Física

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

2018

*Dedicado a*

*Mis padres porque sin su esfuerzo, ayuda y apoyo incondicional hubiese sido muy difícil esta etapa por la universidad y la culminación de este proyecto.*

*Mi hermana, quien confía en mi y me motiva cada día para salir adelante a cumplir todas mis metas. Ella que siempre tuvo una palabra de aliento para darme fortaleza y continuar con este proceso.*

*Mi compañero, también autor de este libro por brindarme su compañía y amistad en el transcurso de mi vida por la universidad, por ser un gran apoyo en todas esas experiencias buenas y malas que afrontamos juntos.*

*Todos mis amigos que fui conociendo por mi paso por la universidad, excelentes personas que siempre fueron una compañía fiel y con quienes compartí muchas experiencias, ellos con los que reí, lloré y disfruté cada momento.*

*Todas aquellas personas que contribuyeron con este proyecto y que a pesar de sus ocupaciones dedicaron un tiempo para la culminación de nuestro libro.*

**Sandra Patricia Hernández Barajas**

*Dedicado a*

*A mi padre, por el amor incondicional a su familia, el esfuerzo cotidiano para brindar a sus hijos un futuro próspero, lleno de sueños y metas cumplidas, por esos buenos ejemplos y las vastas enseñanzas que nos ha dado al enfrentar la vida.*

*A mi madre, por sembrar en nosotros la semilla del conocimiento, por su constante apoyo emocional y los sabios consejos que en su momentos apaciguaron la incertidumbre.*

*A mi hermano, por siempre haber estado en mi camino siendo un pilar fundamental, llenando mi vida de grandes vivencias y pensamientos, un partícipe insustituible en este proceso, sin él, esto no hubiese tenido un concluir satisfactorio.*

*A nuestro director, que fue guía en este último trasegar, su conocimiento y apoyo fueron de gran ayuda para culminar nuestro libro, a su vez y a pesar de los percances y ocupaciones siempre estuvo dispuesto a revisar nuestro trabajo.*

*Y por último pero no menos importante, a esos grandes amigos que siempre estuvieron conmigo en los buenos y malos ratos, todas aquellas personas que conocí en este andar, que de una u otra manera colmaron mi existir de experiencias y momentos magnánimos que me son inefables, en especial a la suscrita a este libro que ha sido como una hermana y a tres grandes amigos: Cristian, David y Pedro, personas con las que recorrí la mayor parte del largo, tortuoso y aun así bello caminar que es la universidad.*

**Yesid Fabián León Carreño**

# Índice general

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>16</b>
<b>1 RESEÑA BIBLIOGRAFICA</b>	<b>18</b>
1.1 RAYOS CÓSMICOS . . . . .	18
1.2 CLIMA ESPACIAL . . . . .	18
1.3 ARREGLO DE DETECTORES WCD . . . . .	19
1.3.1 Detectores Cherenkov de agua: . . . . .	19
1.4 MÉTODOS DE ESTUDIO DE RCs CON WCDs . . . . .	21
1.4.1 Partícula Única: . . . . .	21
1.4.2 Lluvia aérea extendida (EAS): . . . . .	23
<b>2 ARREGLO DE WCD GUANE</b>	<b>25</b>
2.1 ESTRUCTURA DE UN WCD . . . . .	26
2.1.1 Estructura mecánica del WCD: . . . . .	26
2.1.2 Sistema electrónico del WCD: . . . . .	27
<b>3 RESULTADOS</b>	<b>41</b>
3.1 MODELADO Y SIMULACIÓN DEL FOTOMULTIPLICADOR HAMAMATSU R5912	41
3.1.1 Modelo del PMT Hamamatsu R5912: . . . . .	41
3.1.2 Cálculo de los parámetros del PMT Hamamatsu R5912: . . . . .	42
3.1.3 Simulación en Pspice del PMT Hamamatsu R5912 y su red de polarización:	45
3.1.4 Resultados del modelado y simulación del PMT R5912: . . . . .	46
3.2 PROCESO DE CALIBRACIÓN . . . . .	50
3.2.1 Valor real de HV en el ánodo del PMT: . . . . .	50
3.2.2 Calibración del WCD: . . . . .	51
3.2.3 Calibración del arreglo Guane y modelo matemático de la dirección de la EAS: . . . . .	56
3.3 MEDICIÓN DE RETARDO DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN . . . . .	61

3.4 MEDICIONES DE SINCRONIZACIÓN DEL GPS . . . . .	63
3.5 MEDICIÓN DE UN EVENTO FORBUSH Y MEDICIÓN INDIRECTA DEL ÍNDICE DST DEL CAMPO MAGNÉTICO . . . . .	64
<b>4 CONCLUSIONES</b>	<b>67</b>
<b>5 RECOMENDACIONES PARA PROYECTOS FUTUROS</b>	<b>69</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>73</b>

## Índice de figuras

Figura 1	Ilustración del efecto Cherenkov . . . . .	20
Figura 2	Evento Forbush debido a una CME . . . . .	21
Figura 3	Intensidad relativa del flujo de RCs con respecto al ciclo solar . . . . .	22
Figura 4	Ilustración de un arreglo de WCDs a nivel del suelo . . . . .	24
Figura 5	Imagen satelital de los tres WCDs que conforman el arreglo GUANE . . . . .	25
Figura 6	Montaje mecánico del WCD . . . . .	26
Figura 7	Diagrama de bloques de la electrónica del WCD . . . . .	27
Figura 8	Fotomultiplicador Hamamatsu R5912 . . . . .	28
Figura 9	Principio de funcionamiento de un fotomultiplicador . . . . .	29
Figura 10	Circuito divisor de voltaje para un tubo fotomultiplicador . . . . .	30
Figura 11	Base de polarización del PMT . . . . .	31
Figura 12	Diagrama esquemático de un canal de adquisición . . . . .	32
Figura 13	Tarjeta digitalizadora . . . . .	34
Figura 14	Fotomultiplicador Hamamatsu R5912 conectado a la base de polarización . . . . .	35
Figura 15	Tarjeta de desarrollo Nexys II de Digilent. . . . .	36
Figura 16	Bloques jerárquicos del firmware de la FPGA . . . . .	37
Figura 17	Estructura de los datos almacenados por la Nexys II . . . . .	38
Figura 18	Línea base sin y con algoritmo de corrección . . . . .	39
Figura 18	Curva de la ganancia característica del PMT R5912 . . . . .	43
Figura 19	Relación de distribución de voltaje del PMT R5912 . . . . .	43
Figura 20	Configuración de los díodos del PMT Hamamatsu R5912 . . . . .	44
Figura 21	Comparación de la curva de la ganancia característica del PMT R5912 . . . . .	45
Figura 22	Bloque de simulación para el ánodo . . . . .	46

Figura 23	Circuito equivalente del modelo del PMT Hamamatsu R5912 en Pspice . . . . .	47
Figura 24	Simulación de corrientes hecha en Pspice . . . . .	47
Figura 25	Gráfica del valor medido en el último dínodo y en el ánodo en Pspice y los datos registrados por el PMT R5912 . . . . .	48
Figura 26	Simulación en Pspice del pulso de tensión del último dínodo con un factor de amplificación de 20. . . . .	49
Figura 27	Pulso de tensión del último dínodo del PMT, visualizado en el osciloscopio . . . . .	49
Figura 28	Máximo del voltaje del último dínodo con respecto la corriente de cátodo . . . . .	50
Figura 29	Gráfico de la tensión de polarización versus la tensión ingresada en la terminal de Ubuntu . . . . .	51
Figura 30	Logaritmo del flujo de eventos sensados por el WCD con respecto a la tensión de polarización . . . . .	54
Figura 31	Derivada del logaritmo del flujo de eventos . . . . .	55
Figura 32	Histograma de carga de los datos obtenidos durante una hora de registro por el WCD Chitagá . . . . .	56
Figura 33	Espectro de energía de secundarios a nivel del suelo en Bucaramanga	57
Figura 34	Boceto de la calibración del arreglo . . . . .	58
Figura 35	Estimación de la trayectoria de la EAS proyectada respecto a la superficie de los detectores . . . . .	58
Figura 36	Triángulo formado por la proyección de la partícula y la distancia entre los detectores. . . . .	59
Figura 37	Triángulo formado entre la distancia $\Delta_{D^*}$ y la trayectoria de la partícula . . . . .	59
Figura 38	Montaje electrónico para la visualización del retardo en la línea de transmisión. . . . .	61
Figura 39	Retardo entre los canales causado por la longitud de los conductores, vista en el osciloscopio . . . . .	62
Figura 40	Función que describe el tiempo de retardo de la señal dependiendo de la longitud del conductor . . . . .	63
Figura 41	Visualización en el osciloscopio las señales PPS de dos de los GPS	64
Figura 42	Gráfico de datos obtenidos por los detectores durante el Forbush 07-09-2017 . . . . .	66

## Índice de tablas

Tabla 1	Conexión del conector DB15 de la base de polarización . . . . .	31
Tabla 2	Tensión real que alimenta al PMT cuando se ingresa la tensión deseada en el firmware de la FPGA . . . . .	52
Tabla 3	Tiempos del retardo en la línea de transmisión . . . . .	63

## *Glosario*

A continuación se presentan algunos términos utilizados en el trabajo desarrollado:

**BIN:** Es una muestra del vector que almacena el pulso digitalizado. Cada vector contiene un total de doce bins.

**CME:** Eyección de masa coronal (por sus siglas en inglés Coronal Mass Ejection), es una enorme burbuja de material que es expulsada de la corona solar. El material es plasma y principalmente consiste de protones y electrones. La mayoría de las CMEs proviene de regiones activas con campos magnéticos cerrados y se propagan por el espacio interplanetario, si llegan hasta la Tierra pueden causar fenómenos como auroras boreales muy intensas y tormentas geomagnéticas, las cuales intervienen en el funcionamiento de satélites e instalaciones eléctricas [8].

**DST:** Por sus siglas en inglés Disturbance Storm Time, representa la depresión del campo magnético promediada longitudinalmente en el ecuador terrestre sobre la superficie de la Tierra. Cuando el viento solar presiona lo suficiente la magnetosfera se producen reconexiones en las líneas del campo geomagnético, lo que genera canales de ingreso para nuevas partículas cargadas provenientes del viento solar. El índice DST es la medida principal de las tormentas magnéticas [12, 23].

**EAS:** Por sus siglas en inglés Extensive Air Shower, se le llama así a la enorme cascada de miles de millones de partículas generadas cuando un rayo cósmico de ultra-alta energía interactúa con la atmósfera de la Tierra [1].

**FORBUSH:** Fenómeno causado usualmente por una CME, este ocurre debido a que el campo magnético de la Tierra se intensifica al interactuar con el plasma emanado por el sol, lo que conlleva a una disminución del número de partículas que ingresan a la Tierra [6].

**GUANE:** Arreglo de tres detectores Cherenkov de agua ubicados en la Universidad Industrial de Santander, que se usará para el estudio de RCs.

**HV:** Alto voltaje (por sus siglas en inglés High Voltage).

**LAGO:** The Latin American Giant Observatory, es un observatorio de astropartículas a escala regional, el cual está compuesto por detectores Cherenkov de agua (WCD) de bajo costo, ubicados en nueve países de América Latina (Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Guatemala, México, Perú y Venezuela) y España. Tiene tres objetivos principales, como: estudiar los eventos gamma de alta energía en sitios de gran altitud, comprender y monitorear los fenómenos de clima espacial a escala continental y descifrar el impacto de la radiación cósmica sobre los fenómenos atmosféricos. [5].

**MUÓN:** Es una partícula elemental que presenta características similares a un electrón, aunque su masa es 200 veces mayor. Dicha partícula tiene una vida media de 2.2 microsegundos [24].

**PMT:** (Por sus siglas en inglés Photomultiplier Tubes), el fotomultiplicador se encarga de generar una corriente eléctrica amplificada a partir de los electrones liberados en el fotocátodo por su interacción con fotones incidentes (efecto fotoeléctrico) [18].

**RCs:** Rayos Cósmicos.

**TYVEK:** Material altamente reflectivo y difusivo usado para disminuir las pérdidas de fotones Cherenkov causados por partículas cargadas incidentes en el detector.

**VEM:** (Por sus siglas en inglés Vertical Equivalent Muon), que consiste en determinar la energía que deposita en el tanque un muón que le atraviesa, ingresando por la tapa y saliendo por la base [7].

**WCD:** Detector Cherenkov de agua (por sus siglas en inglés Water Cherenkov Detector). Es un detector de partículas cargadas cuyo principio de funcionamiento está basado en el efecto Cherenkov. Este efecto se da cuando una partícula cargada de alta energía atraviesa un medio dieléctrico superando la velocidad de la luz en el medio, esto libera un haz de fotones el cual es detectado por medio de un PMT. El PMT genera una señal eléctrica la cual es acondicionada, digitalizada y almacenada para el posterior análisis y procesamiento de los eventos [3].

# RESUMEN

**Título:** Procedimiento de instalación, calibración y sincronización del arreglo de detectores Cherenkov de agua (GUANE), para la detección y estudio de rayos cósmicos en Bucaramanga<sup>1</sup>.

**Autores:** Sandra Patricia Hernández Barajas<sup>2</sup>, Yesid Fabián León Carreño<sup>2</sup>

**Palabras Clave:** Calibración, detectores Cherenkov de agua, forbush, partícula única, sincronización temporal, rayos cósmicos, lluvias aéreas extendidas.

## DESCRIPCIÓN:

El proyecto GUANE nace en el marco del convenio internacional LAGO, siendo la red más grande de WCDs operando a distintas altitudes. GUANE será un arreglo de tres WCDs sincronizados temporalmente y ubicados en la UIS, dispuestos en forma de triángulo, que registran la componente muónica, electromagnética y hadrónica de las EAS de RCs. Este trabajo apuntó a establecer un procedimiento para la instalación, calibración y sincronización de un WCD que será usado como prototipo para los demás detectores que conforman el arreglo GUANE. Cada WCD está compuesto de un PMT el cual convierte el haz de luz generado por la interacción de una partícula cargada en el agua (efecto Cherenkov), en una señal eléctrica que es amplificada para luego ser digitalizada y almacenada. Dichos eventos se ven reflejados en pequeños pulsos de corta duración ( $\approx 150ns$ ) y con una frecuencia que puede llegar hasta  $\approx 2kHz$ , las señales deben ser cuantizadas y almacenadas usando una electrónica de alta velocidad, en este caso se usan conversores análogo digitales rápidos (FADCs) y un Arreglo de Compuertas Programable (FPGA-Spartan3) corriendo a 40 MHz. La cantidad de datos que se generan alcanzan 800 MB por hora; para administrar y almacenar estos datos se usa una CubieBoard2 y un disco duro. Los datos son etiquetados con dos variables temporales, una de alta frecuencia, la cual tiene una resolución de 10 ns e indica el momento exacto en que ocurrió el evento, y una de baja frecuencia la cual sincroniza temporalmente todos los detectores mediante GPS. Con el WCD se pueden observar fenómenos como los decrecimientos *Forbush*, la evolución temporal de la actividad solar y la posible detección de rayos gamma. Por tal motivo, se desarrollan algoritmos en bash para encontrar el valor de los parámetros de funcionamiento óptimo del WCD y validar su operación mediante el análisis de los datos obtenidos.

---

<sup>1</sup>Trabajo de Grado

<sup>2</sup>Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Jesús Peña Rodríguez. Codirector: Luis Alberto Núñez de Villavicencio Martínez.

# ABSTRACT

**Title:** Procedure for the installation, calibration and synchronization of the water Cherenkov detectors array (GUANE), for the detection and study of cosmic rays in Bucaramanga<sup>1</sup>.

**Authors:** Sandra Patricia Hernández Barajas <sup>2</sup>, Yesid Fabián León Carreño <sup>2</sup>

**Key Words:** Calibration, Water Cherenkov Detector (WCD), Forbush, Cosmic Rays (RCs), single particle, Extensive Air Showers (EAS)

## DESCRIPTION:

The GUANE project was born within the framework of the LAGO international agreement, being the largest network of WCDs operating at different altitudes. GUANE will be an array of three WCDs temporarily synchronized and located at the UIS, arranged in a triangle shape, which register the muon and hadronic component of the EAS of RCs. This work aimed to establish a procedure for the installation, calibration and synchronization of a WCD that will be used as a prototype for the other detectors that make up the GUANE array. Each WCD is composed of a PMT which converts the beam of light generated by the interaction of a charged particle into the water (Cherenkov effect), into an electrical signal that is amplified and then digitized and stored. These events are reflected in small pulses of short duration ( $\approx 150ns$ ) and with a frequency that can reach up to  $\approx 2kHz$ , the signals must be quantized and stored using a high electronic speed, in this case fast digital analog converters (FADCs) and a programmable gate array (FPGA-Spartan3) running at 40 MHz are used. The amount of data that is generated reaches 800 MB per hour; to manage and store this data, a CubieBoard2 and a hard disk are used. The data is labeled with two temporary variables, one of high frequency, which has a resolution of 10 ns and indicates the exact moment in which the event occurred, and one of low frequency which temporarily synchronizes all the detectors by GPS. With the WCD, phenomena such as *Forbush* decreases, the temporal evolution of solar activity and the possible detection of gamma rays can be observed. For this reason, algorithms are developed in bash to find the value of the optimal functioning parameters of the WCD and validate its operation by analyzing the data obtained.

---

<sup>1</sup>Bachelor Thesis

<sup>2</sup>Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Jesús Peña Rodríguez, MSc. Codirector: Luis Alberto Núñez de Villavicencio Martínez, PhD.

# *INTRODUCCIÓN*

El presente trabajo de investigación refiere al estudio de rayos cósmicos, haciendo uso de los arreglos de detectores de superficie y analizando como cada uno de estos cumple determinada función en el arreglo, esto examinando los datos obtenidos y, mostrando su estructura electrónica desde su montaje inicial, hasta dicho análisis, así como también la verificación individual de cada dispositivo electrónico.

Las características principales de dichos detectores está fundamentada en su bajo costo y en la robustez de los posibles fenómenos detectables, está dada por la redundancia de los datos, pues pueden ser corroborados con los de cada detector. Además cuentan con una rápida velocidad de adquisición, procesamiento y almacenamiento de los datos, esto por la eficiencia en la electrónica que lo conforma.

Para analizar estos detectores es necesario conocer los fenómenos físicos que hacen posible su funcionamiento, haciendo una introducción más que superficial de aquellos sucesos; explicando detalladamente qué ocurre cuando se producen esos eventos dentro del detector.

Los rayos cósmicos (RCs primarios) se generan en diversos procesos astrofísicos y están compuestos principalmente por protones, núcleos pesados y rayos gamma que al interactuar con las moléculas que conforman la atmósfera terrestre producen partículas secundarias (RCs secundarios). La detección de RCs es de gran importancia, como por ejemplo en el estudio del clima espacial, la estructura interna de formaciones geológicas, y la detección de materiales peligrosos en contenedores. Dichas aplicaciones implican un aporte científico-técnico en el desarrollo y calibración de detectores y en el procesamiento y análisis de datos. Por esta razón se propuso este proyecto, el cual estará enfocado principalmente en el estudio de 3 ramas de la física de astropartículas: el universo extremo, clima espacial y radiación atmosférica al nivel de la tierra, además de ser parte del proyecto LAGO por sus siglas en inglés The Latin American Giant Observatory.

La electrónica usada se basa en la implementada en el proyecto LAGO. Cada parte de esta electrónica atiende a un fin específico, ya sea para el procesamiento de señales o el almacenamiento de los datos.

Algunos de los instrumentos utilizados para adecuar las señales y mejorar la recepción de datos son: el sensor de temperatura y el GPS, la explicación de ello se profundiza a lo largo de este documento.

En el capítulo 1 se tratan temas que le serán necesarios al lector para un mejor entendimiento. A lo largo de este capítulo, se tratan temas como los RCs, el estudio del clima espacial, la definición de un arreglo, su funcionalidad y un breve resumen de los posibles métodos de estudio.

En el capítulo 2 se define detalladamente qué es y cómo está compuesto un arreglo de detectores, así como las dos partes que conforman el WCD: la estructura mecánica y el sistema electrónico.

En el capítulo 3 se muestran los resultados de este proyecto; el modelo matemático para la simulación de el PMT del detector, el proceso de calibración del detector, la medición del retardo por los conductores, las mediciones de la sincronización del GPS y la validación del detector mediante la medición de un Forbush.

En el capítulo 4 se plasman las conclusiones del proyecto.

Finalmente, en el capítulo 5 se hacen recomendaciones para proyectos futuros.

# *Capítulo 1*

## *RESEÑA BIBLIOGRAFICA*

### **1.1. RAYOS CÓSMICOS**

Los RCs primarios son partículas que están correlacionadas con la dinámica de formación de estrellas masivas, evolución estelar y explosión de supernovas, estas partículas pueden ser protones, núcleos pesados o rayos gamma [13, 28].

El descubrimiento de RCs fue atribuido al físico austriaco Víctor Hess. En 1912, Hess llegó a la conclusión que el aumento de la ionización con la altura se origina por la radiación procedente del espacio, estos resultados fueron posteriormente confirmados por W. Kolhörster [28].

Los RCs primarios de alta energía provenientes del espacio interestelar interactúan continuamente con los átomos presentes en la atmósfera terrestre y generan una cascada de partículas subatómicas en las que se pueden producir millones de partículas, al producto de esta colisión se le denomina RCs secundarios. Los WCDs están enfocados a la detección de los RCs secundarios.

### **1.2. CLIMA ESPACIAL**

El flujo de partículas secundarias a nivel del suelo es afectado debido a las variaciones del campo geomagnético, asociados con el ciclo solar o por perturbaciones transitorias en el viento solar.

Las disminuciones rápidas en el flujo de RCs galácticos seguida por una lenta recuperación exponencial en un intervalo de tiempo de pocos días, se le conoce como decrecimiento Forbush.

Los Forbush son asociados generalmente a una CME que se produce en el Sol generando

una enorme masa de plasma magnetizado que viaja a través del medio interplanetario hasta llegar a la Tierra. Este plasma actúa en forma de “escudo” para los RCs galácticos produciendo un descenso rápido en su flujo. Las variaciones de flujo debidas a actividades solares pueden ser observadas mediante un arreglo de detectores Cherenkov de agua a nivel del suelo.

### 1.3. ARREGLO DE DETECTORES WCD

Un arreglo de detectores Cherenkov es un método para estudiar los RCs secundarios, dependiendo del tamaño del arreglo se captaran partículas en un determinado rango de energías, además, entre más detectores se tenga en el arreglo mejor será la resolución espacial con la que se pueden caracterizar parámetros como la energía de la partícula primaria y la dirección de la EAS.

El proyecto LAGO, además de correlacionar fenómenos entre arreglos de detectores, tiene detectores ubicados en diferentes altitudes, permitiendo, en las más altas (Chacaltaya) la detección de rayos Gamma.

**1.3.1 Detectores Cherenkov de agua:** Son instrumentos que permiten la detección de partículas cargadas a través del efecto Cherenkov. La luz Cherenkov generada en el agua es proporcional a la longitud de la trayectoria de la partícula. Los WCDs son sensibles tanto a la componente electromagnética como a la muónica y requieren agua ultra-pura de alta transparencia para aumentar la eficiencia del detector [28].

El principal objetivo de los arreglos de detectores es encontrar las fuentes de los RCs más energéticos. Claramente, la energía de la partícula primaria que inicia la EAS solo puede inferirse con un gran error de medición. Los WCDs son muy sensibles, versátiles, rápidos, tienen gran ganancia, bajo nivel de ruido y son bastante robustos en operación [15, 16].

El pionero de la EAS que utilizó esta técnica fue el arreglo Haverah Park, que operaba en Inglaterra desde 1964 hasta 1987, hecho de WCDs de varios tamaños distribuidos en aproximadamente  $12km^2$  [28].

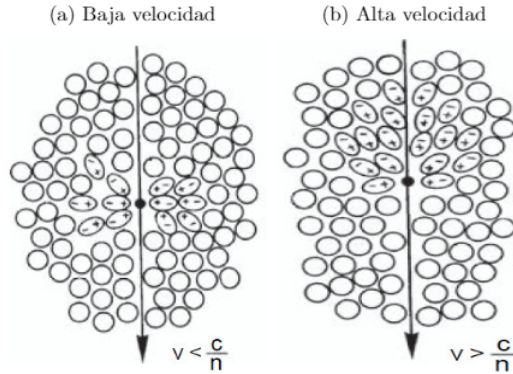
Otros WCDs famosos fueron los detectores IMB en Estados Unidos y Kamiokande-II en Japón, que registraron el estallido de una supernova, con 19 eventos reunidos entre ellos [14,26]. Un gran WCD es Super-Kamiokande (Super-K), localizado en Japón que funciona desde 1996 [20]; Super-K se está ejecutando actualmente con un umbral de energía de aproxima-

damente 4-5 MeV [27].

El arreglo del Observatorio Pierre Auger [2], fue diseñado para estudiar el desarrollo transversal de las cascadas a nivel del suelo. Está formado por 1660 WCDs, dispuestos en un arreglo triangular de 1500 metros de lado y cubriendo un área total de  $3000\text{km}^2$ . Cada WCD está equipado con tres PMTs para medir la luz Cherenkov producida en el agua [4, 28].

**1.3.1.1 Efecto Cherenkov:** Este efecto ocurre cuando una partícula cargada atraviesa un medio con índice de refracción  $n$  con una velocidad  $v$  excediendo la velocidad de la luz  $c$  en el medio, emitiendo una radiación electromagnética característica, llamada radiación Cherenkov. La radiación Cherenkov ocurre debido a que la partícula cargada polariza los átomos a lo de su trayectoria convirtiéndose en dipolos eléctricos [16].

Figura 1: Ilustración del efecto Cherenkov; polarización de las moléculas de un medio dieléctrico por el paso de una partícula cargada. (a) Partícula que se desplaza a baja velocidad en un medio, generando que los dipolos se ordenen simétricamente alrededor de su camino. (b) Partícula que se desplaza a alta velocidad en un medio, formando un arreglo de dipolos asimétrico, lo cual genera la radiación Cherenkov.



*Fuente: [16]*

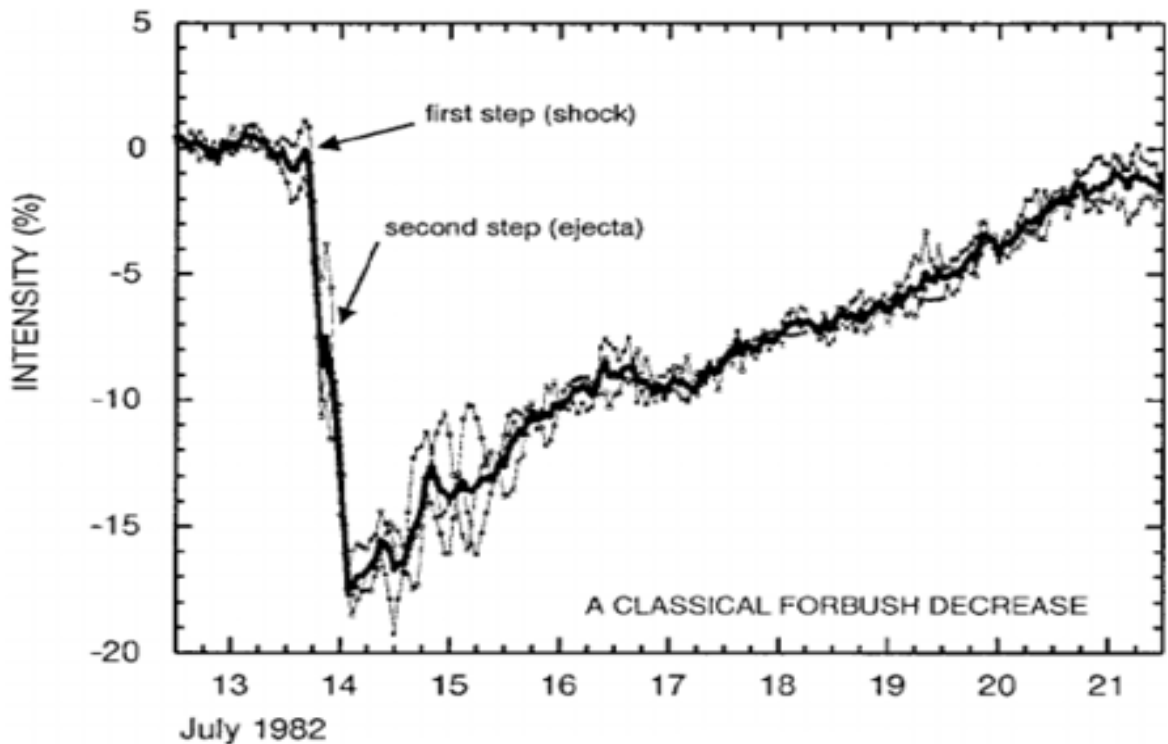
Mientras  $v < \frac{c}{n}$ , los dipolos se ordenan simétricamente alrededor del paso de la partícula, de modo que el campo dipolar integrado sobre todos los dipolos se desvanece y no ocurre radiación, Fig. 1a. Sin embargo, si la partícula se mueve con  $v > \frac{c}{n}$ , la simetría se rompe lo cual conlleva que a lo largo de la trayectoria se forma un campo dipolar el cual es visible a largas distancias desde la trayectoria de la partícula y produzca la radiación Cherenkov, Fig. 1b [16, 21].

## 1.4. MÉTODOS DE ESTUDIO DE RCs CON WCDs

Al implementar los WCDs se debe conocer las limitaciones y los usos que se le pueden dar, en este caso existen dos métodos de estudio de los RCs secundarios:

**1.4.1 Partícula Única:** Los RCs primarios que llegan a la Tierra son generados por diversos tipos de fuentes, entre las cuales están: las explosiones estelares, pulsares, explosiones de núcleos de galaxias y los emitidos por el Sol.

Figura 2: Decaimiento porcentual del conteo de neutrones durante un evento Forbush registrado en Julio de 1982. Este decrecimiento corresponde al conteo de neutrones, para tres estaciones de monitoreo de neutrones: Deep River, Mt. Wellington y Kerguelen. La línea negra gruesa indica el promedio de la tasa de conteos. Se indican las dos estructuras que componen un evento Forbush típico: el primero (first step), corresponde a los RCs que son atrapados detrás de la onda de choque (shock); el segundo (second step), corresponde a los RCs que son atrapados en el interior de la CME cuando se ha alejado del Sol a una distancia mayor a 50 radios solares.



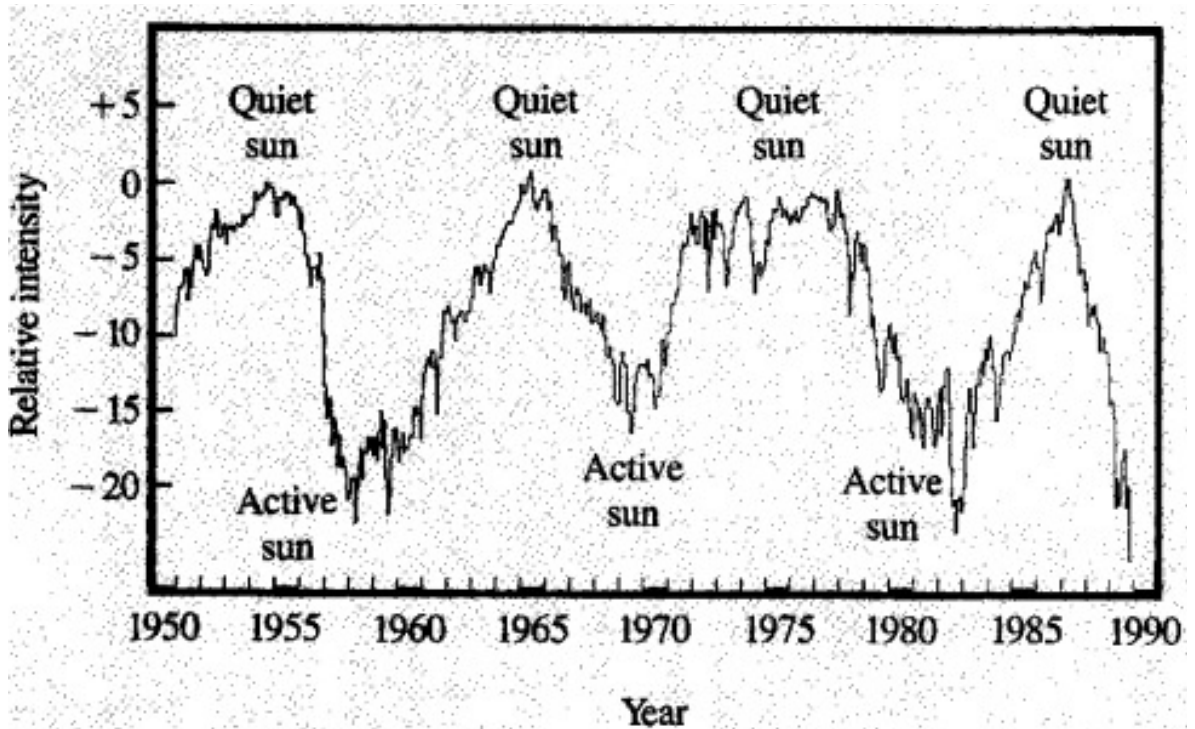
Fuente: [10]

La técnica de partícula única consiste en contar todas las partículas que inciden en el

detector durante un intervalo de tiempo fijo y de esta manera determinar el número de eventos en función del tiempo, tasa de eventos [29].

El estudio de la partícula única permite evidenciar fenómenos como los Forbush, los cuales causan una disminución drástica en el ingreso de partículas a la atmósfera, Fig. 2, [6].

Figura 3: Esta gráfica es el monitor de RCs terrestres de más larga duración, que comenzó a funcionar en 1951 en las afueras de Homestake Mine en Colorado. Muestra la intensidad relativa (cambio porcentual) del flujo de RCs terrestres con respecto al ciclo solar. Tenga en cuenta que el ciclo solar es irregularmente sinusoidal con cada ciclo, siendo bastante diferente de los demás. Aunque estos valores de flujo suavizado muestran una variación de aproximadamente 20 % desde el pico solar al mínimo, los valores reales pueden variar por  $>200\%$  para promedios diarios y mucho más para períodos más cortos. Más del 99 % de estas partículas se originan a partir de partículas primarias del espacio exterior. La principal influencia del ciclo solar está en sus cambios en la magnetosfera que desvía las partículas entrantes, y no en la producción de partículas de RCs terrestres de origen solar. Datos de J. A. Simpson, Universidad de Chicago.



Fuente: [30]

Por otra parte, es posible observar la actividad solar en largos períodos de tiempo, es decir los máximos y los mínimos solares, Fig. 3. Los WCDs ubicados en sitios de gran altitud pueden detectar eventos gamma de alta energía [5].

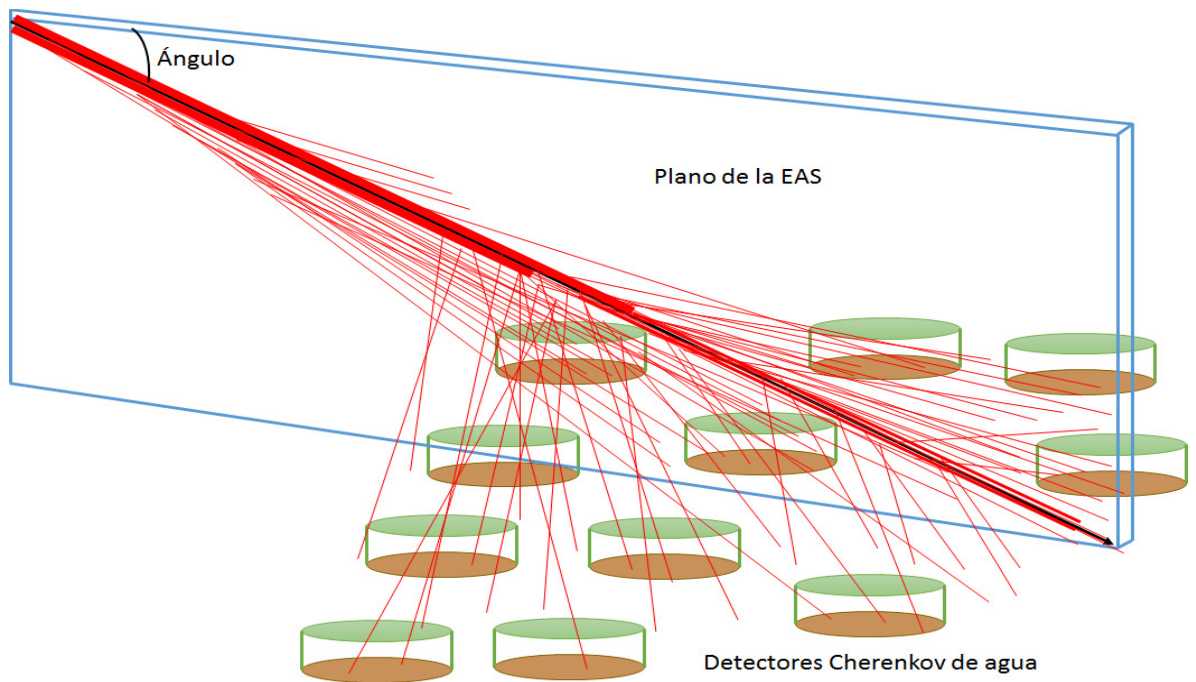
Mediante este método también se puede medir características intrínsecas de las partículas, por ejemplo la vida media del muón, la cual puede ser estimada mediante la diferencia de tiempo entre dos eventos dentro del detector: el primero por el Cherenkov del muón y el segundo por el Cherenkov del electrón generado por el decaimiento del muón [9].

Los WCD también pueden determinar la energía de la partícula depositada en el detector por medio de la medición de la carga, esto se lleva a cabo mediante el cálculo del área bajo la curva del pulso de corriente generado por el PMT debido a la detección de fotones Cherenkov. Como la amplitud y el ancho del pulso dependen de la cantidad de fotones incidentes en el PMT, la carga será mayor si la energía depositada por la partícula incidente también lo es, y caso contrario será menor para partículas que depositen menos energía.

**1.4.2 Lluvia aérea extendida (EAS):** Los RCs primarios que llegan a la Tierra interactúan con los núcleos de los elementos constituyentes de la atmósfera produciendo una lluvia de RCs secundarios, a este resultado se le denomina EAS. La dirección de llegada del eje de la EAS se estima mediante el tiempo de llegada del frente de la lluvia en diferentes WCDs, y la energía primaria de la partícula es evaluada por el número de partículas secundarias detectadas.

Las EAS son detectadas a nivel del suelo mediante arreglos de WCDs, Fig: 4. Estos detectan las componentes de la lluvia que están conformadas por partículas cargadas. La señal registrada por estos detectores se debe tanto a la componente electromagnética como a la muónica de la EAS [1, 4, 29].

Figura 4: Ilustración de un arreglo de WCDs a nivel del suelo para detectar las partículas de una cascada atmosférica generada por RCs.



Fuente: [11]

## Capítulo 2

### ARREGLO DE WCD GUANE

GUANE es un arreglo de detectores que contará con tres WCDs dispuestos en lugares previamente seleccionados dentro de la Universidad Industrial de Santander (UIS), estos están ubicados como se muestra en la Fig.5, formando un triángulo cuasi equilátero que facilita en cierta medida el cálculo de los parámetros para la dirección de la EAS.

Figura 5: Imagen satelital de los tres WCDs que conforman el arreglo GUANE, ubicados en la UIS. En rojo el WCD Chitagá ubicado en la terraza del edificio de Ciencias Humanas, en verde el WCD Cácosta ubicado en el parqueadero de la Cra 25 y en amarillo el WCD Guane ubicado en un salón del edificio Livianos. Todos con una distancia de separación aproximada de 100m.



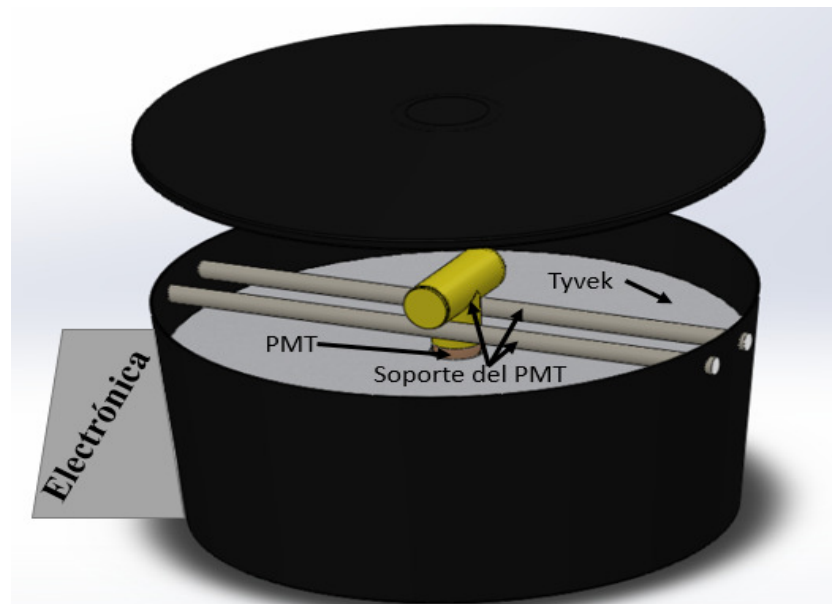
Fuente: Google Earth

Una de las características principales de GUANE radica en la redundancia de la información en el registro de eventos como los Forbush, es decir, la detección del evento por un WCD podrá ser corroborada con los otros WCDs. Obteniendo así una mayor certeza de la ocurrencia del fenómeno, mitigando de tal manera errores generados por ejemplo: caídas de tensión o cortes del servicio eléctrico.

## 2.1. ESTRUCTURA DE UN WCD

El montaje de un WCD consta de dos etapas: El montaje de la estructura mecánica y el del sistema electrónico con el que se procesan y almacenan las señales adquiridas.

Figura 6: Montaje mecánico del WCD. Tanque plástico de 4000L con su estructura cilíndrica interna cubierta con Tyvek, el soporte del PMT Hamamatsu R5912 está compuesto por dos tubos de PVC dispuestos en paralelo que sostienen en el centro del tanque a una "T" de PVC (en amarillo) que contiene la base del PMT y en la parte izquierda del tanque se encuentra ubicada la caja metálica con la electrónica.

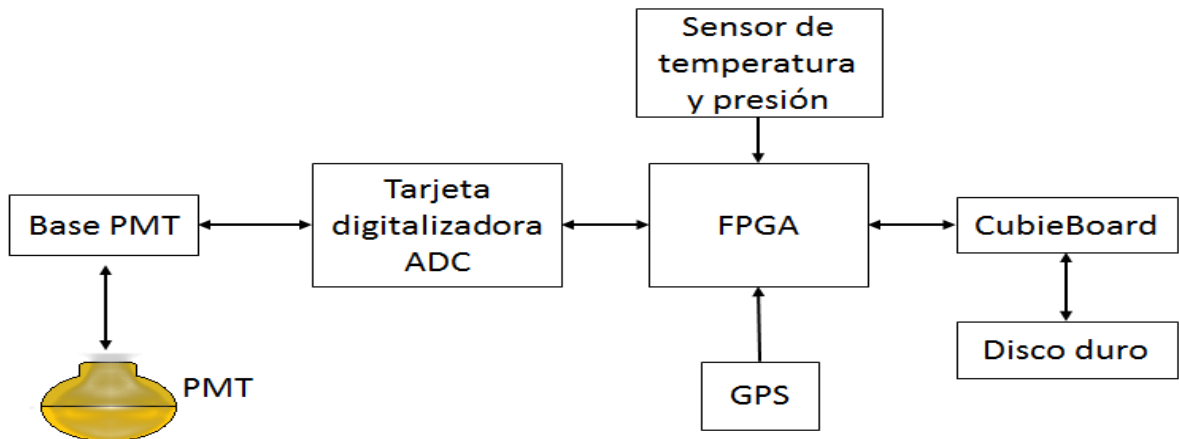


**2.1.1 Estructura mecánica del WCD:** Cada WCD está compuesto por un tanque plástico que internamente posee una estructura cilíndrica recubierta por un material reflectivo (Tyvek) y un soporte transversal que sujeta el PMT de tal manera que sólo la parte sensible quede inmersa dentro de la estructura cilíndrica, Fig. 6. El interior del WCD posee un medio dieléctrico (agua tratada) en el cual ocurre el proceso de liberación de fotones por el

efecto Cherenkov cuando una partícula cargada pase a través de este. Por otra parte, el material altamente reflectivo evita la pérdida de fotones por absorción, aumentando la probabilidad de detección del WCD. Finalmente, en la parte exterior del tanque plástico se instala una caja metálica, la cual tiene en su interior el sistema electrónico del detector.

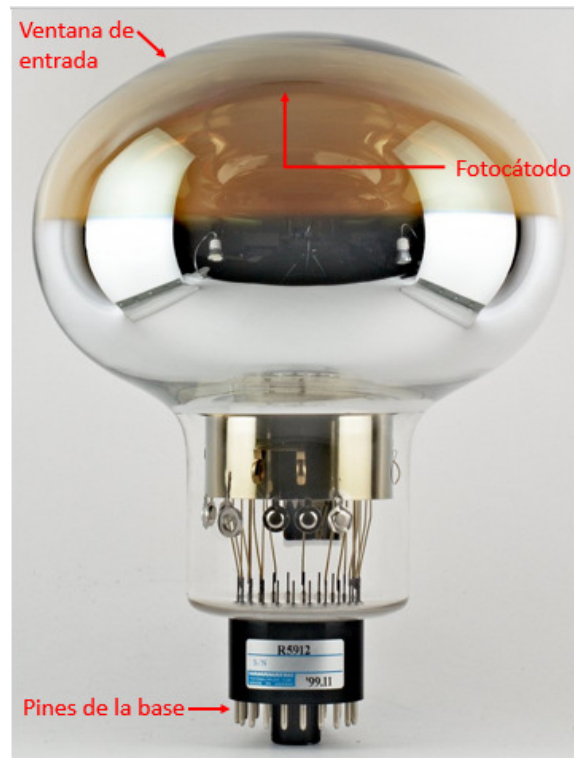
**2.1.2 Sistema electrónico del WCD:** El WCD está compuesto por un diseño electrónico derivado del proyecto LAGO, Fig. 7. El cual está conformado por el tubo fotomultiplicador (PMT Hamamatsu R5912), encargado de sensar los fotones producidos por el efecto Cherenkov en el tanque de agua, una tarjeta digitalizadora que se conecta a través de un Hirose FX2 a la FPGA (Nexys II Xilinx Spartan-3E de Digilent), sensores que permiten registrar información de temperatura y presión atmosférica (HP03) y de posicionamiento (GPS Motorola UT Plus On-Core), y un computador embebido (Cubieboard 2) con capacidad de 4 GB Nand Flash para ejecutar en el escritorio de Ubuntu en donde se envían los datos para finalmente ser almacenados en un disco duro en formato .bz2 para después ser analizados por algoritmos.

Figura 7: Diagrama de bloques de la electrónica del WCD. La base del PMT se conecta a la tarjeta digitalizadora para entregar el pulso y alimentarse de las tensiones necesarias para su funcionamiento. La tarjeta digitalizadora a su vez se conecta a la FPGA Nexys II, allí tiene como entrada la tensión de la línea base y la tensión de control de la fuente de HV para el PMT. La FPGA tiene conectado a sus periféricos de entrada un GPS y un sensor de temperatura, de forma adicional está conectada a un computador embebido Cubieboard para la carga del firmware a la FPGA, por último el sistema embebido se encuentra conectado a un disco duro para el almacenamiento de los archivos.



**2.1.2.1 Fotomultiplicador (PMT):** Los PMTs Fig. 8, son dispositivos que convierten la luz en una corriente eléctrica medible mediante el efecto fotoeléctrico. El PMT es sensible a ciertas longitudes de onda. La luz en el rango del visible o en el rango ultravioleta libera fotones hacia un fotocátodo, el cual convierte la luz incidente en una corriente de electrones, Fig. 9. El fotocátodo es una capa muy delgada de un semiconductor ubicado en el interior de la ventana de entrada [16].

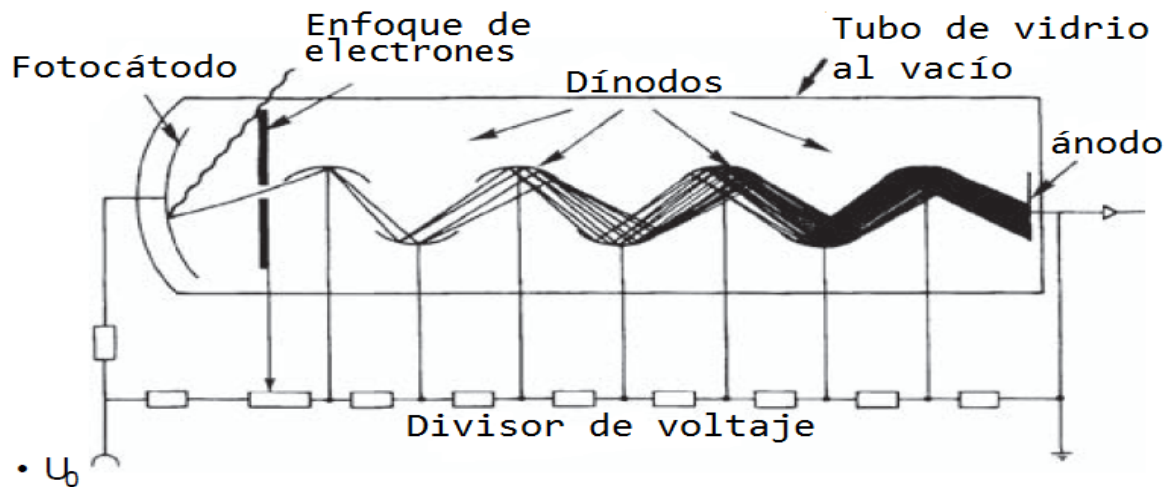
Figura 8: Fotomultiplicador Hamamatsu R5912.



El PMT es polarizado conectando una fuente de alto voltaje (HV) al ánodo. La corriente de electrones emitida por el fotocátodo es colectada y enfocada sobre la primera etapa del multiplicador de electrones, encargado de amplificar la fotocorriente primaria usando electrodos de emisión secundaria o dínodos para producir una corriente medible en el ánodo. Hay un campo eléctrico constante entre los dínodos para arrancar, acelerar y guiar los electrones a lo largo del sistema de multiplicación (dínodos conectados a una serie de diferencias de potencial en cascada). La emisión de electrones secundaria es similar al efecto fotoeléctrico, solo que el fotón incidente es reemplazado por un electrón.

El voltaje entre el fotocátodo y el ánodo, es dividido por un arreglo de resistencias. Esta

Figura 9: Principio de funcionamiento de un fotomultiplicador, el sistema de electrodos está montado en un tubo de vacío. El fotocátodo convierte la luz incidente en una corriente de electrones por efecto fotoeléctrico, después de la emisión del fotocátodo, los electrones en el PMT son colectados y enfocados sobre la primera etapa del multiplicador de electrones. El multiplicador de electrones se encarga de amplificar la fotocorriente primaria usando dínodos para producir una corriente medible en el ánodo. Hay un campo eléctrico constante entre los dínodos para acelerar y guiar los electrones a lo largo del multiplicador. El divisor de voltaje consiste en un arreglo de resistencias que dividen el voltaje entre el fotocátodo y el ánodo, esta división es la encargada de alimentar los dínodos.

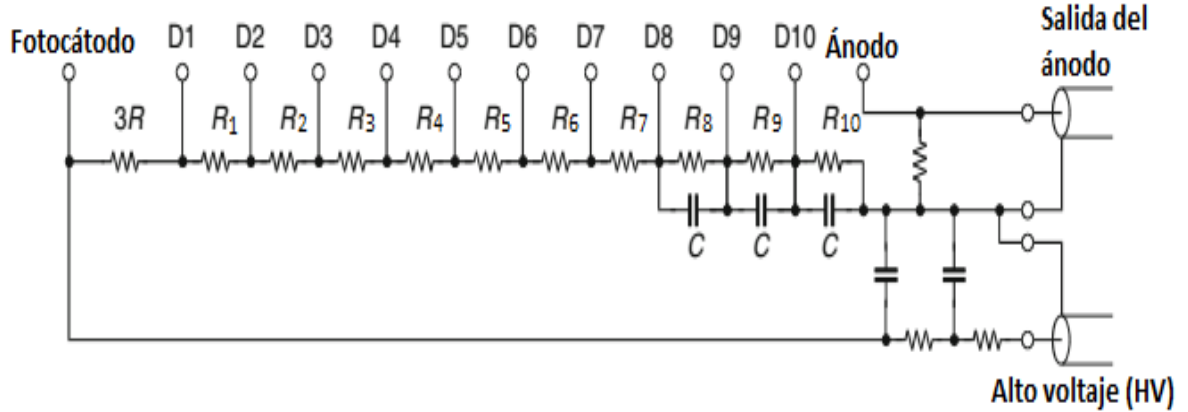


Fuente: [16]

división de voltaje es la encargada de alimentar los dínodos entre el fotocátodo y el ánodo de modo que el HV aplicado no es lineal. El arreglo de resistencias se escoge de tal manera que prevenga la ocurrencia de grandes variaciones de voltajes entre dínodos, ya que esto puede causar cambios en la ganancia total y en la linealidad del PMT. La Fig. 10 muestra la configuración de un PMT junto con un divisor de tensión resistivo típico que aplica los voltajes de los dínodos. Los electrones que se mueven desde el último dínodo al ánodo forman la señal de ánodo. Sin embargo al aplicar un HV al ánodo se produce que el pulso se superponga con un nivel de DC del mismo valor del HV, para evitar esto, se conecta un capacitor de desacople a la salida del ánodo que elimina ese nivel de DC, obteniendo así solo la señal de interés. El PMT trabaja de manera lineal, es decir, la corriente de salida es proporcional al número de fotones incidentes [15].

La ganancia del PMT depende de la tensión de polarización. Dada una ganancia de dínodo  $G$ , donde la ganancia es proporcional a la diferencia por voltaje entre dínodos, la ganancia

Figura 10: Circuito divisor de voltaje para un tubo fotomultiplicador. Las relaciones de voltaje entre los diversos electrodos se establecen mediante el valor de las resistencias.  $D_1$  a  $D_{10}$  son las conexiones de los dínodos.



Fuente: [15]

total de un PMT con  $N$  dínodos es  $G^N$ , esto se explica con más detalle en la sección 3.1.

**2.1.2.2 Base de polarización:** El PMT se conecta a una base donde se encuentra el divisor resistivo, la fuente de alimentación de HV (convertor DC/DC C20 de EMCO) y un preamplificador para acondicionar la amplitud de la salida del pulso proveniente del último dínodo. El HV cubre el rango entre 0 a 2000V y es controlado por una baja tensión de 0V a +5V, la cual es proporcionada por la FPGA con una salida PWM. El PMT tiene dos señales de salida las cuales son los pulsos del ánodo y del dínodo amplificado [19].

En la base de polarización son importante tres conectores: el conector SMA hembra donde salen los pulsos del ánodo y dínodo, el conector DB15 donde se suministran las tensiones de polarización, control y el HV y el conector circular azul donde se conecta el PMT, Fig. 11.

En la Tabla 1 se resumen las conexiones que se deben realizar sobre el conector DB15.

**2.1.2.3 Electrónica de digitalización:** La tarjeta digitalizadora se encarga de hacer un muestreo mediante un ADC - AD9203ARU a una frecuencia de 40MHz y una resolución de 10 bits al pulso de corriente que entrega la base del PMT, además provee el voltaje requerido para la fuente de alimentación y los demás componentes en la base del PMT.

La digitalizadora tiene tres canales de adquisición independientes, cada canal cuenta con tres etapas: un OPAM de voltaje, implementado con un amplificador de realimentación de

Figura 11: Base de polarización del PMT. En amarillo se resalta el conector SMA donde salen los pulsos de ánodo y del dínodo (amplificado), en rojo el conector DB15 con su respectiva enumeración de los pines y el conector circular azul del centro donde se conecta el PMT, en naranja se señalan los pines del conector donde se conecta la señal de ánodo y cátodo dada por el PMT Hamamatsu R5912.

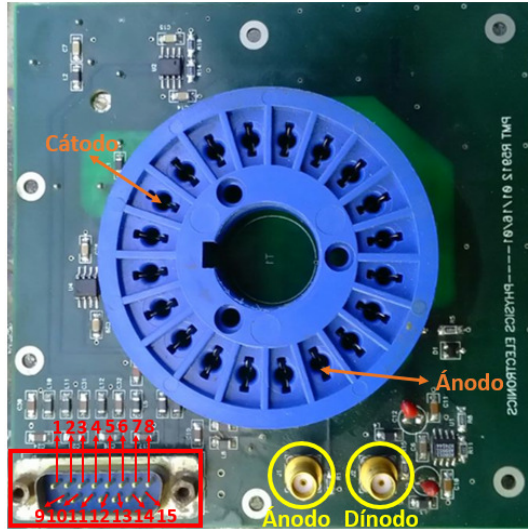
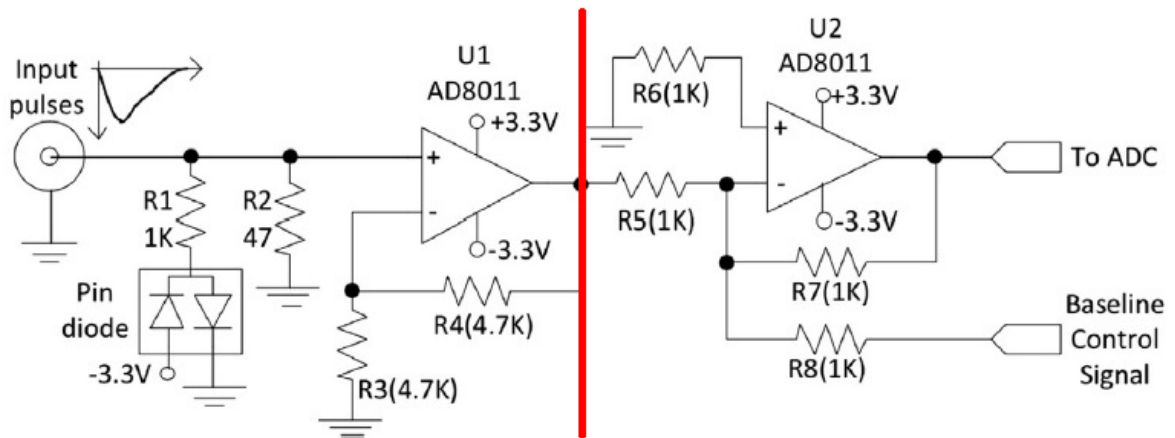


Tabla 1: Conexión de los pines del conector DB15 de la base de polarización.

Número de Pin	Debe ir conectado a
1	+3.3V
2	-3.3V
3	+5V
4	+12V
5	Tensión de control de HV, puede ir desde 0V a +2.5V
6	No conectar (NC)
7	No conectar (NC)
8	No conectar (NC)
9	GND
9	GND
11	GND
12	GND
13	GND
14	No conectar (NC)
15	No conectar (NC)

corriente (CFA-AD8011) en una configuración no inversora, que actúa también como filtro anti-aliasing, un sumador análogo destinado a la estabilización de las líneas bases y el chip ADC con el fin de hacer una copia digital de los pulsos análogos del detector. En la Fig. 12 se presenta el diagrama esquemático de las dos primeras etapas de un canal de adquisición.

Figura 12: Diagrama esquemático de un canal de adquisición de las dos primeras etapas. Compuesto por un amplificador de voltaje que actúa también como filtro anti-aliasing y una etapa de estabilización de la línea base antes que los pulsos lleguen al ADC. La etapa de estabilización es controlada por la FPGA, la cual toma el valor de temperatura y con respecto a este, hace la corrección necesaria para que la línea base permanezca en el mismo valor sin importar las variaciones de temperatura.



Fuente: [19].

La primera etapa corresponde a la sección del circuito que se plasma en la parte izquierda de la Fig. 12, es decir, el circuito que se encuentra antes de la delimitación establecida por la línea roja, allí se puede observar que la entrada tiene una resistencia de  $\sim 50\Omega$  con el fin de mermar reflejos en la señal cuando esta sea conectada a la entrada del OPAM. Lo anterior es necesario, puesto que, cuando se requiere conectar dos circuitos y sus impedancia de salida y entrada son diferentes se producen reflexiones, estas pueden ser constructivas o destructivas dependiendo de los valores de dichas impedancias. Es imprescindible evitar esto, pues, si es constructiva puede que la señal aumente tanto su amplitud y sature el sistema o peor aún, lo dañe, y en caso de que sea destructiva, puede llegar a disminuir la señal de tal manera que la amplitud tienda a cero, perdiendo toda la información.

Esta etapa cuenta además con dos diodos para la protección de entrada al CFA y este amplificador dispuesto en una configuración no inversora con ganancia de aproximadamente dos, (ver ecuación 2.1).

$$\frac{V_O}{V_I} = 1 + \frac{R4}{R3} \quad (2.1)$$

La segunda etapa (la parte derecha de la Fig. 12), se encarga de invertir los pulsos, para luego ser digitalizados, el voltaje de la señal debe ser positivo. Esta etapa también suma la línea base entregada por la FPGA.

La ganancia de un sumador está dada por la ecuación (2.2), en este caso la ganancia es -1, con lo cual no se tiene ninguna alteración diferente a la inversión de la amplitud.

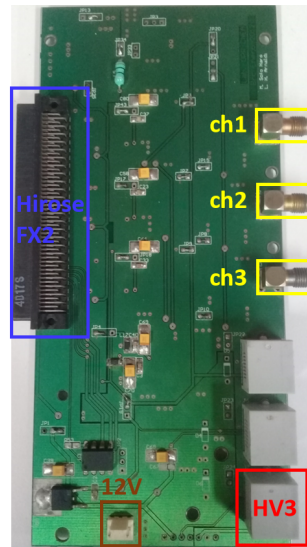
$$\frac{V_O}{V_I} = -R7\left(\frac{V_{Base\_line}}{R8} + \frac{V_{In}}{R5}\right) \quad (2.2)$$

Luego de estas etapas, el pulso es entregado al convertidor análogo-digital ADC-AD9203ARU, que muestrea la amplitud de la señal de entrada a una frecuencia de  $40MHz$ , con una resolución de 10 bits. Con la frecuencia del ADC se tiene una muestra cada  $25ns$  y un pulso tiene una duración aproximada de entre  $150ns$  a  $200ns$ . Nyquist afirma que la frecuencia mínima para obtener una buena resolución debe ser de al menos dos veces el ancho de banda, en el caso de estudio es de  $40MHz$ , frecuencia dos veces superior a la frecuencia de Nyquist. Con lo dicho, se infiere que hay una buena reconstrucción (para el fin del detector) de los pulsos generados por el PMT.

Como se mencionó con anterioridad, la señal de control para el HV de la base de polarización del PMT la genera la FPGA modulando el ciclo útil de una señal PWM, esta es máximo  $3.3V$ , asumiendo un ciclo útil del 100 %, por lo cual se debe amplificar la señal de control, ya que debe tener un máximo de  $5V$  y de esta manera aprovechar el rango dinámico de la fuente HV. El OPAM LM324 es el encargado de realizar la amplificación mediante una configuración no inversora y a una ganancia de 2.5.

En la Fig. 13 se observan los conectores de la tarjeta digitalizadora, la cual se conecta a la Nexys II mediante el conector Hirose FX2. La placa puede digitalizar simultáneamente 3 canales de pulsos (*ch1*, *ch2* y *ch3*), se conectan solo dos, estos son conectores SMA hembra que se conectan a la base del PMT, Fig. 11, usando dos cables coaxiales RG58 de  $50\Omega$  calibre 24 con cada extremo terminado en conectores SMA macho, en este detector solo se hace uso de los canales *ch1* y *ch3* para conectar los pulsos del ánodo y dínodo, respectivamente. El cuadro en rojo es el conector RJ45 que provee la tensión de alimentación a la base de polarización que se conecta al conector DB15 por medio de un cable de red UTP, Fig. 14.

Figura 13: Tarjeta digitalizadora. El cuadro azul es el conector Hirose FX2 por donde se conecta esta tarjeta a la FPGA Nexys II, que también tiene un conector Hirose FX2 de 100 pines, los cuadros en amarillo son los canales de adquisición de pulsos (conectores SMA hembra), el cuadro en rojo es el conector RJ45 que provee la tensión de alimentación a la base del PMT y la tensión de control de HV, finalmente el cuadro marrón es el conector de entrada de fuente de alimentación de 12V para la tarjeta digitalizadora.

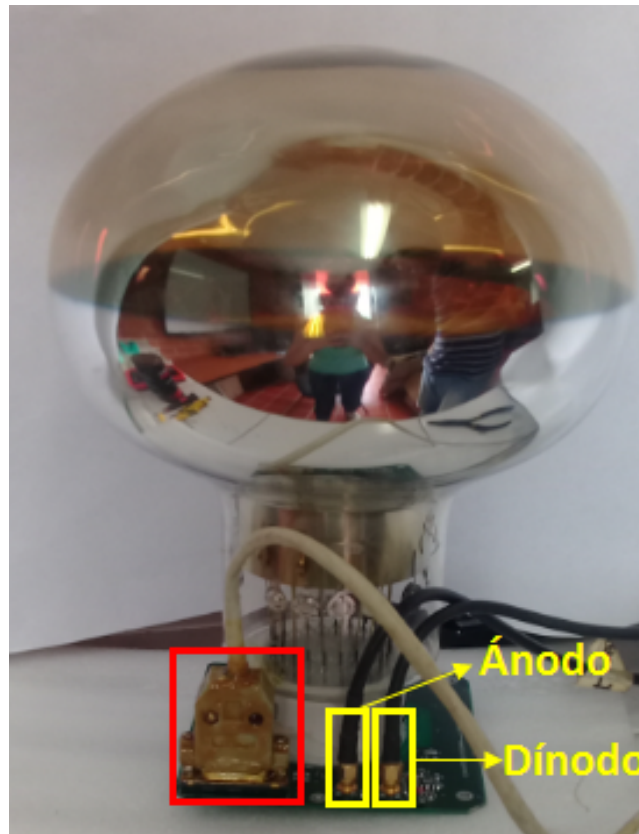


**2.1.2.4 FPGA Xilinx Spartan 3E Nexys II de Digilent:** La electrónica del WCD está compuesta principalmente por la tarjeta de desarrollo Nexys II: FPGA Xilinx Spartan 3E compuertas-1200k, Fig. 15, responsable de la adquisición y pre-procesamiento de los datos, el ajuste de los umbrales y voltajes de polarización, así como del control y comunicación con los periféricos.

El firmware de la FPGA es una combinación de bloques jerárquicos implementados en el lenguaje de programación VHDL, Fig. 16, derivado del proyecto LAGO. Hay varios de estos a cargo de las diferentes tareas, uno de los bloques es el encargado de administrar la fuente de alta tensión correspondiente del PMT, otro bloque implementa el algoritmo de corrección de la línea base, el firmware también implementa protocolos de comunicación estándar (SPI,  $I^2C$  y UART) para administrar los periféricos conectados.

Por otra parte, la Nexys II genera la señal de reloj de  $40MHz$  para el ADC y dos contadores internos. Uno de ellos, un contador de 30 bits que se incrementa cada vez que un pulso supera el umbral de discriminación, es decir, las amplitudes por debajo de este umbral se asumen como ruido y se omiten. Cuando se cumple la condición de activación de al menos un

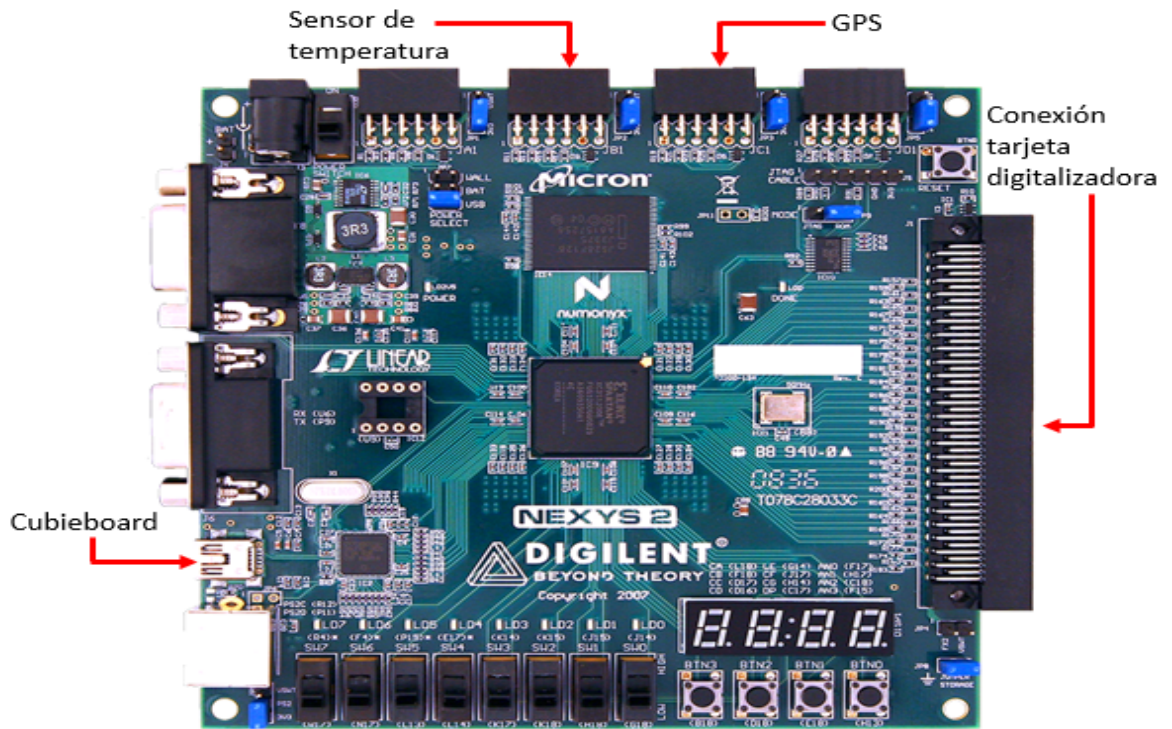
Figura 14: Fotomultiplicador Hamamatsu R5912 conectado a la base de polarización. En rojo el conector DB15 que provee la alimentación a la base del PMT y la tensión de control de HV mediante un cable de red UTP (cable gris) y en amarillo los cables coaxiales RG58 de  $50\Omega$  calibre 24, 30V con cada extremo terminado en conectores SMA machos (cables negros).



canal, lo almacena mediante un vector de doce muestras, por ende se tendrán tres vectores independientes, uno por cada canal. El segundo contador, se encarga de contar el número de flancos de subida del reloj en el segundo actual. Si se tiene conectado un GPS, la señal PPS corrige los desfases del contador interno, si no hay un GPS conectado, el contador se utiliza como una señal de reloj interno, por ende, ya no se estará acoplado a una señal de referencia y el cambio de segundo lo dará este contador y no el GPS. Estos contadores se plasman en el archivo de datos como en la Fig.17, en la parte izquierda se observa un conjunto de muestras de un pulso y al final de este los respectivos contadores y canal de disparo.

Este contador también asigna una marca de tiempo (en nano-segundos) a cada pulso registrado. Los pulsos adquiridos se etiquetan con tres números: el conteo de pulsos, la estampa de tiempo y una máscara de 3 bits que identifica los canales que cumplen las condiciones de activación, Fig.17 [19].

Figura 15: Tarjeta de desarrollo Nexys II de Digilent: FPGA Xilinx Spartan 3E compuertas-1200k.



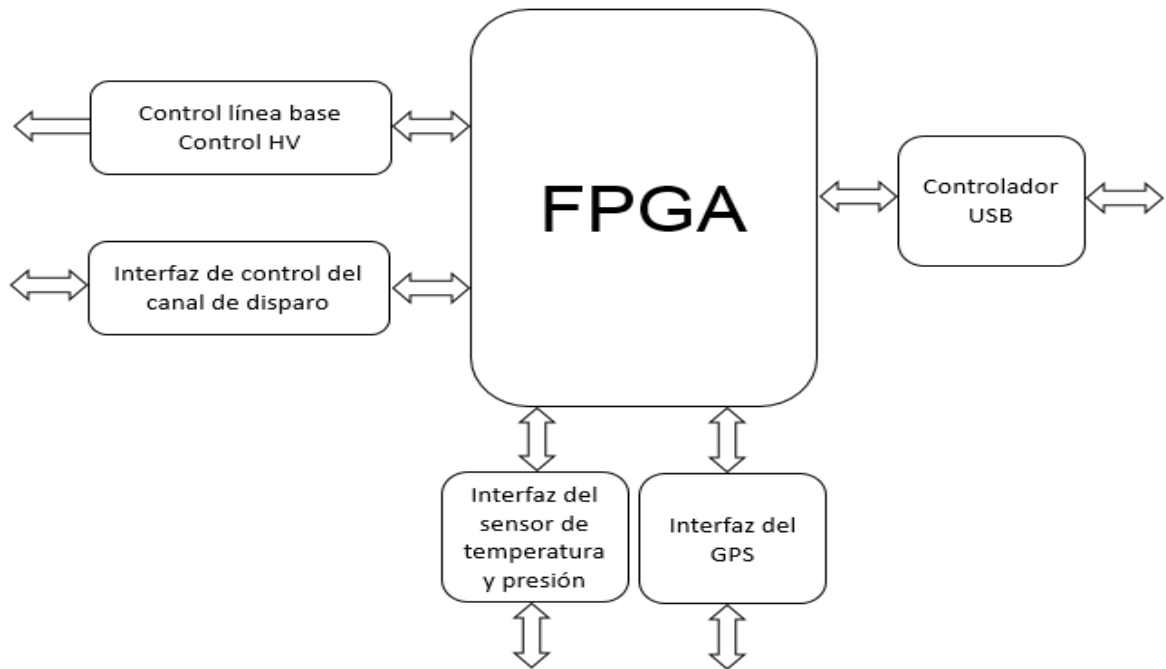
Fuente: Digilent.

Con dicho orden de ideas, el archivo de salida final tendrá una estructura organizada de la siguiente manera: al inicio un encabezado que da información de los parámetros (umbral para cada canal y tensión para el PMT) con los que se obtuvieron los datos, luego una toma inicial de hora y fecha impresa de la forma «# x h hora:minutos:segundos dia/mes/año 'estampa\_en\_nanosegundos'», posteriormente tres columnas, donde cada una equivale a un canal, al final dos líneas, la primera con la información del canal activado y la estampa temporal en nanosegundos «# t 'canal\_activación' 'nanosegundos' » y la segunda, con el contador interno de pulsos.«# c 'contador\_interno\_pulsos'».

Cada segundo se imprimen dos líneas: La fecha y la temperatura, presión atmosférica y altitud, estas últimas de la forma «# x s 'temperatura' C 'presión' hPa 'altitud' m ». Cabe resaltar que los únicos datos que no son precedidos de un '#' son los pulsos.

**2.1.2.5 Sensor de temperatura y presión:** El WCD es vulnerable a los cambios de temperatura, es decir, su correcto funcionamiento está ligado a la temperatura del

Figura 16: Bloques jerárquicos del firmware de la FPGA. Consiste en un banco de registro principal, accesible para los periféricos conectados.



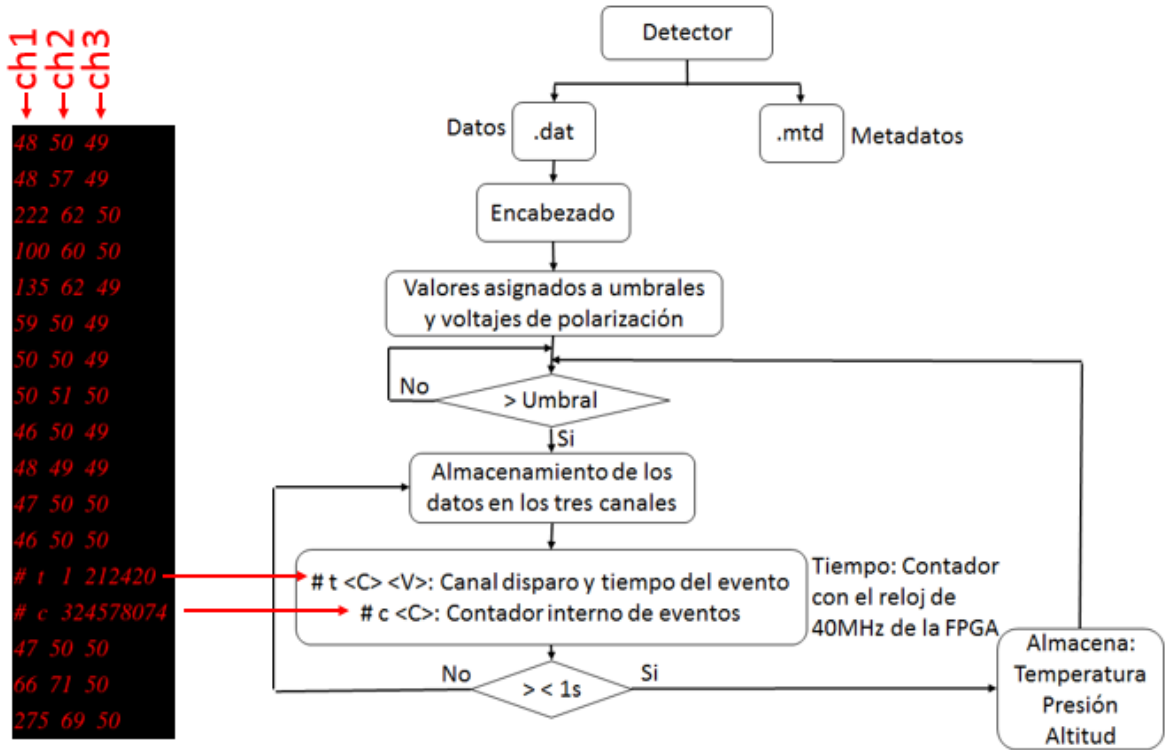
lugar en el que se implemente. Esta dependencia puede ser visualizada en la Fig.18, donde se plasma la variación de la línea base en función de la temperatura y como mejora cuando se aplica el algoritmo de corrección.

Si la corrección no se implementa, no es posible comparar correctamente factores como las amplitudes de los pulsos, no solo entre los detectores, si no también entre los canales. Además, puede que se pierdan pulsos, ya que si la línea base disminuye notablemente, algunos pulsos que deberían cumplir con el filtro de aceptación, no lo harán o caso contrario si esta línea base aumenta considerablemente, los pulsos que no debían ser aceptados, lo serán, teniendo distorsión y errores en la adquisición de datos.

En este caso, el sensor HP03 es el utilizado para medir la presión y temperatura. Este sensor cuenta con una resolución de 15 bits, una tensión de alimentación entre 2.2 V y 3.6 V, un rango de operación para la temperatura de  $-30^{\circ}C$  a  $80^{\circ}C$ , un protocolo de comunicación I<sup>2</sup>C y tiene como entrada una señal de CLK de 32kHz.

La FPGA mantiene una frecuencia de muestreo de 1Hz para este sensor, por lo tanto, cada segundo se hace la corrección de la línea base, dependiendo del valor de temperatura de modo que todos los pulsos están sobre  $\pm 50$  ADC.

Figura 17: Estructura de los datos almacenados por la Nexys II cuando se cumple la condición de activación en al menos uno de los tres canales de la tarjeta digitalizadora. En la parte izquierda una captura de una parte del archivo de datos generado por el WCD Chitagá, esto para mostrar como se imprimen los contadores en el archivo.

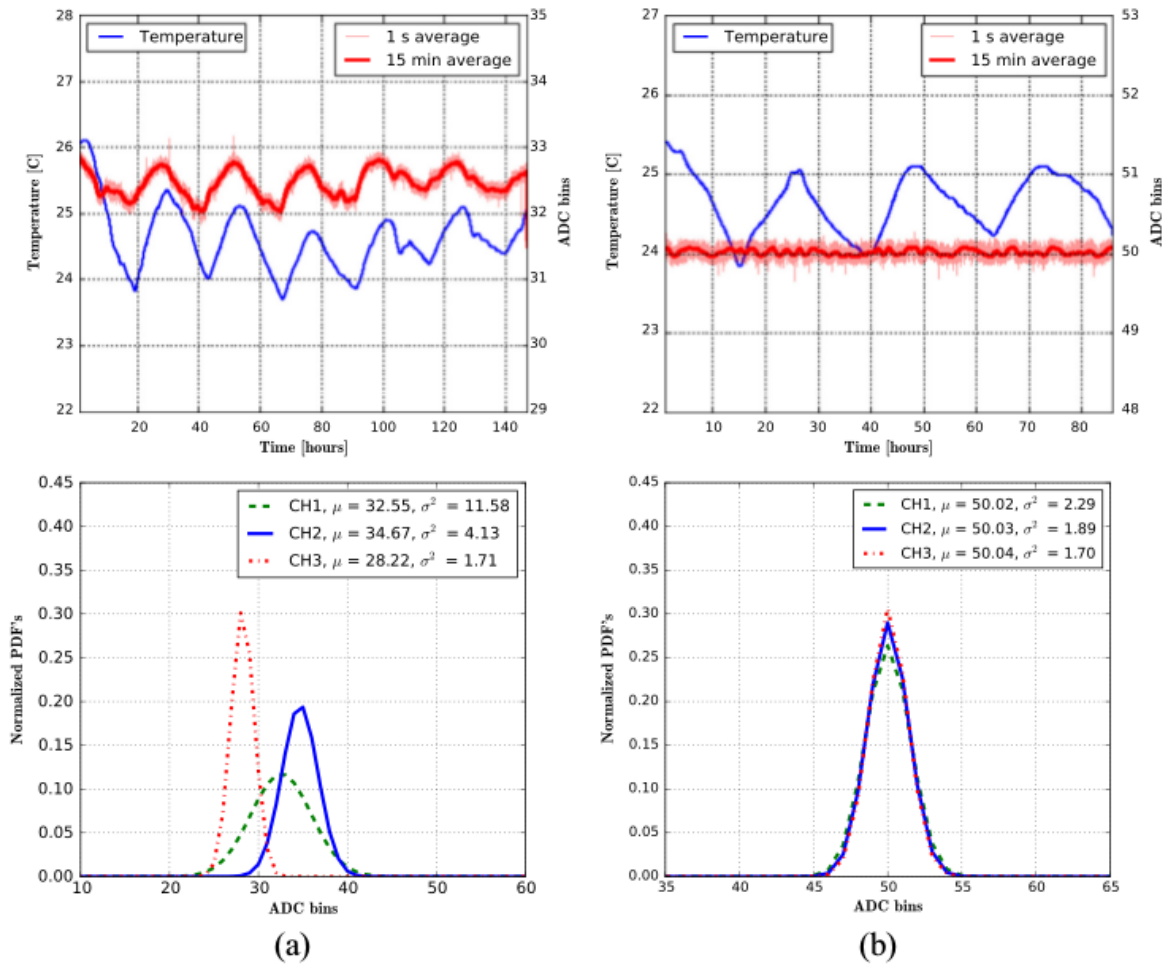


**2.1.2.6 Sistema de Posicionamiento Global (GPS):** El arreglo necesita un sistema de sincronización temporal para el estudio de la EAS y un GPS es la herramienta más factible de lograr esto.

La sincronización se realiza a través de la señal PPS (Pulse Per Second) que ofrece el GPS. Este envía un pulso, el cual es usado por la FPGA para corregir su reloj interno, dado que cada detector tiene un GPS y sus señales PPS están sincronizadas, entonces las FPGA se sincronizarán de manera indirecta a un mismo reloj.

Lo importante de la sincronización está en que cuando un pulso sea aceptado por el filtro de amplitud y se almacenen sus muestras, al final estas se marquen con una estampa de tiempo dada en nano-segundos, dato que posteriormente se usarán para el estudio de la trayectoria de la EAS, de modo que se llegará a un  $\Delta_t$ , con el cual se procederá a analizar si en este rango de tiempo escogido, los tres detectores se activaron, en caso que suceda, se puede proceder a

Figura 18: Línea base sin (a) y con (b) el algoritmo de corrección. En los paneles superiores se muestra la evolución de la línea base (gráfico rojo) en función del tiempo. La correlación con la temperatura (gráfico azul) se puede observar claramente, cuando no se aplica ninguna corrección (a). En los paneles inferiores, se muestran los histogramas de las tres líneas base, y se puede apreciar como la desviación disminuye y las tres líneas base permanecen iguales entre sí.



Fuente: [19].

calcular los parámetros de la EAS.

**2.1.2.7 Computador embebido (CubieBoard 2):** Es el sistema embebido con el que se tiene acceso al detector. Su función es cargar el firmware a la FPGA y de almacenar los archivos en el disco duro que se tiene conectado, este con una capacidad de 500 GB. Cada vez que el sistema detecta un cambio de hora, se crea un nuevo archivo, mientras

que el archivo actual es cerrado y comprimido. El nombre de cada uno de estos se etiqueta con el seudónimo que se le asignó más la hora registrada ya sea por el GPS o por la FPGA.

La Cubieboard A20 es un computador embebido usado comúnmente por la necesidad de tener un sistema portable o que se pueda dejar administrando alguna tarea sin invertir mucho dinero, para el caso de estudio es perfecto, por el tamaño, el precio, el cumplimiento de lo necesario para el proyecto, en cuanto al procesamiento y, su fácil acceso desde otro computador haciendo uso del protocolo ssh.

Algunas de las características:

- ❖ Procesador Dual-core ARM Cortex-A7)
- ❖ 1GB DDR3 @ 960Mhz
- ❖ HDMI 1080p
- ❖ 100M Ethernet
- ❖ 4GB Nand Flash
- ❖ 2 puertos USB
- ❖ Entrada micro SD
- ❖ Un disco duro
- ❖ 96 pines
- ❖ Compatible con sistema operativos con núcleo linux

## *Capítulo 3*

# **RESULTADOS**

### **3.1. MODELADO Y SIMULACIÓN DEL FOTOMULTIPLICADOR HAMAMATSU R5912**

En la sección 2.1 se habló del funcionamiento del fotomultiplicador, el cual es el elemento sensible usado para registrar los fotones Cherenkov generados por el paso de una partícula cargada por el WCD. Por esta razón se hace necesario modelar y simular el PMT R5912 y la red resistiva para garantizar su comportamiento lineal.

**3.1.1 Modelo del PMT Hamamatsu R5912:** La ganancia total del PMT se define como la relación entre la corriente de salida del ánodo  $I_a$  y la corriente generada en el fotocátodo  $I_k$ ,

$$G = \frac{I_a}{I_k} \quad (3.1)$$

Por otro lado, la ganancia total del PMT se puede expresar como una productoria de las ganancias por etapa, como:

$$G = n \prod_{i=1}^N g_i \quad (3.2)$$

donde  $g_i$  es la ganancia en cada etapa,  $N$  el número de dínodos y  $n$  es la eficiencia. La ganancia  $g_i$  está determinada por el voltaje aplicado entre dínodos  $V_i$ , por lo tanto puede ser expresada por

$$g_i = k_i V_i^\alpha \quad (3.3)$$

donde  $k_i$  es la constante de proporcionalidad y  $\alpha$  es un parámetro intrínseco.

La ganancia general del PMT (3.2), es la productoria de la ganancia individual inter-dínodos (3.3) que a su vez puede ser expresada en términos del alto voltaje de alimentación  $V_B$ . Si  $n \approx 100\%$ , entonces

$$G = \prod_{i=1}^N k_i (V_B \varepsilon_i)^\alpha \quad (3.4)$$

donde  $\varepsilon_i$  es la fracción del voltaje de alimentación  $V_B$  aplicado en la etapa debido al circuito divisor de tensión.

Asumiendo  $\varepsilon_i = \varepsilon$  y  $k_i = k_o$  para todos los dínodos, (3.4) se puede expresar de la siguiente forma:

$$G = k_o^N (V_B \varepsilon)^{N\alpha} \quad (3.5)$$

Las formulas mostradas anteriormente fueron tomadas de "SPICE Model of Photomultiplier Tube Under Different Bias Conditions" [22].

### 3.1.2 Cálculo de los parámetros del PMT Hamamatsu R5912:

Teniendo una expresión para la ganancia entre el cátodo y el ánodo (3.5), se hallan los valores de la constante de proporcionalidad  $k_o$  y del parámetro intrínseco  $\alpha$ .

Para calcular los valores de dichas constantes se seleccionan dos puntos  $[V_1, G_1]$  y  $[V_2, G_2]$  de la curva característica de ganancia típica versus el voltaje de alimentación, Fig. 18, mostrada en la hoja de datos del PMT R5912 de Hamamatsu Photonics, el cual cuenta con diez dínodos,  $N=10$ , Fig. 20. Los valores elegidos para este cálculo fueron  $[1000V, 310^5]$  y  $[1500V, 710^6]$ , usando estos puntos es posible construir dos ecuaciones (3.6) y (3.7) para resolver dos incógnitas ( $k_o, \alpha$ ).

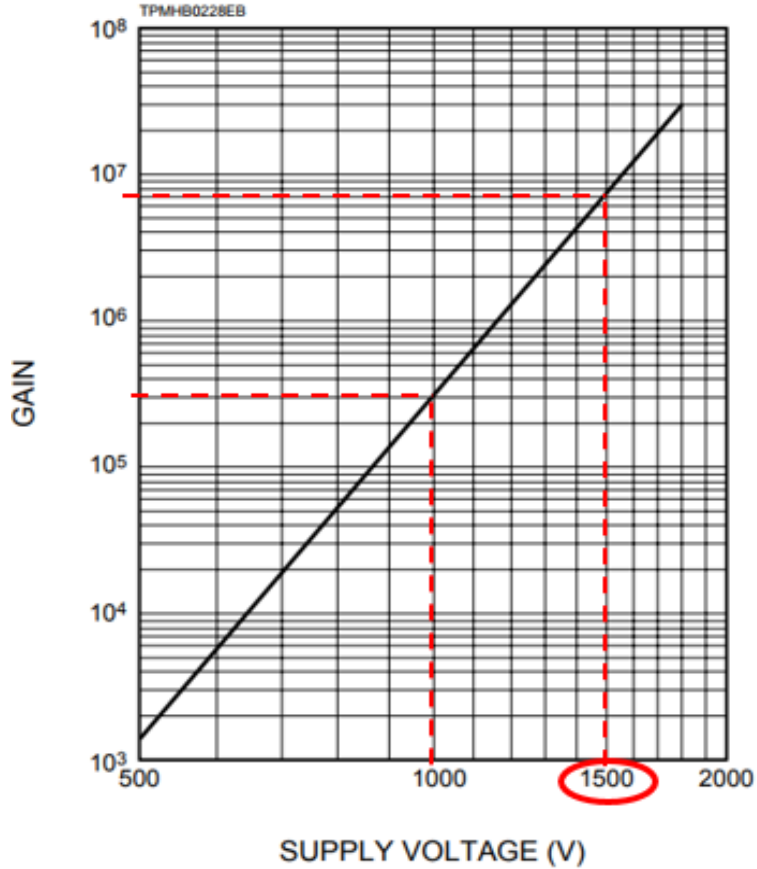
Es fundamental tener en cuenta al momento de escoger los dos valores para el cálculo de la ganancia que alguno de ellos corresponda al voltaje de alimentación que se especifica en la tabla dada por el fabricante de la relación de distribución de voltaje Fig. 19, en este caso 1500 V.

$$G_1 = k_o^N (V_1 \varepsilon)^{N\alpha} \quad (3.6)$$

$$G_2 = k_o^N (V_2 \varepsilon)^{N\alpha} \quad (3.7)$$

De igual manera para calcular el valor de la fracción divisora de voltaje entre dínodos  $\varepsilon$ , se usa la ecuación (3.8), cuyos datos son tomados directamente de la hoja de datos del PMT, Fig. 19.

Figura 18: Curva de la ganancia característica del PMT R5912 dependiendo de su voltaje de polarización, dada por el fabricante. Las líneas punteadas en rojo señalan los dos puntos que se tomaron para calcular los valores de las constantes  $k_o$  y  $\alpha$ . El círculo en rojo corresponde al valor del voltaje de alimentación que se especifica en la tabla dada por el fabricante de la relación de distribución de voltaje Fig. 19.



Fuente: [17].

Figura 19: Relación de distribución de voltaje del PMT R5912. Tabla dada por el fabricante. En rojo se resalta el voltaje de alimentación con el cual fue obtenido los datos de la tabla.

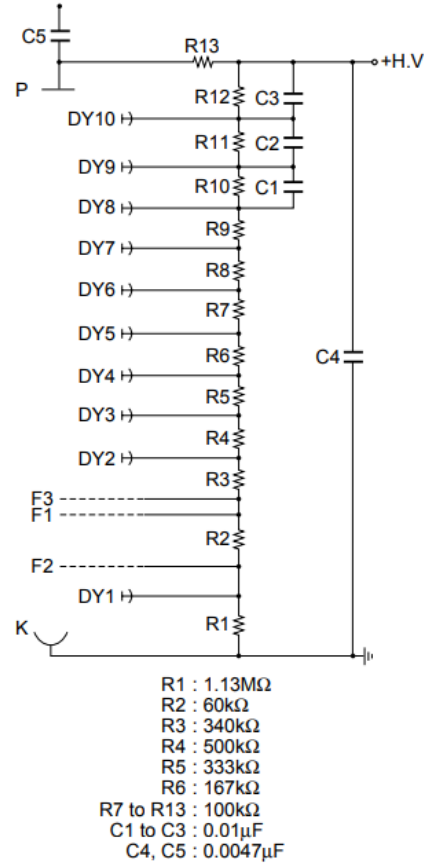
**Table 1: VOLTAGE DISTRIBUTION RATIO AND SUPPLY VOLTAGE**

Electrodes	K	Dy1	F2	F1	F3	Dy2	Dy3	Dy4	Dy5	Dy6	Dy7	Dy8	Dy9	Dy10	P
Ratio	11.3	0	0.6	0	3.4	5	3.33	1.67	1	1	1	1	1	1	1
Supply Voltage	1500Vdc														

K: Cathode, Dy: Dynode, P: Anode, F: Focus

Fuente: [17].

Figura 20: Configuración de los dínodos del PMT Hamamatsu R5912.



Fuente: [17].

$$V_B = (11,3 + 3,4 + 5 + 3,33 + 1,67 + 6)\varepsilon V_B \quad (3.8)$$

$$\varepsilon = \frac{V_B}{(11,3 + 3,4 + 5 + 3,33 + 1,67 + 6)V_B} \quad (3.9)$$

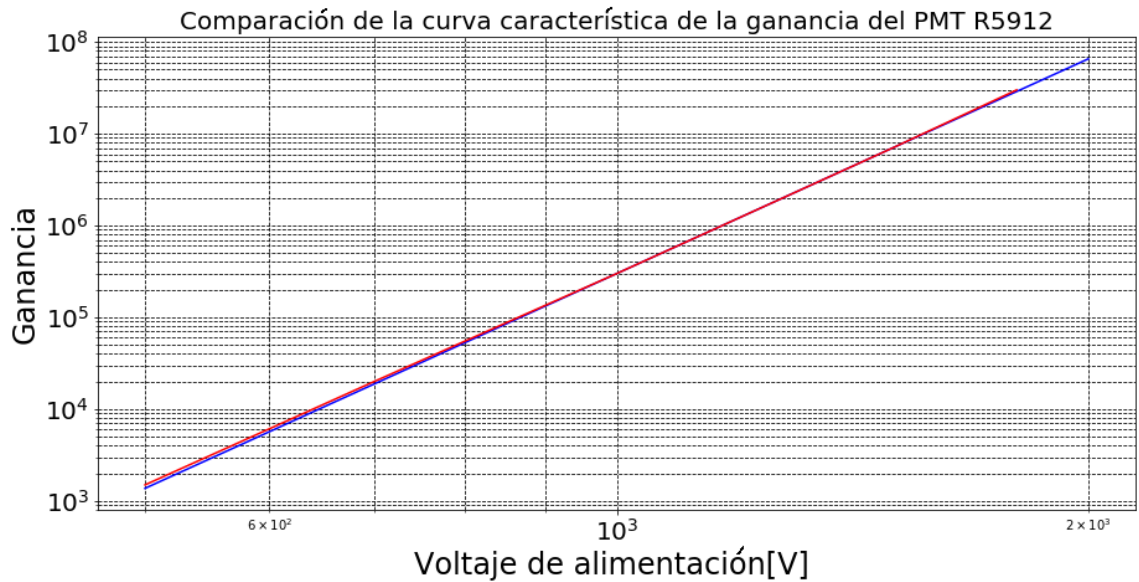
Despejando  $\varepsilon$  de la ecuación (3.8), se tiene la ecuación (3.9), así el valor de la constante es 0.0325732899. Luego, con la ecuación (3.7) y el par de puntos antes mencionados se hallan  $\alpha$  y  $k_o$ . Despejando  $k_o$  se obtiene (3.10) ,

$$k_o = \sqrt[N]{\frac{G_2}{(V_2\varepsilon)^{N\alpha}}} \quad (3.10)$$

Reemplazando (3.10) en (3.6) se encuentra que el valor de  $\alpha$  es 0.7768567234. Luego se reemplazan todos los valores en la ecuación (3.10), se obtiene  $k_o = 0.2357411517$ .

El objetivo de esta sección es encontrar los valores de los parámetros  $k_o$  y  $\alpha$  que representan correctamente la curva característica de ganancia del PMT. La Fig. 21, se obtuvo usando la ecuación (3.5) desde 500 V hasta 2000 V. Además, estos parámetros serán los valores de entrada en el circuito en Pspice.

Figura 21: Comparación de la curva de la ganancia característica del PMT R5912 dada por el fabricante (línea roja) con la del modelo matemático utilizado y los parámetros calculados (línea azul).



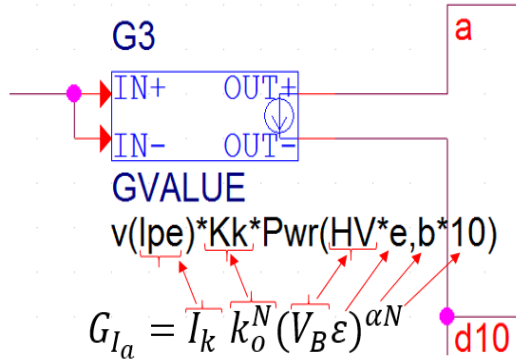
**3.1.3 Simulación en Pspice del PMT Hamamatsu R5912 y su red de polarización:** Para el modelado de los parámetros del PMT se hicieron las siguientes suposiciones y condiciones:

1. La constante de proporcionalidad  $k_o$  y el parámetro  $\alpha$  son iguales para todas las etapas.
2. La curva característica de ganancia versus el voltaje de alimentación y relación de distribución de voltaje son proporcionados por el fabricante.

Ahora con los valores hallados se procede a hacer la simulación en Pspice.

En el programa de simulación Pspice se hace un esquemático, en el que se simula el cátodo, el ánodo y los dínodos de la estructura del PMT, para esto se usa el bloque de ganancia

Figura 22: Bloque de simulación para el ánodo. Las constantes que se ingresan en el bloque de GVALUE son:  $V(I_{pe})$  es el voltaje en el nodo del circuito que corresponde a la corriente de entrada al cátodo compuesto por una fuente de corriente y una resistencia de  $1\Omega$ , por lo tanto la tensión en el nodo es el mismo que la corriente del cátodo  $I_k$ ,  $Kk$  es la constante de proporcionalidad elevada al número de dínodos del PMT R5912  $k_o^N$ ,  $HV$  es  $V_B$ , el voltaje de alimentación aplicado en la etapa debido al circuito divisor,  $e$  es el valor de la fracción de voltaje de alimentación  $\varepsilon$  y  $b$  es el valor del parámetro intrínseco  $\alpha$ .



GVALUE Fig.22, donde se escribe la expresión de la ganancia para cada uno de los dínodos (ver ecuación 3.11) y el ánodo (ver ecuación 3.12), respectivamente. Además, se pone una fuente de corriente de  $30nA$  de amplitud simulando el pulso incidente al PMT (corriente de cátodo) que se genera por la incidencia de los fotones Cherenkov. El número de fuentes de corrientes dependientes es igual que el número de electrodos del PMT los cuales son  $N+1$  ( $N$  dínodos y ánodo). En la Fig. 23 se muestra el circuito equivalente del modelo del PMT en Pspice.

$$G_{Id_i} = I_k \frac{k_o^N (V_B \varepsilon)^{N\alpha}}{(k_o V_i^\alpha)^{11-i}} (k_o V_i^\alpha - 1) \quad (3.11)$$

$$G_{I_a} = I_k k_o^N (V_B \varepsilon)^{N\alpha} \quad (3.12)$$

### 3.1.4 Resultados del modelado y simulación del PMT R5912:

Como primer paso, se simula la corriente del último dínodo y la del ánodo para verificar el correcto funcionamiento. En la Fig.24 se muestran los pulsos de corriente provenientes del ánodo y del último dínodo del PMT R5912, la amplitud de la corriente del ánodo es mayor debido a que la corriente es amplificada por medio del campo eléctrico desde el último dínodo hacia el ánodo. En la gráfica se representa la corriente de ánodo invertida  $-I(R50)$ , ya que por el comportamiento de las corrientes de los dínodos y la del ánodo se esperaba que una

Figura 23: Esquemático hecho en Pspice. En la parte izquierda se muestran los parámetros hallados como el valor de  $k_o^N = Kk$ ,  $\alpha = b$ ,  $\varepsilon = e$ , además se encuentra el circuito equivalente de la corriente de cátodo, las tensiones de polarización del amplificador de la señal del último dínodo con ganancia de 20, y la fuente de alta tensión  $HV=700V$ . A la derecha el bloque GVALUE de ganancia del ánodo y del último dínodo conectado a la etapa de amplificación e inversión.

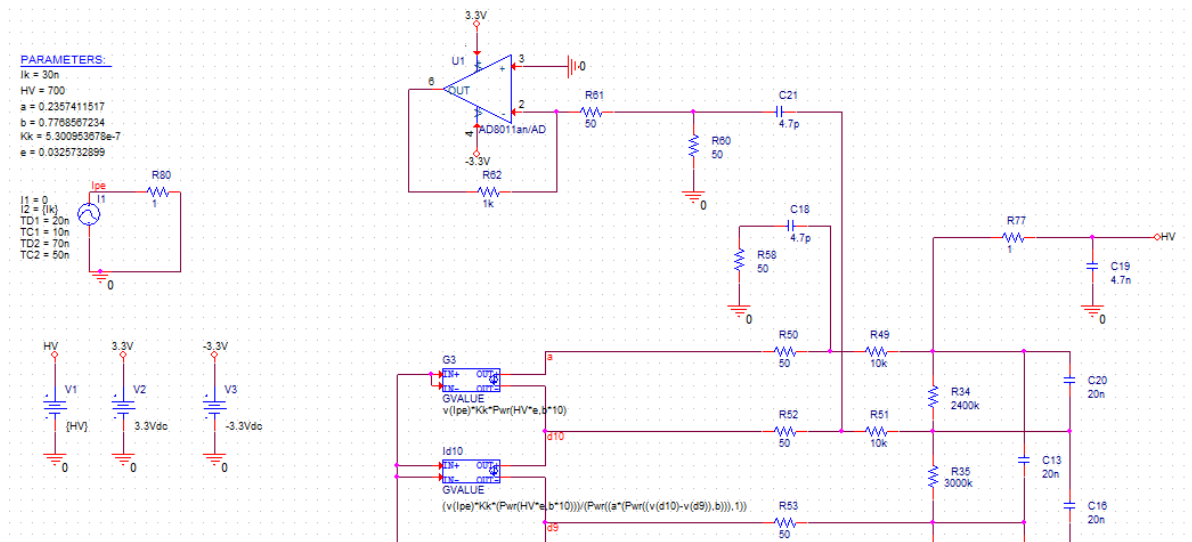
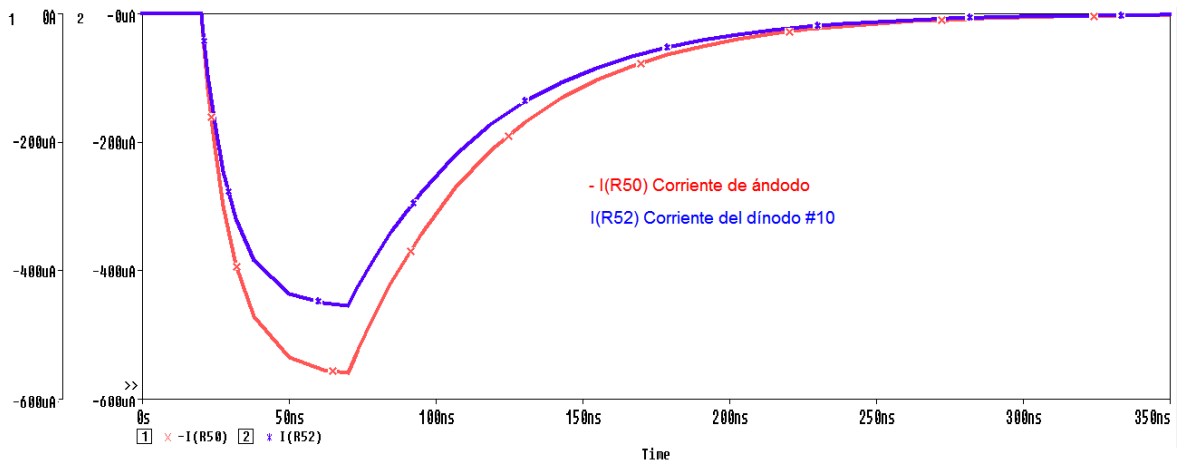


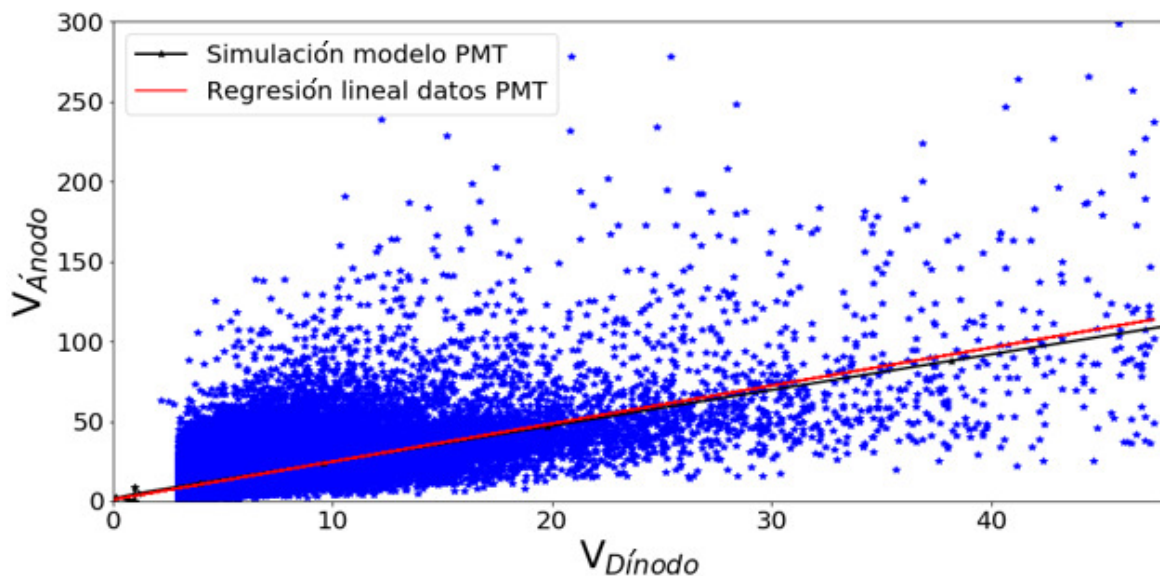
Figura 24: Simulación de corrientes hecha en Pspice. En rojo la corriente del ánodo (invertido) ya que el comportamiento de esta corriente es positiva y mayor debido a que el campo eléctrico producido por la diferencia de potencial entre el ultimo dínodo y el ánodo acelera los electrones hacia el ánodo, amplificando la corriente proveniente desde el último dínodo (en azul). Se gráfica la corriente de ánodo con sentido contrario para facilitar la comparación de las amplitudes entre las dos corrientes.



corriente sea positiva y la otra negativa. Se gráfica con sentido contrario para poder observar y comparar las amplitudes de las señales.

Luego, se obtienen datos de la ganancia del PMT dependiendo del HV variando desde  $400\text{ V}$  hasta  $1500\text{ V}$ , se toman los valores máximos del pulso del ánodo y del último dínodo. Se registran datos con el PMT con el fin de corroborar el modelo planteado para la simulación. Los datos de la simulación y los registrados por el PMT ubicado en el interior del WCD Chitagá se representan en la Fig 25. En la gráfica se observa el comportamiento lineal que tiene el PMT Hamamatsu R5912 y se compara con los datos obtenidos de la simulación en Pspice del modelo matemático, de esta forma se comprueba que tienen el mismo comportamiento, pues a medida que se aumenta la tensión en el dínodo de igual forma se incrementa la tensión en el ánodo.

Figura 25: Gráfica del valor medido en el dínodo y en el ánodo en Pspice y los datos registrados por el PMT R5912. La línea negra representa los datos de la simulación del modelo en Pspice y en rojo la regresión lineal de los datos registrados por el PMT ubicado en el interior del WCD Chitagá.



En la Fig. 26 se muestra el pulso del último dínodo del PMT simulado en Pspice después de pasar por la etapa de amplificación con un factor de 20, el pulso tiene una amplitud máxima de  $146.932\text{ mV}$ , el cual tiene el mismo comportamiento del pulso de tensión que se puede ver en la Fig. 27, que muestra un pulso de tensión del dínodo del PMT R5912 que se encuentra en el WCD.

La Fig. 28 representa de la tensión del último dínodo respecto al barrido de la corriente de cátodo entre  $1nA$  hasta  $90nA$  con pasos de  $5nA$ . Se puede ver que el modelo del PMT presenta un comportamiento lineal, a medida que se aumenta la corriente de cátodo el voltaje del último dínodo aumenta. Este modelo del PMT funciona correctamente para corrientes de cátodo hasta de  $90nA$ , ya que para valores superiores el modelo se desestabiliza y empieza a oscilar entre  $5V$  a  $20V$ , dejando de presentar un comportamiento lineal.

Figura 26: Simulación en Pspice del pulso de tensión del último dínodo con un factor de amplificación de 20.

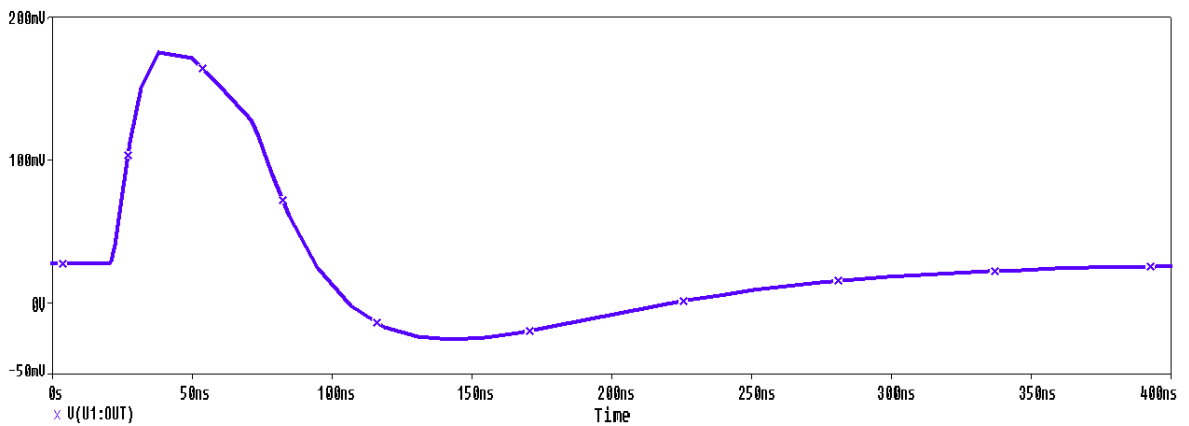


Figura 27: Pulso de tensión del último dínodo del PMT, visualizado en el osciloscopio. Este pulso está amplificado en un factor de 20 con respecto al pulso original del PMT.

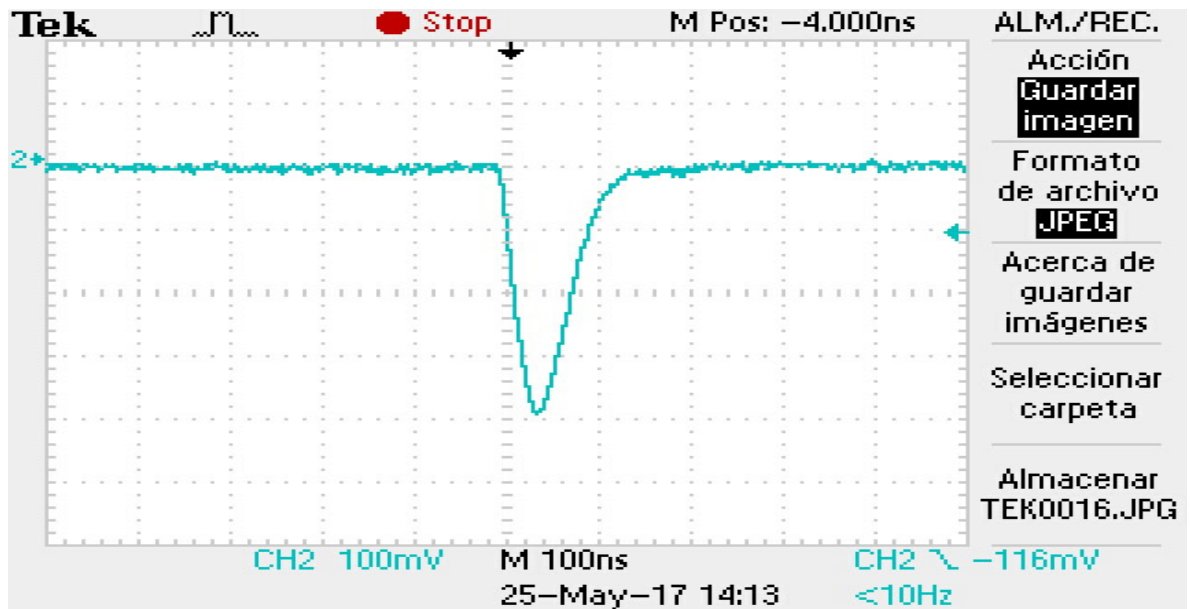
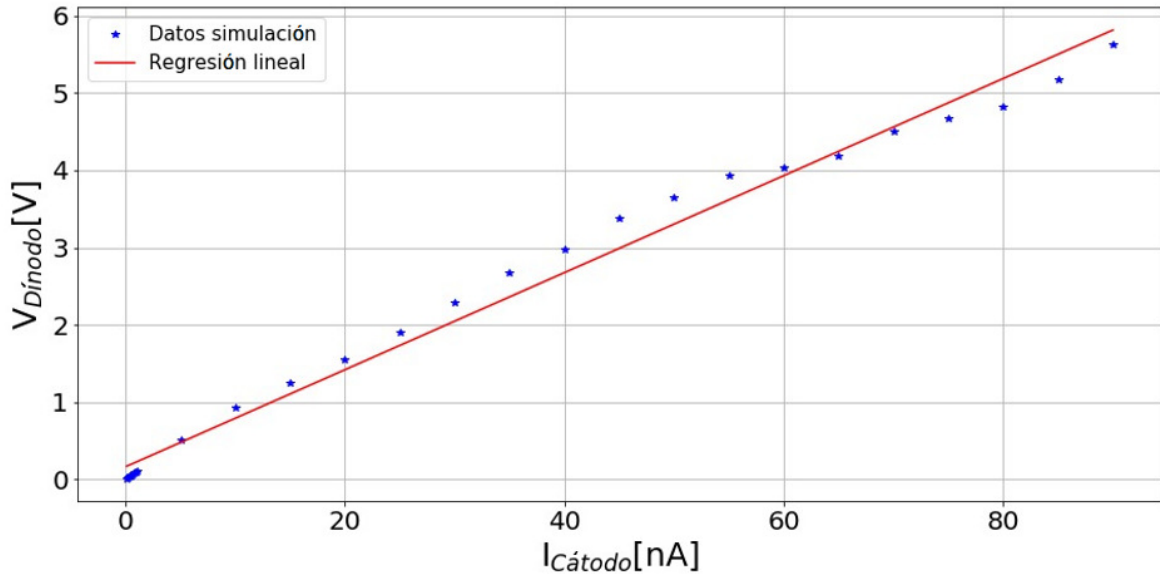


Figura 28: Máximo del voltaje del último dínodo con respecto la corriente de cátodo con un barrido de corriente desde  $1nA$  hasta  $90nA$ , con pasos de  $5nA$ . Los puntos azules corresponden a los valores máximos del último dínodo del PMT a medida que se aumenta la corriente del cátodo, es decir la corriente incidente del PMT y la línea roja corresponde a la regresión lineal de estos datos. La gráfica corrobora la linealidad en el PMT Hamamatsu R5912.



## 3.2. PROCESO DE CALIBRACIÓN

Todo instrumento que se use para realizar una función específica debe ser previamente calibrado, de esta manera se garantiza la calidad de la información registrada.

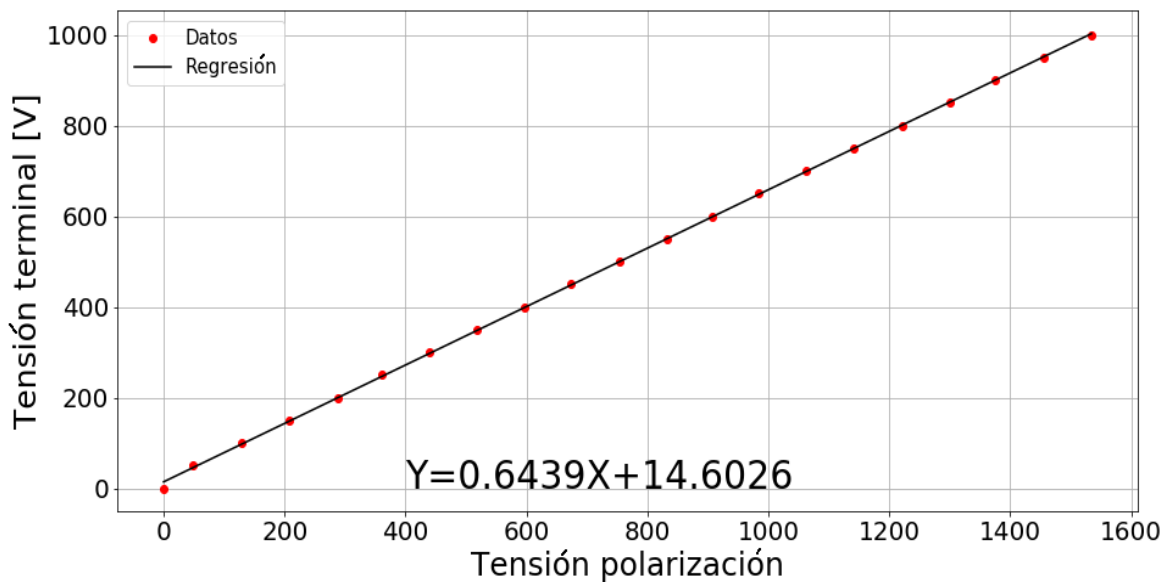
**3.2.1 Valor real de HV en el ánodo del PMT:** La tensión de HV con la cual se alimenta el PMT es dado por un convertidor DC/DC que tiene un rango de salida de  $0V$  a  $2000V$  y es controlado por una tensión de  $0V$  a  $5V$ , esta baja tensión la proporciona la FPGA con una salida PWM.

La FPGA tiene como entrada un valor de HV deseado, el firmware con el que trabaja la FPGA se encarga de transformar este valor en la tensión PWM solicitada.

Como es de suponer, debido a errores tanto en la señal PWM como en el convertidor DC/DC el valor de la tensión de HV que realmente se pone entre el ánodo del PMT y la referencia, no es el impuesto anteriormente como entrada en la FPGA, por lo tanto se debe analizar como es el comportamiento del voltaje físico medible con respecto al deseado.

Para esto, se hace una prueba con valores de tensión desde 0V hasta 1000V como entrada a la FPGA y se mide la tensión con la que se está alimentando realmente el PMT, se obtiene así el gráfico de la Fig.29, luego se hace la respectiva regresión lineal y se obtiene la función que describe el comportamiento del voltaje del ánodo (tensión polarización) en función de la deseada (tensión terminal), tensión que es ingresada en la terminal de Ubuntu como parámetro de entrada de la FPGA.

Figura 29: Gráfico de los datos obtenidos al variar la tensión que se ingresa como parámetro de entrada a la FPGA desde 0V hasta 1000V, Tabla 2. Para cada valor de tensión asignado en la FPGA se midió su respectivo valor en el ánodo del PMT, con dichos datos se hizo la regresión lineal, hallando la función plasmada en este gráfico.



**3.2.2 Calibración del WCD:** Para encontrar los parámetros de funcionamiento del WCD como el umbral de discriminación y la tensión de polarización, se desarrolló un algoritmo en bash (Algoritmo.3.1), implementado en la CubieBoard.

El algoritmo inicia con un ciclo "for", en este se varia el umbral de discriminación que usa la FPGA para filtrar los pulsos, desde 110ADC hasta 210ADC, con aumento de 50ADC, siendo un ADC la unidad de medida del convertidor análogo digital. Como se tiene una resolución de 10 bits, el máximo valor que puede alcanzar es 1023ADC y, sabiendo que el voltaje de referencia es de 1V, se puede hallar el equivalente en tensión para cualquier valor de ADC (3.13).

Tabla 2: Tensión real que alimenta al PMT cuando se ingresa la tensión deseada en el firmware de la FPGA.

Tensión deseada [V]	Tensión real [V]
0	0
50	49
100	128.7
150	208.1
200	287.8
250	361
300	440
350	519
400	596
450	674
500	753
550	833
600	908
650	984
700	1063
750	1140
800	1222
850	1300
900	1375
950	1456
1000	1534

$$Valor_{Volts}[V] = \frac{Valor_{ADC}[ADC] * 1[V]}{1023[ADC]} \quad (3.13)$$

En la secuencia del ciclo "for" mencionado, se incluye otro, este es usado para variar los valores de tensión para el HV. Se inicia con un voltaje de 400 V a 900 V con pasos de 20 V, con cada uno de estos se pone el detector a funcionar durante 10 minutos.

El flujo de partículas que será detectado por el WCD varia dependiendo del umbral de discriminación y del HV. El PMT tiene tres regiones de funcionamiento, dos en las que se tiene un crecimiento exponencial y otra cuando lo es lineal y su pendiente tiende a cero, a esta se le conoce como zona plateau.

Algoritmo 3.1: Código en bash para la calibración de un WCD

```
1 #!/bin/bash
```

```

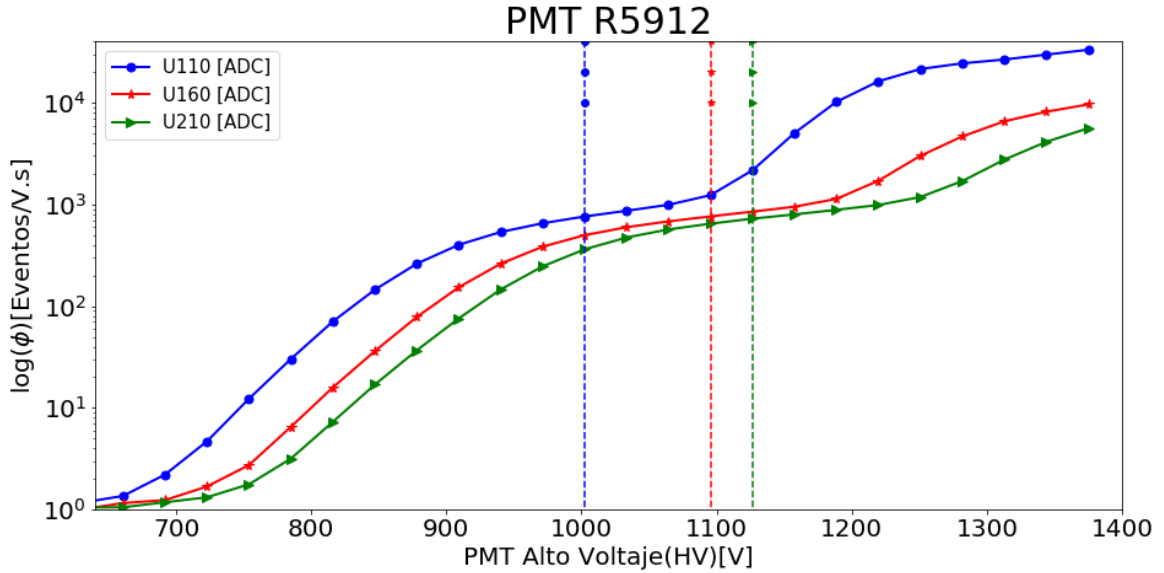
2 # >For para variar el umbral de discriminacion.<
3 for umbral in $(seq 60 50 510);do
4 # >Se le indica a la FPGA el parametro de discriminacion.<
5     ./lago -s t1 $umbral #Canal 1
6     ./lago -s t2 $umbral #Canal 2
7     echo "trigger on: "$umbral
8     sleep 1
9 # >For para variar la tension de alimentacion del PMT.<
10     for volt in $(seq 400 20 900);do
11 # >Se le indica a la FPGA el parametro de tension.<
12         ./lago -s hv3 $volt
13         echo "voltage on: "$volt
14         echo ""
15 # >Se le da un respectivo nombre al archivo para
16 #distinguirlo al momento de procesar los datos.<
17         label="_v${volt}_u${umbral}"
18         nohup ./lago -f capmt10$label &
19 # >Para cada valor de tension se toman datos
20 #por 10 minutos.<
21         sleep 600
22         echo ""
23         id=$(ps aux | grep '[l]ago'|awk '{print $2}')
24         kill $id
25         sleep 2
26     done
27 done

```

El procedimiento de calibración a nivel de hardware en el WCD Chitagá y que se implementará en el arreglo GUANE se basa en encontrar la región óptima de operación del PMT, la cual se produce cuando la región de funcionamiento presenta un comportamiento cuasi-lineal, es decir, cuando la tasa de eventos dependiente del HV aumenta lentamente.

Con los datos obtenidos, se realizó un gráfico del logaritmo del flujo promedio de eventos por segundo con respecto al voltaje de polarización del PMT. Para esto se hace un conteo del número de eventos total en un segundo, de modo que a medida que hay un aumento en la tensión de alimentación al PMT, también lo hay en el flujo, esto para cada umbral estudiado Fig.30.

Figura 30: Logaritmo del flujo de eventos sensados por el WCD con respecto a la tensión de polarización. En color azul está representado el umbral de 110 *ADC*, en rojo el umbral de 160 *ADC* y el verde el umbral de 210 *ADC*. Se pueden distinguir las tres regiones de funcionamiento; exponencial, lineal (plateau) y nuevamente exponencial.



Actualmente, en el proyecto LAGO la elección del punto óptimo de operación del WCD se hace de manera empírica, o sea, observando el gráfico, y en la región que a simple vista se ve lineal se escoge un punto medio. En este proyecto se pretende crear un estándar de calibración.

Para encontrar el punto óptimo de operación se realiza una derivada Fig.31 del logaritmo del flujo anteriormente hallado y se encuentra el mínimo de la función, exactamente donde la pendiente es aproximadamente igual a cero (3.14).

$$\frac{d(\log(\phi))}{dv} \approx 0 \tag{3.14}$$

Para probar que los parámetros de funcionamiento del detector se han hallado correctamente, se realizan los histogramas de carga de los datos recolectados. La carga de un pulso se calcula mediante la integral de su área bajo la curva, (Algoritmo.3.2).

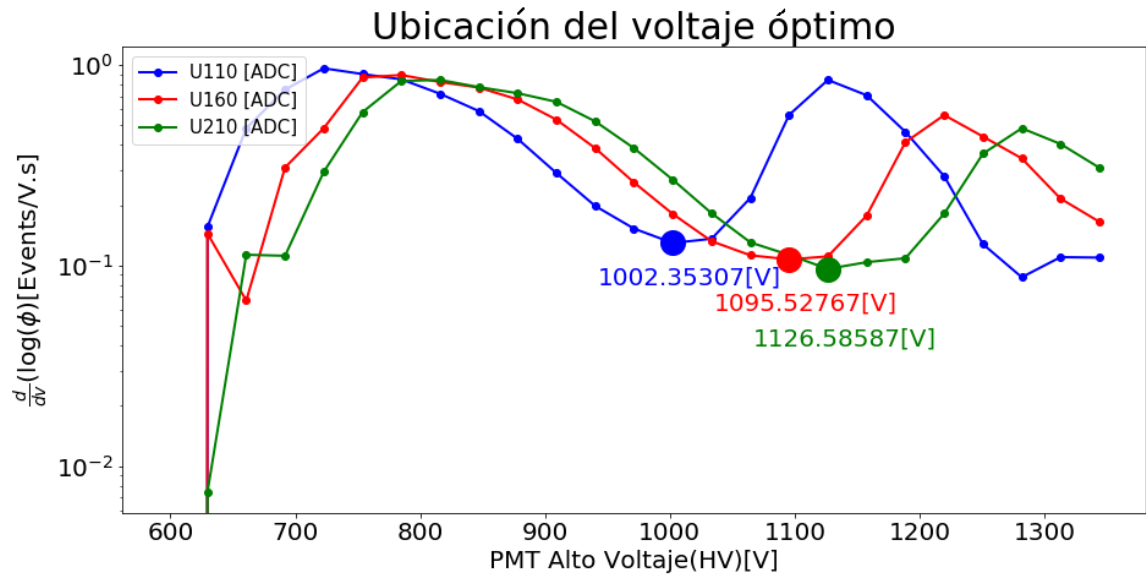
### Algoritmo 3.2: Código para la calibración de un WCD

```

1
2 #!/bin/bash
3 # >Se descomprimen los archivos almacenados con bzcatt

```

Figura 31: Derivada del logaritmo del flujo de eventos. Cada punto de tensión resaltado da información del valor de tensión óptimo en los distintos umbrales de discriminación con base en la procedimiento propuesto. Es de resaltar que estos valores de tensión son los que realmente recibe el PMT, aplicando la función hallada anteriormente.



```

4 # y se ingresa a estos con la funcion awk.<
5 bzcata File.bz2 | awk '{
6 # >Se pregunta si la columna uno es diferente de "#"
7 # lo que indica que es un dato del bin.<
8 if($1!="#"){
9 # >se hace la sumatoria("integral") de los puntos que
10 #conforman un bin, se debe restar el nivel de base impuesto<
11     a+=$(2-50)}
12 # >Se pregunta si el pulso ya termino.<
13 if($1=="#" && $2=="t"){
14 # >Se busca la posicion equivalente a la carga calculada
15 # y se aumenta en uno el valor que contenga.<
16     cg[a]++
17 # >Se re-inicializa en cero la variable que almacena la carga.<
18     a=0 }}
19 # >Al finalizar el analisis de todos los archivos guardados
20 # se hace un barrido en el vector cg y se escribe en el
21 # archivo .dat de salida en la columna 1 el valor de la carga

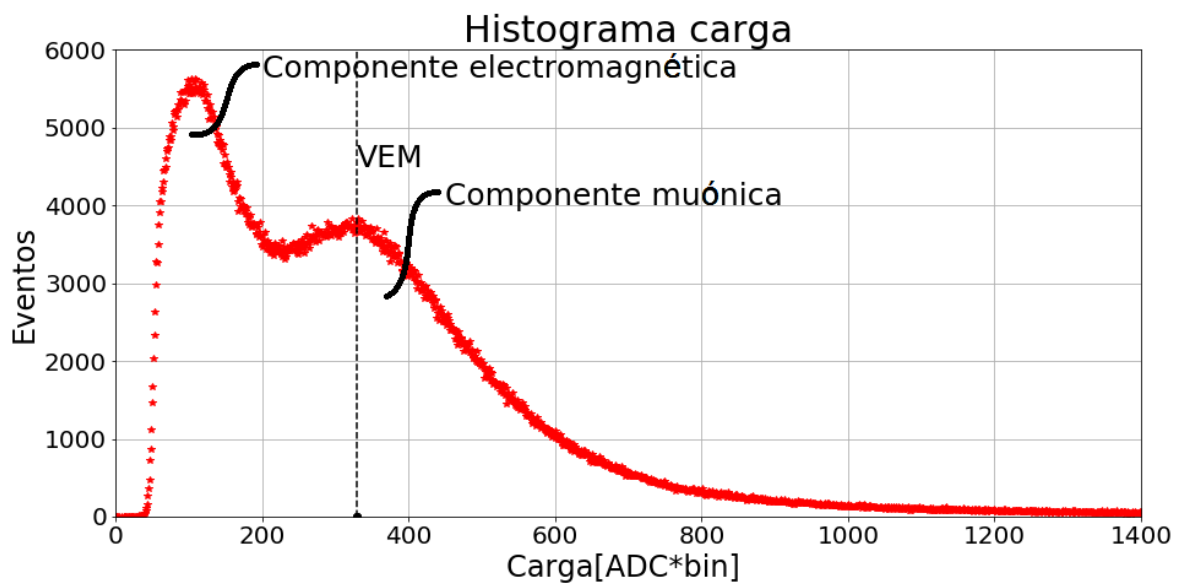
```

```

22 # y en la columna 2 su correspondiente de eventos.<
23 END{
24     for(i in cg)
25         print i ,cg[i]
26     }' >outputfile.dat

```

Figura 32: Histograma de carga de los datos obtenidos durante una hora de registro por el WCD Chitagá ubicado en la Universidad Industrial de Santander. La parte izquierda del espectro representa la componente electromagnética de los RCs secundarios y la derecha la componente muónica donde se puede apreciar la carga del VEM.

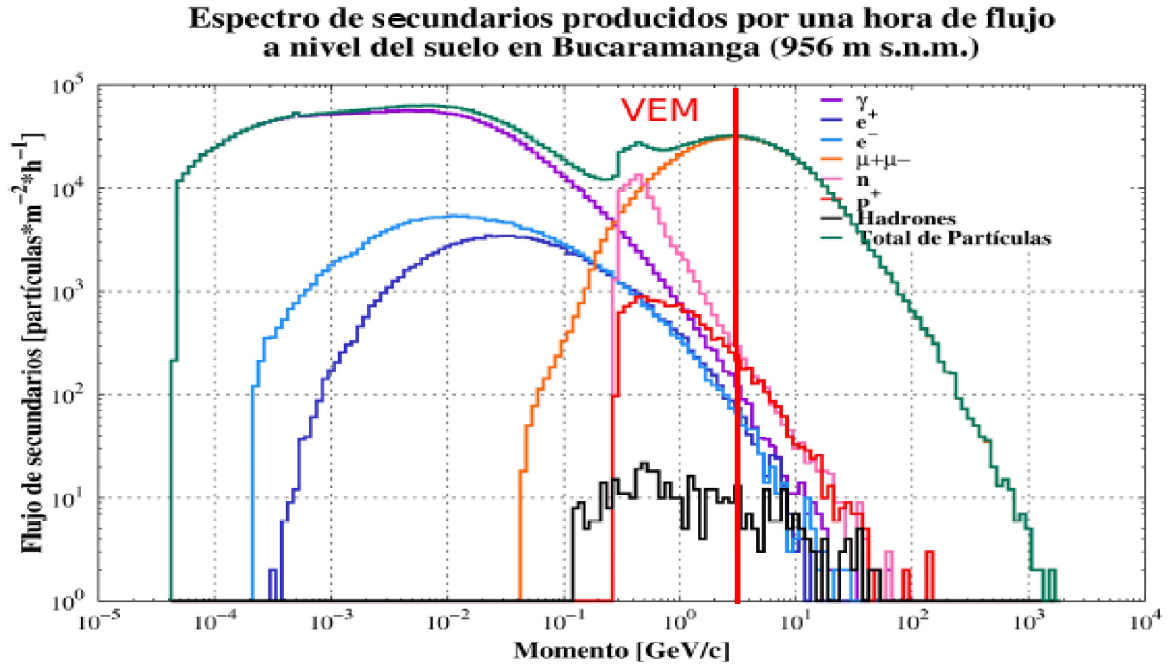


El histograma de carga resultante se muestra en la Fig.32, en este caso se observan dos distribuciones gaussianas, la primera hace referencia a la componente electromagnética de los RCs secundarios compuesta por electrones, positrones, fotones y la segunda a la componente muónica. Esto sirve para inducir que la calibración está correcta pues la forma de este histograma era la que se esperaba, y esto se puede comprobar remitiéndose a la simulación del espectro de partículas secundarias que llegan a la superficie de Bucaramanga (Fig.33).

El histograma de carga se puede usar para obtener una relación entre la energía y la carga en unidades de VEM de la partícula, esto es útil para el posterior análisis de los eventos físicos que se pueden detectar mediante el WCD.

**3.2.3 Calibración del arreglo Guane y modelo matemático de la dirección de la EAS:** Como ya se había mencionado en el capítulo 2, la calibración del arreglo se basa en una sincronización temporal de los sistemas electrónicos de cada WCD,

Figura 33: Espectro de energía de los secundarios que se producen durante una hora de flujo a nivel del suelo en Bucaramanga. Espectro de todos los secundarios (verde) y por familias de partículas: fotones (morado), electrones(celeste), positrones (azul oscuro), neutrones (rosado), protones (rojo) y hadrones (negro). La línea roja vertical representa el VEM de energía de la componente muónica. Simulación hecha en el programa Corsika.



Fuente: [12].

Fig.34.

Para ello se desarrollaron pruebas que corroboren que la señal PPS de los GPS que se tienen dispuestos para cada detector estén correctamente sincronizadas entre sí, estas pruebas se mostrarán en la sección 3.4.

El cálculo de la dirección de la EAS se hace primero con dos detectores como en la Fig. 35, en esta se traza un vector en una de las posibles direcciones en las que podría llegar la partícula, este se proyecta con respecto a la superficie de los detectores y se trazan los ángulos con los cuales se tienen los dos componentes que describen la trayectoria de la EAS; el ángulo con respecto al Cenit ( $\varphi$ ) y el ángulo con respecto al acimut ( $\theta$ ).

Tomando el triángulo que se forma entre la proyección de la partícula y la distancia de los detectores se tiene la Fig. 36, luego, haciendo un análisis trigonométrico se llega a la expresión (3.15) para  $\Delta_{D^*}$ , esta distancia corresponde a la proyección de la partícula en el plano de los

Figura 34: Boceto de la calibración del arreglo. Consiste en la sincronización de los respectivos sistemas electrónicos en cada WCD a una señal común: la señal PPS del GPS.

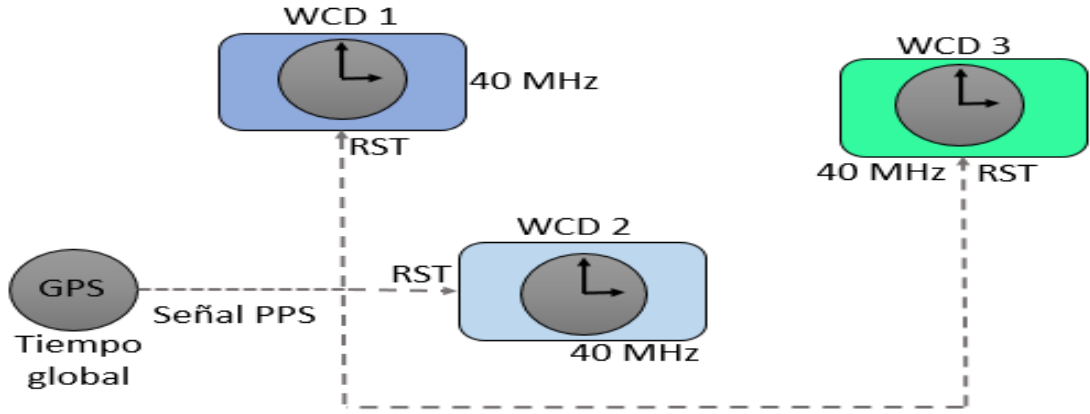
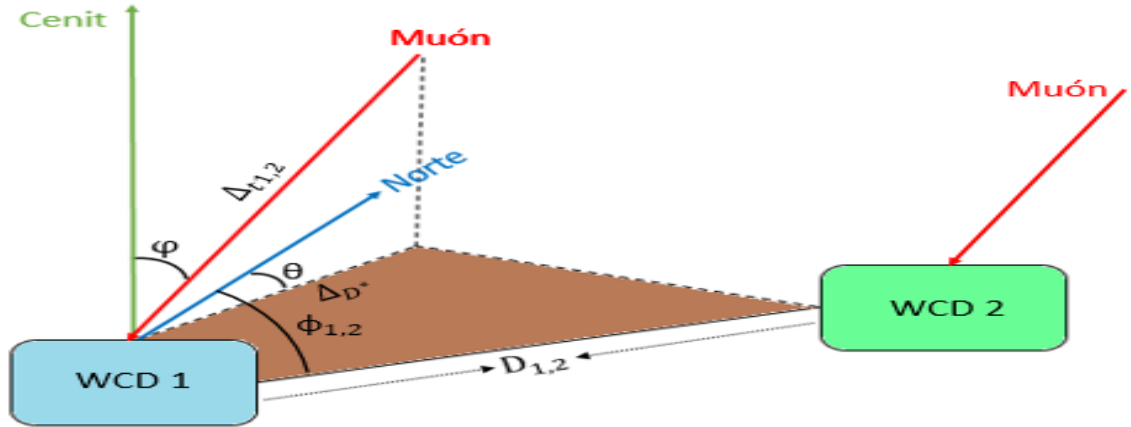


Figura 35: Estimación de la trayectoria de la EAS proyectada respecto a la superficie de los detectores, mediante los ángulos  $\varphi$  respecto al Cenit y  $\theta$  al Acimut (Norte).



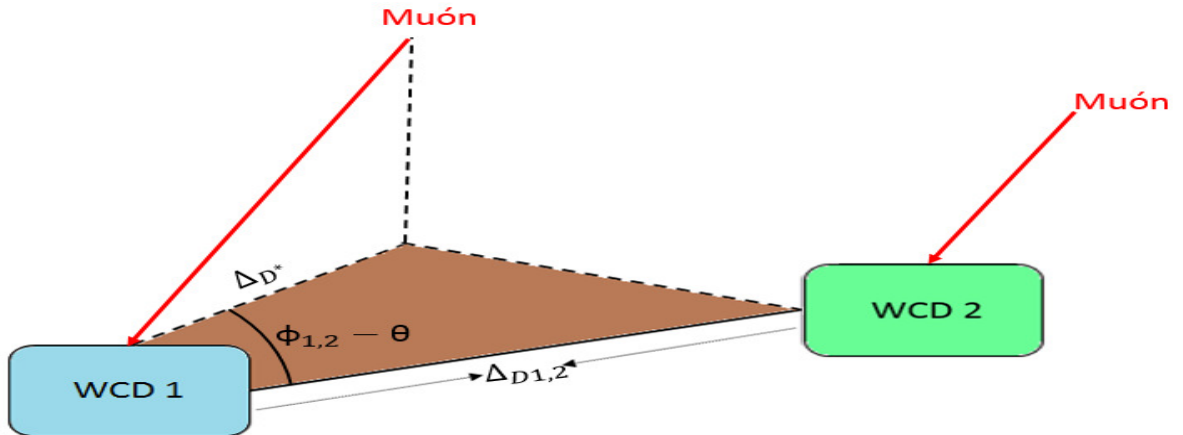
detectores, siendo el cateto adyacente de dicho triángulo.

$$\Delta_{D^*} = \cos(\Phi_{1,2} - \theta)\Delta_{D1,2} \quad (3.15)$$

Ahora, se hace uso de otro triángulo de los que se pueden formar, el de la Fig.37, este se forma con la distancia  $\Delta_{D^*}$  y la trayectoria de la partícula entre los puntos en los cuales incide en cada uno de los detectores, de aquí se obtiene la expresión (3.16) para  $\Delta_{t1,2}$ , donde  $c$  representa la velocidad de la luz.

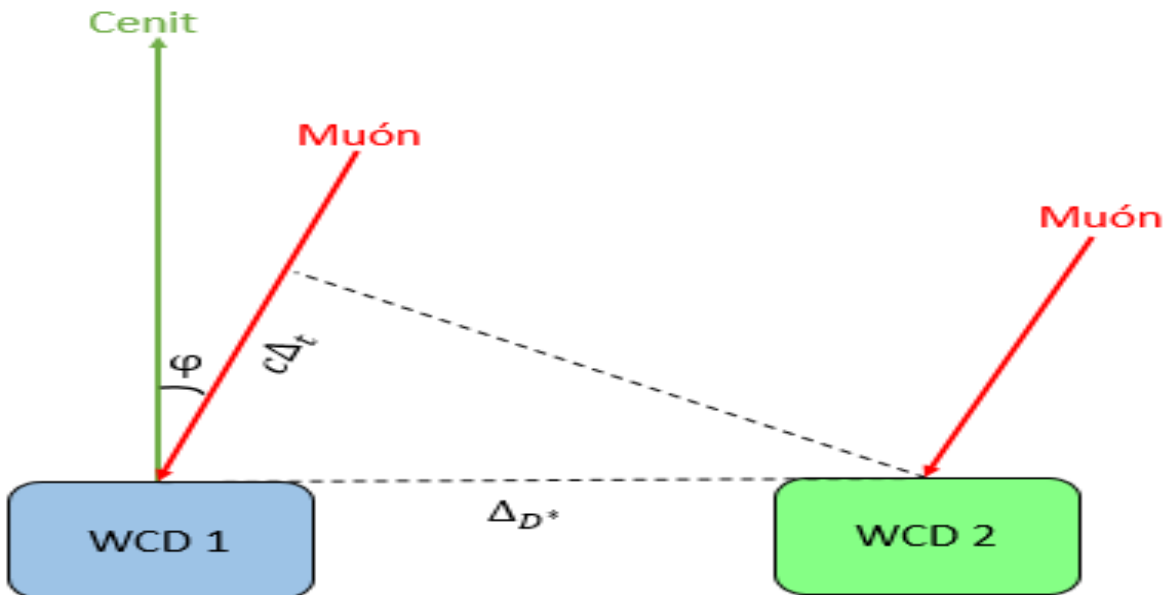
$\Delta_{t1,2}$  representa la diferencia temporal de activación entre el WCD1 y el WCD2.

Figura 36: Triángulo formado por la proyección de la partícula y la distancia entre los detectores.  $\Delta_{D^*}$  corresponde a la proyección de la partícula en el plano de los WCD, siendo esta el cateto adyacente y la hipotenusa del triángulo, es la distancia medida entre los detectores  $\Delta_{D1,2}$



$$\Delta_{t1,2} = \frac{\Delta_{D^*}}{c} \sin(\varphi) \quad (3.16)$$

Figura 37: Triángulo formado entre la distancia  $\Delta_{D^*}$  y la trayectoria de la partícula entre los puntos en los cuales incide en cada uno de los detectores.



Reemplazando (3.15) en (3.16) se llega a (3.17), quedando un sistema de una ecuación con dos incógnitas (sin solución), ya que,  $\Delta_{t1,2}$  es conocido pues es la diferencia de tiempos de

adquisición de pulsos,  $\Phi_{1,2}$  el ángulo entre la línea imaginaria que une los detectores y el norte y,  $\Delta_{D1,2}$  la distancia de separación de los WCDs, siendo estos valores conocidos.

$$\Delta_{t1,2} = \cos(\Phi_{1,2} - \theta) \frac{\Delta_{D1,2}}{c} \sin(\varphi) \quad (3.17)$$

Haciendo un mismo análisis entre los detectores 1 y 3 se llega a un resultado idéntico a (3.17), con una diferencia, los parámetros serán medidos de 1 a 3.

$$\Delta_{t1,3} = \cos(\Phi_{1,3} - \theta) \frac{\Delta_{D1,3}}{c} \sin(\varphi) \quad (3.18)$$

Con (3.17) y (3.18) se tiene dos ecuaciones con dos incógnitas, obteniéndose un sistema que si puede ser resuelto.

Aplicando la relación

$$\frac{\Delta_{t1,2}}{\Delta_{t1,3}} = \frac{\Delta_{D1,2} \cos(\Phi_{1,2} - \varphi)}{\Delta_{D1,3} \cos(\Phi_{1,3} - \varphi)} \quad (3.19)$$

Y empleando luego el coseno de la diferencia de dos ángulos y resolviendo, se llega a

$$\frac{\sin(\varphi)}{\cos(\varphi)} = \frac{\Delta_{t1,2} \Delta_{D1,3} \cos(\Phi_{1,3}) - \Delta_{t1,3} \Delta_{D1,2} \cos(\Phi_{1,2})}{\Delta_{t1,3} \Delta_{D1,2} \sin(\Phi_{1,2}) - \Delta_{t1,2} \Delta_{D1,3} \sin(\Phi_{1,3})} \quad (3.20)$$

Despejando  $\varphi$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\Delta_{t1,2} \Delta_{D1,3} \cos(\Phi_{1,3}) - \Delta_{t1,3} \Delta_{D1,2} \cos(\Phi_{1,2})}{\Delta_{t1,3} \Delta_{D1,2} \sin(\Phi_{1,2}) - \Delta_{t1,2} \Delta_{D1,3} \sin(\Phi_{1,3})}\right) \quad (3.21)$$

Con lo anterior, la expresión resultante para el ángulo con respecto al Zenit es de la forma (3.21). Se procede entonces a hallar el ángulo con respecto al Acimut, partiendo de (3.17) ó (3.18) y despejando  $\theta$  se obtiene (3.22), donde  $k$  simboliza una fracción de la velocidad de la luz, conociendo que esta solo es total en el vacío.

$$\theta = \arcsin\left(\frac{kc\Delta_{t1,2}}{\Delta_{D1,2} \cos(\phi_{1,2} - \varphi)}\right) = \arcsin\left(\frac{kc\Delta_{t1,3}}{\Delta_{D1,3} \cos(\phi_{1,3} - \varphi)}\right) \quad (3.22)$$

Con estos dos parámetros se describe la dirección de la lluvia en función de valores conocidos como la distancia entre los WCDs y valores que pueden ser calculados con los datos registrados por cada WCD como la diferencia de tiempo entre los eventos de cada detector.

Para el análisis de la EAS, es necesario conocer la ventana temporal máxima para la aceptación, es decir, hasta que  $\Delta_t$  (diferencia temporal de activación entre los WCD) se puede afirmar que los pulsos pertenecen a la misma lluvia y así proceder a calcular los parámetros de la misma. Este tiempo estará dado por la mayor distancia de separación entre los WCD.

Ahora, dado que ocurra un evento en alguno de los detectores, este mismo se debe ver reflejado en los otros detectores, en un instante de tiempo que no supere el tiempo que se demoraría en recorrer de un WCD a otro a una velocidad similar a la de la luz.

Estas distancias se mostraron en el capítulo 2, en la Fig. 5, allí se visualiza las distancias de los WCD, la máxima distancia es de  $112m$ .

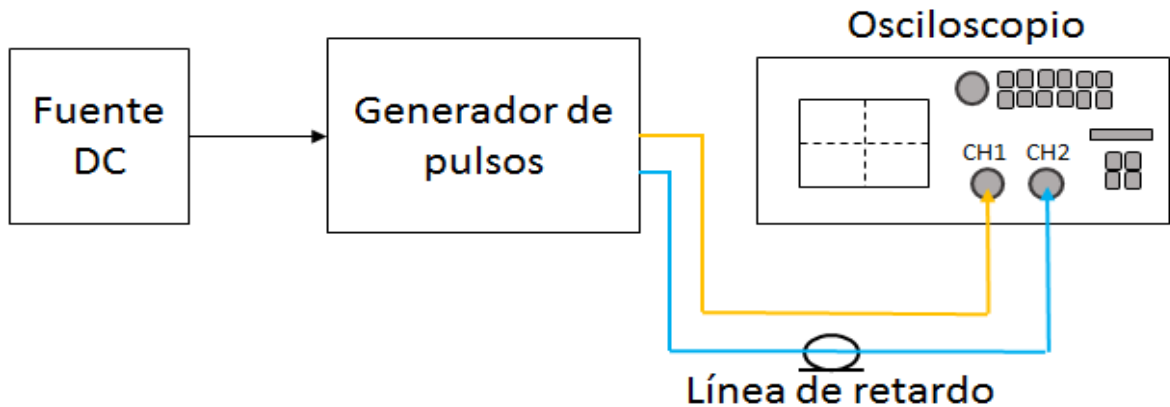
De esto llegamos a que la expresión para el tiempo máximo en el que se puede asegurar que los pulsos son de la misma EAS es:

$$t_{maximo}[s] = \frac{112[m]}{kc[\frac{m}{s}]} \quad (3.23)$$

### 3.3. MEDICIÓN DE RETARDO DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

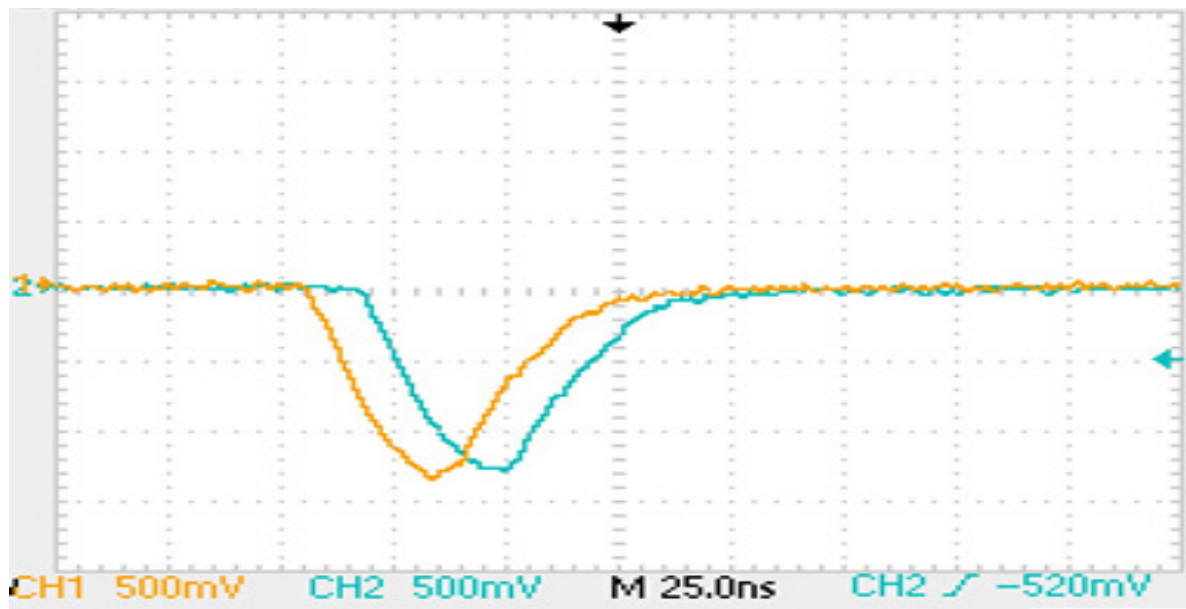
La velocidad de la luz está en un orden de magnitud considerable, mas no infinito, por ende tomará un determinado tiempo en ir de un punto a otro, ahora si se están analizando fenómenos cuya duración es corta como un pulso, cuyo tiempo está en el orden de nano segundos es importante considerar los retrasos generados en las líneas de transmisión.

Figura 38: Montaje electrónico para la visualización del retardo ocasionado por la longitud de los conductores. Está compuesto por una fuente DC encargada de alimentar con  $5V$  al generador de pulsos con frecuencia variable que emula la salida de la base del PMT y un osciloscopio Tektronix TDS2002B para medir el retraso. En amarillo una salida del generador conectado directamente al osciloscopio y en azul la otra salida conectada por medio de un cable coaxial RG58 de  $50\Omega$ .



El pulso es generado por el PMT ubicado en el interior del tanque desde donde es transmitido al exterior donde se encuentra el sistema electrónico de discriminación y registro, por ende se debe usar un cable coaxial RG58 de  $50\Omega$  para conectar la base del PMT y la electrónica de adquisición de datos (DAQ). Para el estudio de la EAS es indispensable saber el momento exacto en que la partícula golpea cada detector, por esta razón, se requiere una marca de tiempo precisa. Por lo tanto, el tiempo de retraso entre el PMT y el DAQ debe medirse y tenerse en cuenta para el análisis de los datos y la reconstrucción de los parámetros de la EAS.

Figura 39: Gráfica obtenida del osciloscopio Tektronix TDS2002B del retardo entre los canales causado por la distancia de los conductores. La medida fue realizada con un cable coaxial RG58 de  $50\Omega$  calibre 24, 30 V, 28 A y longitud 364 cm.



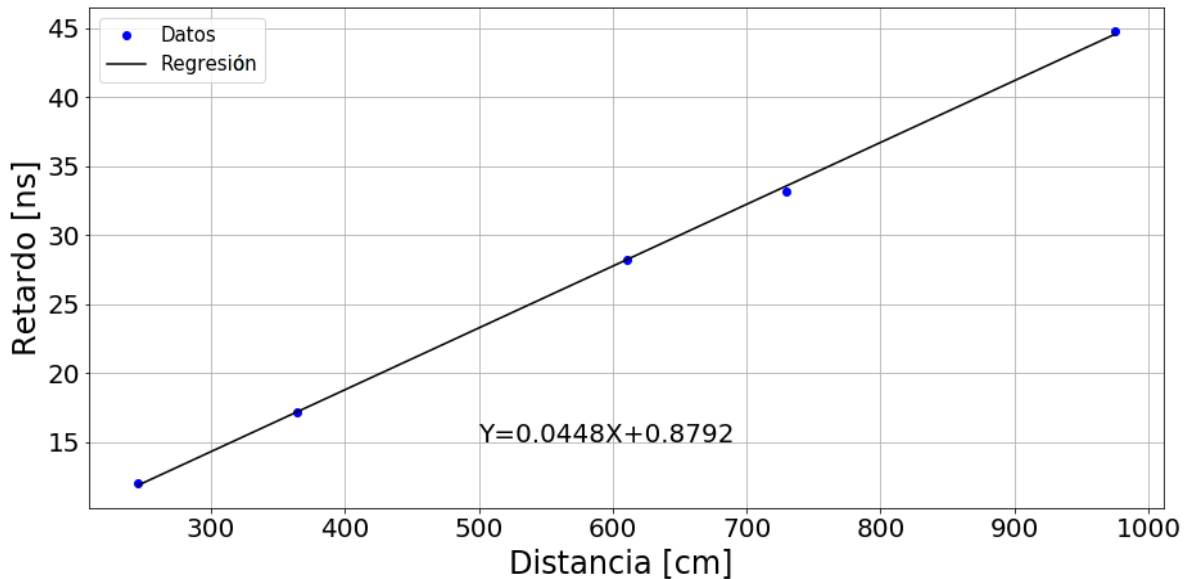
Para caracterizar el tiempo de retardo se realizaron pruebas con cables de distintas longitudes, para esto se hizo el montaje de la Fig.38 y el conductor usado fue un cable coaxial RG58 calibre 24. En el osciloscopio se pudo observar el retardo entre los canales de la tarjeta generadora de pulsos Fig. 39 con una longitud del cable de 364 cm.

Los datos obtenidos con diferentes longitudes del cable coaxial se muestran en la Tabla 3, se encontró un comportamiento lineal y mediante una regresión lineal se obtuvo una función que modela el tiempo de retardo dependiendo de la longitud del conductor Fig.40.

Tabla 3: Tiempos de retardo obtenidos con distintas longitudes de cable coaxial RG58 de  $50 \Omega$  calibre 24.

Distancia [cm]	Retardo [ns]
245.5	12
364	17.2
611	28.2
729.5	33.2
975	44.8

Figura 40: Función que describe el tiempo de retardo de la señal dependiendo de la longitud del conductor.



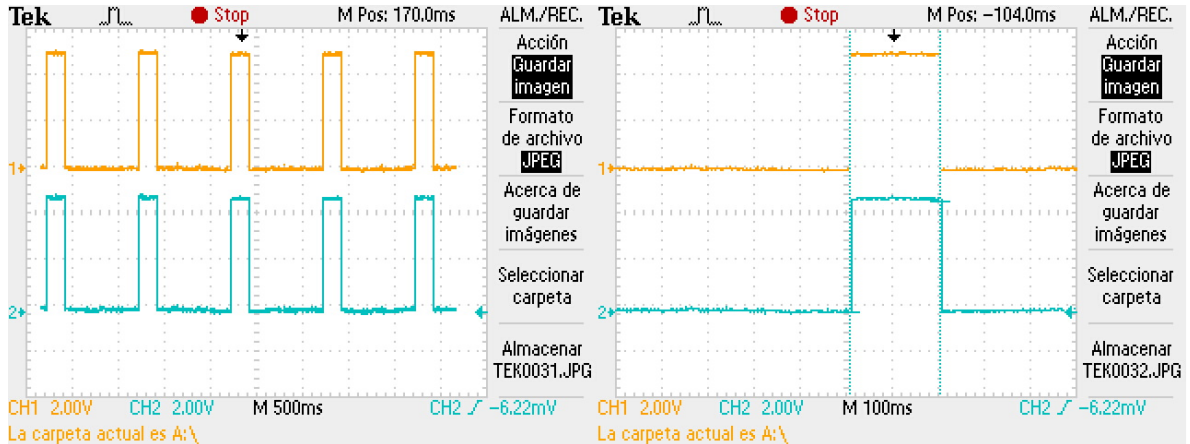
### 3.4. MEDICIONES DE SINCRONIZACIÓN DEL GPS

Con ánimos de corroborar que las señales de los GPS realmente se sincronizan a una única señal, esta generada por los satélites a los que se conectan, se hicieron pruebas para visualizar en un osciloscopio si efectivamente se cumplía dicha afirmación, y con esto concluir que la opción de usar el GPS para sincronizar los sistemas electrónicos en los detectores tendrá un fin satisfactorio.

Se pusieron las señales PPS en el osciloscopio, esta medición se hizo de dos en dos con las combinaciones posibles entre los tres GPS, en la Fig. 41 se evidencia que los GPS se encuentran

sincronizadas mediante su señal PPS.

Figura 41: Visualización en el osciloscopio Tektronix TDS2002B de las señales PPS de dos de los GPS con los que se realizaron las pruebas de sincronización.



### 3.5. MEDICIÓN DE UN EVENTO FORBUSH Y MEDICIÓN INDIRECTA DEL ÍNDICE DST DEL CAMPO MAGNÉTICO

El día 4 de septiembre de 2017 el observatorio de dinámica solar de la NASA que observa el sol constantemente recibió imágenes de dos llamaradas solares de gran amplitud, la primera de X2.2 y la segunda de X9.3, donde X representa las llamaradas más intensas, a estas se les atribuyó una CME que se tenía previsto llegaría a la tierra entre los dos o tres días posteriores al evento [25].

Un Forbush es una disminución representativa en el número de partículas que ingresan a la atmósfera, y por ende, se ve reflejado en las partículas secundarias que alcanzan la superficie terrestre.

El detector registró datos desde el día 7 de septiembre con el fin de registrar el evento. Luego con los datos adquiridos y por medio del Algoritmo. 3.3 en bash, se calculó el promedio de eventos por hora.

Algoritmo 3.3: Algoritmo para calcular el promedio de eventos por hora

```
1 #!/bin/bash
```

```

2 # >Se descomprimen los archivos almacenados con bzip2
3 # y se ingresa a estos con la funcion awk.<
4 bzip2 File.bz2 | awk '{
5 # >Se pregunta si la columna uno y dos son "#" y "t"
6 # respectivamente, lo que indica que hubo un evento(pulso).<
7 if($1=="#" && $2=="t"){
8 # >Se aumenta el contador de eventos.<
9     pul++}
10 # >Se pregunta si ha pasado un segundo.<
11 if($1=="#" && $2=="x" && $3=="h"){
12 # >Se aumenta el contador temporal.<
13     ti++}
14 # >Se pregunta si ha pasado una hora.<
15 if(ti>3600){
16 # >Se calcula el promedio por hora de esa hora.<
17     m=pul/ti
18 # >En cero las variable para un proximo promedio.<
19     pul=0
20     ti=0
21     print m}
22 # >El promedio impreso se va escribiendo en el
23 #archivo .dat de salida
24 }' > outputfile.dat

```

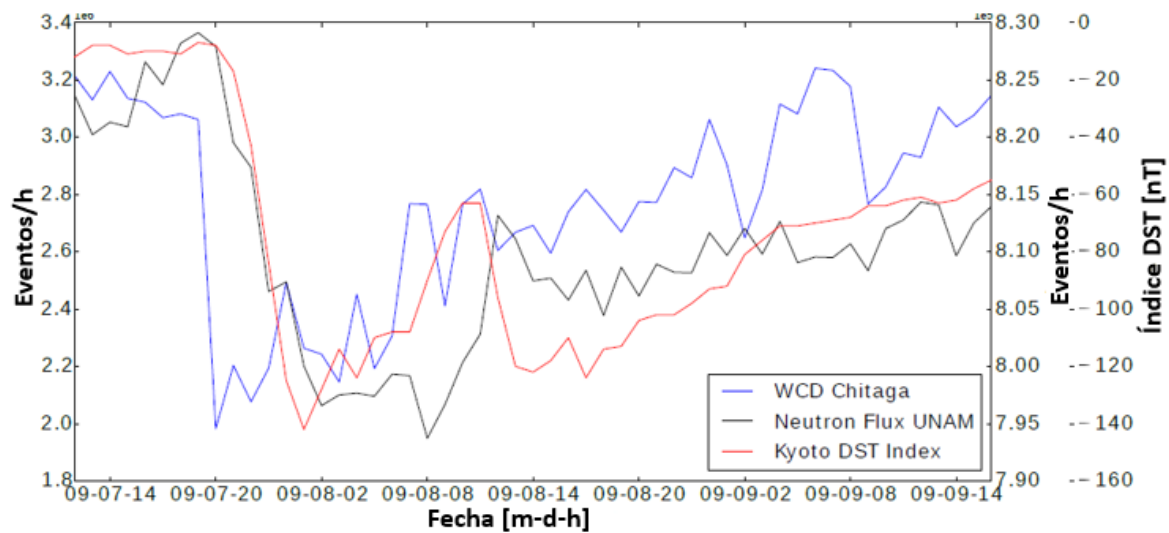
El flujo de partículas detectado por el WCD Chitagá se gráfica junto a los datos de otros detectores para corroborar la detección del evento Forbush. Con esto se obtiene la Fig. 42 en la cual se muestran los registros de los distintos detectores, se puede observar claramente el decrecimiento tanto en el número de partículas que inciden en la atmósfera como del índice DST del campo magnético en el caso del detector de Kyoto<sup>1</sup>.

La detección de este evento Forbush corrobora la correcta calibración del detector y de igual forma presenta al WCD como un instrumento para medir indirectamente el índice DST del campo magnético, ya que existe una relación entre este y el flujo de partículas detectado por el WCD.

---

<sup>1</sup>[http://wdc.kugi.kyoto.ac.jp/dst\\_realtime/201709/index.html](http://wdc.kugi.kyoto.ac.jp/dst_realtime/201709/index.html)

Figura 42: Gráfico de datos obtenidos por los detectores Chitagá, Kyoto y UNAM durante el Forbush 07-09-2017. La gráfica roja representa el detector de DST del campo magnético en Kyoto, la negra los de el detector de Neutrones de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la traza azul que corresponde a los datos obtenidos por el WCD Chitagá en la Universidad Industrial de Santander.



## *Capítulo 4*

# *CONCLUSIONES*

En este trabajo se considera la instalación y calibración de un WCD para servir como procedimiento para la puesta en funcionamiento y sincronización de un arreglo de WCDs, un problema de gran interés para los científicos en el área de calibración y desarrollo de detectores Cherenkov y en el procesamiento y análisis de datos. Además, un importante recurso para proyectos que estén compuestos por detectores Cherenkov de agua de bajo costo como lo son el arreglo GUANE y el proyecto LAGO, este último que realiza su calibración en términos de hardware de forma empírica.

Para establecer el procedimiento de instalación, calibración y sincronización, se comenzó con la instalación del detector, partiendo del montaje de la estructura mecánica que se encontraba en la terraza del edificio de Ciencias Humanas de la Universidad Industrial de Santander y del sistema electrónico derivado del proyecto LAGO, hasta tener un detector Cherenkov “Chitagá” con la estructura y componentes necesarios para ser el prototipo de los dos WCDs restantes que harán parte del arreglo GUANE.

Para realizar la calibración del WCD Chitagá se desarrolló un algoritmo en bash que se implementó en la CubieBoard para encontrar el valor de los parámetros de funcionamiento óptimo del WCD Chitagá. Para iniciar con el proceso de calibración se estudiaron los datos obtenidos por el sistema electrónico y se procedió a realizar el gráfico del logaritmo del flujo promedio de eventos con respecto al voltaje de polarización del PMT Hamamatsu R5912. Luego, se hizo una derivada del gráfico del logaritmo del flujo anteriormente mencionado y se encontró el mínimo de la función, es decir, donde la pendiente es aproximadamente igual a cero. Es en ese punto donde el detector tiene un comportamiento lineal (plateau), por lo tanto se tomó el valor de  $660\text{ V}$  para el HV del PMT y el umbral de discriminación en  $110\text{ ADC}$ . Se debe resaltar que estos valores varían dependiendo del PMT, por lo que es necesario ejecutar siempre este procedimiento. Es importante mencionar que este procedimiento es el aporte más

significativo hecho en este trabajo de investigación, el cual se pretende extrapolar a los demás detectores, no solo a los que conformaran el arreglo GUANE, también a los WCD de LAGO, de manera que se estandarice el procedimiento de calibración a todo el proyecto.

Además, se calculó y simuló un modelo matemático del PMT Hamamatsu R5912, esto con el fin de conocer el funcionamiento del elemento capaz de registrar los fotones Cherenkov generados por el paso de una partícula cargada por el WCD y profundizar en la red resistiva que funciona como divisor de tensión para los dínodos del PMT. Para realizar el circuito y las simulaciones se usó el software Pspice.

Para validar el funcionamiento del WCD Chitagá que conforma el arreglo GUANE, se puso el detector a recolectar datos desde el día 7 de Septiembre con el fin de medir el evento Forbush que se previa sucedería en el transcurso de esos días debido una CME que se dio después de que el 4 de Septiembre se presentaran dos llamaradas solares de gran amplitud, este fenómeno se tuvo previsto por la NASA que llegaría a la Tierra entre los días posteriores al evento. Por ende, se realizó un código en bash y con los datos adquiridos por el detector se calculó el promedio de eventos por hora, obteniendo así un evento Forbush registrado por el WCD Chitagá. La detección de este evento corrobora la correcta calibración, además es de destacar que el WCD Chitagá fue el único detector Cherenkov en el proyecto LAGO que logró reconstruir el fenómeno.

En este texto se propone usar un GPS para obtener una sincronización temporal de los tres detectores que conformaran el arreglo GUANE, para esto se realizó una prueba con la señal PPS que entregan los Sistemas de Posicionamiento Global que serán usados en cada uno de los tres detectores que componen el arreglo y se corroboró que estas señales efectivamente se encuentran sincronizadas entre sí. El elemento que será usado es el GPS Motorola On-Core. También se llegó a un modelo matemático que permitirá conocer la dirección de llegada de la EAS, por esta razón es necesario tener los detectores sincronizados con la señal GPS para la etiqueta temporal de los datos y conocer la distancia de separación entre ellos.

Adicionalmente, se midió el tiempo de retraso de la línea de transmisión de la información, el cual es generado por la longitud de los conductores, esta prueba se realizó con el cable coaxial RG58 DE  $50\Omega$ , dado que es el cable que se seleccionó para comunicar el PMT con la electrónica de adquisición de datos y se obtuvo que a medida que la longitud del conductor es mayor el retardo también lo es. Este análisis es de vital importancia tener en cuenta al momento de estudiar la EAS.

## *Capítulo 5*

# ***RECOMENDACIONES PARA PROYECTOS FUTUROS***

En el transcurso de este trabajo de investigación, fue necesario enfrentar algunas problemáticas causadas por diversos fallos desde el montaje mecánico, hasta falsos contactos en conectores electrónicos, por ello nacen algunas propuestas y recomendaciones para proyectos futuros, ya sea en el mismo grupo de investigación donde este trabajo tuvo cabida o en cualquier institución que desee verse inmersa en el desarrollo de física de partículas.

Lo que respecta al montaje mecánico y adecuación del tanque, hubo dos inconvenientes: Filtraciones de agua y entrada de luz en el detector.

La primera problemática se evidenció al momento de analizar los datos, ya que estos carecían de credibilidad, luego de hacer diversas revisiones se decidió abrir el tanque, encontrando que el nivel de agua había descendido, o sea, el agua tratada que se encuentra en el interior se estaba drenando por uno de los tubos de desagüe con los que cuenta el tanque, esto ocasionó problemas en la correcta recepción del PMT, ya que el agua debe tener un nivel mínimo de altura, de modo que cubra la parte sensible del PMT.

En cuanto al segundo problema, el tanque debe cubrirse totalmente con plástico negro, con el fin de evitar la contaminación lumínica del ambiente, igual que antes; en el análisis de los datos, el tasa de eventos no era coherente. Pues, se tenía un conocimiento previo en que esta se encontraba a la altura de Bucaramanga en un valor cercano a  $1kHz$  y lo que se estaba obteniendo era una tasa de eventos muy alta comparada con el valor esperado, por este motivo se decidió cubrir el detector con un plástico de carpa negro, reduciendo aún más la entrada de fotones en el interior del tanque, resolviendo de esta forma el dilema.

En aras de evitar estos fallos en los futuros proyecto, se recomienda hacer una revisión detallada del tanque, buscando posibles filtraciones y cubrir lo mejor posible el PMT, la solución más práctica es un plástico negro que tenga un grosor considerable.

Si bien el tamaño del tanque tiene repercusiones en la cantidad de partículas que el detector recibe, para el fin no es necesario que sea tan grande, por ende, el tanque se aconseja sea más pequeño que el utilizado, esto conlleva a una disminución en el presupuesto, pues un tanque de dimensiones menores tiene un precio menor, además, el espacio que se requiere para su instalación también se vería reducido.

La electrónica en la actualidad tiende a disminuir su tamaño, cada vez se encuentran dispositivos más pequeños y con mayor capacidad de procesamiento. La electrónica usada en este proyecto cumple satisfactoriamente las necesidades del mismo, mas, con el fin de mejorar se pensó en: cambiar la FPGA por un modelo más nuevo, pues la que actualmente se usa ya fue descontinuada, ahora a modo de disminuir el espacio que ocupa de la electrónica se recomienda una opción más factible, reemplazar la CubieBoard, la FPGA y el sensor de temperatura, por una tarjeta como la MATRIX CREATOR<sup>1</sup>, esta cumple con los requerimientos mencionados, cuenta con una FPGA Xilinx Spartan 6, un sensor de temperatura y además a nivel de hardware que es compatible con RaspBerry, que a pesar de tener un rendimiento menor en cuanto a procesamiento es un sistema embebido por el que se puede cambiar la CubieBoard para aprovechar esta compatibilidad.

---

<sup>1</sup><https://www.matrix.one/products/creator>

## *Bibliografía*

- [1] AAB, A., ET AL. Impact of atmospheric effects on the energy reconstruction of air showers observed by the surface detectors of the pierre auger observatory. *Journal of Instrumentation* 12, 02 (2017), P02006.
- [2] ALLEKOTTE, I., ET AL. The surface detector system of the pierre auger observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 586, 3 (2008), 409–420.
- [3] AMENOMORI, M., ET AL. Underground water cherenkov muon detector array with the tibet air shower array for gamma-ray astronomy in the 100 tev region. *The Multi-Messenger Approach to High-Energy Gamma-Ray Sources* (2008), 435–439.
- [4] ASOREY, H. *Los detectores Cherenkov del observatorio Pierre Auger y su aplicación al estudio de fondos de radiación*. PhD thesis, Universidad Nacional de Cuyo, 2012.
- [5] ASOREY, H., ET AL. Lago: the latin american giant observatory. In *34th International Cosmic Ray Conference (ICRC2015)* (2015), vol. 34.
- [6] BAROUCH, E., AND BURLAGA, L. Cause of forbush decrease and other cosmic ray variations. *Goddard space flight center* (1974), 6–9.
- [7] BERTOU, X., ET AL. Calibration of the surface array of the pierre auger observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 568, 2 (2006), 839–846.
- [8] BLANCO CANO, X., AND KAJDIC, P. El sol, nuestra estrella. *Revista Digital Universitaria* 10, 10 (2009).
- [9] CAMPOS FAUTH, A., CHIAPERINI GROVER, A., AND MARTELOZO CONSALTER, D. Medida da vida média do múon. *Revista Brasileira de Ensino Física* 32, 4 (2010).
- [10] CANE, H. V. Coronal mass ejections and forbush decreases. *Space Science Reviews* 93, 1-2 (2000), 55–77.

- [11] COUNCIL, N. R., ET AL. *Connecting Quarks with the Cosmos: Eleven Science Questions for the New Century*. National Academies Press, 2003.
- [12] DURÁN SUÁREZ, M. Modulación de rayos cósmicos secundarios a nivel del suelo por cambios en el campo geomagnético. Master's thesis.
- [13] DURÁN SUÁREZ, M. Instalación de un detector cherenkov de agua para la detección de trazas de rayos cósmicos a 956 metros sobre el nivel del mar, 2011.
- [14] ELLIS, J., AND OLIVE, K. A. Constraints on light particles from supernova sn 1987a. *Physics Letters B* 193, 4 (1987), 525–530.
- [15] GRUPEN, C., AND BUVAT, I. *Handbook of particle detection and imaging*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [16] GRUPEN, C., AND SHWARTZ, B. *Particle detectors*, vol. 26. Cambridge university press, 2008.
- [17] HAMAMATSU PHOTONICS, K. Photomultiplier tube-r5912, 1998.
- [18] HAMAMATSU PHOTONICS, K. Photomultiplier tubes: Basics and applications. *Edition 3a* (2006).
- [19] HARO, M. S., ET AL. The data acquisition system of the latin american giant observatory (lago). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 820 (2016), 34–39.
- [20] IKEDA, M., ET AL. Search for supernova neutrino bursts at super-kamiokande. *The Astrophysical Journal* 669, 1 (2007), 519.
- [21] JELLEY, J. Cherenkov detector and their applications. In *Cherenkov Radiation and its applications*. United Kingdom Atomic Energy Authority, 1958, pp. 126–141.
- [22] KRIHELY, N. Spice model of photomultiplier tube under different bias conditions. *IEEE Sensors Journal* 14, 10 (2014), 3606–3610.
- [23] LUNDSTEDT, H., GLEISNER, H., AND WINTOFT, P. Operational forecasts of the geomagnetic dst index. *Geophysical Research Letters* 29, 24 (2002).
- [24] MAJEWSKI, R. *Balancing particle absorption with structural support of the muon beam stop in muons-to-electrons experimental chamber*. PhD thesis, Northern Illinois University, 2013.

- [25] NASA. Two significant solar flares imaged by nasa's sdo. URL:<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/active-region-on-sun-continues-to-emit-solar-flares>, 2017.
- [26] SATO, K., AND SUZUKI, H. Analysis of neutrino burst from the supernova 1987a in the large magellanic cloud. *Physical review letters* 58, 25 (1987), 2722.
- [27] SCHOLBERG, K. Supernova neutrino detection in water cherenkov detectors. In *J. Phys. Conf. Ser.* (2011), vol. 309, p. 012028.
- [28] SPURIO, M. *Particles and Astrophysics*. Springer, 2014.
- [29] VERNETTO, S. Detection of gamma-ray bursts in the 1 gev–1 tev energy range by ground-based experiments. *Astroparticle physics* 13, 1 (2000), 75–86.
- [30] ZIEGLER, J. Terrestrial cosmic rays. *IBM J. DEVELOP* 40, 1 (1996).