



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO**

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN
CONTROL Y REDES INDUSTRIALES**

**“DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y TEST DE UN PROTOTIPO DE ESTACIÓN PARA
LA DETECCIÓN DE GAMMA RAY BURST”**

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del título de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA, CONTROL Y REDES
INDUSTRIALES**

Presentado por:

ROMMEL EUSEBIO SUAREZ VINUEZA

LUIS ANGEL ZAVALA DAVALOS

Riobamba – Ecuador

2012

AGRADECIMIENTO

A nuestros Maestros Dr. Dennis Cazar, Dr. Mario Audelo, Dr. Celso Recalde, Ing. Paúl Romero quienes con humildad, sinceridad y responsabilidad, supieron guiarnos e impartir sus valiosos conocimientos.

A los señores Dr. Xavier Bertou, Ing. Horacio Arnaldi, Ing. Miguel Sofo Haro colaboradores del Centro de Investigación de Energías Atómicas en Bariloche, Argentina, por brindarnos el espacio para desarrollar el estudio de la electrónica del proyecto LAGO y su aporte para la culminación de la tesis.

DEDICATORIA

A Dios mi Madre Virgen de Agua Santa, Virgen del Quinche por guiarme e iluminarme en toda mi carrera politécnica.

A mi mami Osmana Vinueza por ser la mujer más importante en mi vida que sin su apoyo no hubiera llegado hasta este punto gracias. A mi padre Ing. Ricardo Suarez por estar junto en el desarrollo de mi vida estudiantil.

A toda mi familia por sus consejos y ayuda cuando los necesite. A mi Abuelito José, mi tío Freddy y a mí enamorada por ser los angelitos que me protegen y me apoyan siempre.

A todos mis amigos gracias por compartir los buenos momentos de estudio y diversión en la poli.

Rommel

Agradezco a Dios y a mis padres por haberme brindado todo durante esta vida estudiantil, tanto en el aspecto humano dando consejos sabios, como en lo económico.

Su apoyo ha sido de gran ayuda para llegar a esta instancia de mi vida, ya que esto que he logrado es de y para ellos.

A mi familia, mis hermanos y mi abuelita que de igual manera han estado presentes cuando he necesitado apoyo para salir adelante.

Todo este logro alcanzado será uno de los primeros pilares que forjaran mi camino hacia un buen futuro, en unión a los seres que más me quieren y quiero.

Luis

FIRMAS DE RESPONSABLES Y NOTA

NOMBRE	FIRMA	FECHA
Ing. Iván Menes DECANO DE LA FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
Ing. Paúl Romero DIRECTOR DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES INDUSTRIALES
Ing. Paúl Romero DIRECTOR DE TESIS.
Dr. Mario Audelo MIEMBRO DEL TRIBUNAL
Tec. Carlos Rodríguez Carpio DIRECTOR DPTO DOCUMENTACIÓN
NOTA DE LA TESIS	

TEXTO DE RESPONSABILIDAD

“Nosotros **ROMMEL EUSEBIO SUAREZ VINUEZA Y LUIS ANGEL ZAVALA DÁVALOS**, somos responsables de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en esta tesis; y, el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado pertenece a la **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**”.

.....
ROMMEL EUSEBIO SUAREZ VINUEZA

.....
LUIS ANGEL ZAVALA DÁVALOS

INDICE DE ABREVIATURAS

ADC's	Convertidor Analógico-Digitales
CM	Módulo de Comunicación
CPU	Unidad Central de Proceso
E/S	Entradas y Salidas
IP	Protocolo de Internet
PC	Computadora personal
PMT	Sensor Fotomultiplicador
PWM	Modulación por Ancho de Pulso
R	Resistencia
RAM	Memoria de lectura y escritura
RJ 45	Conector para Cables UTP
ROM	Memoria de solo lectura
TDD	Tarjeta de Digitalización
TN2	Tarjeta Nexys2
VDC	Voltaje de corriente directa
VCA	Voltaje de corriente alterna.
SMA	Conector para cable coaxial
Γ, γ	Gamma es una unidad de la densidad de flujo magnético, 1 gamma = 10^{-9} tesla o 1 nanotesla.
erg	El ergio es la unidad de medida de energía en el sistema de unidades CGS 1 ergio = 1×10^{-7} joules
eV	El electronvoltio es una unidad de energía que representa la energía cinética que adquiere un electrón cuando es acelerado por una diferencia de potencial de 1 voltio. 1 ergio = 624,15 GeV
GZK	Este corte es un límite teórico para la energía máxima que podrían tener los rayos cósmicos, al menos los provenientes de nuestra galaxia. El límite es 5×10^{19} eV

INDICE GENERAL

PORTADA	
AGRADECIMIENTO	
DEDICATORIA	
FIRMAS DE RESPONSABILIDAD	
RESPONSABILIDAD DE LOS AUTORES	
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE TABLAS	
INTRODUCCIÓN	

CAPITULO I GENERALIDADES

1.1 Antecedentes.....	13
1.2 Justificación.....	14
1.3 Objetivos.....	15
1.3.1 Objetivo General.....	15
1.3.2 Objetivos Específicos.....	15
1.4 Hipótesis.....	16

CAPITULO II RAYOS GAMMA

2.1 GRBs o destellos de rayos gamma.....	17
2.2 Detección de GRBs.....	20
2.3 Espectro de Partículas Cósmica.....	22
2.4 Origen de las Partículas Cósmicas de altas energías.....	25
2.5 Arribo de las partículas cósmicas a la tierra.....	25
2.5.1 La Magnetósfera de la Tierra.....	25
2.5.2 Anomalía del Atlántico sur.....	27
2.6 Cascada de Partículas.....	29
2.7 Partículas elementales.....	34

CAPITULO III PROYECTO LAGO Y SU DETECTOR DE SUPERFICIE

3.1 PROYECTO LAGO (Large Aperture Gamma ray burst Observatory).....	35
3.2 Efecto Cherenkov.....	36
3.3 Análisis del Efecto Cherenkov para detectores de superficie.....	40

3.4 Descripción del Detector Cherenkov de superficie.....	43
3.5 Ventajas de usar detectores Cherenkov de superficie.....	44
3.6 Resumen de la detección de rayos gamma por medio de un detector Cherenkov.....	45

CAPITULO IV

PROTOTIPO DE UN DETECTOR CHERENKOV PARA LA DETECCIÓN DE GRBs (DESTELLOS DE RAYOS GAMMA)

4.1 Diagrama de bloques de un detector cherenkov.....	46
4.2 El tanque.....	47
4.3 Fotomultiplicador (PMT).....	49
4.4 Base del PMT.....	51
4.5 Tarjeta digitalizadora.....	53
4.6 Conexión entre la tarjeta digitalizadora y la base del PMT.....	55
4.7 Tarjeta FPGA NEXYS 2.....	56
4.8 Sensor de presión y temperatura.....	58
4.9 GPS.....	60
4.10 Programación de la FPGA NEXYS 2.....	62
4.11 Software, librerías y programas necesarios para las adquisiciones del detector.....	64

CAPITULO V

SOFTWARE, PRUEBAS, E INICIO DE LA ADQUISICION DEL DETECTOR

5.1 Pruebas en la tarjeta digitalizadora.....	65
5.2 SOFTWARE.....	72
5.3 Sentencias y comandos de control para software lago.....	75
5.4 Inicio de la adquisición del detector.....	77
5.5 Mantenimiento del detector.....	79
5.6 Toma de datos del voltaje de control.....	80

CAPITULO VI

RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Archivo .dat generado por la adquisición.....	81
6.2 Resultados: HISTOGRAMAS.....	83
6.3 CONCLUSIONES.....	86
6.4 RECOMENDACIONES.....	87

RESUMEN

SUMMARY

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

INDICE DE FIGURAS

Figura II.1	Satélite Vela.....	17
Figura II.2	Satélite BATSE.....	18
Figura II.3	Satélite Beppo-SAX.....	18
Figura II.4	Satélite SWIFT.....	19
Figura II.5	Producción de Rayos Gamma.....	21
Figura II.6	Cascada electromagnética.....	22
Figura II.7	Espectro de partículas cósmicas (flujo en función de la energía).....	23
Figura II.8	Espectro de partículas cósmicas en la región de alta energía.....	24
Figura II.9	Magnetósfera de la tierra.....	26
Figura II.10	Partícula cósmica llegando a la tierra.....	27
Figura II.11	Anomalía del Atlántico Sur AAS.....	28
Figura II.12	Anomalía del Atlántico Sur AAS y flujo de patrones.....	28
Figura II.13	Lluvia de incidencia vertical simulada por el programa de simulación... ..	29
Figura II.14	Representación esquemática de una hadrónica de partículas.....	30
Figura II.15	Estructura vertical de la atmósfera terrestre	33
Figura III.1	Localización de los detectores de LAGO.....	35
Figura III.2	F/A-18 “Hornet” rompiendo la barrera del sonido.....	37
Figura III.3	Partícula viajando en medio dieléctrico diferente del vacío a $v < \text{luz}$	37
Figura III.4	Partícula viajando en medio dieléctrico diferente del vacío a $v > \text{luz}$	38
Figura III.5	Radiación de Cherenkov en la piscina del Advanced Test Reactor.....	39
Figura III.6	Partícula desplazándose sin perturbar a los átomos del medio.....	40
Figura III.7	Partícula desplazándose perturbando drásticamente los átomos.....	41
Figura III.8	Condición para que se produzca radiación Cherenkov.....	42
Figura III.9	Ancho de banda de emisión de radiación Cherenkov.....	43
Figura III.10	Detector de superficie con un fotomultiplicador.....	44
Figura III.11	Resumen de la detección de rayos gamma.....	45
Figura IV.1	Diagrama de bloques de detectores cherenkov de GRBs.....	46
Figura IV.2	TYVEK en una estructura de tubo pvc	47
Figura IV.3	Tanque cubierto exteriormente por blackout y plástico negro.....	48
Figura IV.4	Tanque adaptado correctamente para la detección	38
Figura IV.5	Fotomultiplicador de 9 pulgadas.....	49
Figura IV.6	Dimensiones del Fotomultiplicador de 9 pulgadas.....	50
Figura IV.7	Cascada de electrones generadas en el fotomultiplicador.....	50
Figura IV.8	Base del PMT con sus conectores principales.....	51
Figura IV.9	Esquema del conector de la base del PMT	51
Figura IV.10	Arreglo de resistencia para el divisor de tensión de la base PMT	52
Figura IV.11	Tarjeta Digitalizadora.....	53
Figura IV.12	Conectores de la tarjeta digitalizadora.....	53
Figura IV.13	Canales de Slow Control	54
Figura IV.14	Cable para la conexión entre conectores SMA hembra.....	55
Figura IV.15	Placa RJ-45 a DB-15.....	55
Figura IV.16	Cable DB-15 a RJ-45.....	55
Figura IV.17	Tarjeta FPGA NEXYS 2.....	56

Figura IV.18	Conectores a tener en cuenta en Tarjeta FPGA NEXYS 2	56
Figura IV.19	Diagrama de bloques de la NEXYS 2.....	57
Figura IV.20	Esquema de las fuentes de alimentación para la NEXYS 2.....	58
Figura IV.21	Sensor de presión y temperatura.....	59
Figura IV.22	Conexión del sensor HP03S a la NEXYS 2.....	59
Figura IV.23	GPS Motorola ONCORE.....	60
Figura IV.24	Pines del conector del GPS Motorola ONCORE.....	61
Figura IV.25	Software ISE para la programación de la FPGA.....	62
Figura IV.26	Entorno de programación de software ISE de XILINX.....	63
Figura V.1	Jumper JP50 de la tarjeta digitalizadora.....	65
Figura V.2	Jumper JP4 de la NEXYS 2.....	66
Figura V.3	Power select de la NEXYS 2 en la posición de wall.....	66
Figura V.4	Jumpers JP20 y JP21 de la tarjeta digitalizadora.....	66
Figura V.5	Conexión entre NEXYS y la digitalizadora con conector HIROSE.....	67
Figura V.6	Conexión de 12V a NEXYS 2.....	67
Figura V.7	Conexión a tierra del multímetro para realizar mediciones	68
Figura V.8	Pulso del generador que ingresa a la tarjeta digitalizadora.....	69
Figura V.9	Pulso en la entrada de los AD8011 de la tarjeta digitalizadora.....	70
Figura V.10	Pulso a la salida de los AD8011 multiplicado por 2.....	70
Figura V.11	Pulso final que ingresará a los AD9203 para ser digitalizados.....	71
Figura V.12	Archivos de la carpeta de instalación del software LAGO-VLR0	73
Figura V.13	Creación de los archivos PROCESS y LAGO.....	73
Figura V.14	Archivo de la descarga para el FPGA.....	74
Figura V.15	Pulso del PMT visto en el osciloscopio.....	78
Figura VI.1	Estructura del archivo .dat de pulsos.....	81
Figura VI.2	Archivo .dat de adquisición	82
Figura VI.3	Histograma generados con el archivo process.....	83
Figura VI.4	Histograma .cal.....	83
Figura VI.5	Histograma .sol.....	84
Figura VI.6	Histograma .sol ejemplo.....	84
Figura VI.7	Histograma de pico y de carga.....	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla IV.I	Características del Fotomultiplicador de 9 pulgadas.....	49
Tabla IV.II	Conexiones del conector DB15 de las bases	52
Tabla IV.III	Pines del sensor de presión HP03S.....	60
Tabla IV.IV	Pines del GPS Motorola Oncore.....	62
Tabla V.I	Comandos básicos del software de LAGO.....	75
Tabla V.II	Comandos avanzados del software de LAGO.....	75
Tabla V.III	Voltajes de control de los canales de la tarjeta digitalizadora.....	80

INTRODUCCIÓN

Varias veces al día se producen explosiones de rayos gamma en alguna parte distante del Universo. Estos estallidos, cuando duran más de dos segundos son llamados explosiones largas y marcan generalmente el lugar del violento final de las estrellas más masivas del Universo, así como el lugar donde muy probablemente se habrá formado un agujero negro. Por otro lado, las explosiones cortas, cuya duración es de menos de dos segundos, marcan el lugar donde dos estrellas (girando una alrededor de la otra) se empiezan a acercarse vertiginosamente deformando todo el espacio-tiempo a su paso y fusionándose en un destello fulgurante que también genera una explosión de rayos gamma.

Esto lleva inevitablemente a la formación de un agujero negro, la forma más compacta de materia que conocemos en la naturaleza.

Pero a todo esto, ¿qué son los rayos gamma? Son la forma de luz más potente que conocemos y que se forma cuando, literalmente, desmembramos átomos y partículas subatómicas. Solamente durante los eventos más energéticos que se conocen es posible producir esta radiación. Dos ejemplos son: la explosión de una bomba atómica en la que se están dividiendo átomos de uranio o plutonio y que ocurre a escala humana y, el segundo caso, una explosión de supernova en la cual una estrella muy grande explota de forma violenta, a escala estelar.

Todos los seres que habitamos la superficie de la Tierra estamos protegidos de la radiación nociva del espacio exterior por la capa de ozono, ubicada en la estratosfera. Esta capa absorbe la radiación ultravioleta, de rayos X y de rayos gamma, e impide que esos fotones altamente letales dañen nuestros tejidos celulares. Por lo tanto si queremos detectar este tipo de radiación, a priori asumiríamos que debemos localizar nuestros detectores en el espacio exterior.

Es por eso que los científicos de todo el mundo se han valido principalmente de costosos satélites para detectar esta radiación. Sin embargo, se está desarrollando diferentes proyectos a nivel mundial que estudiarán los rayos gamma desde la superficie terrestre ayudados de diversas ramas de la ciencia entre los cuales se puede citar: a la Electrónica, Física, Matemática, Química, Mecánica, Astrofísica, entre otras.

Y en el transcurso de este documento presentado en 6 capítulos se verá una de estas formas que se está utilizando en el proyecto LAGO para la detección GRBs, basándose en el desarrollo de un prototipo.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1 Antecedentes

El estudio de fenómenos cosmológicos que generan alta energía en este caso los GRBs “Gamma Ray Bursts” o en español Destellos de Rayos Gamma es uno de los temas más actuales e interesantes de estudio en el campo de la astrofísica para saber su origen y magnitud de energía, entre otros aspectos de estos fenómenos.

En la actualidad, el mayor aporte al conocimiento de los GRB proviene de los datos que se recogen mediante el uso de satélites especializados para esta tarea, estos instrumentos son capaces de captar el espectro de energías de esos destellos pero el gran inconveniente de estos es su gran costo, por ello científicos de todo el mundo han visto la necesidad de desarrollar diferentes proyectos para estudiar rayos gamma desde la superficie terrestre.

Entre estos se encuentra un proyecto conformado por varios países de la comunidad Latinoamericana llamado LAGO (Large Aperture Gamma Ray Burst Observatory) el cual utiliza detectores cherenkov, los que están basado en su mayor parte a los utilizados en el Observatorio Pierre Auger, para detectar y estudiar GRBs. Para maximizar la posibilidad de detección LAGO ha dispuesto que el lugar de instalación del detector deba encontrarse en un lugar de gran altitud.

Ya que Ecuador es un país que se está incorporando en el proyecto LAGO y además cuenta con lugares de gran altitud, se ha dispuesto de el nevado Chimborazo, contando con un refugio a más de 4800 metros de altura sobre el nivel del mar, es el lugar ideal para la instalación del sistema.

El sistema en cuestión formará parte de la red de detectores que el proyecto LAGO posee en toda Latinoamérica. Antes de la instalación del sistema en el lugar final de funcionamiento se necesita diseñar, construir y probar un prototipo del mismo tipo en la ESPOCH para así desarrollar el sistema en modo que no se tengan problemas mayores cuando se proceda a instalar en el lugar final de utilización.

LAGO es un proyecto a nivel internacional, en el cual intervienen diferentes centros de investigación, universidades, entre otros organismos de diferentes países como Colombia, Argentina, Venezuela, México, Bolivia, Perú, Guatemala, Italia, Francia entre otros. Por la complejidad del sistema a desarrollar el grupo de investigadores es esencialmente multidisciplinar. Entre las áreas más importantes que serán de gran aporte para el desarrollo de LAGO ECUADOR podemos mencionar: astrofísica, electrónica, química, física, informática, telecomunicaciones, seguridad industrial, energías renovables, entre otras.

1.2 Justificación

El proyecto LAGO ha manifestado su interés por instalar un sistema detector de GRBs en el nevado Chimborazo, la razón de esta decisión es que la altura de esta montaña es ideal para la detección de partículas y energía que componen los GRBs.

Aunque este mismo sistema de detección ya ha sido instalado en otras montañas de los Andes es necesario adaptarlo para que funcione correctamente en cada punto. La nueva versión de este sistema debe tomar en cuenta las condiciones de altitud, logística, acceso a fuentes de energía y facilidad para el *download* de los datos que se adquieren.

Para minimizar problemas de instalación y funcionamiento del sistema final es indispensable, diseñar, implementar y probar un prototipo en un lugar fácilmente accesible. Es por esto que el presente proyecto de tesis propone la realización de estas actividades de dicho prototipo en la en la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO.

Por todo lo antes mencionado es de vital importancia para el correcto funcionamiento del sistema de detección de GRB que el prototipo sea probado en todos sus aspectos, funcionales, de prestaciones, de duración y resistencia y se puedan determinar parámetros fundamentales como el MTBF (Valor medio entre fallas), consumo de energía, cantidad de

datos generados en el tiempo, la necesidad o no de desarrollar sistemas de redundancia y de backup en caso de mal funcionamiento.

El principio fundamental para el estudio de los GRB es un sistema de detección de partículas provenientes de GBSs por medio de un sensor fotomultiplicador el cual genera un pulso de tensión medible en su ánodo que es proporcional al flujo de fotones de alta energía que componen los GRB, este pulso de voltaje oportunamente amplificado y digitalizado se almacena en archivos que estarán disponibles para un posterior análisis realizado por personal capacitado en el campo de la física de partículas cósmicas.

Las modificaciones y mejoras que se desarrollaran en el presente trabajo de tesis deberán ser soluciones integrales y compatibles con las otras estaciones ya instaladas en otros países dentro del marco del proyecto LAGO. De igual manera todos los procesos que ya hemos mencionado y otros por explicar deberán tener un grado muy alto de eficiencia en los métodos de control del sistema, que den a conocer la capacidad de investigación y desarrollo adquirida en el transcurso de nuestra carrera de **INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES INDUSTRIALES**.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

- Diseñar, implementar y probar un prototipo de estación de detección de GRBs.

1.3.2 Específicos

- Estudiar el funcionamiento de una estación de detección de GRB.
- Construir un prototipo en la ESPOCH, para el proyecto LAGO.
- Realizar pruebas de funcionamiento, rendimiento, estrés del sistema para desarrollar un protocolo de mantenimiento y reparación.
- Proponer nuevas alternativas o mejoras para futuros sistemas para este tipo de proyectos.

1.4 Hipótesis

El proyecto LAGO ha identificado al nevado Chimborazo como un sitio estratégico para la instalación de una estación para la detección de GRB. Los sistemas instalados en otros lugares de la cordillera de los Andes no presentan las condiciones de altura, temperatura y otros aspectos climáticos que se dan en el Chimborazo, por lo que es indispensable el diseño, construcción y prueba de un prototipo de estación para la detección de GRBs en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo el cual será detallado en este proyecto de tesis además prestará ayuda para identificar y corregir todos los problemas que puedan presentarse a futuro en el momento de la instalación en el nevado Chimborazo ubicado a 4800 metros de altura.

CAPITULO II

RAYOS GAMMA

2.1 GRBs o destellos de rayos gamma.

Los GRB se detectaron por primera vez en 1967 por los satélites Vela, una serie de satélites diseñados para detectar pruebas de armas nucleares encubiertas, estos satélites fueron diseñados especialmente para verificar que se estaba cumpliendo con el tratado de No Proliferación del Armamento Nuclear. Cuando éstos misteriosos destellos de rayos gamma se detectaron por primera vez, se determinó que ellos no procedían de la tierra, la primera suposición (rápidamente abandonada) era que podían ser producto de una avanzada civilización extraterrestre. Pronto, se dieron cuenta que se trataba de un nuevo y desconcertante fenómeno cósmico. En los años posteriores a su descubrimiento se propusieron cientos de modelos teóricos para explicar estos brotes, tales como las colisiones entre cometas y estrellas de neutrones.

Desde su descubrimiento a finales de 1960, los destellos de rayos gamma, han sido de gran interés para los astrofísicos. Un GRB se caracteriza por su repentina emisión de rayos gamma durante un breve período de tiempo. La luminosidad alcanzada durante esta explosión es típicamente entre 10^{51} a 10^{55} egrs, si la emisión es isotrópica. Las fuentes astrofísicas de estos destellos aún no está claro, pero los candidatos podrían ser colapso de estrellas masivas y choque de binarios compactos.



Figura II.1 Satélite Vela

Los primeros datos de GRB fueron proporcionados por el instrumento BATSE (Burst And Transient Source Experiment) a bordo del satélite Compton Gamma Ray Observatory (CGRO 1991-2000) aportó importante información sobre los destellos. Primero, eran isótropos, y se veía en promedio un destello por día. Segundo, la duración de esos destellos era entre 0.01 y 100 segundos, con dos poblaciones, llamadas destellos cortos (<2 s) y destellos largos (>2 s). Por último, la distribución de luminosidad observada no era compatible con una distribución uniforme de fuentes, ya que se observaba un déficit a baja luminosidad.

Con el satélite Beppo-SAX, lanzado el 30 de abril de 1996, un nuevo paso se hizo en la comprensión de los GRB. Beppo-SAX permitió la detección de contrapartes de los destellos largos en otras bandas de energía, en X con sus propios instrumentos, y en óptico comunicando las coordenadas de los destellos detectados a otros telescopios. Las mediciones en óptico permiten hacer espectroscopía y así medir el corrimiento al rojo, lo cual da la distancia al afterglow (interacción entre la explosión y el medio ambiente alrededor de la explosión).



Figura II.2 Satélite BATSE



Figura II.3 Satélite Beppo-SAX

Con el satélite SWIFT (lanzado el 22 Noviembre 2004), se observaron contrapartes ópticas también para destellos cortos, confirmando el entendimiento más aceptado sobre las posibles fuentes de destellos gamma: los cortos serían el resultado del choque entre dos estrellas de neutrones o agujeros negros en un sistema binario, mientras que los largos provendrían de hipernovas, explosiones de estrellas tipo supernovas cuyas masas serían mayor a 10 masas solares. GLAST es la nueva generación de satélites experimentales de

GRB lanzado el 11 de junio de 2008. Su sensibilidad debería permitir obtener GRB individuales hasta 300 GeV. Entre los objetivos principales de GLAST, está entender los mecanismos de aceleración en núcleos galácticos activos, los pulsares, y restos de supernovas.

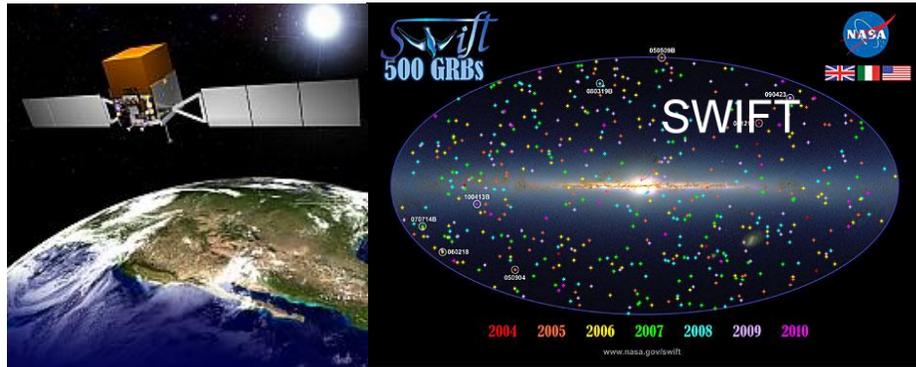


Figura II.4 Satélite SWIFT

Hasta el día de hoy, el mayor aporte al conocimiento de los GRB vino de los satélites. Si bien el espectro en energía de esos destellos se conoce bien a bajas energías, se tiene muy poca información sobre la parte de altas energías (>1 GeV). El detector EGRET (*Energetic Gamma Ray Experiment Telescope*) a bordo del satélite CGRO detectó la contraparte de alta energía de 16 GRB, con un fotón de 18 GeV como mayor energía para el destello del GRB940217. A esas energías, los flujos son demasiado bajos para los satélites, e intentar observar los GRB desde el suelo parece ser la única solución.

La detección de GRB desde la tierra, tiene una ventaja sobre uno espacial y es esencialmente su tamaño. Mientras el metro cuadrado parece ser un límite de superficie de detección en el espacio, uno puede razonablemente hablar desde decenas hasta miles de metros cuadrados en el suelo. Fotones de energía mayor a 1 GeV desarrollan una cascada electromagnética en la atmósfera, y se puede detectar los fotones a través de esa cascada.

Pero se enfrenta con un importante fondo de partículas cósmicas comunes, y con la absorción atmosférica que limita la observación solo a las más altas energías.

Experimentos como AUGER, MILAGRO o ARGO/YBJ y LAGO intentan detectar destellos gamma a través de sus cascadas. La única indicación de detección de un destello gamma por este método fue el GRB970417 por Milagrillo, el prototipo de MILAGRO. Con

el fin de liberarse de las limitaciones del Observatorio Pierre Auger, tales como la altura que es de 1400 msnm que limita seriamente su eficiencia por causa de la absorción atmosférica de las partículas secundarias, el limitado ancho de banda entre los detectores y la central para transmitir un gran caudal de datos y los niveles de disparo impuestos por el observatorio para su funcionamiento, se hizo conviene tener un detector dedicado a la detección de destellos gamma con el método de la “partícula individual ”que consiste en no detectar la cascada de fotones originada por destellos gamma, ya que esta muy absorbida, sino a lo mejor una partícula de la cascada, así, si muchos fotones provienen del destello, se puede esperar observar durante unos segundos varios fotones secundarios y si esta cantidad es mayor a la fluctuación del fondo de fotones, se podría detectar el destello.

Los detectores dedicados a detectar destellos gamma se encuentran dentro del proyecto LAGO(*Large Aperture GRB Observatory*) que tiene detectores de superficie ubicados en lugares como: Chacaltaya a 5300m (Bolivia), Sierra Negra a 4600m (México), Pico Espejo a 4765m (Venezuela), Perú, Colombia y al norte de Argentina para detectar las partículas generadas por un γ primario.

2.2 Detección de GRBs.

Los destellos de rayos gamma (GBRs), son eventos cortos que ocurren con una razón promedio de pocos por día a través del universo, y que en breve período de tiempo (segundos) inundan completamente con su radiación casi todo el cielo de rayos gamma. La actual interpretación de cómo se produce esta prodigiosa liberación de energía, es correspondiente a la gran cantidad de energía gravitatoria que es liberada en corto tiempo (seg. o menos) en una pequeña región del espacio (10 Km. o menos) en un evento cataclísmico estelar. Parte de la energía se escapa en los primeros segundos como neutrinos térmicos, otra fracción substancial puede ser emitida como ondas gravitacionales. Esta repentina liberación de energía podría resultar en una “bola de fuego” de una alta temperatura expandiéndose a velocidades altamente relativistas, el cual sufren una disipación interna que conduce a rayos gamma, que más tarde se convierte en ondas de

choques que desacelera contra el medio externo, produciendo un *afterglow* que se debilita progresivamente.

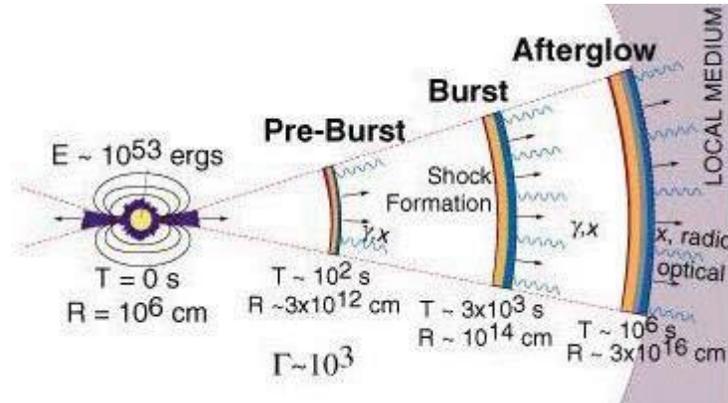


Figura II.5 Producción de Rayos Gamma

Las técnicas de detección de los rayos gamma se ven influenciada por tres factores fundamentales:

- La atmósfera terrestre es opaca a la radiación γ , de manera que de las cumbres más altas existe la probabilidad de no detectar ésta radiación. Solo desde globos o satélites es posible la detección de rayos γ primarios.
- Los flujos a detectar son muy bajos y disminuyen rápidamente al aumentar la energía.
- El flujo de partículas cósmicas cargadas es mayor que el de fotones γ y al haber sido desviados por los campos magnéticos tienen direcciones isotropas. El desarrollo de técnicas de separación de la componente hadrónica (en especial protones, que se suponen $\sim 90\%$) de la componente *gamma* es primordial en cualquier experimento de astronomía γ

La detección de fotones γ es posible desde observatorios situados en la tierra, ya que los rayos γ primario interactúan con la atmósfera y producen un conjunto de partículas que se conoce como chubascos atmosféricos extensos. Las partículas generadas en una cascada (figura II.6) se distribuyen sobre una superficie que abarca unos cientos de metros

cuadrados. De esta forma, el detector no necesita estar en la ruta de intercepción de la partícula incidente para poder detectarla. Acá es donde entra el proyecto LAGO (Large Aperture GRB Observatory) que tiene detectores de superficies ubicados en lugares como: Chacaltaya a $5300m$ (Bolivia), Sierra Negra a $4600m$ (México), Pico Espejo a $4765m$ (Venezuela) entre otros para detectar las partículas generadas por un γ primario y tratar de reconstruirlo.

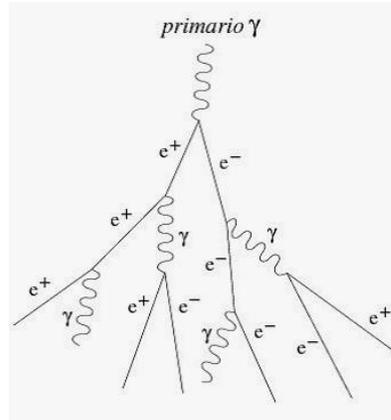


Figura II.6 Cascada electromagnética

Dado que los rayos γ no poseen carga no se ven desviados en su trayectoria, proporcionando así información sobre la dirección en que se encuentran las fuentes de partículas cósmicas.

2.3 Espectro de Partículas Cósmicas

Se han observado partículas cósmicas en un amplio rango de energías, que abarca desde energías menores a $10^9 eV$ hasta valores mayores a $10^{20} eV$. En la Figura II.7 se muestra el flujo de partículas cósmicas por m^2 , por unidad de ángulo sólido, por segundo y por GeV de energía ($d\phi / dE$) en función de la energía. Distintos métodos experimentales se utilizan para detectar partículas cósmicas según la energía que posean. En la Figura II.7 se muestra además las técnicas usadas en cada zona del espectro. Como se puede ver en la Figura II.7, el flujo observado disminuye rápidamente con la energía, desde aproximadamente 10^4 partículas por segundo y por m^2 para $10^9 eV$ y 10^{-28} por Km^2 y por segundo para $10^{20} eV$. La disminución del flujo con la energía sigue una ley de potencia $E^{-\alpha}$ en casi todo el rango conocido. Solo se observan algunos pequeños cambios en la pendiente. El primero de estos

quiebres se presenta a $\sim 10^{15.5} eV$ donde se pasa de $E^{-2.7}$ a $E^{-3.0}$, formando lo que se conoce como la primera rodilla, a partir de acá la aceleración de núcleos livianos en remanentes de supernovas deja de ser eficiente y la composición se vuelve más pesada

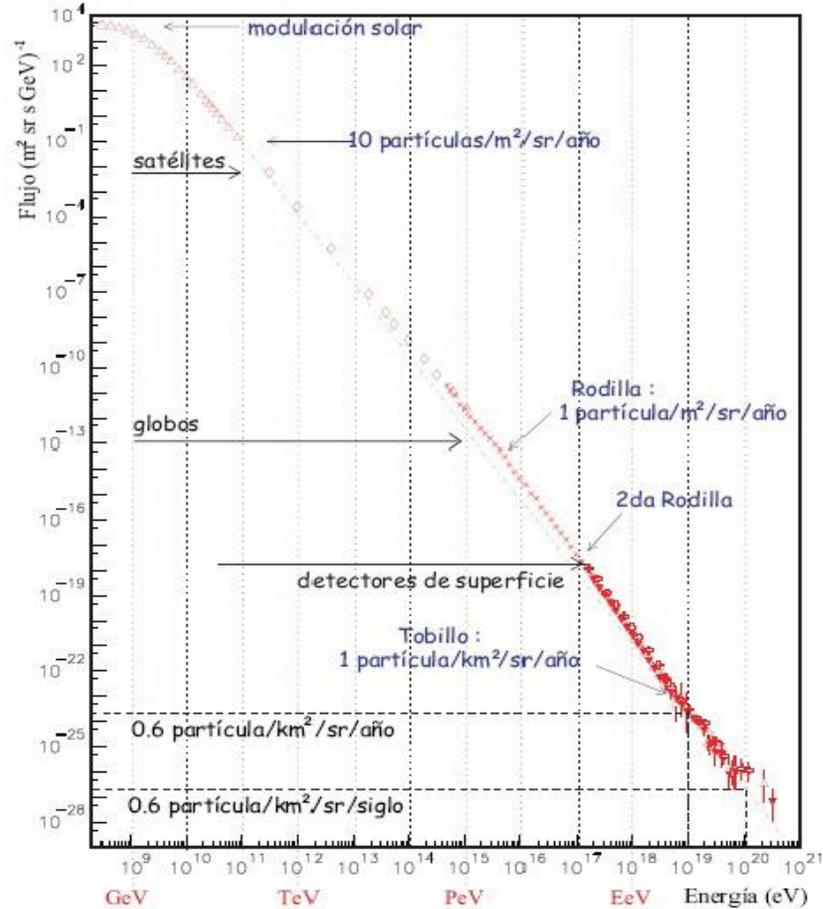


Figura II.7 Espectro de partículas cósmicas (flujo en función de la energía). La línea verde punteada corresponde a una ley de potencias de energías de la forma $E^{-2.7}$. Se muestra también los límites para las diferentes técnicas de detección usadas hasta la fecha.

El segundo cambio se produce a aproximadamente $10^{17.7} eV$ y corresponde a una nueva disminución de la pendiente hasta -3.3 y recibe el nombre de la segunda rodilla, para su explicación se ha sugerido que sería posible disponer de mecanismos de aceleración galácticos más energéticos que los remanentes de supernovas, básicamente, grupos de supernovas y configuraciones espirales de choque del viento solar galáctico. Luego de ésta, el espectro vuelve a aplanarse recuperando el exponente -2.7 y se forma el tobillo alrededor de $10^{18.5} eV$.

El origen de las partículas con energías entre la primera rodilla y la segunda rodilla es aún poco claro pero existe un consenso general de la naturaleza galáctica. Existen dos posibles mecanismos sobre la producción de éstas partículas: según el primero, éstas serían núcleos pre-acelerados en las cronósfera de estrellas tipo F (color amarillento y esta a 7500°C) y G (color amarillo y esta a 6000°C , ejemplo el sol), mientras que en el segundo se tratan de granos de polvo eléctricamente cargados que se condensan en los densos vientos de las estrellas gigantes rojas o azules. La segunda rodilla, aunque ha sido observada en varios experimentos (Akeno, Fly's Eye, y HiRes), su interpretación física es todavía incierta. El tobillo ha sido observado por Fly's Eye alrededor de los $3 \times 10^{18} \text{ eV}$. Esta observación fue confirmada por Haverah Park, Yakutsk y HiRes. El tobillo podría representar el punto de transición entre las componentes galácticas y extragalácticas del flujo de partículas cósmicas, el resultado de la creación de pares por protones propagándose en el fondo de radiación cósmica o el resultado de la propagación difusa de núcleos extragalácticos a través de campos magnéticos intergalácticos. A partir de 10^{19} eV , la disminución regular del espectro podría sugerir la existencia del corte GZK predicho por la teoría en $6 \times 10^{19} \text{ eV}$. Aún, así la forma del espectro final no está del todo establecida. La Figura II.8 muestran las experiencias registradas por experimentos para éstas energías con dos técnicas de detección

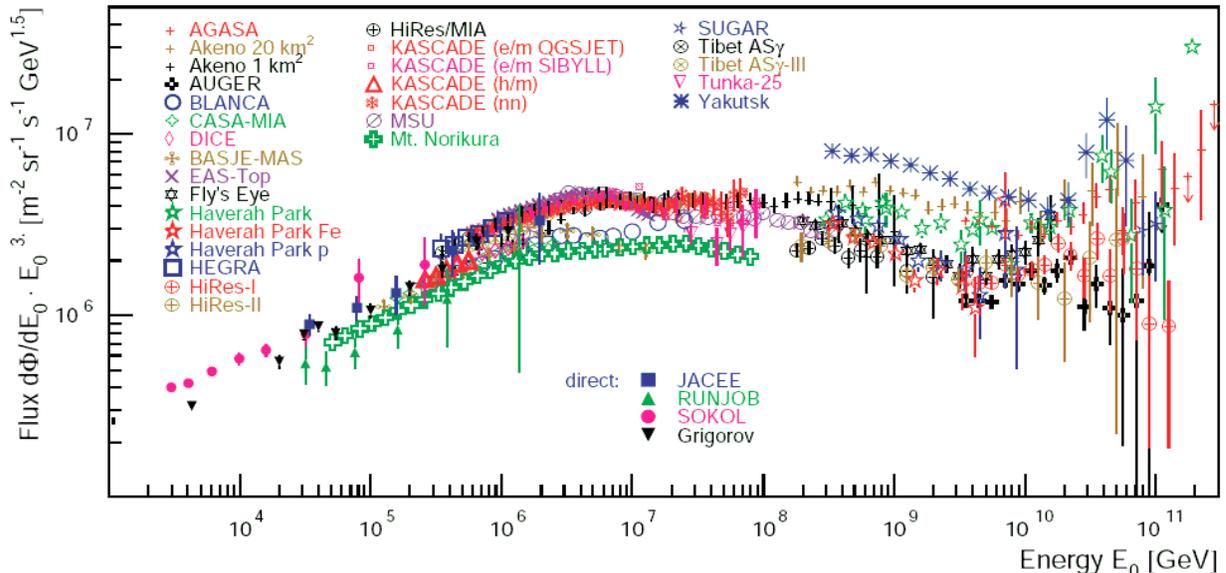


Figura II.8 Espectro de partículas cósmicas en la región de alta energía, determinado a partir de las mediciones de distintos experimentos,

Los distintos cambios en el espectro se encuentran relacionados también con cambios en la naturaleza de las partículas que arriban a nuestro planeta y por lo tanto con el espectro de energía y de masa en las posibles fuentes astrofísicas.

2.4 Origen de las Partículas Cósmicas de altas energías

Además de la forma que toma el espectro de energía de las partículas cósmicas de altas energías, existen dos preguntas fundamentales que aún se encuentran sin respuesta concluyente: cuál es la naturaleza y cómo adquieren la energía observada. Existen dos propuestas al respecto: la primera consiste en que las partículas inicialmente con baja energía alcanzan altas energías en forma progresiva por algún medio acelerador natural, la segunda propuesta, es el decaimiento de partículas supermasivas (creadas en procesos que datan del Universo primitivo) responsable de las partículas ultra energéticas observadas.

La distribución de las direcciones de arribo de las partículas ultra energéticas debería ser determinante para la decisión sobre uno y otro mecanismo. Si las partículas provienen de un acelerador astrofísico ubicado a una distancia menor al corte GZK, debería apuntar a ellas al no sufrir grandes desviaciones por la presencia de campos magnéticos, mientras que si son producto del decaimiento de partículas supermasivas la distribución de las direcciones de arribo debería ser esencialmente isótropa correlacionada sólo, si se desea, con la distribución de materia en el Universo.

2.5 Arribo de las partículas cósmicas a la tierra

2.5.1 La Magnetósfera de la Tierra

Es una región alrededor del planeta, en la que el campo magnético de ésta desvía la mayor parte del viento solar a través de una trayectoria circunferente, mientras que las líneas del campo geomagnético conducen el movimiento de las partículas cargadas sobre los polos magnéticos, formando así un escudo protector contra las partículas cargadas de alta energía procedentes del sol. La magnetósfera contiene gran parte de la exósfera y comienza a unos

500 kmsnm, por encima de la ionosfera, donde las partículas ionizadas de la atmósfera interaccionan con mayor intensidad con el campo magnético terrestre.

La magnetósfera interacciona con el viento solar en una región denominada magnetopausa

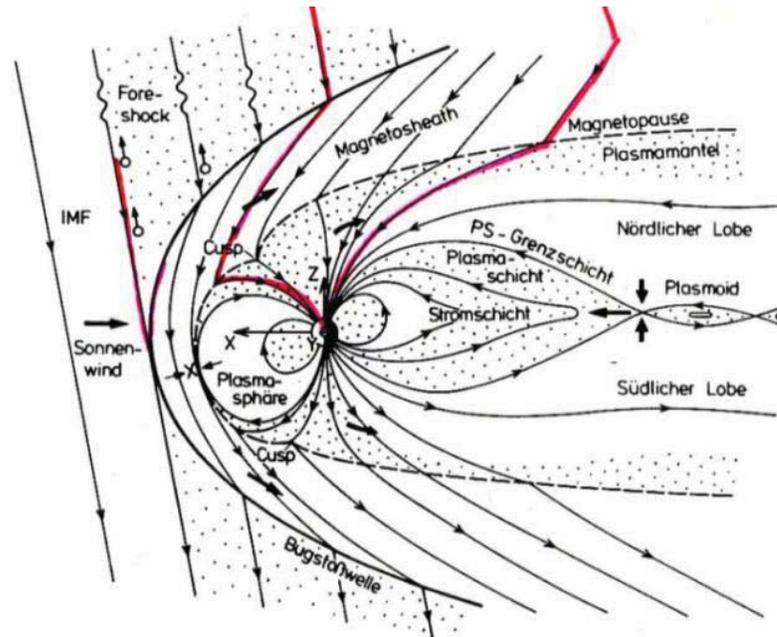


Figura II.9 Magnetósfera de la tierra

que se encuentra a unos 60000km de la Tierra en la dirección Tierra-Sol y a mucha mayor distancia en la dirección opuesta. Por delante de la magnetopausa se encuentra la superficie de choque entre el viento solar y el campo magnético. En ésta región el plasma solar se frena rápidamente antes de ser desviado por el resto de la magnetósfera. Las partículas cargadas del viento solar son arrastradas por el campo magnético sobre los polos magnéticos dando lugar a la formación de auroras polares, boreales en el hemisferio norte y australes en el hemisferio sur.

Las partículas cósmicas acercándose a la tierra, primero encuentran el campo magnético el cual desvía algunas partículas por completo. Las que atraviesan son desviadas por el campo magnético. Realizando un seguimiento de las trazas de las partículas cósmicas a través del campo magnético terrestre, se puede determinar si la dirección de inicio ("dirección asintótica") está relacionada con el punto de impacto.

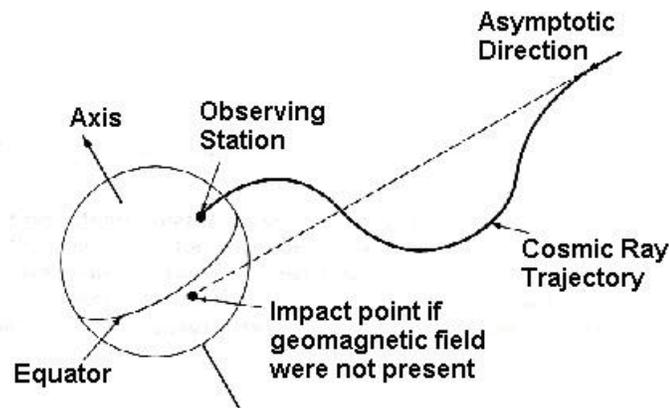


Figura II.10 Partícula cósmica llegando a la tierra

2.5.2 Anomalía del Atlántico sur

Es una región, donde los cinturones de radiación de Van Allen se encuentran a unos cientos de kilómetros de la superficie de la tierra. Como resultado de esa región la intensidad de radiación es más alta que en otras regiones. Esta anomalía es producida por una “depresión” en el campo magnético de la tierra en esa zona, ocasionada por el hecho de que el centro del campo magnético de la tierra está desviado de su centro geográfico en 450km . Algunos piensan que dicha anomalía es un efecto secundario de una reversión magnética, que consiste en un cambio en la orientación del campo magnético terrestre tal que las posiciones del polo norte y sur magnético se intercambian. Estos eventos los cuales se creen duran de cientos a miles de años a menudo implican un descenso prolongado de la fuerza del campo magnético seguida por una recuperación rápida después de que la nueva orientación se ha establecido.

La Anomalía del Atlántico Sur es de particular interés en la astrofísica de altas energías, ya que esta región es muy densa en radiación (alto flujo de partículas). El flujo de partículas es tan alto en esta región que a menudo los detectores de los satélites se deben apagar (o al menos colocarlos en modo “seguro”) para protegerlos de la radiación. Los límites de ésta anomalía varía con la altitud por encima de la tierra. A una altitud de 500Km dichos límites

oscilan entre -90 y 40 en longitudes geográficas y -50 a 0 en latitud geográfica. La medida de la anomalía se incrementa con la altitud en ésta región.

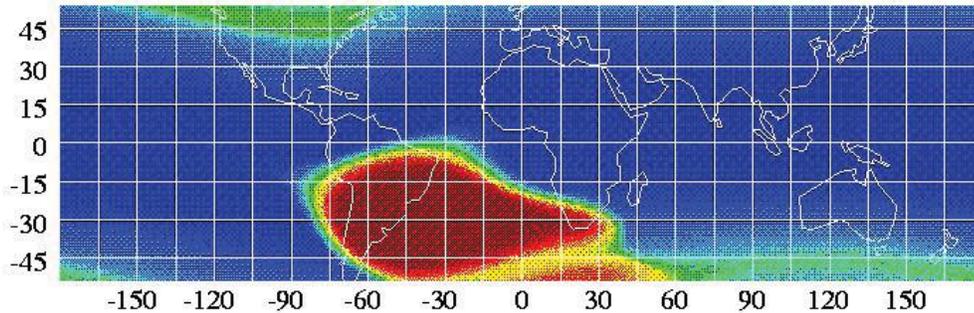


Figura II.11 Anomalía del Atlántico Sur (AAS)

En el mapa se muestra AAS (Anomalía Atlántico Sur) a una altitud de ~ 560 Km. Los datos fueron recolectados por el Detector Anomalía del Atlántico Sur (DAAS) a bordo de ROSAT (satélite Röntgen). El color rojo oscuro muestra el área de la AAS. Las bandas verde, amarillo y naranja representa los cinturones de partículas.

En el siguiente mapa se ilustra la AAS a ~ 850 Km, donde especifica el flujo de protones por segundo que atraviesan las diferentes zonas de la anomalía, destacando el flujo de protones mayor que $32/s$ en la zona central hasta menores que $1/s$ fuera de la anomalía. El observatorio Pierre Auger se encuentra entre la zona amarilla y parte de la roja donde el flujo de protones es mayor que el resto de las zonas, pero como los protones son de baja energía ($30-80$ KeV) no son de interés para el estudio de cascadas atmosféricas.

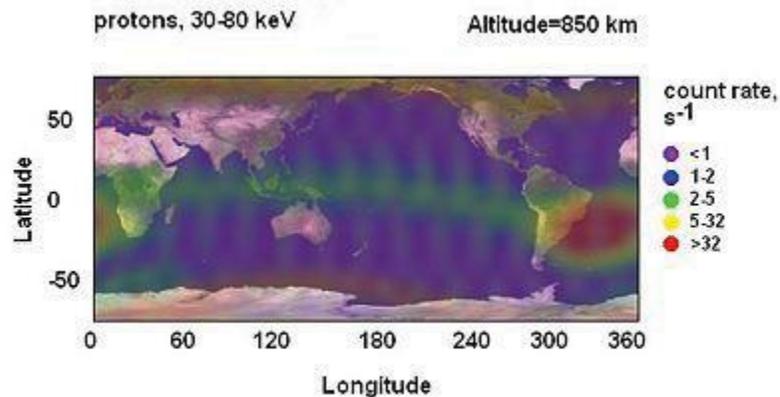


Figura II.12 Anomalía del Atlántico Sur AAS y flujo de protones.

2.6 Cascada de Partículas

2.6.1 Fenomenología Básica

Luego de atravesar el espacio exterior y de interactuar con los fotones de fondo perdiendo energía en su propagación, algunas partículas terminan de dispersar el resto de su energía en la atmósfera terrestre. La interacción de esta partícula primaria con las moléculas de aire presentes en la atmósfera genera otras partículas que interactúan a su vez con el aire o se desintegran. Así se genera una reacción en cadena que dará como resultado una cascada de partículas propagándose por la atmósfera llamada lluvia, chubascos o cascada atmosférica de partículas, Figura II.13

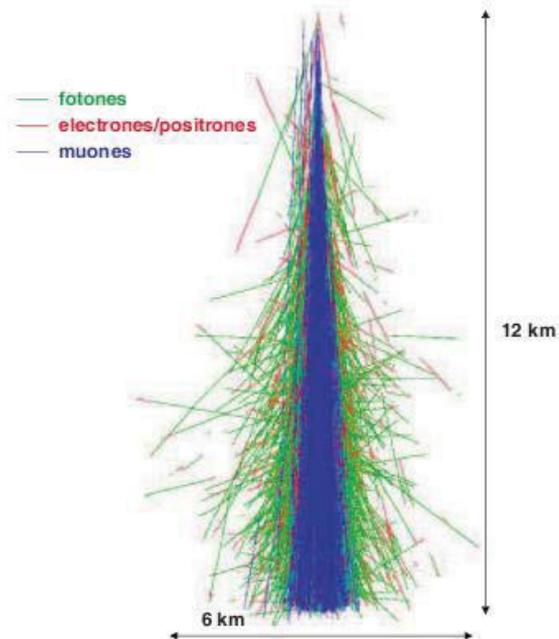


Figura II.13 Lluvia de incidencia vertical simulada por el programa de simulación MOCCA con una partícula primaria de $10^{19} eV$. Notar que la abundancia de un color no implica la de la partícula sino el orden en que la trayectoria fue dibujada

La evolución de la cascada de partículas depende de las características de la partícula primaria (naturaleza química, energía inicial, ángulo de incidencia) y en cierta medida, de las condiciones atmosféricas locales. El número de partículas crece rápidamente hasta alcanzar un máximo y luego disminuye a medida que la energía de las mismas cae por debajo del umbral para producir nuevas partículas. A medida que la lluvia se desarrolla, las

partículas secundarias se dispersan alejándose del eje determinado por la dirección de incidencia del primario. La configuración espacial del conjunto de partículas se asemeja a un “panqueque”, que se dirige a la superficie de la tierra a velocidades ultrarrelativistas, en la dirección de la partícula primaria. Este “panqueque” puede alcanzar unas decenas de kilómetros cuadrados al llegar al nivel del suelo, dependiendo de la energía del primario, su ángulo cenital y la altura a la que se produce el máximo de la misma. La mayor densidad de partículas se genera en la zona cercana al eje principal, disminuyendo rápidamente a medida que uno se aleja del mismo Figura II.14. Las partículas primarias con energía superiores a $10^{15} eV$ producirán cascadas y probablemente lleguen a la superficie terrestre. Las cascadas iniciadas por nucleones o núcleos, llamadas hadrónicas, pueden dividirse en tres componentes: una electromagnética, una muónica y una hadrónica Figura II.14

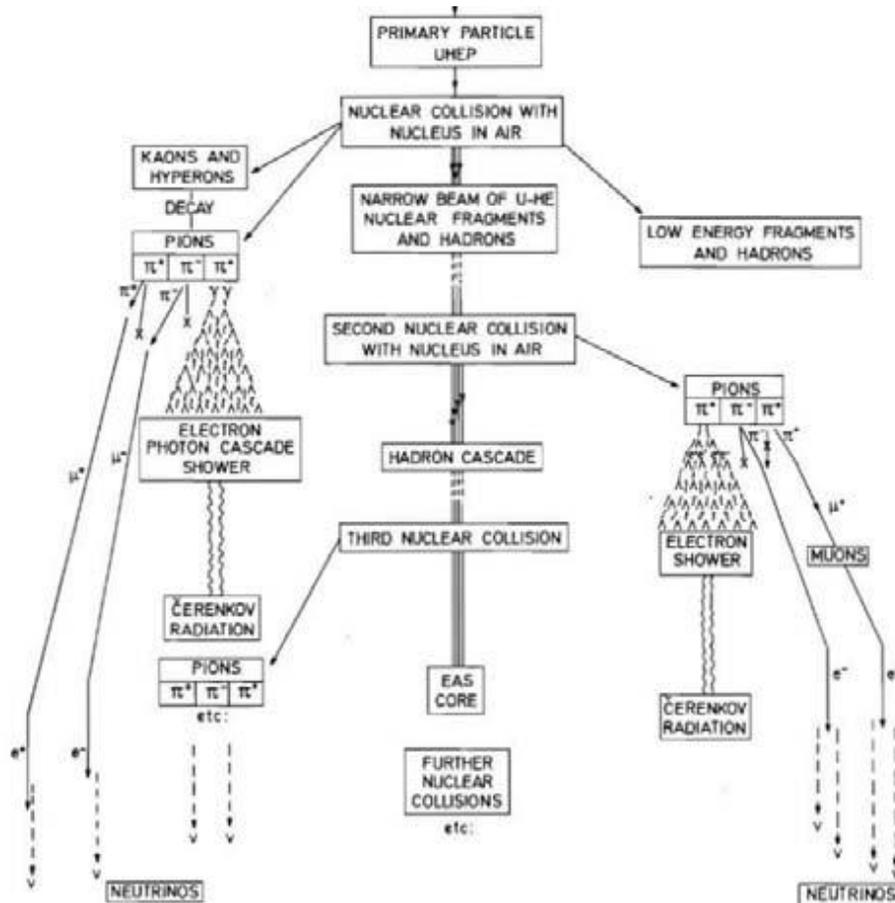
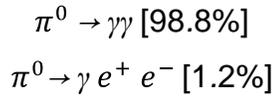


Figura II.14 Representación esquemática de una cascada hadrónica de partículas, con sus tres componentes

2.6.2 Cascada Electromagnética

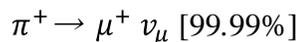
Las primeras interacciones hadrónicas dan origen a piones cargados y neutrones. Estos últimos decaen en γ según los siguientes procesos.



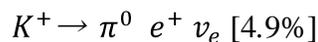
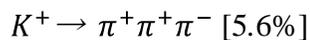
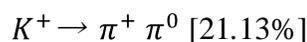
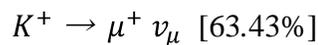
Que dan origen a la cascada electromagnética. Debido a que gran parte de la energía se disipa por este canal, el comportamiento de las grandes lluvias de partículas (“Extensive Air Showers” ó EAS) queda completamente determinado por las características de la cascada electromagnética. Por eso es válido suponer que una lluvia está formada por múltiples sub-lluvias electromagnéticas. Además, si el primario es un fotón de alta energía, el desarrollo de la lluvia será completamente electromagnético.

2.6.3 Cascada Muónica

Como casi toda la energía de la partícula primaria se disipa por el canal electromagnético, es mucho más directa la relación entre la energía de la partícula primaria E_0 y la distribución lateral de muones. Las primeras interacciones hadrónicas producen también piones cargados, los cuales, en los altos niveles de la atmósfera, tienen una mayor probabilidad de decaer que de interactuar con los átomos presentes. El decaimiento de piones cargados ocurre siguiendo la siguiente reacción.



Mesones extraños, principalmente Kaones, son también fuente de muones luego de su decaimiento vía



En primera aproximación, el número de muones aumenta a medida que la lluvia se desarrolla, llega a un máximo y luego se atenúa muy lentamente. Esto sucede debido a que

raramente estas partículas interactúan, prácticamente sólo pierden energía por ionización del medio (también es posible que los muones de baja energía decaigan).

2.6.4 Cascada Hadrónica

La componente puramente hadrónica de la lluvia, posee un nivel de dispersión lateral mucho más pequeño que para el de las otras dos componentes. Es por esto que el núcleo hadrónico se encuentra en general en regiones cercanas al eje de la lluvia totalmente desarrollada, se estima que la misma permanece concentrada en un radio no mayor a los $150m$ para una lluvia iniciada por un protón de $10^{18}EeV$.

2.6.5 La atmósfera terrestre

La intensidad de las interacciones que sufren las partículas con la materia va a depender del medio a través del cual se estén propagando. En éste caso el medio que atraviesan es la atmósfera terrestre, esto hace necesario conocer las principales características como su composición química y densidad para entender cómo se producen las cascadas de partículas secundarias. Nuestra atmósfera es un cascarón gaseoso que se extiende por varias centenas de kilómetros sobre la tierra. El 90% de su masa se encuentra acumulada en los primeros 18 Kmsnm. Solamente un 1% de la masa se encuentra a partir de 32 Kmsnm. La atmósfera puede ser descrita usando distintas variables de estado. La temperatura es la más intuitiva, y es la medida de la energía cinética de las moléculas.

La temperatura está influenciada por:

- La posición del sol y de la cantidad de nubes
- El intercambio vertical de calor entre la superficie de la Tierra y la atmósfera
- El tipo de superficie de la tierra (nieve, agua, bosque, desierto)
- El transporte horizontal del calor por movimiento de aire
- La altitud
- Los vientos
- La topografía.

Otra variable que define la atmósfera es la presión $p(h)$ y representa el peso del aire sobre la superficie debido a la fuerza gravitacional. Suponiendo al aire como un gas ideal, la densidad puede escribirse como:

$$p(h) = \frac{p(h)M_m}{RT(h)}$$

donde R es la constante universal de los gases y vale $8.31451(Kmol)^{-1}$ y M_m es la masa molar del aire en g/mol

2.6.6 Estructura Vertical

La estructura vertical de la atmósfera terrestre se le divide en varias regiones según la variación de la temperatura y la composición Figura II.15. Hasta aproximadamente 80 km de altura, la masa molecular es casi constante. Esta zona se denomina homósfera y por encima de ésta se encuentra la heterósfera, donde los átomos más pesados se ubican en el fondo de la capa mientras que los más livianos flotan en la parte superior de ésta.

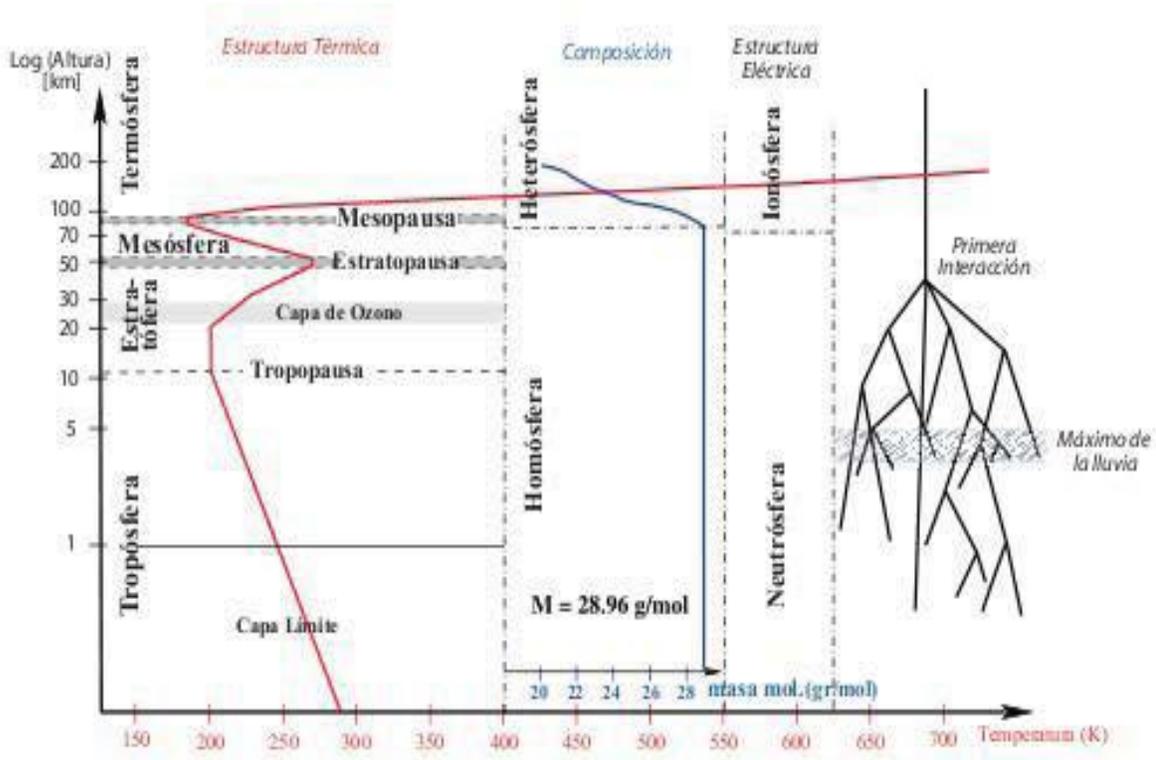


Figura II.15 Estructura vertical de la atmósfera terrestre. A la derecha se encuentra el esquema del desarrollo de un EAS.

En la homósfera se puede realizar una clasificación según la temperatura, y es la siguiente:

- **La tropósfera:** la temperatura decrece linealmente con la altura en ésta región (a razón de 6.5°C por 1000 m hasta $\sim -75^{\circ}\text{C}$). La banda que separa la tropósfera de la estratósfera es la tropopausa, donde la temperatura se mantiene más o menos constante pero su valor depende de la latitud.
- **La estratósfera:** comienza a aproximadamente 50 kmsnm y contiene varias capas a temperatura distintas. Una de estas capas es rica en ozono. Esta se extiende hasta la estratopausa donde la presión es del orden de 1hPa
- **La mesósfera:** la temperatura en ésta capa decrece como en la tropósfera. Es la capa más fría de la atmósfera llegando a temperaturas del orden de -100°C .

En la heterósfera se encuentra la termósfera, donde radiación ultravioleta del sol es absorbida por el oxígeno molecular y atómico. Lo que hace aumentar la temperatura desde ~ 300 a 1700°C dependiendo de la actividad solar. Es importante ver que las cascadas de partículas evolucionan dentro de los primeros 50 Kmsnm, es decir, a partir de la estratopausa. El máximo de la lluvia se encuentra entre los primeros 5 kmsnm para primarios de ultra alta energía.

2.7 Partículas elementales

En el universo hay partículas que tienen propiedades que desafían la imaginación:

Fotón: Partícula fundamental sin masa y carga que permite las interacciones del campo electromagnético. Los diferentes tipos de la luz que observamos dependen de la energía de los fotones. El fotón viaja a la velocidad de la luz en el vacío.

Electrón: Partícula subatómica fundamental muy liviana con carga negativa. Junto a los protones y neutrones forma los átomos. El electrón tiene una antipartícula idéntica pero de carga positiva llamada positrón.

Muón: Partícula subatómica fundamental similar al electrón, cuya vida media es de 2,2 microsegundos y puede ser formada por rayos cósmicos o bien por rayos gamma muy energéticos que penetran la atmósfera terrestre. Unos 10 mil muones pasan por cada metro cuadrado de la superficie terrestre cada minuto.

CAPITULO III

PROYECTO LAGO Y SU DETECTOR DE SUPERFICIE

3.1 PROYECTO LAGO (Large Aperture Gamma ray burst Observatory)

LAGO es el acrónimo en inglés de *Large Aperture Gamma-ray Observatory*, Observatorio de Rayos Gamma de Gran Apertura. Este proyecto utiliza varios detectores ubicados en diferentes puntos de América Latina: en la Sierra Negra (Puebla, México), en Mérida (Venezuela), en Chalcataya (Bolivia), en Marcapomacocha (Perú) y en Bariloche (Argentina), entre otros. LAGO cuenta con la colaboración de universidades de Francia e Italia. Y sus detectores están localizados por encima de los 4 mil metros. Cada estación cuenta con varios detectores que cubren un área de varios metros cuadrados. La gran ventaja de LAGO sobre otros detectores es la altitud a la que se están colocando. Para detectar el mismo flujo de radiación a una altitud menor se necesitaría cubrir un área mayor de cientos de metros cuadrados, mientras que a estas altitudes bastan detectores que cubran pocos metros cuadrados para obtener un flujo similar.

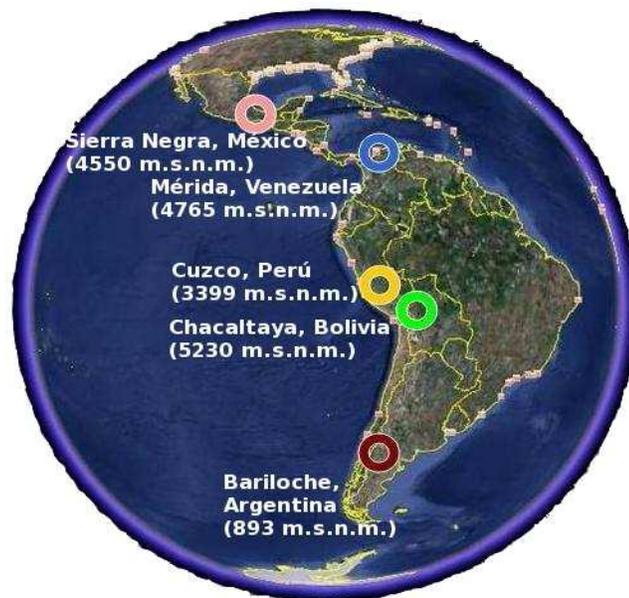


Figura III.1 Localización de los detectores de LAGO

Los detectores individuales están hechos de tanques de plástico comerciales llenos de agua destilada con un fotomultiplicador en el interior que permite medir la intensidad de la radiación Cherenkov.

Asimismo, poseen una tarjeta electrónica que digitaliza la detección y la envía como señal de teléfono a una central que registra las detecciones de varios detectores primeramente y luego, vía Internet, la de todas las estaciones de los países. Para esto se valen de la Cooperación Latino Americana de Redes Avanzadas (CLARA) y su red de Internet de alta velocidad CLARA, en la cual participan varias universidades, busca ser un sistema latinoamericano de colaboración mediante redes avanzadas de telecomunicaciones para la investigación, la innovación y la educación.

Medir la intensidad de la radiación Cherenkov permite reconstruir, a partir de la señal, la forma, y establecer la dirección de donde vino el destello de rayos gamma.

3.2 Efecto Cherenkov

En 1934, el físico soviético *Pavel alekseevich cherenkov*, también escrito Cherenkov, realizo experimentos relacionados con la radiactividad, a partir de los cuales observó un fenómeno curioso: cuando se bombardeaba una botella llena de agua con radiación alfa o beta muy energética, esto es, partículas cargadas, como núcleos de helio o electrones que se mueven muy rápido, *la botella brillaba con una luz azulada*. Este efecto se denominó, en su honor, *efecto Cherenkov*, y la radiación suele llamarse *radiación de Cherenkov*.

El equivalente “macroscópico” de esta radiación es el sonido. Cuando un avión vuela, genera ondas sonoras que llegan hasta nuestros oídos y permiten que lo oigamos. Estas ondas se propagan en todas las direcciones formando un frente esférico. Si el avión vuela por debajo de la velocidad del sonido, entonces siempre se encontrará dentro de los frentes de ondas que el mismo produce, y lo oiremos llegar a nosotros. Sin embargo, cuando supera la velocidad del sonido, adelanta a sus propias ondas sonoras, las cuales se agrupan detrás de él formando un frente de onda, y dando lugar a una *onda de choque*.

Esto es equivalente al estruendo que escuchamos después de que pasa por encima de nosotros un avión supersónico.



Figura III.2 F/A-18 “Hornet” rompiendo la barrera del sonido

Este efecto puede ser aplicable para cualquier otro tipo de onda. Sabiendo de antemano que la luz puede comportarse como onda o como partícula, podríamos imaginar que si una partícula viaja a mayor velocidad que la de la luz, entonces dejaría una estela similar a la que dejaba el sonido, en forma de onda de choque, solo que esta vez se manifiesta como una radiación electromagnética en lugar de acústica.

Cuando una partícula viaja por un medio, a una velocidad inferior a la de la luz en dicho medio, sucede algo así:

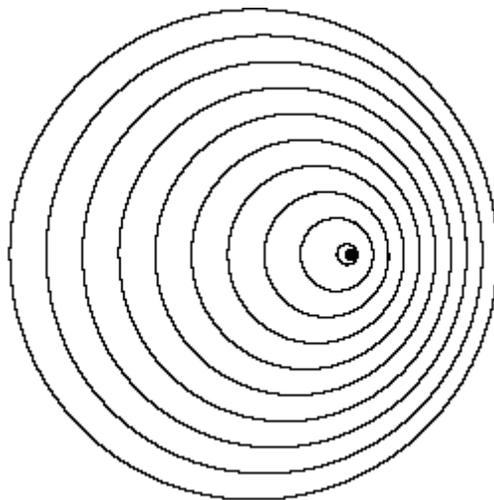


Figura III.3 Partícula viajando en un medio dieléctrico diferente del vacío a una velocidad $<$ que la luz.

Sin embargo, si la partícula aumenta su velocidad por encima del de la luz, como les pasa a los rayos cósmicos al entrar en la atmósfera, sucede esto:

Si una partícula es capaz de, en un medio dieléctrico distinto del vacío, ir más deprisa que la luz, entonces los frentes de onda formarán un cono similar al del estampido sónico y producirán un efecto parecido, emitiendo fotones en la dirección perpendicular al cono de Mach. Esto es lo que se conoce como efecto Cherenkov y la luz producida se llama radiación de Cherenkov.

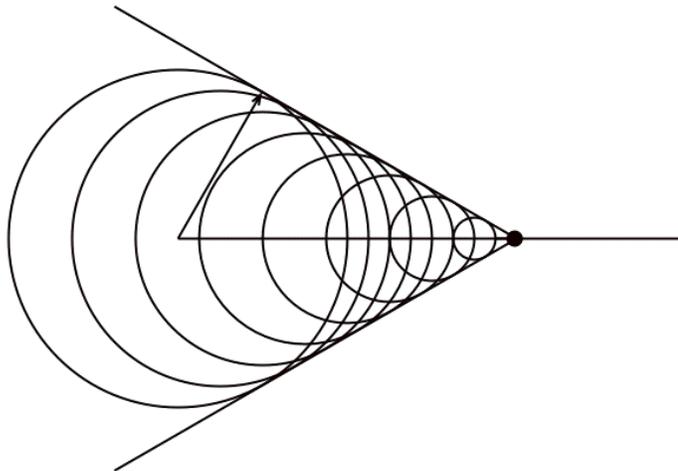


Figura III.4 Partícula viajando en un medio dieléctrico diferente del vacío a una velocidad $>$ que la luz.

Después de estudiar la Teoría Especial de la Relatividad, sabemos claramente que una de las constantes universales es la velocidad de la luz (c), la cual no puede ser superada, como demostró Einstein. Sin embargo, esta constante se refiere a la velocidad de la luz en el vacío, ya que en cualquier otro medio, la luz se propaga a velocidades bastante menores.

Entonces, si escogemos un medio como es el agua, con un índice de refracción de 1.33, en donde la luz viaja a tan solo 225000 Km/s, nada le impide a una partícula, como por ejemplo un neutrón, superar esa velocidad dentro del agua. De esta forma se formaría la misma onda de choque que se formaba con el sonido, solo que esta vez en forma de onda electromagnética, esto es la radiación de Cherenkov.

Esta onda electromagnética tiene la peculiaridad de que resulta visible para el ojo humano, con una tonalidad azulada característica. Este efecto resulta muy visible en los reactores

nucleares, en los que durante la fisión, los neutrones que se desprenden bastan para hacer que surja esta tonalidad, la cual se asocia a la radiactividad. Es por eso que incluso las cosas contaminadas por la radiactividad se representan con un brillo característico, solo que no debería ser verde, sino azulado, y solo darse dentro del reactor nuclear.

Entonces, si algún día se tiene la oportunidad de observar un medio aislante, como el agua, brillar con una luz azulada que parece no tener explicación, eso quiere decir que hay un gran número de partículas cargadas que se mueven muy rápido por su interior y, de hecho, la mayor parte de la radiación ni siquiera la estamos viendo, porque es de una frecuencia mayor que la que pueden detectar nuestros ojos.

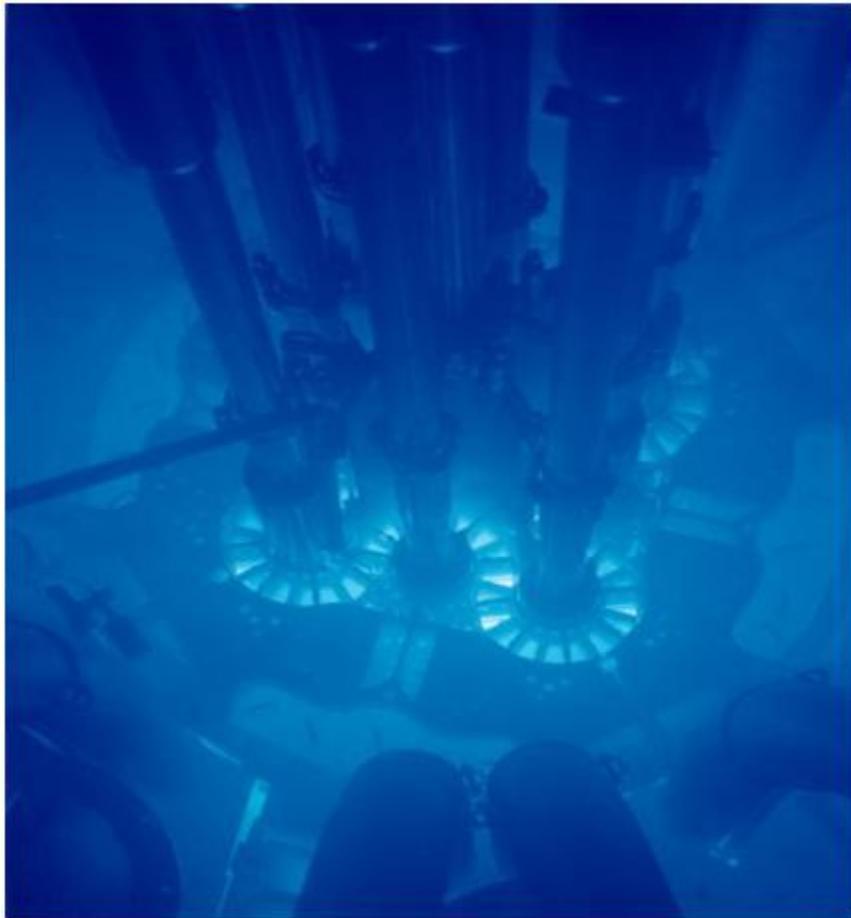


Figura III.5 Radiación de Cherenkov en la piscina del Advanced Test Reactor en Estados Unidos

3.3 Análisis del Efecto Cherenkov para detectores de superficie.

Supongamos una partícula cargada moviéndose a través de un medio denso transparente.

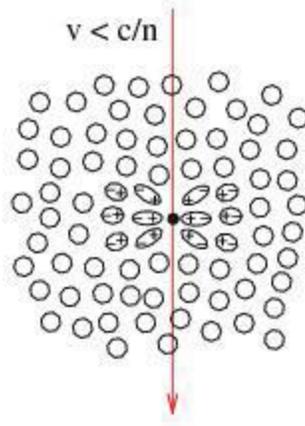


Figura III.6 Partícula desplazándose en un medio denso transparente sin perturbar en gran medida los átomos del medio.

En la trayectoria de la partícula cargada, los círculos representan los átomos que componen el material. Normalmente estos son de forma rigurosamente esféricos y sin distorsión. Sin embargo, en la región cercana al paso de la partícula cargada en un instante particular de tiempo, en un punto, el campo eléctrico de la partícula distorsiona los átomos desplazando su carga, así el medio se polariza alrededor del punto.

Cuando la partícula cargada se mueve a otro punto, la elongación de los átomos alrededor del primer punto retornan a su forma normal. El átomo distorsionado se comporta como un dipolo elemental, con el polo negativo en un punto lejano de la trayectoria si la partícula que pasa es un electrón, viceversa para un positrón o protón.

Como la partícula pasa a través del medio, cada región elemental del material a lo largo de la trayectoria recibe un corto pulso electromagnético. Debido a la completa simetría del campo de polarización alrededor de la partícula, no habrá un campo resultante a gran distancia y por lo tanto no hay radiación. Hay simetría azimutal y a lo largo del eje.

Sin embargo, si la partícula se mueve rápidamente, que su velocidad sea comparable a la de luz en el medio, la representación es diferente.

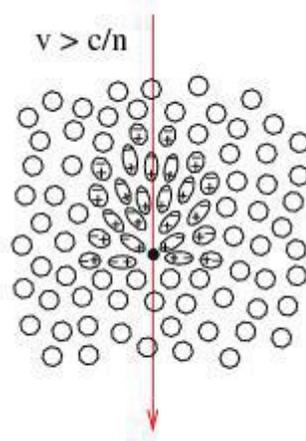


Figura III.7 Partícula desplazándose rápidamente en un medio denso transparente, perturbando drásticamente los átomos del medio.

En este caso, el campo de polarización no es completamente simétrico a lo largo del eje. En el plano azimutal se conserva la simetría, pero a lo largo del eje hay una resultante del campo dipolar, incluso a grandes distancias de la trayectoria de la partícula.

Tal campo es creado momentáneamente por la partícula en cada elemento a lo largo de la trayectoria, a su vez, cada elemento entonces irradia un breve pulso electromagnético.

En el caso general, las ondas radiadas de todas partes de la trayectoria interfieren destructivamente, así que, a una distancia del punto de radiación, la intensidad del campo resultante es casi cero.

Sin embargo, si la velocidad de la partícula es más alta que la de luz en el medio, es posible que todas las ondas de la trayectoria estén en fase unas con otras, así que, a una distancia del punto de observación hay ahora un campo resultante.

La condición para que este frente de fotones sea observable es que debe estar en fase con los fotones emitidos por el paso de la partícula, es decir, el tiempo que tarda un fotón

emitido en recorrer una distancia r es el mismo tiempo que debe gastar la partícula en recorrer cierta distancia s . Ver en la figura III.8

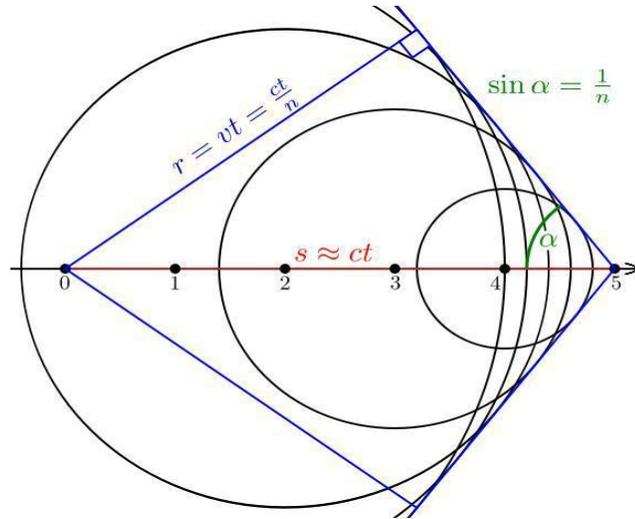


Figura III.8 Ángulo crítico en función de la velocidad de la partícula y la constante dieléctrica del medio para que se produzca radiación Cherenkov.

Esta condición se expresa en función del ángulo de emisión, de la siguiente forma:

$$\cos \alpha_c = \frac{1}{\beta \sqrt{\epsilon(\omega)}}$$

Donde $\epsilon(\omega)$ es la constante dieléctrica del medio, ω es la frecuencia de oscilación de las moléculas del medio y β la velocidad de la partícula. De esta última expresión tenemos que existen dos límites, o condiciones, para que una partícula cargada produzca radiación Cherenkov:

$$\beta_{min} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon(\omega)}}$$

y $\beta_{max} = 1.$

La dependencia de ϵ con ω restringe la radiación Cherenkov emitida a un ancho de banda (Figura III.9) debido a parámetros físicos como frecuencias de resonancias y absorción del medio.

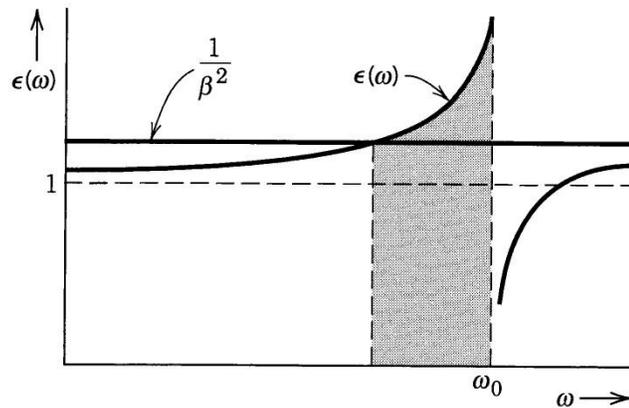


Figura III.9 Permitividad eléctrica ϵ en función de ω . La condición $\beta_{min} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon(\omega)}}$ produce un ancho de banda para la radiación Cherenkov

3.4 Descripción del Detector Cherenkov de superficie.

Consiste en un tanque (por ejemplo de resina de polietileno) de forma cilíndrica cubierto por una capa de manto asfáltico que actúa como una barrera previniendo el ingreso de luz externa, con una superficie libre que depende del tamaño del tanque y un volumen de agua de 1 m o más de profundidad. Los litros de agua son contenidos por una bolsa fabricada de tyvek, con el propósito de aumentar la reflectividad de la luz Cherenkov en el interior del tanque.

La luz cherenkov producida por el pasaje de partículas relativistas por el tanque es reflejada por el tyvek y captadas desde abajo por un fotomultiplicador (PMT) de 9 pulgadas, colocado en el centro del tanque en la parte superior, acoplado al tyvek lo mejor posible para minimizar las pérdidas de luz Cherenkov. La señal que se genera es digitalizada por una electrónica local y los datos son enviados a una PC.

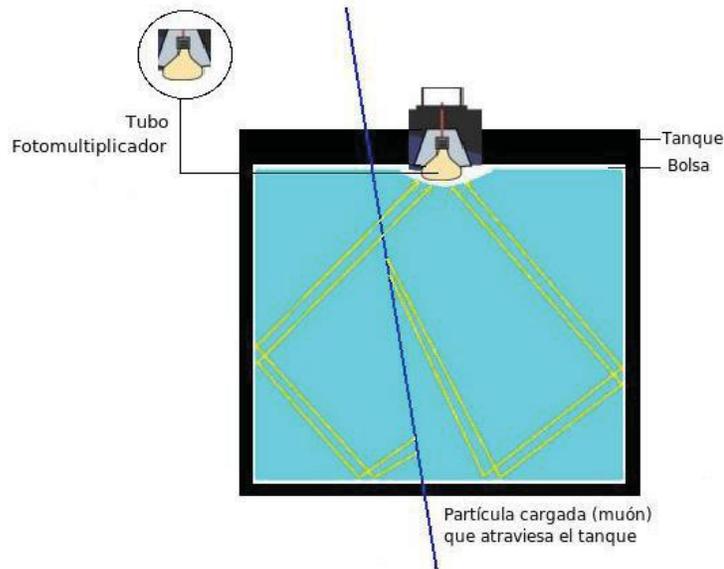


Figura III.10 Detector de superficie, con un fotomultiplicador

El Fotomultiplicador ó PMT son sensores extremadamente sensibles detectores de luz, usualmente en azul y ultravioleta. El PMT es un tubo de vidrio al vacío que contiene un fotocátodo, varios dínodos, y un ánodo. La incidencia de fotones en el fotocátodo produce fotoelectrones por el efecto fotoeléctrico.

El alto voltaje entre cada dínodo provoca una avalancha secundaria de electrones, literalmente multiplicando la señal. Típicamente se detectan en el ánodo 106 millones de electrones de un fotón que golpea el fotocátodo. Las señales provenientes del ánodo y del último dínodo, amplificada ésta última por un factor ~ 40 , con lo cual se logra una relación dínodo/ánodo de aproximadamente 32.

3.5 Ventajas de usar detectores Cherenkov de superficie.

La principal limitación de los detectores para ver destellos gamma es su falta de sensibilidad a los fotones. En una cascada originada por un fotón, el 90% de las partículas a nivel del suelo son fotones, los cuales interaccionan muy poco en los centelladores plásticos, ya que estos tienen poco espesor. Los centelladores plásticos se usan como contadores de muones, ya que se puede blindar para eliminar la componente electromagnética de una cascada y obtener únicamente la señal de los muones. Con los

detectores Cherenkov de agua, se detectan el paso de una partícula por la luz cherenkov que producen al atravesar el agua, se asegura una conversión de un fotón en un par $e+e^-$, haciéndolos sensible a los fotones. A igual superficie un tanque cherenkov detectará 10 veces más partículas que un centellador plástico. Además son relativamente económicos y fáciles de Calibrar.

3.6 Resumen de la detección de rayos gamma por medio de un detector cherenkov.

Como se puede observar la detección se la puede realizar por medio de satélites pero esto es muy costoso, y la otra forma de detección que podemos observar es la que se hace desde la superficie terrestre, para este tipo existen diversos proyectos a nivel mundial dedicados a este estudio entre los cuales está incluido el proyecto LAGO.

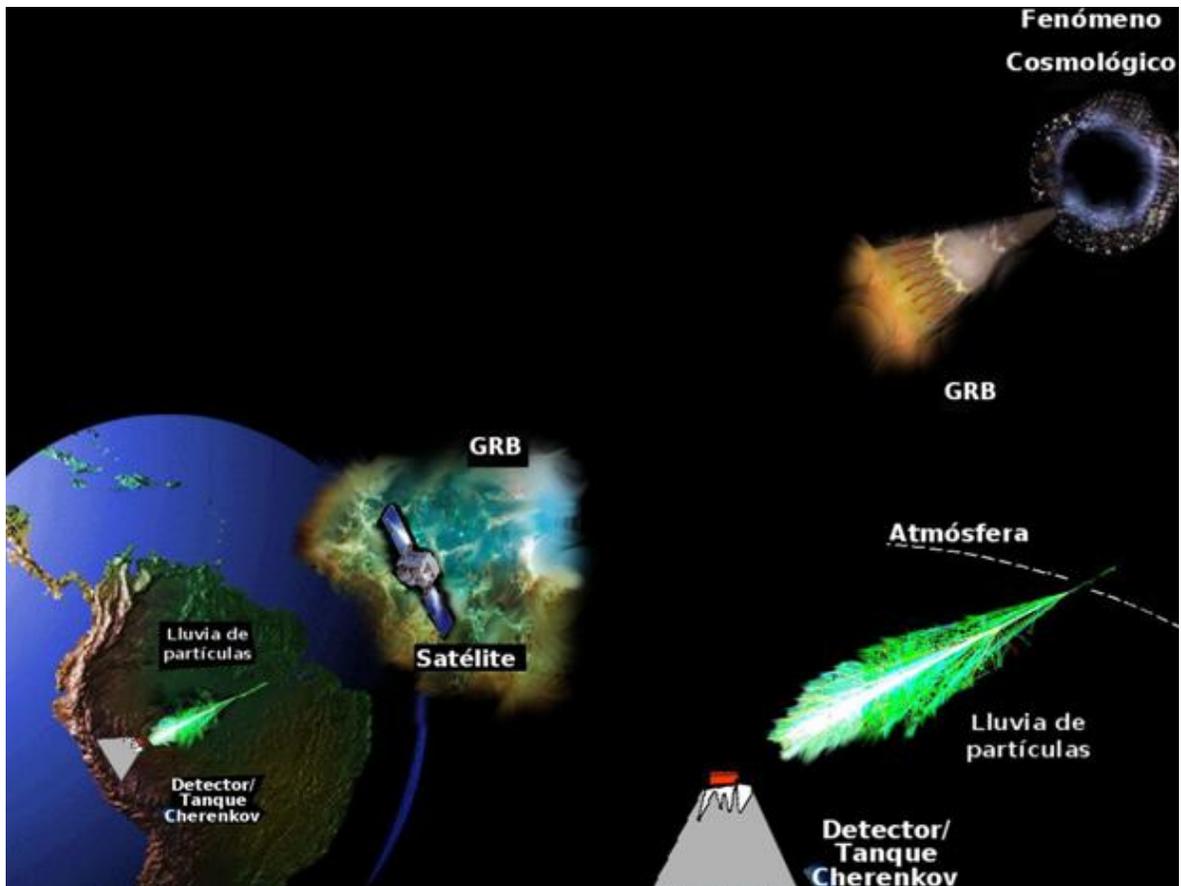


Figura III.11 Resumen de la detección de rayos gamma

CAPITULO IV

PROTOTIPO DE UN DETECTOR CHERENKOV PARA LA DETECCIÓN DE GRBs (DESTELLOS DE RAYOS GAMMA)

4.1 Diagrama de bloques de un detector cherenkov

Cada sitio de LAGO consta de tres detectores Cherenkov. Cada detector está formado por un tanque de agua al cual se lo debe cubrir tanto interna como externamente de tal manera que cumpla con los requisitos necesarios para obtener la detección deseada.

La Electrónica de adquisición de cada detector consta de un fotomultiplicador (PMT) de 9 pulgadas que detecta los fotones que llegan al tanque, generando un pulso de tensión el cual es digitalizado y enviado a una FPGA para ser procesado, y finalmente toda esta información ya procesada es almacenada en un PC para que con ésta se realicen los estudios respectivos de los fenómenos. Además consta de un sistema GPS para sincronización y registrar el momento preciso del fenómeno, y cuenta también de un sensor de presión y temperatura

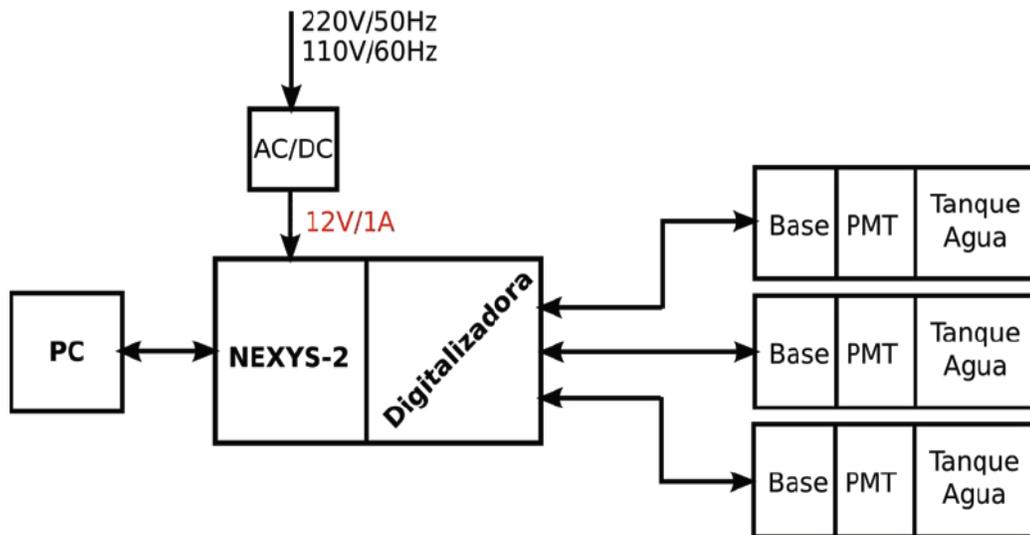


Figura IV.1 Diagrama de bloques de una estación de detectores cherenkov de GRBs

4.2 El tanque

En la construcción del detector se ha utilizado un tanque de agua comercial de los utilizados en los sistemas de reserva de nuestros hogares, en este caso utilizamos uno de 1100 litros. Es necesario adaptar el tanque con los siguientes materiales para una correcta detección:

- **Difusor Interno:** Material sintético hecho de fibras de polietileno de alta densidad (TYVEK) que garantiza un alto porcentaje de difusión y reflectividad. Se ubica dentro del tanque en contacto directo con el agua.



Figura IV.2 TYVEK en una estructura de tubo pvc para ubicar dentro del tanque

- **Cubierta exterior:** Para garantizar que no ingrese luz del exterior ya que puede causar una mala detección y daños del PMT ya que este es sensible a la luz se ha visto en la necesidad de cubrir el tanque con un manto (BLACKOUT) y plástico negro de gran espesor para así poder obtener una mejor detección y evitar fugas de luz en el tanque.



Figura IV.3 Tanque cubierto exteriormente por blackout y plástico negro

A continuación se muestra un esquema del como debería de estar adaptado el tanque para poder evitar fugas de luz, garantizando así una buena detección, además de asegurar la vida útil del fotomultiplicador PMT:

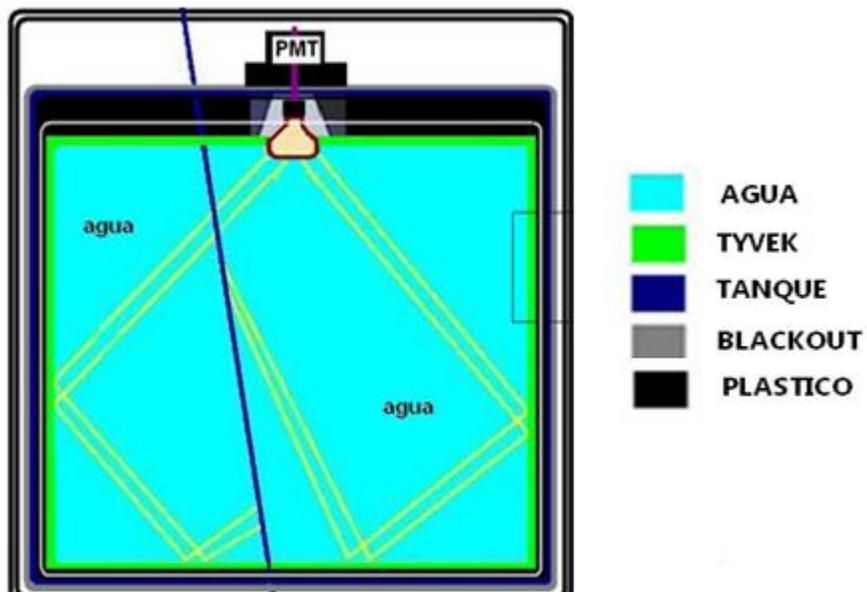


Figura IV.4 Tanque adaptado correctamente para la detección

4.3 Fotomultiplicador (PMT)

Es un dispositivo de alta sensibilidad espectral de luz usualmente en azul y ultravioleta que usa el principio fotoeléctrico para generar un flujo de corriente en función del número de fotones incidentes en él. Es un tubo de vidrio al vacío que contiene un fotocátodo, varios dinodos, y un ánodo. Al llegar fotones al fotocátodo, se producen una cascada de electrones, literalmente multiplicando la señal, que se aceleran por una serie de dinodos, conectados a diferencias de potencial en cascada obtenido gracias a un arreglo de resistencias. Estos electrones al llegar al último dinodo llamado ánodo se convierte en un pulso de tensión.



Figura IV.5 Fotomultiplicador de 9 pulgadas

Típicamente se detectan en el ánodo 10^6 millones de electrones de un fotón que golpea el fotocátodo.

Limiting values	Min	Max	Unit
Anode blue sensitivity		10^8	
Supply voltage		3000	V
Continuous anode current		0.2	mA
Voltage between :			
G1 and photocathode :	500	1500	V
D1 and photocathode :		1500	V
Consecutive dynode :		300	V
Anode and D11 :	20	300	V
Ambient temperature :			
Short operation (<30 mn) :	-30	+80	°C
Continuous operation & storage :	-30	+50	°C

Tabla IV.I Características del Fotomultiplicador de 9 pulgadas

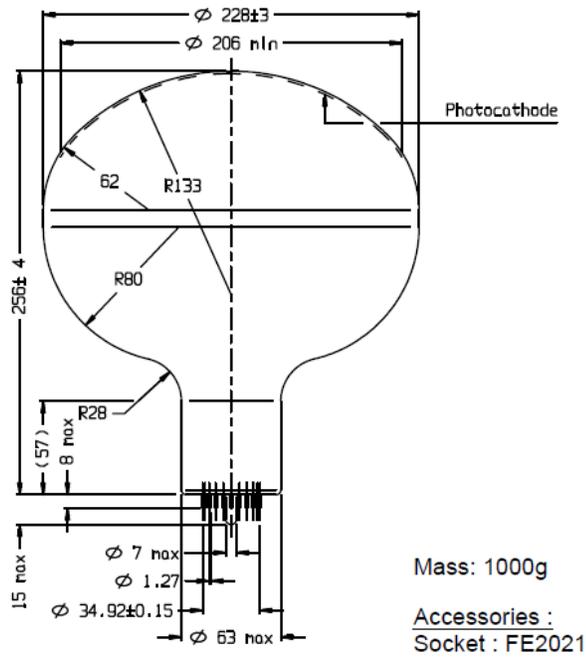


Figura IV.6 Dimensiones del Fotomultiplicador de 9 pulgadas

A continuación se observa la cascada de electrones acelerados entre cada dinodo, hasta llegar al último dinodo llamado ánodo generando en este un pulso de tensión. Todo esto generado al llegar un fotón al fotocátodo del PMT.

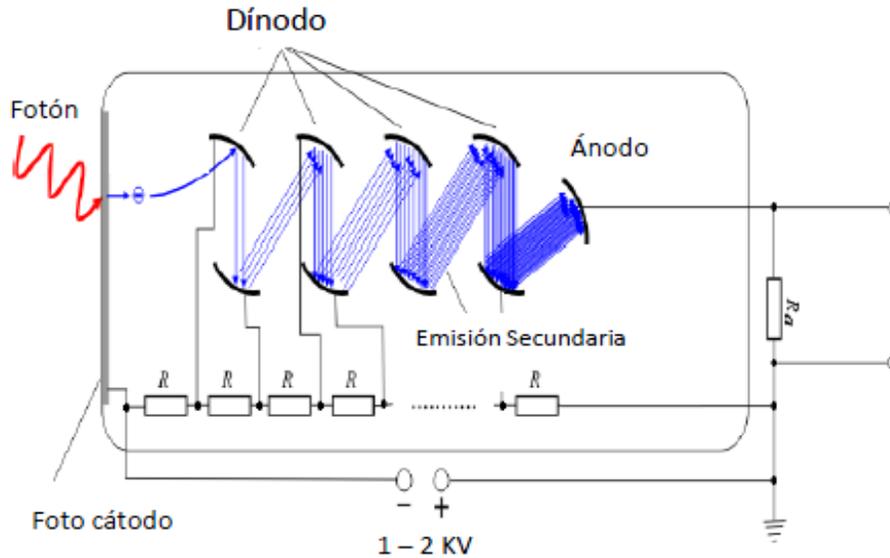


Figura IV.7 Cascada de electrones generadas en el fotomultiplicador

4.4 Base del PMT.

En las bases de los PMT la alta tensión se genera con una fuente EMCO C20, cuya salida va hasta 2000V. Se puede diferenciar tres importantes conectores de las bases: el conector SMA donde salen los pulsos del ánodo, (el conector DB15 donde se suministran las tensiones de alimentación y de control de la tensión de alta y el conector circular azul donde se conecta el PMT).

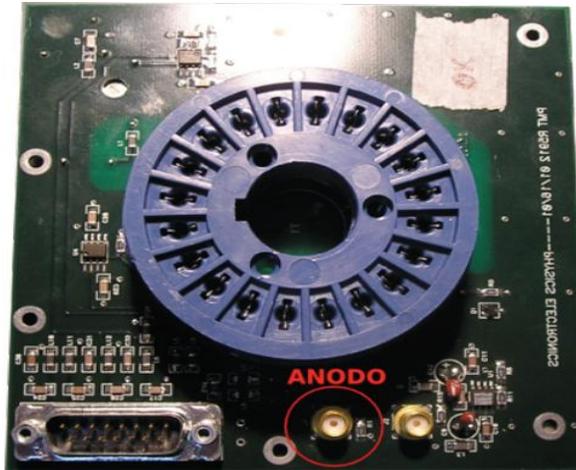
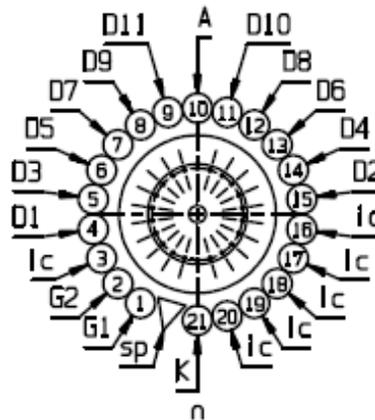


Figura IV.8 Base del PMT con sus conectores principales

A continuación se muestra la distribución de los pines del conector azul de la base del PMT, pudiendo observar en este la ubicación de sus dínodos, ánodo y fotocátodo.



K: cathode
sp: short pin

Dn: dynode
Gn: focusing and accelerating electrodes

A: anode

n: plane of symmetry of the multiplier
ic: internal connection

Figura IV.9 Esquema del conector de la base del PMT

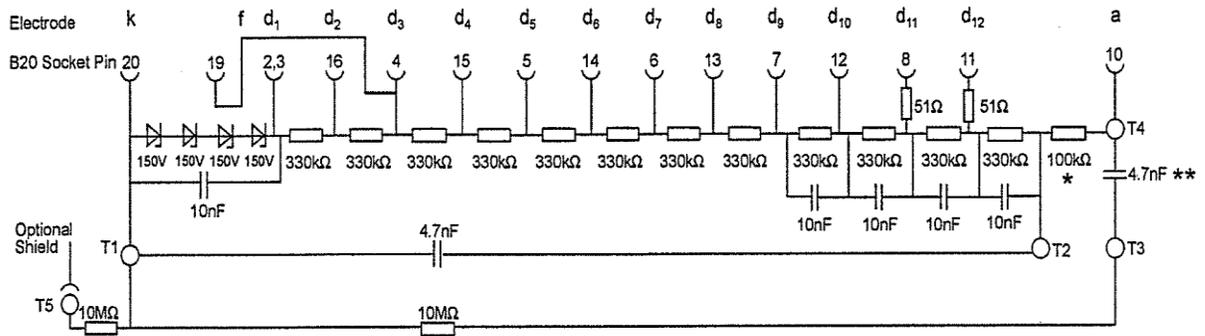


Figura IV.10 Arreglo de resistencias necesario para el divisor de tensión de la base del PMT

En la siguiente tabla se resumen las conexiones que se deben realizar sobre el conector DB15 de la base del PMT. Más adelante se explica cómo tomar todas las tensiones desde la placa digitalizadora.

Numero de Pin	A donde se conecta?
1	Se debe conectar a +3,3V
2	Se debe conectar a -3,3V
3	Se debe conectar a +5V
4	Se debe conectar a +12V
5	Se debe conectar a la tension de control de HV, puede ir desde 0V a +2,5V
6	No Conectar (NC)
7	No Conectar (NC)
8	No Conectar (es el pin3 del sensor de temperatura AD592 que se encuentra en la base)
9	Se debe conectar a GND
10	Se debe conectar a GND
11	Se debe conectar a GND
12	Se debe conectar a GND
13	Se debe conectar a GND
14	No conectar (NC)
15	No conectar (es el pin 1 del AD592)

Tabla IV.II Conexiones del conector DB15 de las bases de PMTs

4.5 Tarjeta digitalizadora.

La placa puede digitalizar simultáneamente hasta tres canales de los pulsos provenientes del ánodo de las bases de los PMT. La digitalización se realiza con 10bits a 40Msps (Msps = millones de muestras por segundo) con los conversores AD9203 de Analog Devices.



Figura IV.11 Tarjeta digitalizadora.

A continuación se da explicación de los conectores más importantes de la tarjeta digitalizadora

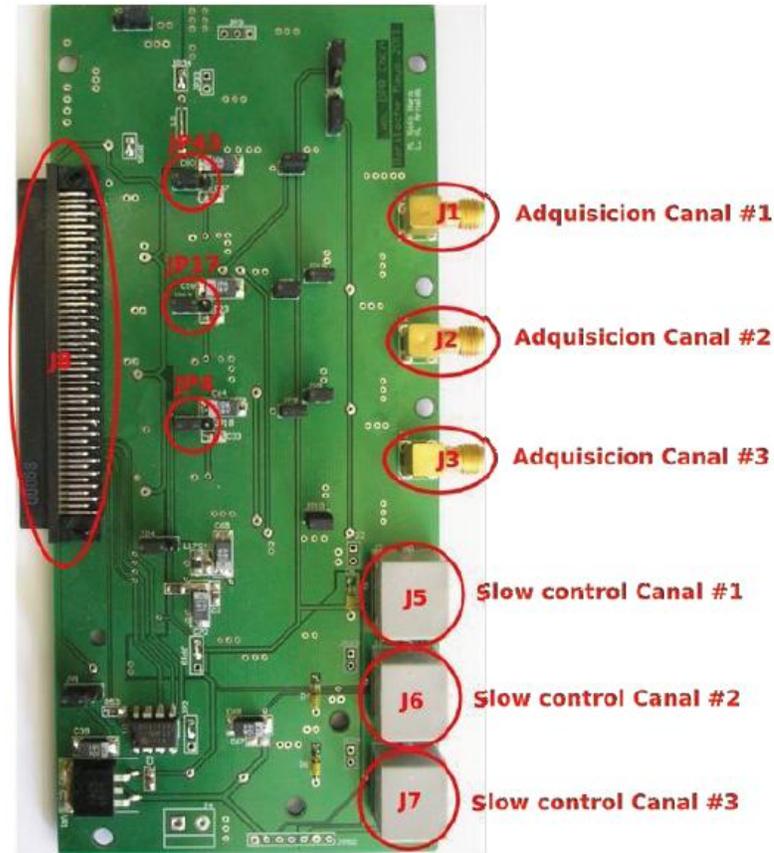


Figura IV.12 Conectores de la Tarjeta digitalizadora.

- En los conectores SMA-HEMBRA J1, J2 y J3, se conectan los pulsos de ánodo que viene de las bases de los PMT.
- Con los jumper JP43, JP17 y JP18 se ajusta la tensión de referencia de los ADC en 1V o 2V.
- Con J43 en la posición de la imagen, se puede digitalizar con 10bit pulsos de hasta 2V en J1, y en la posición opuesta, de hasta 1V con igual número de bits. Idénticamente para JP17 y JP18. JP17 se utiliza para los pulsos en J2 y JP18 en J3.
- Los conectores RJ45: J5, J6 y J7, proveen las tensiones de alimentación de las bases (las que se deben conectar en el conector DB15 de la figura 4) y la tensión de control de la fuente de alta. J5 corresponde al canal 1, J5 al canal 2 y J6 al canal 3.
- En el jumper 8 se conecta la tarjeta FPGA NEXYS 2

En la siguiente figura se muestra que tensión corresponde a cada pin de los conectores RJ45 J5 (los conectores J6 y J7 tiene igual configuración de tensiones). La tensión de control $V_{control}$ se utiliza para controlar la tensión de alta que se aplica al PMT, va de 0 a 2.5V en 25. Para 2.5V de $V_{control}$, la salida de la fuente EMCO C20 es de 2000V (la máxima aplicable a los PMT). Este control se lo realiza con la finalidad de no aplicar un alto voltaje de forma brusca al PMT.

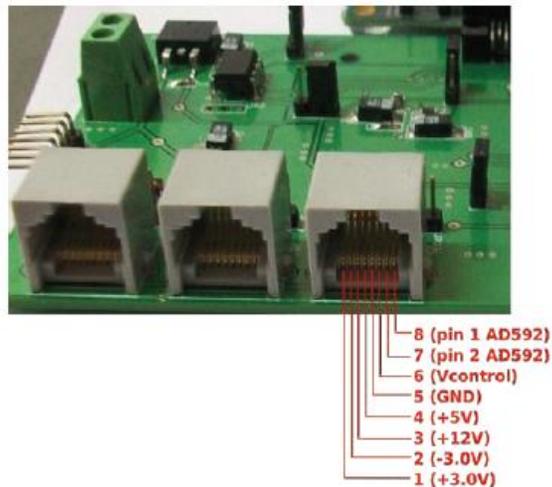


Figura IV.13 Canales de Slow Control. En rojo se indican las tensiones disponibles en cada pin

4.6 Conexión entre la tarjeta digitalizadora y la base del PMT

Para la conexión del ánodo con los conectores SMA hembra de la placa digitalizadora es necesario un cable coaxial RG-58 de 50Ω de no más de 20m con cada extremo terminado en conectores SMA-MACHO:



Figura IV.14 Cable para conexión entre conectores SMA hembra de la base y la digitalizadora

Para la conexión de los conector RJ45 de la digitalizadora al DB15 de la base se necesita un cable de red UTP (de calidad para exteriores) DERECHO pero dicho cable debe ser implementado con una placa que convierte de RJ45 a DB15 como se muestra en la figura.

La otra opción es armar un cable que tenga a un extremo un conector RJ45 y a su otro extremo el conector DB15



Figura IV.15 Placa RJ-45 a DB15



Figura IV.16 Cable DB-15 a RJ-45

4.7 Tarjeta FPGA NEXYS 2

La placa NEXYS-2 es un kit de desarrollo de FPGA de la empresa Digilent , se utiliza para tratar los pulsos digitalizados y transferencia de datos al pc, así como para realizar una interfaz por medio de sistemas embebidos para poder hacer la comunicación con el sensor de presión y el gps.



Figura IV.17 Tarjeta FPGA NEXYS 2

Los conectores a tener en cuenta son los marcados en rojo.

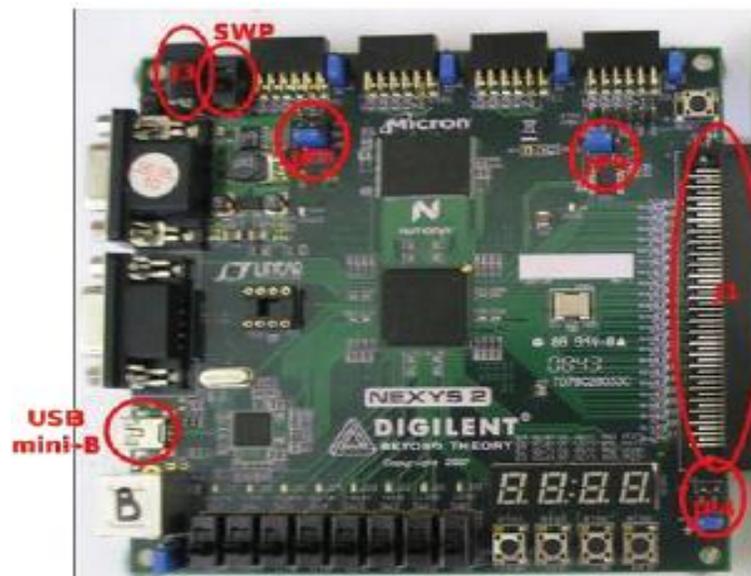


Figura IV.18 Conectores a tener en cuenta en Tarjeta FPGA NEXYS 2

A continuación se da una breve explicación de los conectores de la FPGA:

- J3 es para la alimentación de 12V.
- SWP para el encendido de la tarjeta.
- JP7 deberá estar en la posición de Wall ya que este permite a la tarjeta ser alimentada con 12 V.
- JP9 deberá estar en jtag cuando se va a cargar por primera vez el firmware y de ahí deberá pasar a la posición de ROM.
- Mini-usb permite la programar la fpga así como la transferencia de datos al pc.
- J1 permite conectarse a la tarjeta digitalizadora para permitir transmitir y recibir datos entre ambas.
- JP4 permite la alimentación con 12V de la tarjeta digitalizadora.

La NEXYS 2 está basada en la plataforma de Xilinx Spartan 3E FPGA la cual nos brinda diferentes prestaciones para poder implementar nuestro detector cherenkov como podemos observar a continuación:

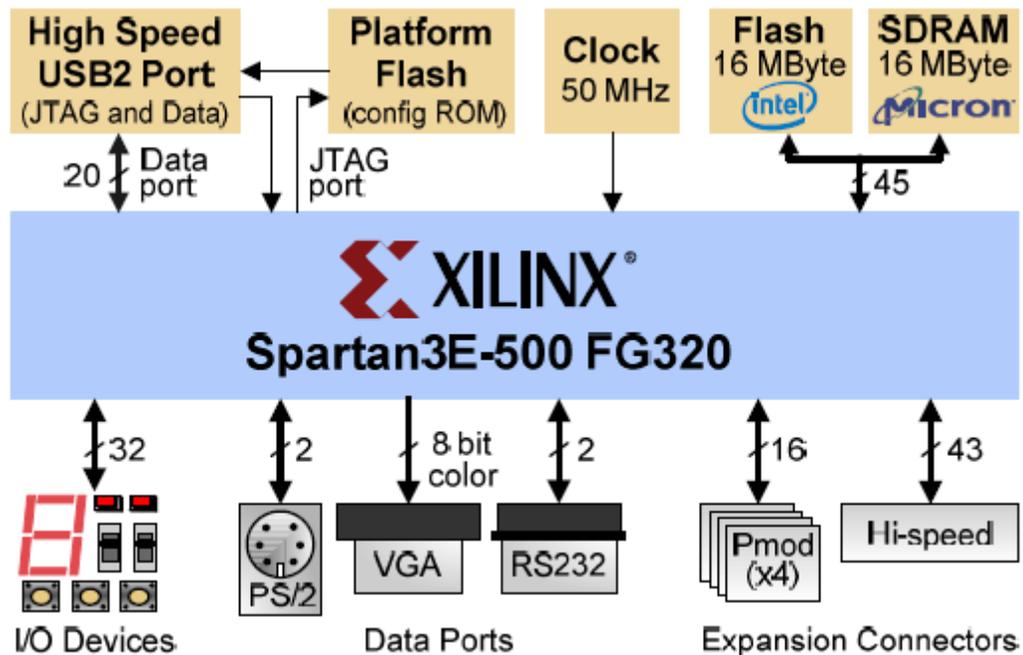


Figura IV.19 Diagrama de bloques de la NEXYS 2

Además cuenta con gran accesibilidad en el momento de alimentarla ya que se la puede situar con 12V por medio de su Power Jack como es el caso que estamos utilizando, 5V del USB, o con batería, así como también nos ofrece diferentes rangos de voltajes regulados los cuales se los puede utilizar para alimentar sensores, entre otros. Para nuestro caso utilizamos la salida de 3.3V para alimentar el sensor de presión, pero se debe tener presente el consumo de potencia de los elementos que se conecten ya que podría ser un problema si no se cumple con las respectivas especificaciones de consumo de los dispositivos que se conecten externamente.

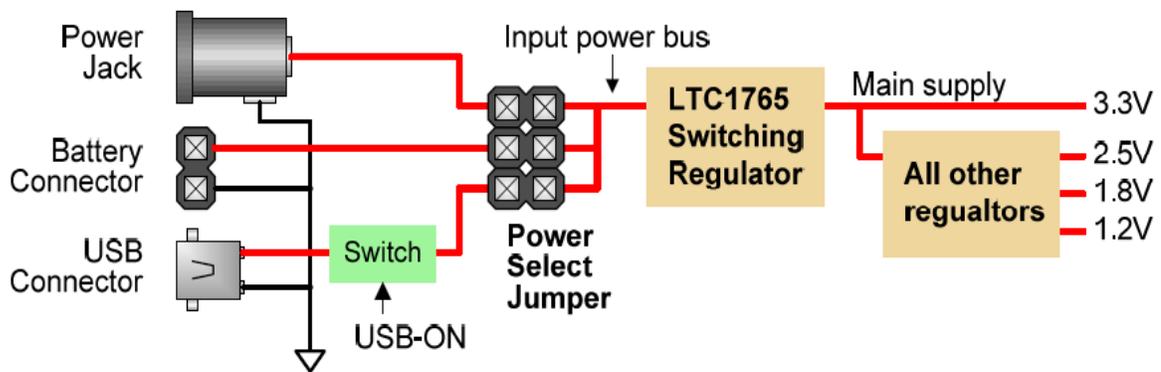


Figura IV.20 Esquema de las fuentes de alimentación para la NEXYS 2

Es muy recomendable leer los manuales, esquemas, entre otros datos importantes de la tarjeta FPGA NEXYS 2 para lograr su correcto uso y potenciabilidad de sus prestaciones, toda esta información se la puede descargar fácilmente de la página web de DIGILENT.

4.8 Sensor de Presión y Temperatura

El sensor utilizado en el detector es el HP03S de Hope RF el cuál brinda diferentes prestaciones necesarias para los datos que se requieren obtener del detector para realizar histogramas de presión, temperatura y efectuar estudios sobre estas magnitudes.

Se realizó una placa que nos ayuda para la conexión con la NEXYS. La transmisión de los datos se la realiza a través de una interfaz I2C. Se debe tener mucho en cuenta la configuración así como elementos necesarios para que el sensor trabaje de la manera más eficiente, lo cual se puede seguir de las hojas de especificaciones (datasheets) del sensor.

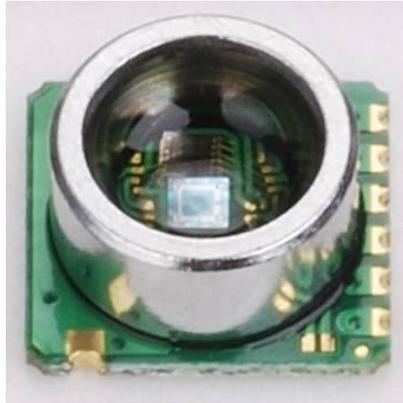


Figura IV.21 Sensor de presión y temperatura HP03S

Características del sensor de presión:

- Integrated pressure sensor
- 300-1100hpa absolute Pressure Range
- 16 Bit Σ - Δ ADC
- 11 coefficients for software compensation stored on chip
- I2C Serial Interface
- One system clock line (32768Hz)
- One hardware controlled reset line
- Low voltage, low power consumption

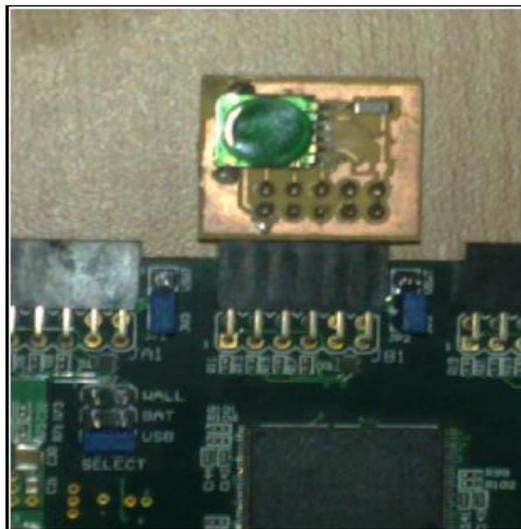


Figura IV.22 Conexión del sensor HP03S a la NEXYS 2

En la siguiente tabla se muestran los pines del sensor de presión:

Pin Name	Pin Number	Type	Function
VSS	6	G	power ground
VDD	5	P	power VCC
MCLK	4	I	master clock(32k) input
XCLR	3	I	ADC reset input (keep low when system is in idle state)
SDA	2	I/O	I ² C data input and output
SCL	1	I	I ² C clock input

Tabla IV.III Pines del sensor de presión HP03S

4.9 GPS

En el detector cherenkov se utilizan los receptores GPS Oncore. Se ha realizado una pequeña placa la cual nos permite tener la comunicación con la NEXYS a través de una interface serial. Uno de los principales objetivos de trabajar con un gps es el de poder obtener su “pps” ya que este nos ayudará a una buena sincronización de los datos y saber en el momento preciso que sucedió el evento.



Figura IV.23 GPS Motorola ONCORE

Las características más importantes que nos ofrece este GPS son:

- Precisión dentro de 1m (3,2 pies) con RTCM dentro de los 25m (82 pies)

- Las búsquedas para, adquieren, y siguen los satélites en 8 canales paralelos; el receptor intentará siempre seguir los 8 satélites con los ángulos de elevación más altos
- El filtro de la posición reduce cambios precipitados a la posición debido a los cambios de la constelación
- Entrada-salida serial usando el binario de Motorola, RTCM y otros protocolos
- Solución de la posición, de la velocidad y del tiempo
- Tiempo referido al tiempo de GPS o al UTC
- PPS (un pulso por segundo) (+/- 50 ns de precisión)
- hora y fecha conservadas por el reloj en tiempo real (RTC) para minimizar tiempo de la adquisición
- Datos incorporados usuario y ajustes conservados
- El circuito del sentido de la antena detecta si la antena está conectada correctamente
- Latitud, longitud, altura, velocidad, tiempo de partida, y además información sobre el estado del satélite de forma continua (una vez por segundo) .
- Alimentación de Voltaje 4,75 V a 5,25 V
- Corriente 155 mA de típico (sin la antena)
- Máximo del poder 0,8 W (sin la antena)

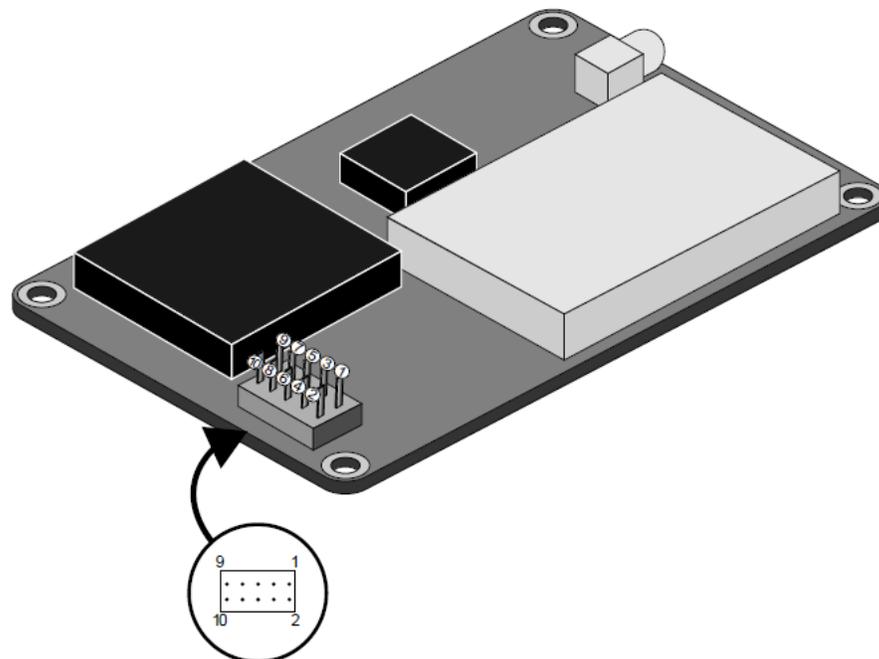


Figura IV.24 Pines del conector del GPS Motorola Oncore

Pin #	Signal Name	Description
1	BATTERY	Externally applied backup power ($\leq + 5 \text{ V}$)
2	+5V PWR	+5 V regulated main power
3	GROUND	Ground (receiver)
4	VPP	Flash memory programming voltage
5	RTCM IN	RTCM input
6	1PPS	One pulse per second signal
7	1PPS RTN	One pulse per second return
8	TTL TXD	Transmit 5V logic
9	TTL RXD	Receive 5V logic
10	TTL RTN	Transmit/receive return

Tabla IV.IV Pines del GPS Motorola Oncore

4.10 Programación de la FPGA NEXYS 2

En cuanto a la programación de la FPGA NEXYS 2; se está trabajando con la plataforma de ISE perteneciente a XILINX la cual nos permite realizar la programación mediante una estructura basada en lenguaje VHD; en este caso VHDL y VERILOG.



Figura IV.25 Software ISE para la programación de la FPGA

Por medio de este software se logra la programación necesaria para obtener, procesar y almacenar los datos obtenidos del detector. Mediante el uso de registros y otros todos los datos obtenidos son almacenados en archivos .dat en los cuales se detallan el estado de los

3 canales, así de la digitalización de los pulsos que llegan al detector para el estudio. Luego estos archivos .dat son leídos por 2 programas realizados en lenguaje C, para un posterior estudio de los fenómenos lo cual es realizado por profesionales especializados en la física de partículas cósmicas.

Además del procesamiento y almacenamiento de los datos de detección, la programación VHD de la FPGA permite el uso de 2 sistemas embebidos picoblaze para realizar una la interfaz de comunicación entre la NEXYS 2 y el sensor de presión y también el GPS. Y finalmente cabe destacar que el resto de procesos como es el slow control de la tensión, interfaces spi para los DAC de la digitalizadora, interfaz de control del puerto USB para transmisión y recepción de datos, control de la línea base, entre otros aspectos fundamentales para la correcta puesta en marcha del detector se han realizado en este entorno de programación VHD (verilog y vhdl), utilizando en este caso ISE de XILINX.

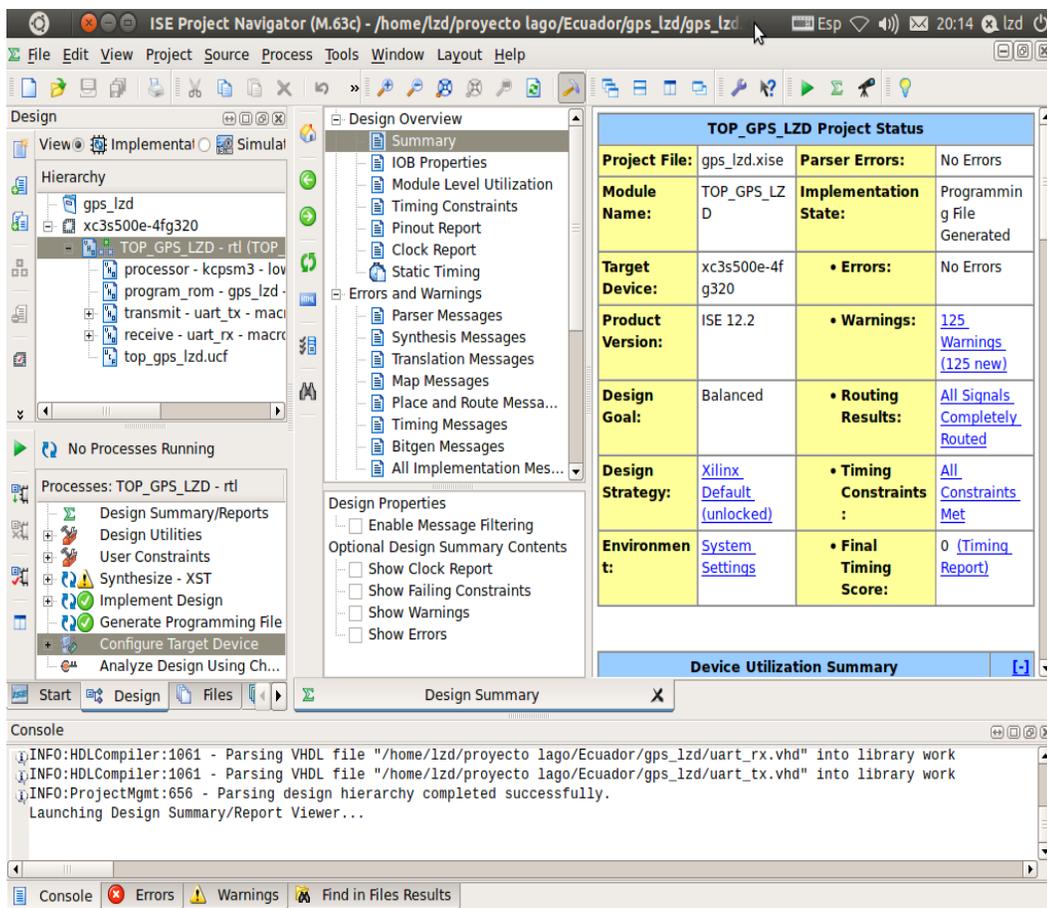


Figura IV.26 Entorno de programación de Software ISE de XILINX

4.11 Software, librerías y programas necesarios para las adquisiciones del detector.

Se preparó un PC con los requerimientos tanto en software como en hardware necesarios para poder albergar el software que será utilizada para la adquisición, consultas, control, entre otras opciones para el manejo del detector.

Los requisitos con los que se implementó la PC en cuanto a software fueron:

- Tener instalado UBUNTU
- Instalar las librerías DIGILENT necesarios para que trabaje la FPGA
- Compilador de C
- Programas de edición de text (Gedit O Vim), y una herramienta para graficar como GNUPLOT
- Y finalmente instalar el software LAGO.

En cuanto a requisitos de hardware de la PC es necesario tener en cuenta el espacio de almacenamiento suficiente para albergar los archivos generados por nuestro detector, así como la memoria y el procesador con una rapidez moderada que puedan correr de manera oportuna el software mencionado anteriormente. Y finalmente no está por demás nombrar un sistema de auxilio contra un corte de energía como es un UPS y las conexiones necesarias de seguridad que debe tener cualquier sistema de este tipo para alargar la vida útil de nuestro detector.

CAPITULO V

SOFTWARE, PRUEBAS, E INICIO DE LA ADQUISICION DEL DETECTOR

5.1 Pruebas en la tarjeta digitalizadora

Con el objetivo de obtener los resultados esperados por parte de la digitalización de los pulsos provenientes del fotomultiplicador se ha visto la necesidad de probar el correcto funcionamiento de la tarjeta digitalizadora, simulando el pulso ayudados de un generador de frecuencia, y visualizando o verificando el correcto funcionamiento de mencionada tarjeta.

A continuación se muestra los pasos necesarios para realizar esta prueba:

1.- Con la placa digitalizadora desconectada de la NEXYS y sin tensión, probar con el multímetro si no hay continuidad entre tierra y los voltajes de JP50.

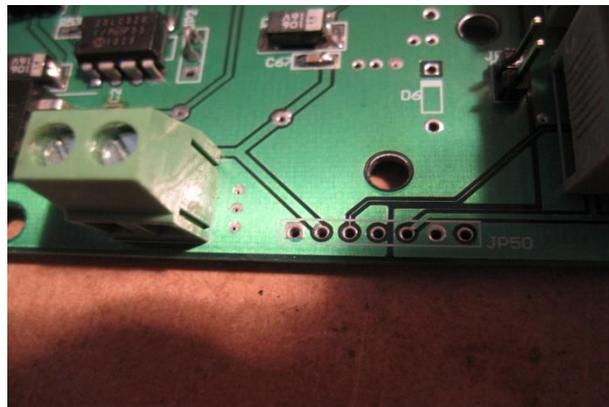


Figura V.1 Jumper JP50 de la tarjeta digitalizadora

2.- Verificar que JP4 de la nexys2 se encuentre puesto, de igual manera el power select de la nexys 2 deberá estar en la posición de *Wall* ya que con esto podemos alimentar la nexys con 12 V los mismos que al tener a JP4 en la posición indicada serán también los que sirvan para alimentar la tarjeta digitalizadora.

4.- Verificados los pasos anteriores procedemos a conectar la tarjeta digitalizadora a la nexys2 por medio del conector Fx2 Hirose de la siguiente manera



Figura V.5 Conexión entre la Nexys y la digitalizadora mediante el conector Hirose

5.- Y se procede a conectar los 12V a la nexys2 y ya se la puede encender.



Figura V.6 Conexión de 12V a la nexys 2

5.1.- Para las mediciones se conectará el multímetro a tierra para facilitar las mediciones.



Figura V.7 Conexión a tierra del multímetro para realizar las respectivas mediciones

6.- Verificar que la salida del 7805 (VR1) nos de los 5V, Medir el pin 5 del circuito integrado LM2662 (U22), deben ser -3.3V

7.- Probar las tensiones de JP50 en los pines 2, 3 y 4 que nos deberá medir 12V, 5V y 3.3V respectivamente

8.- Poner nuevamente los JP20 y JP21 en la tarjeta digitalizadora para alimentar los ADC y amplificadores con +3.3V y -3.3V

9.- Medir nuevamente en JP50 los voltajes del paso 7 y **ver si ya existe** los +3.3V y -3.3V en los pines 5 y 7 de JP50

10.- Medir las alimentaciones de los integrados AD8011 que deberá ser de -3.3V en el pin 4 y +3.3V en el pin 7

11.- De igual manera se deberá medir el voltaje de referencia de 1.24V en el pin 8 del LM285

12.- Medir alimentaciones en los integrados LM324 y en el DAC MAX5501

13.- Medir la alimentación en todos los AD9203 y además medir que el voltaje de referencia V_{ref} se de 0.5V

14.- Una vez realizados estos trece pasos se procede a ingresar un pulso en los conectores SMA-HEMBRA J1, J2, J3 de la tarjeta digitalizadora que debe ser aproximadamente de 150mV de V_{min} y 0V de V_{max} además de 150ns con un tiempo de subida de 66ns lo cual será establecido en un generador de frecuencias, como se muestra en la siguiente figura

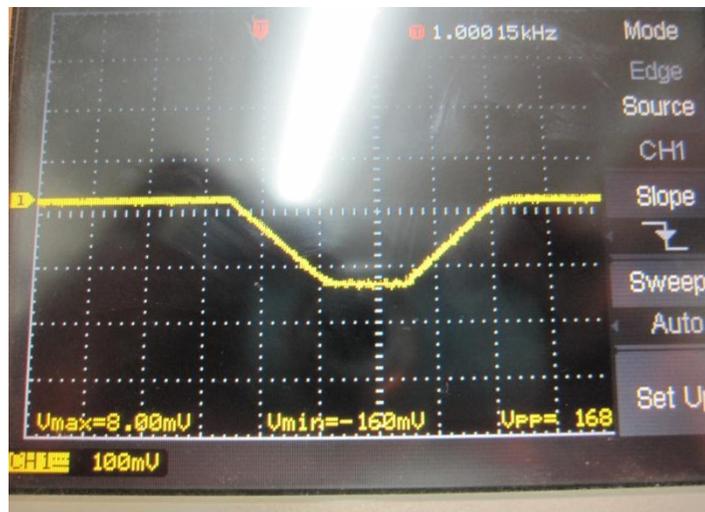


Figura V.8 Pulso del generador que ingresara a la tarjeta digitalizadora

15.- Una vez conectado este pulso a la tarjeta digitalizadora se procederá a medir en la entrada de U6, U8, U10 que es el integrado AD8011, lo que debemos visualizar será el mismo que se conecto en J1, J2 y J3

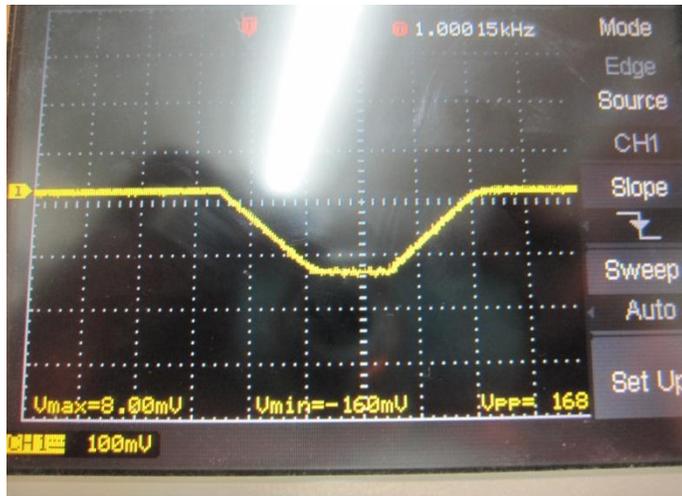


Figura V.9 Pulso en la entrada de los AD8011 de la tarjeta digitalizadora

16.- A la salida de U6, U8, U10 se comprobara que la señal fue multiplicada por 2 que será aproximadamente unos 300mV



Figura V.10 Pulso a la salida de los AD8011 multiplicado por 2

17.- Y finalmente se verificara en las salidas de U5, U7, U9 que la señal fue invertida y sumada al offset baseline que está fijada a 500mV, teniendo como resultado un pulso de V_{min} aproximado de 500mV y V_{max} de unos 900Mv

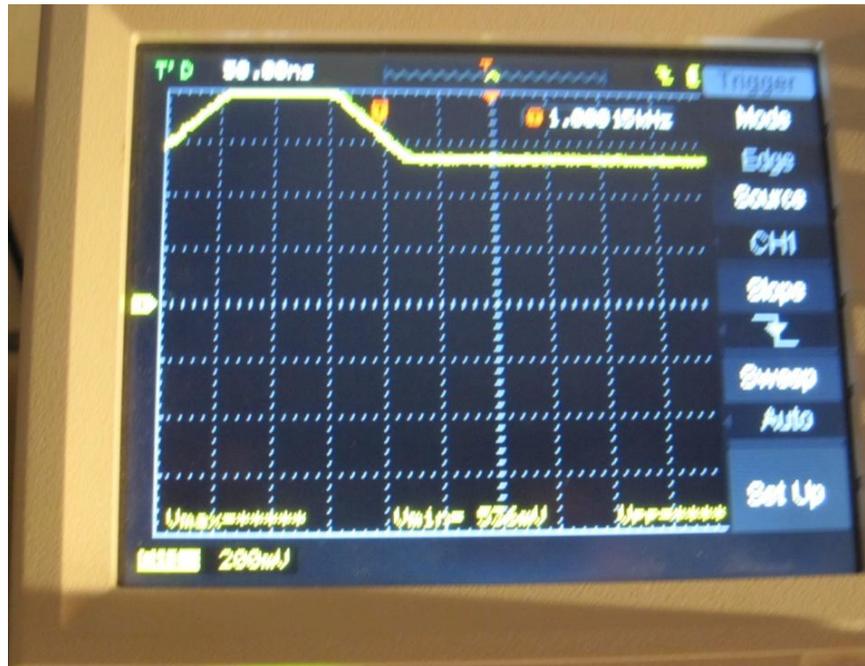


Figura V.11 Pulso final que ingresará a los AD9203 para ser digitalizados

Una vez realizados todos estos pasos en las tarjetas digitalizadoras ya se puede decir que están funcionando de una manera correcta, para ingresar a los AD9203 y realizar la digitalización de los pulsos para luego estos pasar a ser procesados en la FPGA NEXYS 2, si uno de estos pasos no se cumple entonces se deberá proceder a realizar las correcciones necesarias.

5.2 SOFTWARE

Como se mencionó en el capítulo 4 en la sección 4.11, se debe cumplir con todos los requisitos mencionados para poder utilizar el software de LAGO para comenzar a realizar nuestras adquisiciones de datos.

- **LIBRERIAS DIGILENT**

Una vez instalado en UBUNTU las librerías de DIGILENT necesarias para trabajar con la FPGA NEXYS 2, las cuales se las puede encontrar en versiones para 32 y 64 bits, en nuestro caso utilizamos las de 32 bits:

digilent.adept.runtime_2.8.2-i686

digilent.adept.utilities_2.1.1-i686

Estas librerías se las puede descargar de forma gratuita desde la página web de digilent y simplemente se las instala desde del terminal de Ubuntu ejecutando los archivos de instalación install.sh, es recomendable leer los README de cada una de estas librerías que vienen adjuntos.

- **Otros programas**

De igual manera como se mencionó es necesario tener instalado en ubuntu, el compilador de C, Gedit o Vim, y Gnuplot, cuya instalación es muy fácil desde el terminal de Ubuntu ayudados del comando:

#sudoapt-get install

Cabe mencionar que nuestro pc deberá estar conectado a internet para realizar este tipo de instalaciones.

- **SOFTWARE lago-v1r0**

Este es el software que nos permitirá hacer el control total de nuestro detector por medio de comandos emitidos desde el terminal, se lo puede descargar desde la comunidad de LAGO.

A continuación se muestra como se debe realizar la instalación del software lago-v1r0:

1.- En la carpeta del software lago-v1r0 se encontrarán los siguientes archivos:

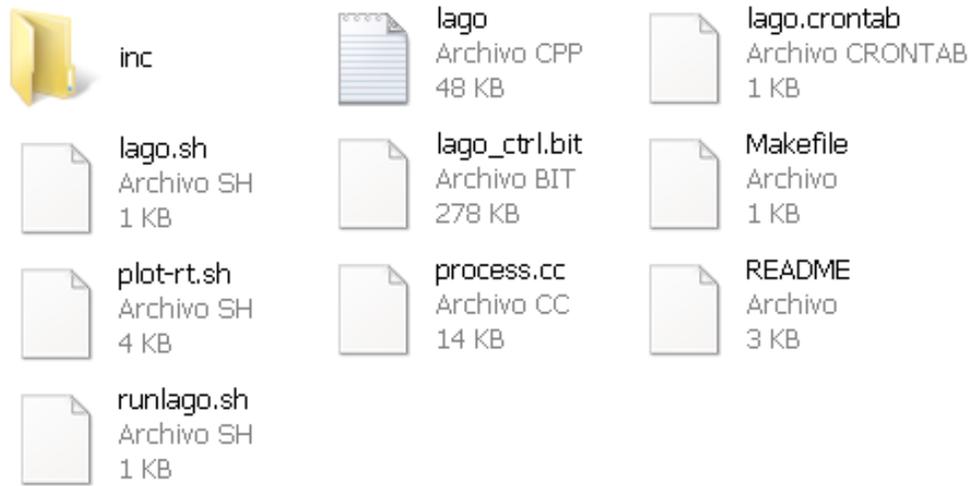


Figura V.12 Archivos de la carpeta de instalación del software lago-v1r0

2.- Desde el terminal de Ubuntu se ejecuta el archivo Make, creando así dos archivos nuevos llamados “process” y “lago”

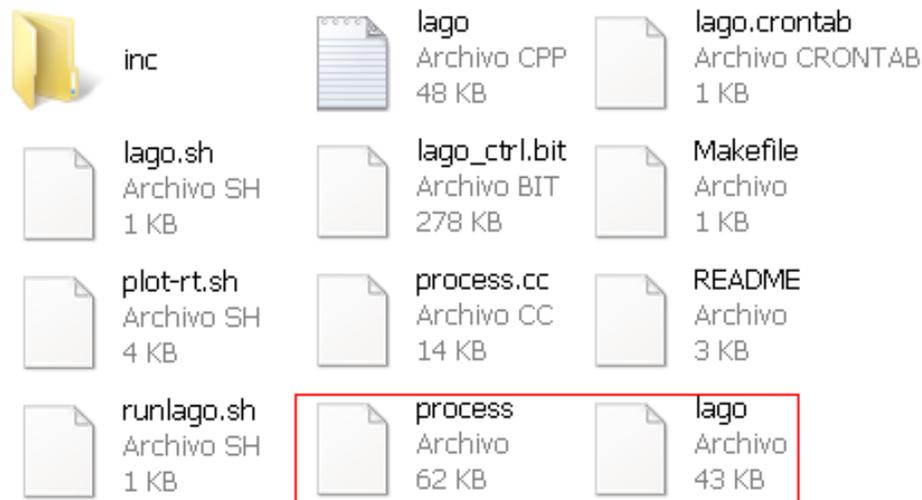


Figura V.13 Creación de los archivos process y lago

El archivo lago es el que se encargará de procesar los datos de adquisición de la FPGA y creará los archivos de .dat de los pulsos digitalizados del detector, en cambio el archivo

process lee los archivos creados en la adquisición lo cual sirve de ayuda para el análisis de los datos obteniendo histogramas los cuales son interpretados por profesionales en el área de la física de partículas cósmicas

Cabe destacar que para utilizar el software de lago desde el terminal de Ubuntu, para el control del sistema nos debemos de ubicar en el directorio donde están todos los archivos de la carpeta lago-v1r0.

Una vez realizados estos pasos ya se puede comenzar a utilizar el software de lago, y como primer paso se debe descargar el firmware en la FPGA por medio del siguiente comando emitido desde el terminal:

```
# djtgcfg prog -d Nexys2 -i 1 -f lago_ctrl.bit
```

Con este comando se descarga a la FPGA su firmware el cual también se encuentra en la carpeta lago-v1r0:

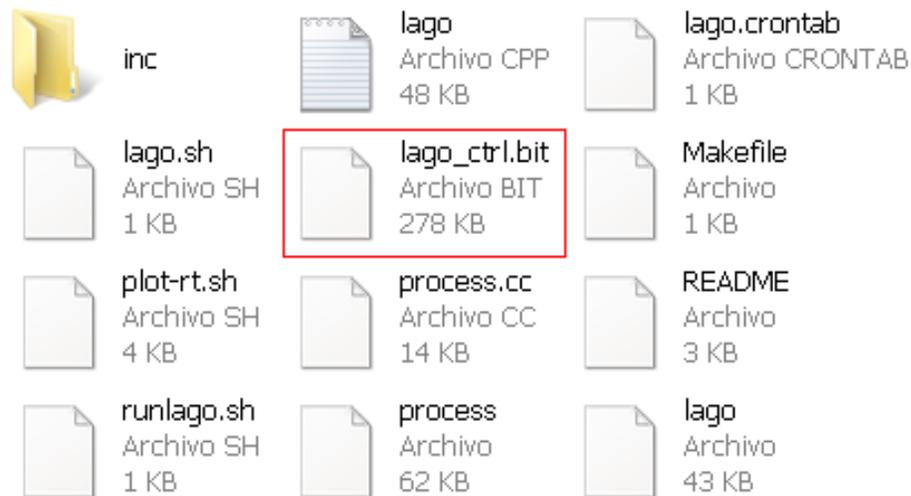


Figura V.14 Archivo de descarga para la FPGA

Una vez ya descargado el archivo lago_ctrl.bit en la FPGA ya se puede proceder a realizar el control del sistema por medio de comandos emitidos desde el terminal.

5.3 Sentencias y comandos de control para software lago:

- COMANDOS BASICOS:

-a	Get all registers status
-s	Set registers
-f	Start DAQ and save data to file
-o	Start DAQ and send data to stdout
-g	Get GPS data
-t	Get Pressure and Temperature data
Registers: t1, t2, t3 st1, st2, st3 hv1, hv2, hv3	Specify triggers 1, 2 and 3 Specify subtriggers 1, 2 and 3 Specify high voltages

Tabla V.I Comandos básicos del software de LAGO

- COMANDOS AVANZADOS:

-r	Get a single register value
-p	Put a value into a single register
Registers: t1, t2, t3 st1, st2, st3 hv1, hv2, hv3 tm	Specify triggers 1, 2 and 3 Specify subtriggers 1, 2 and 3 Specify high voltages ... Specify Time Mode for GPS Receiver (0 - UTC, 1 - GPS)
Options: -c <# bytes> -b <byte>	Number of bytes to read/write Value to load into register

Tabla V.II Comandos avanzados del software de LAGO

Resultados de los comandos más importantes.

A continuación citamos los comandos más importantes del software de adquisición de LAGO:

1.- Estado de los registros (triggers y voltajes):

IN:

./lago -a

OUT:

```
#Trigger Level Ch1 = 1000
#Trigger Level Ch2 = 1000
#Trigger Level Ch3 = 1000
#Subtrigger Ch1 = 1000
#Subtrigger Ch2 = 1000
#Subtrigger Ch3 = 1000
#High Voltage 1 = 0
#High Voltage 2 = 0
#High Voltage 3 = 0
#GPS Time Mode = UTC
```

Status from registers complete!

2.- Lectura de datos del GPS:

IN:

./lago -g

OUT:

```
Motorola Oncore GPS Receiver Data v0r1
Date: 10/28/2011 Time: 15:27:16
Frac Sec: 0.847266
Geogarphic location and Status Flags
  Lat: -41.117785    Lon: -71.398542
  Height: 834.26 msl  Velocity: 0.32 Km/h
  Heading: 315.0 true DOPT: 0
  NVS: 10    NTS: 7
```

	Sat1	Sat2	Sat3	Sat4	Sat5	Sat6	Sat7	Sat8
ID	13	23	4	7	10	20	2	8
CHTM	8	8	8	8	8	8	0	8
CNo	43	41	46	48	32	50	0	46
CHSF	162	162	162	0	162	162	32	162

Receiver Status Flag : 32

3.- Lectura de presión y temperatura:

IN:

`./lago -t`

OUT:

Temperature : 27.0 C
 Pressure : 919.52 hPa
 Altitude : 2500 m

5.4 Inicio de la adquisición del detector

A continuación se muestran los pasos para comenzar y poner en funcionamiento el sistema de adquisición de nuestro detector de GRBs, **se debe tener en cuenta todas las conexiones de hardware y condiciones en las que tiene que estar el tanque**, para asegurar que todo el sistema responda de la mejor manera y evitar que exista algún fallo que pueda causar daño a cualquier parte del detector, lo cual fueron ya indicadas en el capítulo 4.

Una vez indicado esto procedemos a adquirir datos:

1.- Establecer el nivel de trigger:

IN:

`./lago -s t1 100`

OUT:

#Trigger Level Ch1 = 100
 #Trigger Level Ch2 = 1000
 #Trigger Level Ch3 = 1000
 #Subtrigger Ch1 = 1000
 #Subtrigger Ch2 = 1000
 #Subtrigger Ch3 = 1000
 #High Voltage 1 = 1000
 #High Voltage 2 = 0
 #High Voltage 3 = 0
 #GPS Time Mode = UTC

Status from registers complete!

2.- Establecer el nivel de alto voltaje que puede ir de 0 a 1900 V en la versión de software vr01, podemos ir subiendo a pasos de 100V gracias al SLOW CONTROL para así evitar una sobretensión en el fotomultiplicador, vamos subiendo el voltaje hasta poder observar por ejemplo en el osciloscopio que ya se obtienen los pulsos del ánodo del PMT:

IN:

```
./lago -s hv1 1000
```

OUT:

```
#Trigger Level Ch1 = 1000
#Trigger Level Ch2 = 1000
#Trigger Level Ch3 = 1000
#Subtrigger Ch1 = 1000
#Subtrigger Ch2 = 1000
#Subtrigger Ch3 = 1000
#High Voltage 1 = 1000
#High Voltage 2 = 0
#High Voltage 3 = 0
#GPS Time Mode = UTC
```

Status from registers complete!

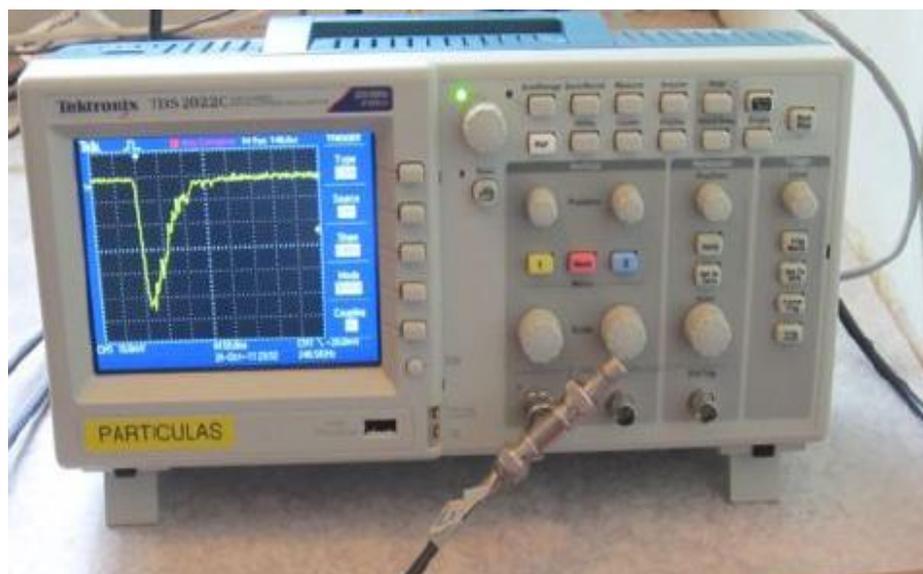


Figura V.15 Pulso del PMT visto en el osciloscopio

3. - Una vez ya controlado el voltaje del PMT y observando que ya comienza a emitir pulsos procedemos a comenzar la adquisición:

IN:

```
./lago -f file_output.dat
```

Con este comando ya comenzará la adquisición, creando el archivo file_output.dat .Hasta que la adquisición sea detenida mediante CRT+C o killing el proceso. Durante este proceso de adquisición los leds LED 0 y LD1 de la FPGA comenzarán a parpadear.

4.- Una vez comenzada la adquisición se generarán archivos .dat cada hora, y a partir de estos se podrán obtener los diferentes histogramas que nos ofrece el software para los diferentes estudios que se realizarán por parte de los capacitados en física de partículas cósmicas.

5.5 Mantenimiento del detector.

Un punto importante a resaltar el momento de realizar cualquier clase de mantenimiento en el detector ya sea en software o hardware, en el tanque etc. Se debe de parar la adquisición y poner el nivel de alta tensión de todos los canales a 0.

IN:

```
./lago -s hv1 0
```

OUT:

```
#Trigger Level Ch1 = 1000
#Trigger Level Ch2 = 1000
#Trigger Level Ch3 = 1000
#Subtrigger Ch1 = 1000
#Subtrigger Ch2 = 1000
#Subtrigger Ch3 = 1000
#High Voltage 1 = 0
#High Voltage 2 = 0
#High Voltage 3 = 0
#GPS Time Mode = UTC
```

Status from registers complete!

5.6 Toma de datos del voltaje de control.

Es bueno obtener una tabla que nos indique los voltajes de control que estamos obteniendo para el slow control del PMT, ya que este voltaje de control es el que permite que la fuente de alta tensión EMCO alimente los arreglos de resistencias de los dínodos del PMT. Para con estos datos poder hacer las relaciones existentes entre estos voltajes.

Los datos que hemos adquirido son los siguientes:

Voltage de Control	Canal 1	Canal 2	Canal 3
0	-3.5 mV	1.0 mV	1.2 mV
100	0.075 mV	130.9 mV	133.0 mV
200	0.154 mV	238.8 mV	239.8 mV
300	0.233 mV	335.6 mV	336.6 mV
400	0.312 mV	456.4 mV	455 m V
500	0.391 V	545m V	544 mV
600	0.470 V	653m V	654m V
700	0.549 V	782 mV	781m V
800	0.628 V	900 mV	898 m V
900	0.707 V	1.1 V	1.13 V
1000	0.786 V	1.26V	1.29 V
1100	0.865 V	1.35 V	1.37 V
1200	0.944 V	1.46 V	1.45 V
1300	1.023 V	1.58 V	1.59 V
1400	1.102 V	1.7 V	1.71 V
1500	1.181 V	1.85 V	1.86 V
1600	1.260 V	2.07V	2.08 V
1700	1.339 V	2.2 V	2.22 V
1800	1.418 V	2.38V	2.39 V
1900	1.497 V	2.49 V	2.48 V

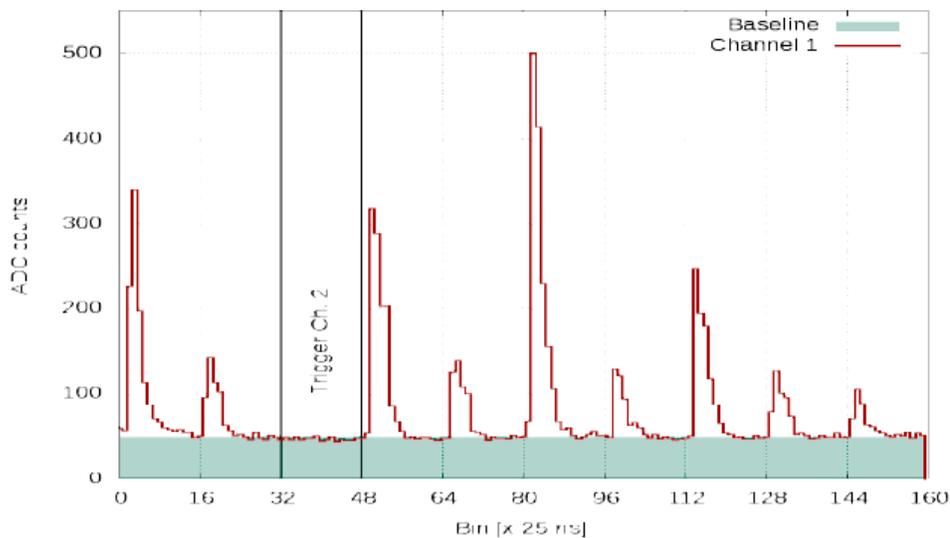
Tabla V.III Voltajes de control de los canales de la tarjeta digitalizadora

CAPITULO VI

RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Archivo .dat generado por la adquisición

Como se mencionó anteriormente en el capítulo 5 una vez iniciada la adquisición se generarán archivos con extensión .dat gracias al archivo “*lago*” creado al ejecutar el archivo “*Make*”, estos archivos se generarán cada hora el cual contendrá los pulsos digitalizados de los 3 canales que se muestra en 3 columnas y cada pulso que llegue se lo digitaliza en 16 bines a 400 ns en total , con el Bin temporal: 25 ns como se podrá ver más adelante, entre otra información de suma importancia como son el estado de los registros de triggers, alta tensión, subtriggers, información del gps, etc.



- Formato ASCII + bz2
- Estructura jerárquica
- 1 hora de datos por archivo
- “#” → Comentarios, tiempos, monitoreo, errores, Presión y Temperatura, GPS
- Pulsos → 3 columnas x 16 (ó 12) filas

Figura VI.1 Estructura del archivo .dat de pulsos

A continuación se muestra el contenido del archivo .dat generado cada hora en la adquisición:

```

# v 3
## This is a LAGO raw data file, version 3
## It contains the following data:
##   <N1> <N2> <N3>   : line with values of the 3 ADC for a triggered pulse
##                       it is a subtrigger with the pulse maximum bin if only one such line is found
##                       it is a trigger with the full pulse if 16 lines are found
##   # t <C> <V>      : end of a trigger
##                       gives the channel trigger (<C>:3 bit mask) and 40MHZ clock count (<V>) of the trigger time
##   # c <C>          : internal trigger counter
##   # x f <V>        : 40 MHz frequency
##   # x r C1-DD <V>  : raw temperature and pressure sensor value
##   # x r D1 <V>     : raw temperature/pressure value
##   # x r D2 <V>     : raw temperature/pressure value
##   # x h <HH:MM:SS> <DD/MM/YYYY> <S> : GPS time (every new second, last number is seconds since EPOCH)
##   # x s <T> C <P> hPa <A> m : temperature <T>, pressure <P> and altitude (from pressure) <A>
##   # x g <LAT> <LON> <ALT>   : GPS data - latitude, longitude, altitude
##   # x b <B1> <B2> <B3>     : baselines (NOT IMPLEMENTED IN LAGO)
## In case of error, an unfinished line will be finished by # E @@@
## Followed by a line with # E <N> and the error message in human readable format, where <N> is the error code:
##   # E 1 : read timeout of 2 seconds
##   # E 2 : too many buffer reading tries
##   # E 3 : unknown word from FPGA
##
## Current registers setting
# x c T1 100
# x c T2 100
# x c T3 100
# x c ST1 1000
# x c ST2 1000
# x c ST3 1000
# x c HV1 0
# x c HV2 3800
# x c HV3 2100
# x c GPSTM UTC
## This file was started on DPR_Lab
## Machine local time was Fri Jun 22 20:00:01 2012
## WARNING, there is no GPS, using PC time
## 20:00:00 22/06/2012 1340406000
52 47 50
51 47 52
53 101 79
54 70 59

```

Empieza el primer pulso

Figura VI.2 Archivo .dat de adquisición

6.2 Resultados: HISTOGRAMAS

Con los archivos .dat generados, ya se puede comenzar al análisis por parte de la física de partículas con los histogramas que nacen a partir de ejecutar el archivo “*process*” generado de igual manera al ejecutar el “*make*”. Dicho “*process*” lee y procesa los archivos .dat para a partir de estos generar los diferentes histogramas que servirán para calibración, y demás estudios que han sido propuestos para el proyecto LAGO incluyendo en esta actividad a personal capacitado en el tema de la física de partículas cósmicas.

Dichos histogramas podemos obtenerlos al ejecutar el comando:

./process nombre_del_archivo.dat

Los histogramas generados una vez ejecutado el comando anterior son los siguientes:

```
-f: force analysis
-c: produces .cal calibration file
-s: produces .sol solar physics file
-t: produces .tim time difference histogram file (Not yet Implemented)
-r: produces .raw 10 second raw file copy (Not yet Implemented)
-a: produces .all complete pulse data file (Not yet Implemented)
-m: produces .mon monitoring file (Not yet Implemented)
-l: produces .scl scaler data file (old lago analysis)
```

Figura VI.3 Histogramas generados con el archivo process

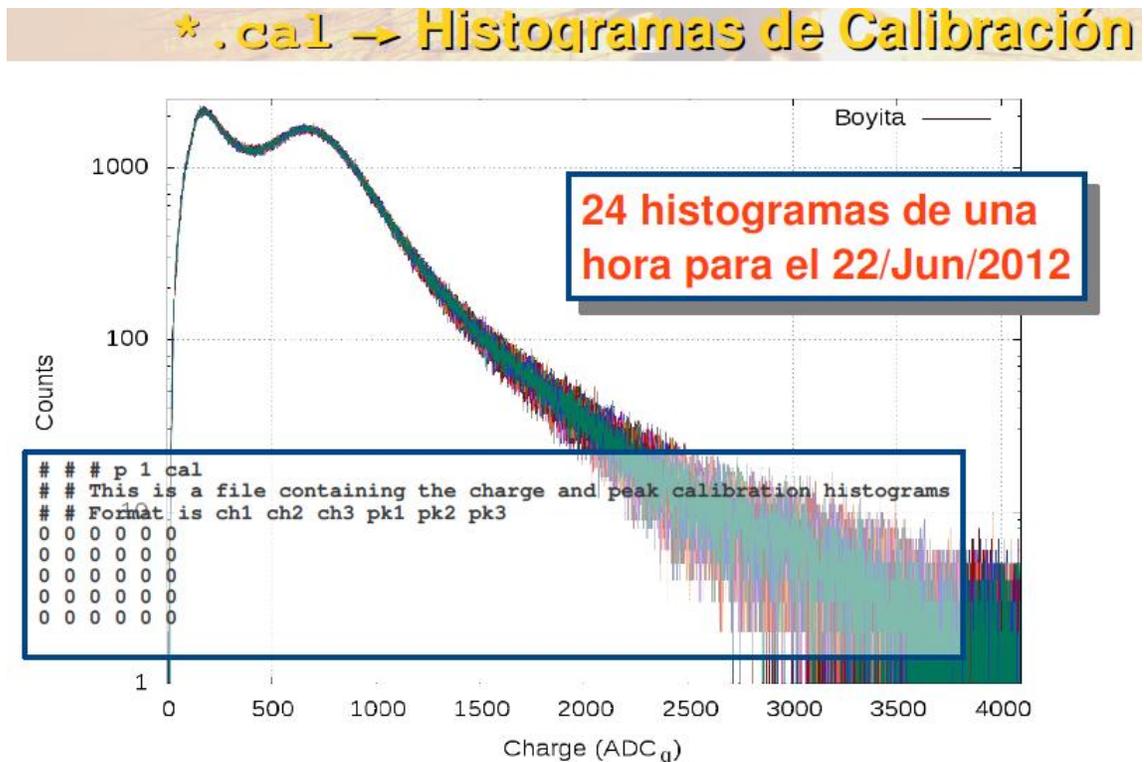


Figura VI.4 Histograma .cal

A continuación se da una breve explicación del resto de histogramas generados:

***.tim**: Histograma de diferencia de tiempos entre pulsos sucesivos

Decaimiento del muon

Auto correlación temporal

***.raw**: 10 segundos de “raw data”

***.all**: Área vs pico de todos los pulsos

Estadística de partículas

***.scl**: Scalers “lago” , con tres umbrales y un “undershoot”

Análisis de Gamma Ray Burst

Uno de los archivos utilizados por la física de partículas son los histogramas de pico y de carga los cuales son de suma importancia en el momento de calibrar el detector.

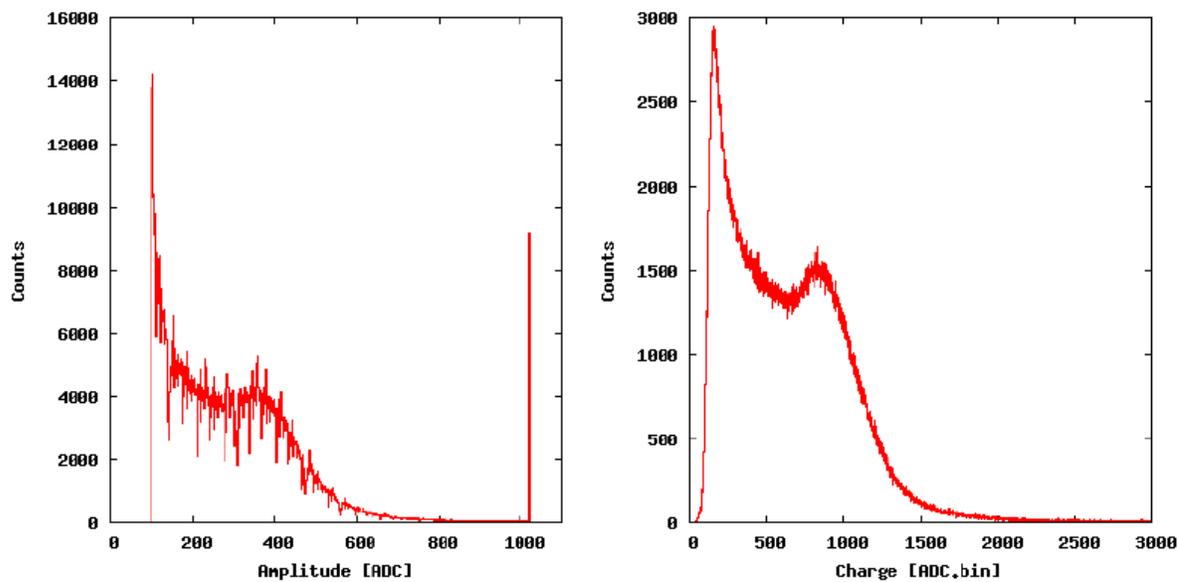


Figura VI.7 Histograma de pico y de carga

6.3 CONCLUSIONES

- Se ha logrado el principal objetivo como es el de implementar un prototipo de estación para detección de GRBs, además hemos visto que la electrónica se la aplica en diferentes campos del conocimiento en este caso la Astrofísica, pudiendo así ver que nuestra carrera de Ingeniería Electrónica es multidisciplinaria.
- Hemos obtenido nuevos conocimientos en cuanto al funcionamiento de diferentes sistemas electrónicos entre los cuales podemos citar: sensores de presión y temperatura, GPS, interfaces de comunicación, tarjetas digitalizadoras, FPGAs, etc.
- Al complementar la parte teórica recibida en cada semestre de la carrera con la parte práctica se logró ver la importancia de que estas dos siempre deben ir a la par al momento de implementar sistemas de tal magnitud, para así tener una mejor formación profesional con la capacidad de resolver problemas ya sea en teoría o en práctica en la industria.
- Además de adquirir conocimiento en la parte de hardware, se ha introducido a nuevos sistemas de software en este caso la administración de un software libre tal como UBUNTU, lo cual es muy importante ya que en la actualidad la industria trabaja con diferentes sistemas operativos.

6.4 RECOMENDACIONES

- Se debe tener cuidado cuando se trabaja con dispositivos electrónicos como sensores ya que muchos de estos son sensibles a diferentes aspectos de su entorno en este caso a la luz, es recomendable tomar las precauciones pertinentes para cuidar el sistema y preservarlo para tener una mayor vida útil.
- Tener claros los conceptos de la parte teórica los mismos que son de gran ayuda en el momento que se está trabajando en el campo laboral por motivo que la teoría nos permite entender los fenómenos que puede estar sucediendo en los sistemas y complementarlos con la parte práctica.
- Durante la realización de una tesis de grado la cual es también es un nuevo proceso de aprendizaje se debe tener en cuenta que a nuestro alrededor existen profesionales ya con experiencia en el campo laborable, quienes nos pueden brindar su ayuda en el momento que nos encontremos con dudas, por lo que se debe aprovechar al máximo su ayuda la misma que nos servirá para nuestro futura vida profesional.
- Al momento de implementar el diseño esquemático de cualquier sistema se propone prestar mucha precaución y atención en estos; para que así en el momento de ponerlo en funcionamiento o dar algún tipo de mantenimiento se evite totalmente cualquier tipo de daño ya sea al sistema o al personal encargado del manejo del mismo.

RESUMEN

El diseño e implementación de un prototipo para la detección de GRB (Gamma Ray Burst), servirá para formar parte del Proyecto LAGO, el mismo que se desarrollará en el laboratorio de Física de la Escuela de Ingeniería en Biofísica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Se utilizó el método experimental para la obtención de partículas producidas por los Rayos Cósmicos y de esta manera obtener un resultado satisfactorio. El prototipo de detección tiene una longitud estándar, la altura es de 1,67m, un diámetro 1.3 m. El cuerpo del prototipo está constituido en perfil de plástico. El prototipo está diseñado para una operación directa con un PMT (fotomultiplicador) y su respectivo software desarrollado en lenguaje VHD, en C y todo esto bajo en un Sistema Operativo de UBUNTU.

Cada detector (Cherenkov), está formado por un tanque de agua, un fototubo de 9 pulgadas y una base encargada de generar la alta tensión y polarizar el fototubo, además se necesita de una tarjeta de digitalización que se encuentra conectada a una FPGA y todo el sistema se encuentra alimentado por una fuente Switching de donde se obtiene: 5V, 12V respectivamente. Adicionalmente consta de las protecciones necesarias para evitar el paso de la luz y brindando seguridad al PMT (altamente sensible a la luz) e impermeabilización de la electrónica de alta tensión.

El prototipo puede realizar su proceso las 24 horas del día sin ningún tipo de interrupción. Se logró obtener un prototipo sencillo que permite desarmar, armar y manejar la aplicación software para prácticas estudiantiles, también permitirá a los estudiantes realizar prácticas de física de partículas aplicando sus conocimientos teóricos y desarrollando sus habilidades en el estudio de este tema. Dar el uso y manipulación adecuada al sistema, para que este a su vez no sufra ningún tipo de daño puesto que se manejan instrumentos muy delicados que deben ser preservados adecuadamente.

SUMMARY

BIBLIOGRAFIA

1. **Richard E. Haskell & Darrin M. Hanna.**, Digital Design using Digilent FPGA Boards VERILOG edition., 2da.ed., L.B.E BOOKS., ups., 2012., Pp351
2. **Richard E. Haskell & Darrin M. Hanna.**, Digital Design using Digilent FPGA Boards VHDL edition ., 2da.ed., L.B.E BOOKS., ups., 2012., Pp383

BIBLIOGRAFIA INTERNET**3. MANEJO DE FPGA**

<http://cevale2.uis.edu.co/~ /wiki/images/PropuestaTesisMauricio.pdf>
2012-04-14

4. MANUAL DE ELECTRONICA LAGO

http://cevale2.uis.edu.co/~cevale2/wiki/images/Manual_electronica_1_ago0v2.pdf
2012-02-12

5. EL OBSERVATORIO DE LAGO

<http://cevale2.uis.edu.co/~cevale2/wiki/images/MSuarez1erTallerLAGOBinacional.pdf>
2012-04-23

6. ENERGIAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES

<http://dSPACE.epn.edu.ec/bitstream/15000/9052/2/T11431CAP2.pdf>
2012-01-17

7. EL PROYECTO PIERRE AUGER

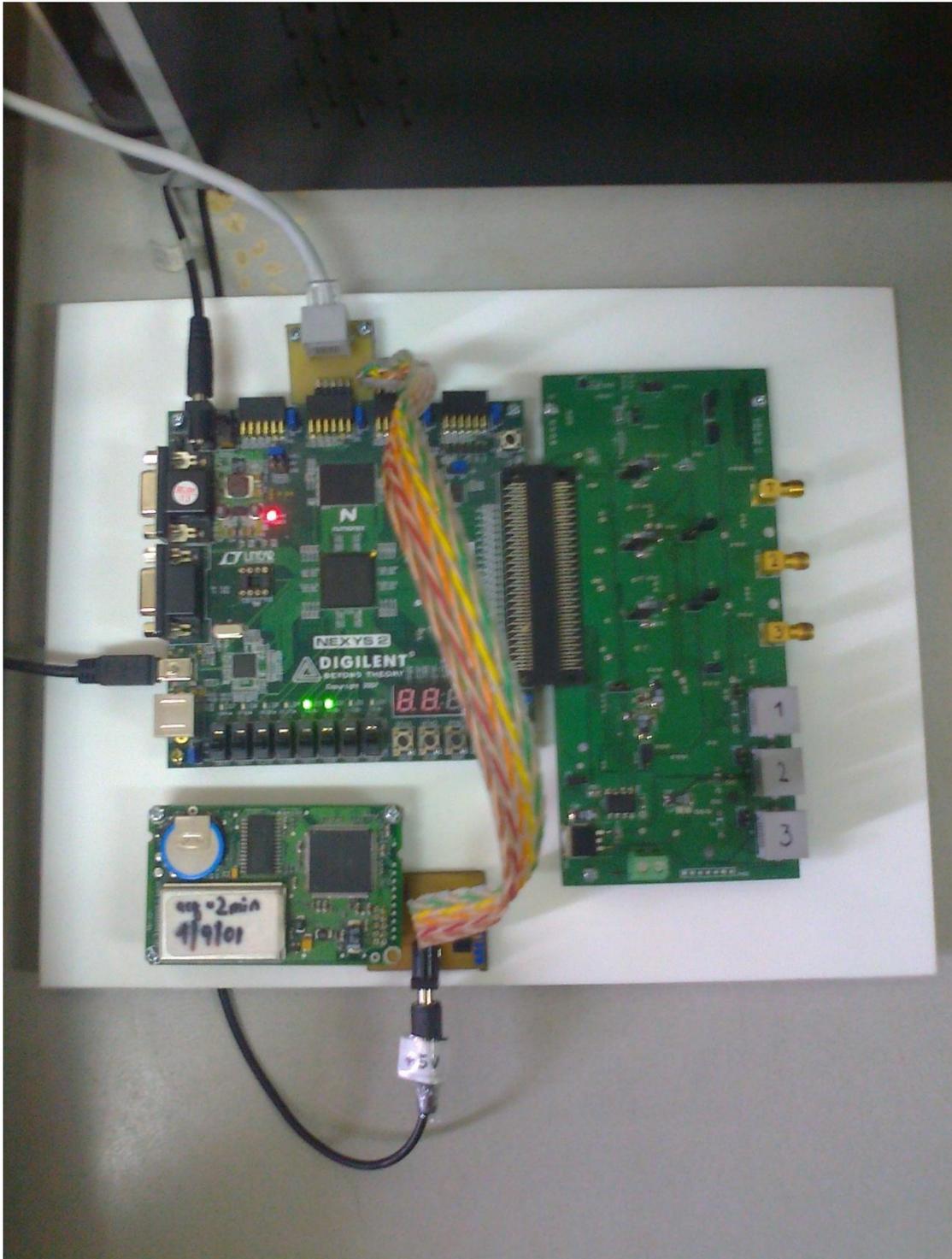
<http://www.cienciahoy.org.ar/hoy35/pierr03.htm>
2012-04-23

8. DETECTORES DE PARTICULAS

http://www.gae.ucm.es/~barrio/conf/astrop/astroparticulas_detectores-tecnicas_11-12-print.pdf
2012-04-2

ANEXOS

ANEXO 1

SISTEMA ELECTRÓNICO IMPLEMENTADO**UBICACIÓN DEL SENSOR**



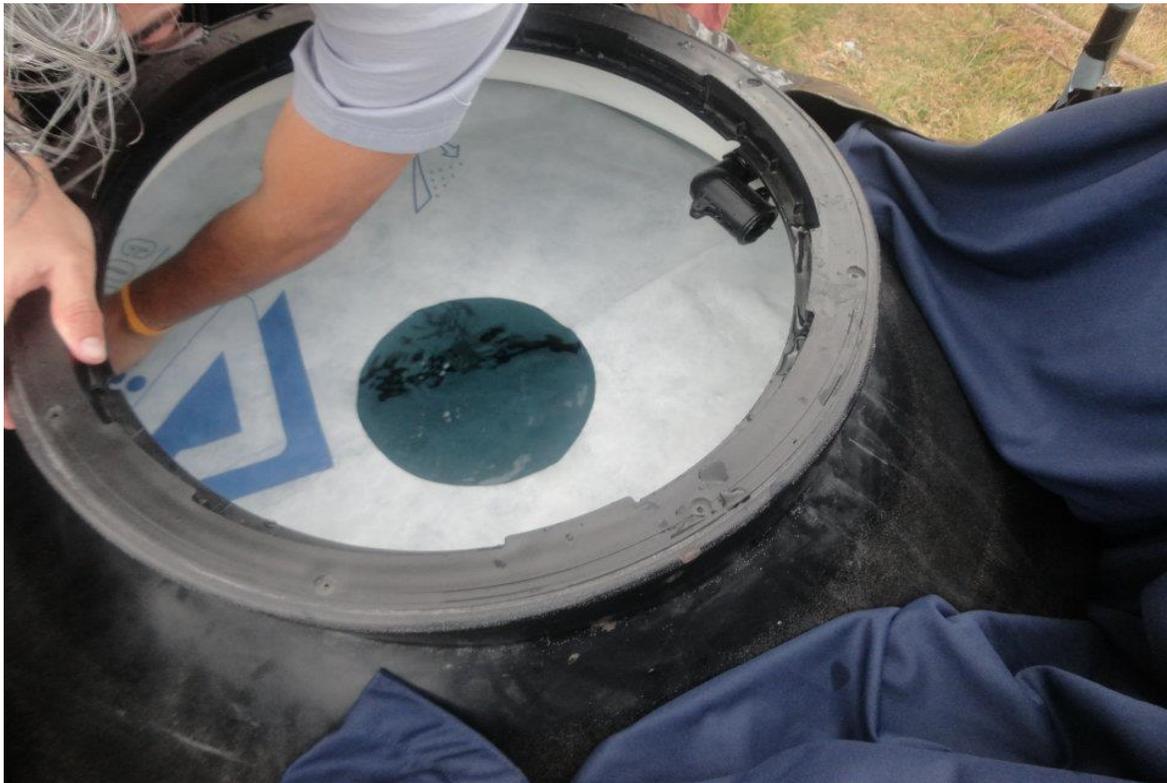
UBICACIÓN DEL PROTECTOR EN EL TANQUE



RECUBRIMIENTO DEL INTERIOR Y EXTERIOR DEL TANQUE



PUESTA DEL TYVEK EN EL TANQUE



MONTAJE DEL SENSOR EN EL INTERIOR DEL TANQUE



SELLADO TOTAL DEL TANQUE



PROTOTIPO TERMINADO

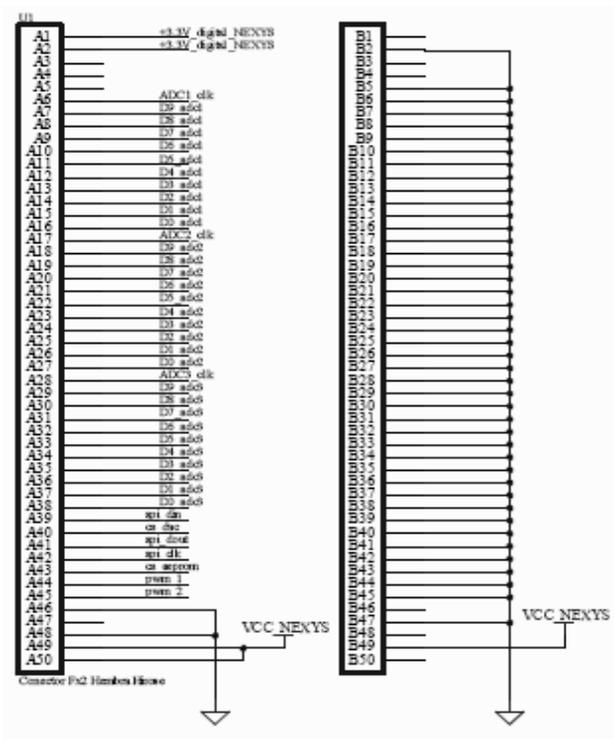


ANEXO 2

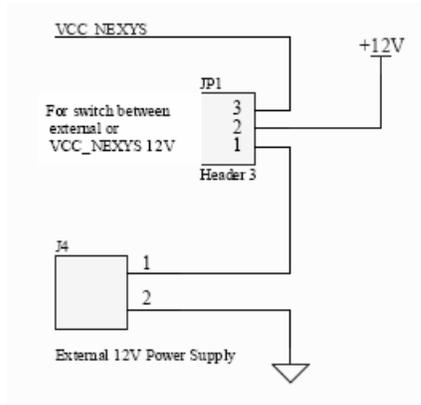
CIRCUITOS DE LA PLACA DIGITALIZADORA

Los elementos que participan en una Placa Digitalizadora, son:

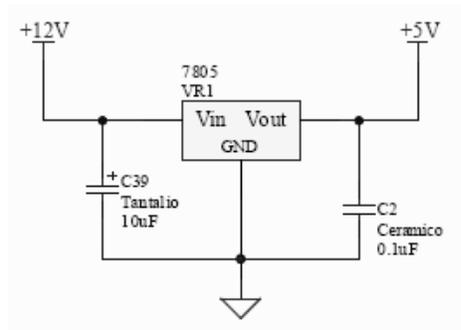
Descripción: Nos permite interactuar tanto con la adquisición de datos, y desde luego nos permite conectar o enlazar esta información y transmitirla a la tarjeta Nexys y a la base del PMT.



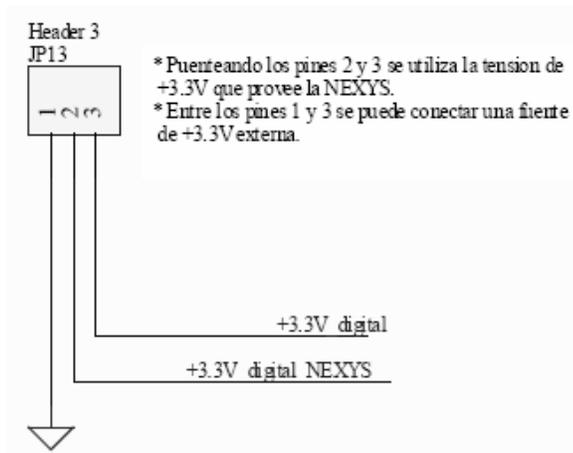
CONECTOR HIROSE FX2 (A LA NEXYS2)



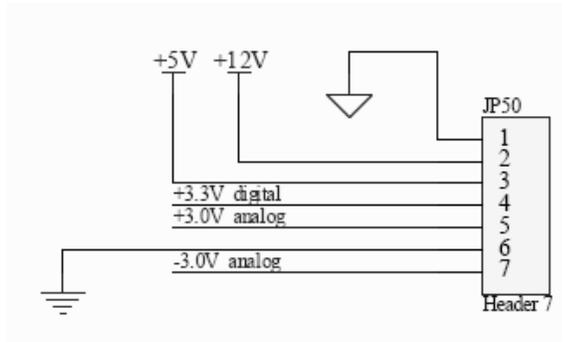
DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES



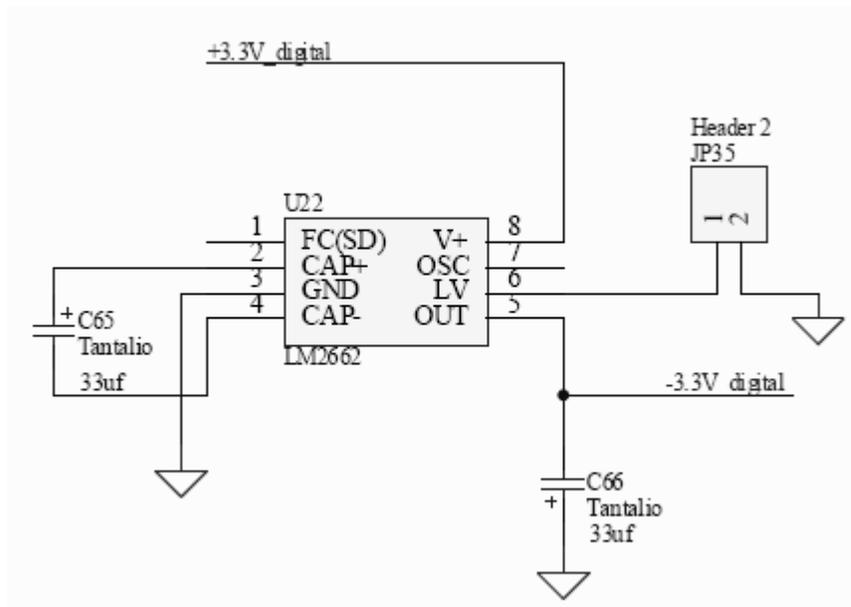
DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES



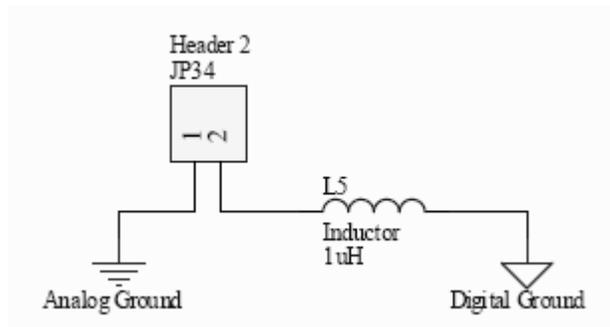
DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES



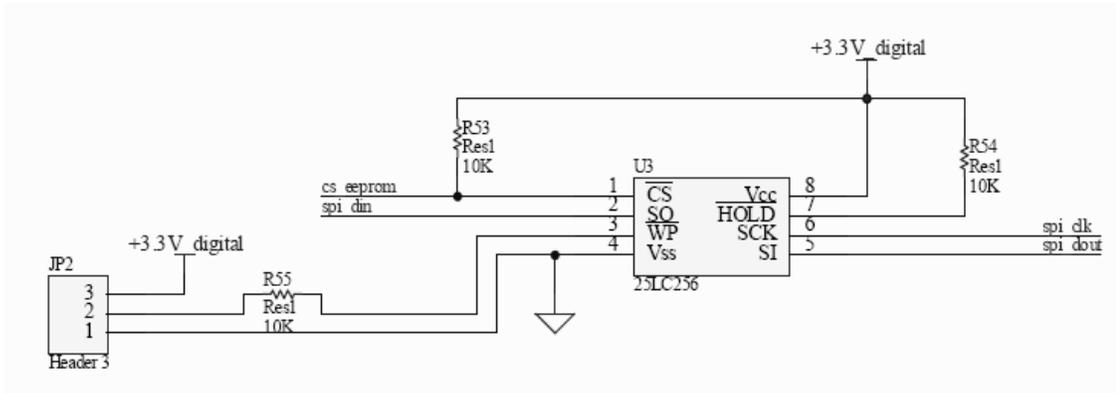
DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES



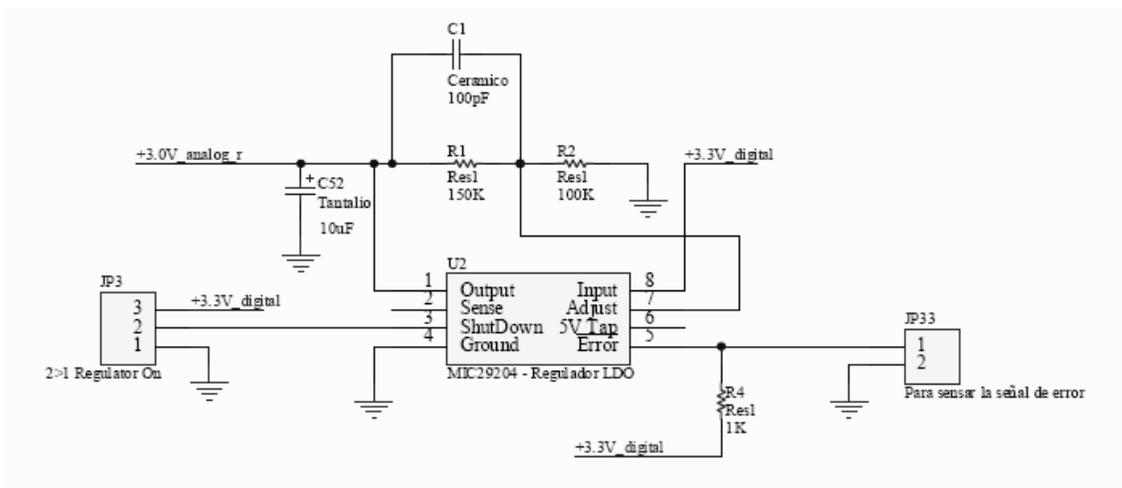
VOLTAGE INVERTER (invierte los +3.3V de la NEXYS2 en -3.3V)



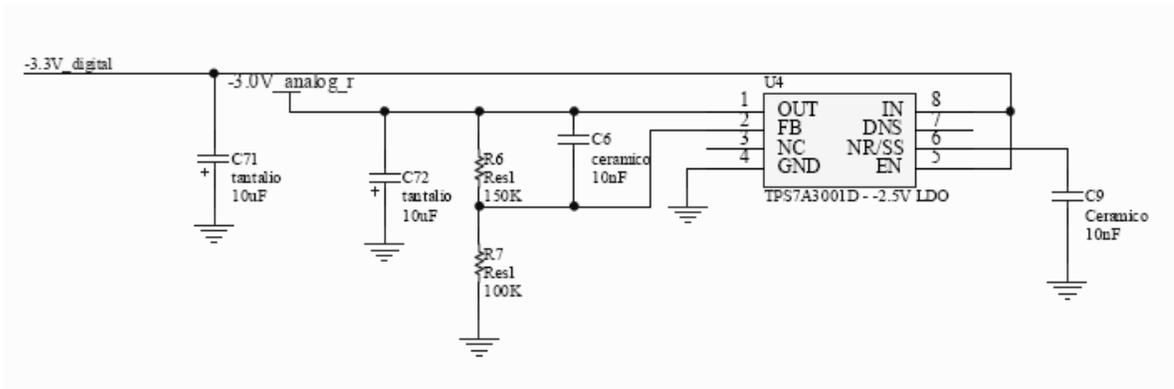
CONEXION DE LAS TIERRAS ANALOGICA y DIGITAL



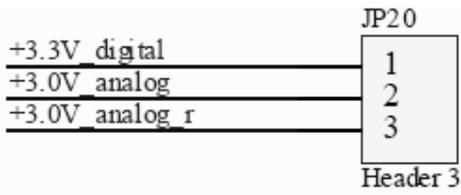
EEPROM FOR PCB IDENTIFICATION



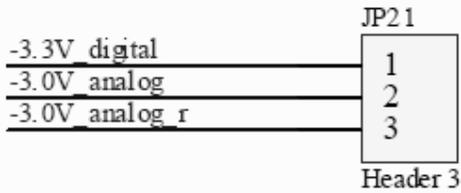
REGULADORES DE ALIMENTACION PARA LA ELECTRONICA ANALOGICA DE LA PLACA



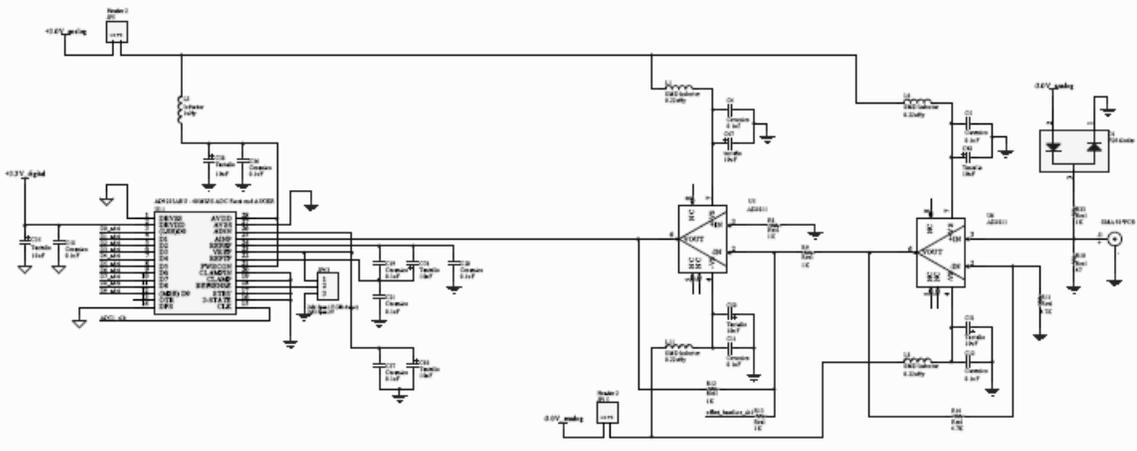
RREGULADORES DE ALIMENTACION PARA LA ELECTRONICA ANALOGICA DE LA PLACA



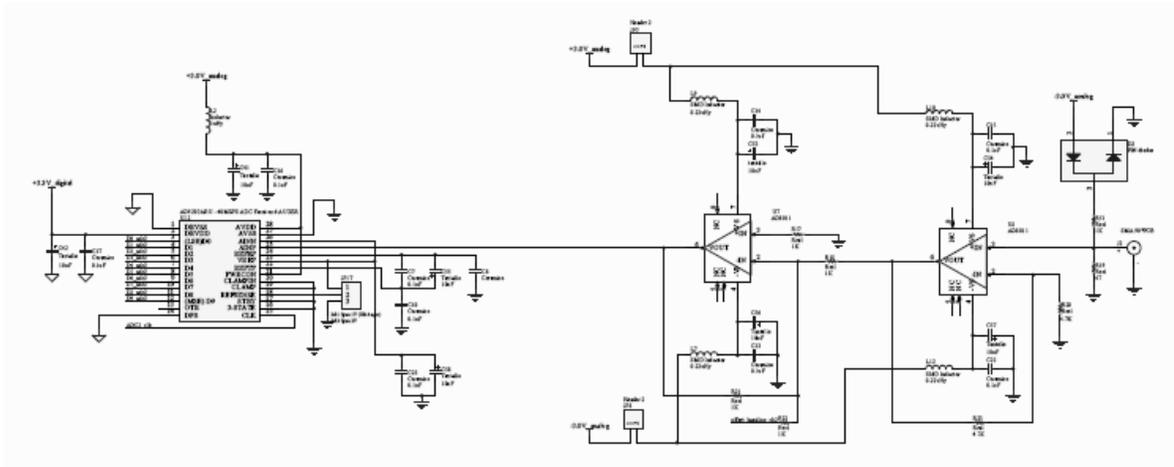
Para elegir si la alimentacion de los chips se hace desde la alimentacion digital o la que sale de los reguladores



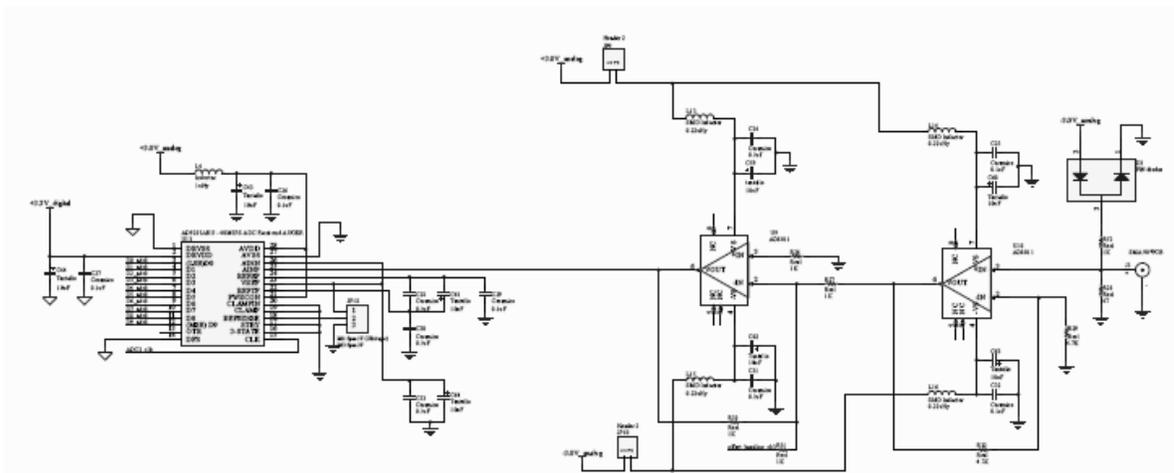
REGULADORES DE ALIMENTACION PARA LA ELECTRONICA ANALOGICA DE LA PLACA



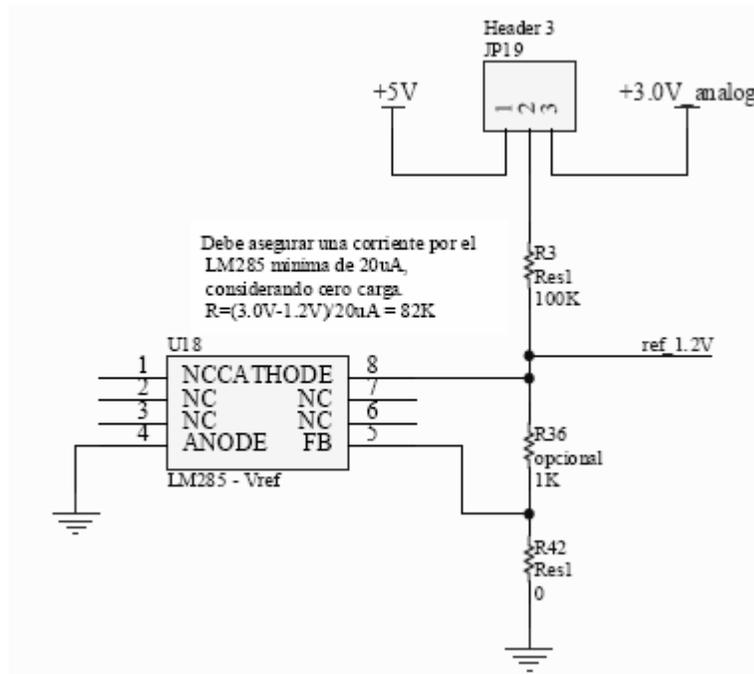
CONVERSION ANALOGICA DIGITAL CANAL 1 PULSE SHAPER CANAL 1



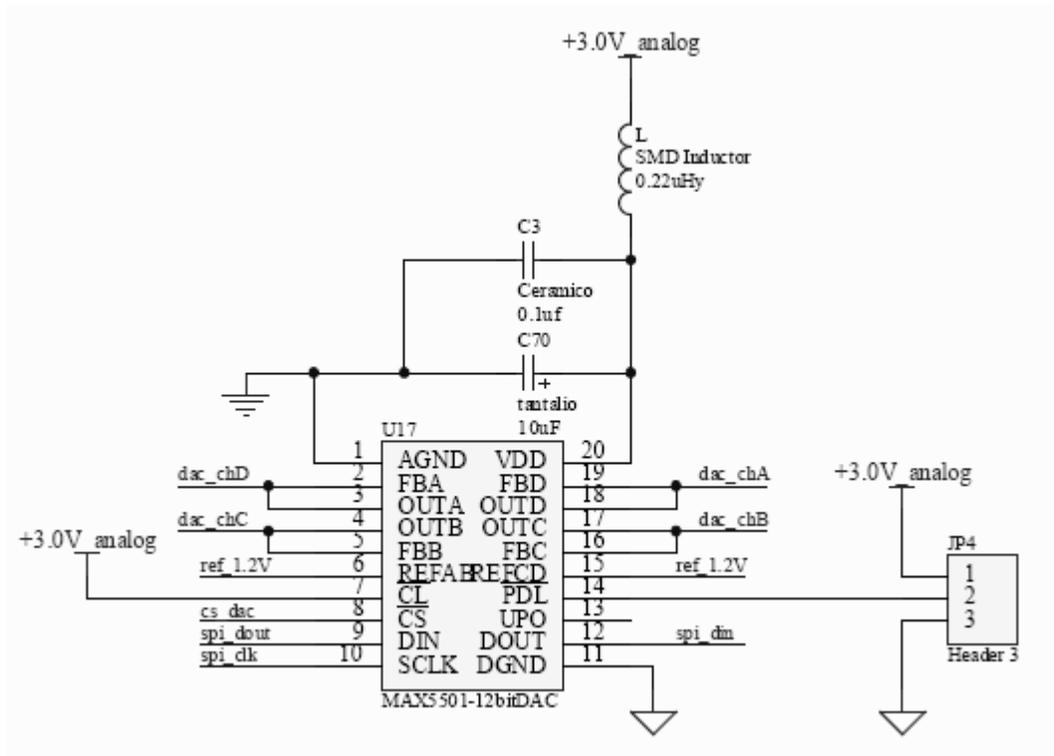
**CONVERSION ANALOGICA DIGITAL CANAL 2
PULSE SHAPER CANAL 2**



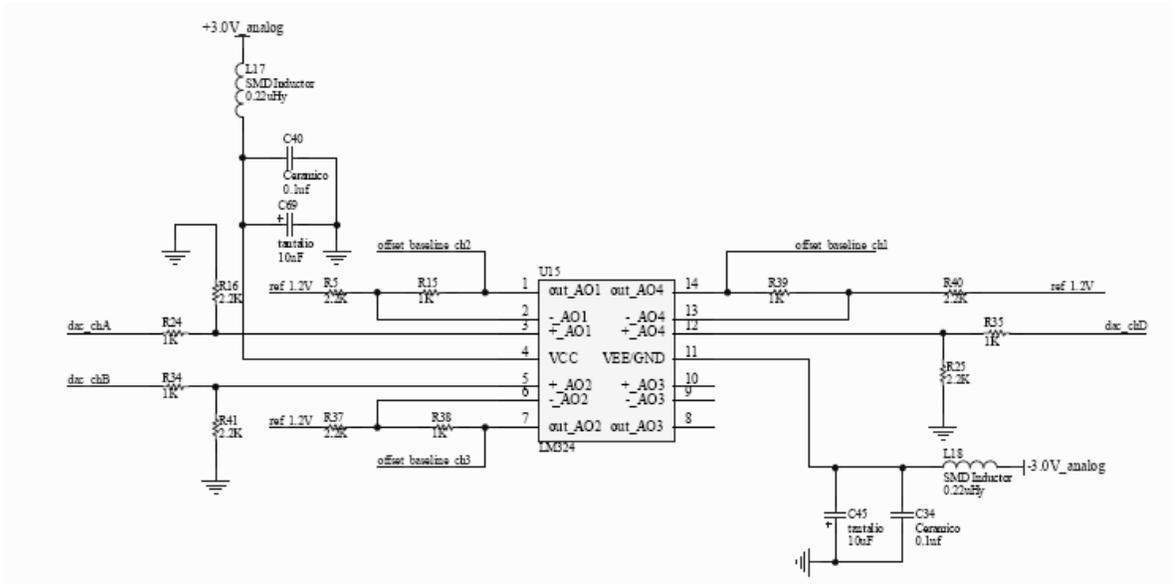
**CONVERSION ANALOGICA DIGITAL CANAL 3
PULSE SHAPER CANAL 3**



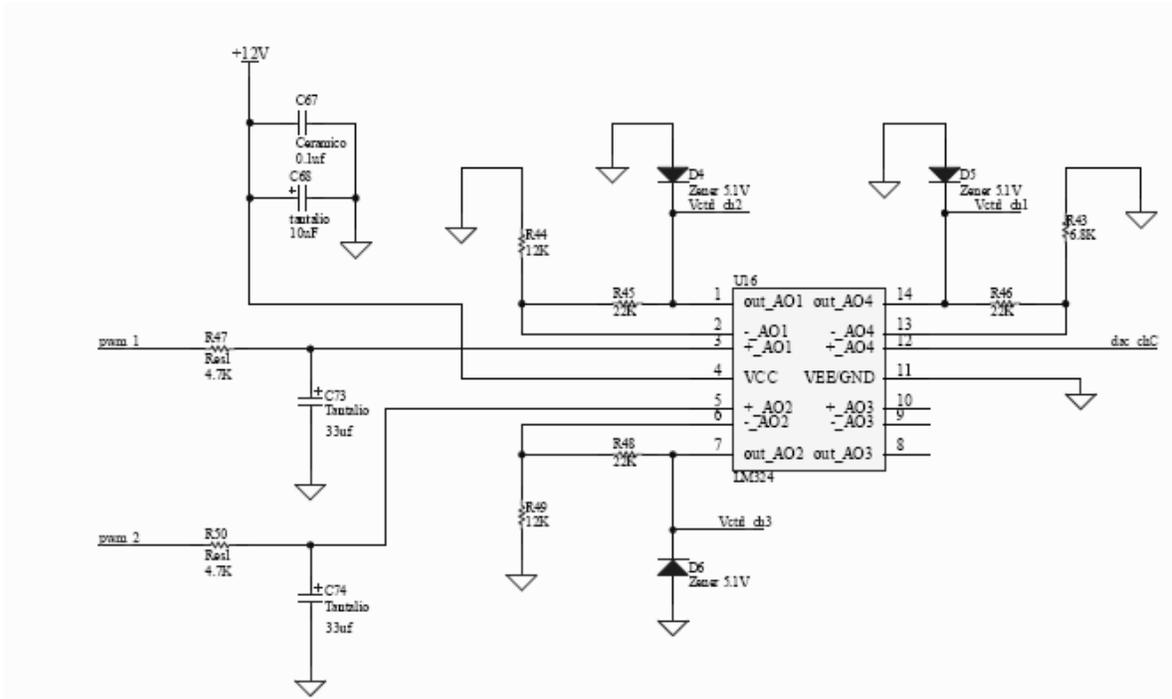
BASELINE CONTROL VOLTAGE PRODUCTION



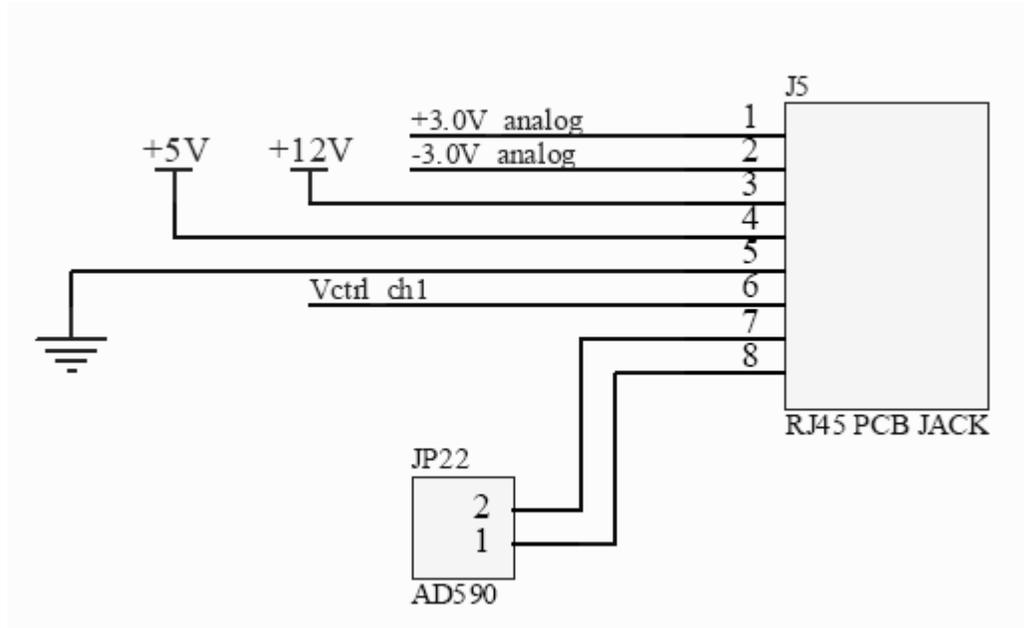
BASELINE CONTROL VOLTAGE PRODUCTION



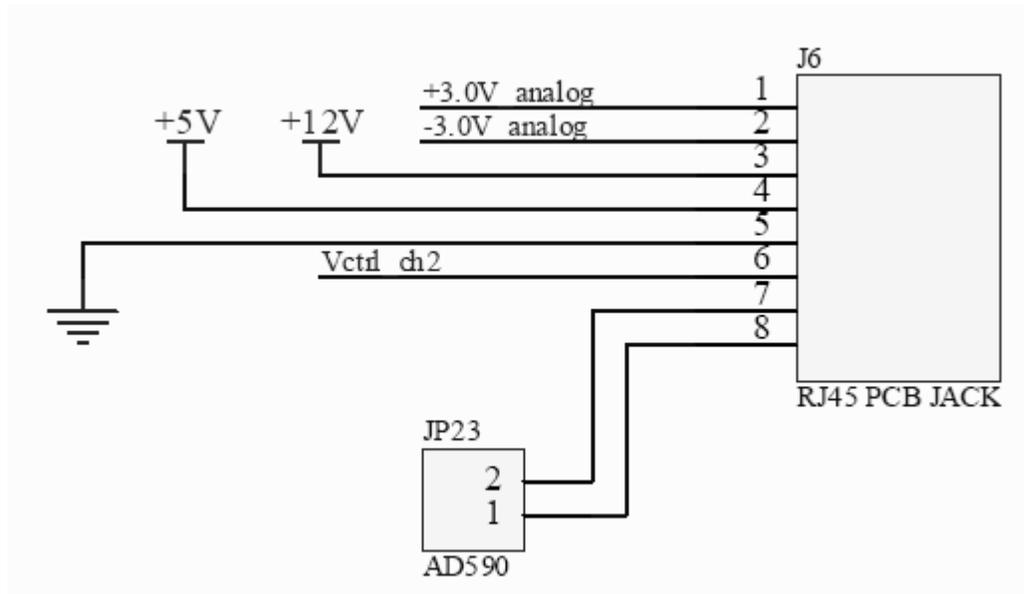
BASELINE CONTROL VOLTAGE PRODUCTION



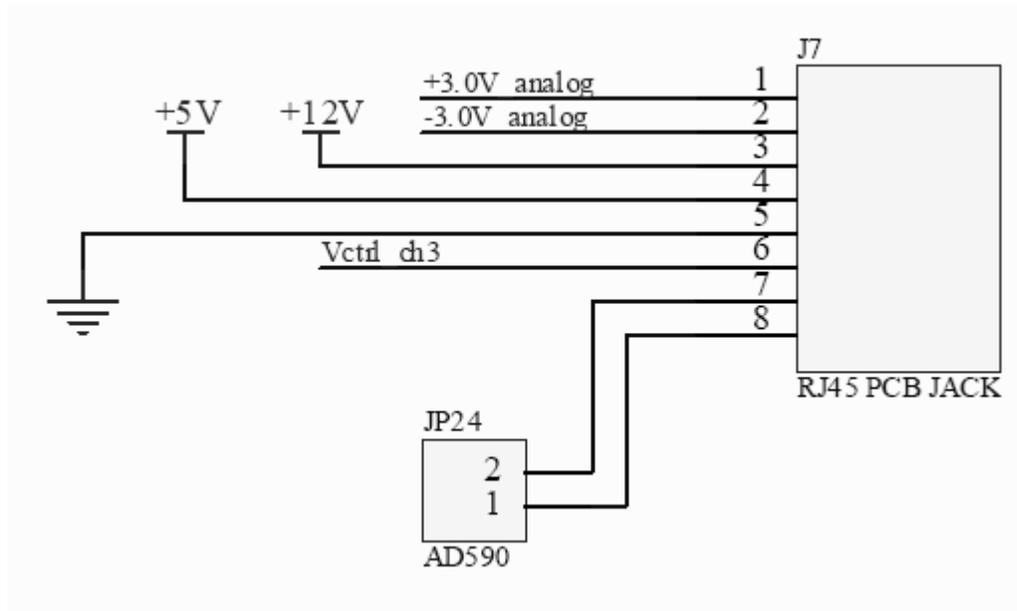
SLOW CONTROL



RJ45 OUTPUT JACKS



RJ45 OUTPUT JACKS

**RJ45 OUTPUT JACKS**

ANEXO 3

Materiales que se utilizaron en el Prototipo

<u>MATERIALES Y SUMINISTROS</u>			
<u>NOMBRE</u>	<u>IMAGEN</u>	<u>DESCRIPCION</u>	<u>CARACTERISTICAS</u>
Teflón		<ul style="list-style-type: none"> • El PTFE o Teflón es generalmente considerado un polímero termoestable, por lo cual se utilizara para recubrir el PVC. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta resistencia a temperaturas elevadas • Alta resistencia a la acción de agentes químicos y solvente Alta anti adherencia • Altas propiedades dieléctricas • Bajo coeficiente de fricción • No tóxico • Puede ser utilizado en uso continuo a cualquier temperatura comprendida entre -200 °C y +260 °C.
Codos 1/2		<ul style="list-style-type: none"> • Son accesorios de forma curva que se utilizan para cambiar la dirección del flujo de las líneas tantos grados como lo especifiquen los planos o dibujos de tuberías. 	<ul style="list-style-type: none"> • Codos estándar de 90°

<p>T TIPO PVC 1/2</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Una unión en T es un tipo de empalme para tuberías 	<ul style="list-style-type: none"> • Una unión en T es un tipo de empalme para tuberías. • Es principalmente usado para combinar o dividir el caudal de un fluido. • Las uniones en T más comunes tienen el mismo tamaño de entrada y salida
<p>UNIONES TIPO PVC 1/2</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Este tipo de unión consiste en conexiones soldadas, son simples uniones con soldadura líquida. 	<ul style="list-style-type: none"> • Este tipo de unión tiene muchas ventajas con respecto a las otras uniones como resistencia a la corrosión. • Resistencia a la acción electrolytica que destruye las tuberías de cobre • Las paredes lisas y libres de porosidad que impiden la formación de incrustaciones comunes en las tuberías metálicas proporcionando una vida útil mucho más larga con una mayor eficiencia.

			<ul style="list-style-type: none"> • Este tipo de uniones proporciona alta resistencia a la tensión y al impacto. • Pueden soportar presiones muy altas, como también pueden brindar seguridad, comodidad, economía.
TUBOS DE AGUA FRIA PVC 1/2		<ul style="list-style-type: none"> • Para realizar una estructura. 	<ul style="list-style-type: none"> • El sistema tiene más espesor que la tubería SP, pues es un material que va a ser desgastado por la tarraja; pese a tener mayor espesor, soporta la misma presión que un SP • Clase: C-10 • Medidas: 1/2" • Medidas: 1/2" x 5 m • Tipo: Con rosca
TUBOS DE AGUA CALIENTE PVC 1/2		<ul style="list-style-type: none"> • Para realizar una estructura. 	<ul style="list-style-type: none"> • 6 Mts de Largo • DIAMETRO: 1/2" • Tipo: Con rosca
PEGAMENTO PARA PVC		<ul style="list-style-type: none"> • Para unir tuberías de C-PVC en sistemas de toda presión para agua potable fría y caliente, drenaje e 	<ul style="list-style-type: none"> • Excelente fuerza de pegado. • Viscosidad extra gruesa sin escurrimientos. • Rellena holguras entre el tubo y la

		instalaciones industriales	<p>conexión de hasta 0.6mm.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fácil de aplicar. • Secado intermedio para mayor tiempo de trabajo.
PEGAMENTO CEMENTO DE CONTACTO		<ul style="list-style-type: none"> • Adhesivo sintético, impermeable, para unir paneles de plástico laminado o estratificado, cloruro de polivinilo rígido, cuero, metales, goma, materiales duros y blandos, etc., a superficies horizontales y verticales, sin necesidad de ejercer presión mecánica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Consistencia: líquida. • Color: ámbar. • Material base: cauchos poli cloroprenos y resinas sintéticas. • Sólidos: 15 % • Viscosidad: 800 - 1300 cps (viscosímetro Brookfield RVT, spin 3, vel. 50). • Peso específico: (20°C) 0.86 grs./cc • Limitaciones: Se recomienda trabajar a temperatura ambiente no inferior a 10°C. • Tipo de película: Transparente, flexible. • Resistencia al calor: Buena resistencia hasta temperatura de 60 - 70°C. • Resistencia química: la película seca de adhesivo no es

			afectada por agua ni por solventes hidrocarbonados alifáticos.
SILICON DE ALTA TEMPERATURA		<ul style="list-style-type: none"> • Que se adhiera con facilidad tanto a un material plástico como a un material de vidrio ya que este nos ayudara a tener una buena aislación en cuanto al no paso de algún tipo de humedad y permitirnos tener una impermeabilidad al mismo 	<ul style="list-style-type: none"> • Para temperaturas ambiente.
CINTA AMERICANA		<ul style="list-style-type: none"> • La cinta americana, conocida también como cinta plateada, es un tipo de cinta adhesiva que se caracteriza por añadir una malla de fibras naturales o sintéticas parecida a una venda como refuerzo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es un tipo de cinta adhesiva de presión usada principalmente para aislar empalmes de hilos y cables eléctricos. • Este tipo de cinta es capaz de resistir condiciones de temperaturas extremas, corrosión, humedad y altos voltajes. • La cinta está fabricada en

			<p>material de PVC delgado, con un ancho generalmente de 14 mm; uno de los lados de la cinta está impregnado con un adhesivo.</p> <ul style="list-style-type: none"> • El PVC ha sido elegido por ser un material de bajo costo, flexible y tener excelentes propiedades de aislante eléctrico aunque posee la desventaja de endurecerse con el tiempo y el calor.
<p>TORNILLOS GALVANIZADO S ¼*1 Y PASA CABLES</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Estos herrajes se usan para montar y/o fijar otros elementos; son de servicio continuo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Están formados por un cuerpo cilíndrico con cabeza y roscado (tornillo) • Arandelas planas, una arandela de presión • Elemento cilíndrico con una perforación central roscada (tuerca). • Abrazaderas para sujetar algún tipo de tubo PVC.

			<ul style="list-style-type: none"> • Los tornillos de acero galvanizado deberán ser fabricados según las especificaciones de las normas NTC 858 y ANSI/ASME B1.1 – 982, deberán ser galvanizadas según norma NTC 2076.
TUERCAS GALVANIZADO S ¼*1			
RODELAS GALVANIZADO S ¼*1			
ABRAZADERAS GALVANIZADO S ¼			
PLASTICO NEGRO Y BLACK OUT	 	<ul style="list-style-type: none"> • Materia Prima: Polietileno • Impermeable • Protege el producto o área de la humedad • Diversidad de Anchos • El cliente puede escoger el ancho según el área a cubrir • Diversidad de Calibres • Varios niveles de resistencia • Durabilidad • Para no 	<ul style="list-style-type: none"> • Para evitar el paso de humedad e impermeabilizar el tanque de 5 metros cuadrados de plástico. • Sera una tela de 5 metros cuadrados DE Black Out.

		permitir el paso de la luz	
MANGUERA NEGRA FLEXIBLE 1/2		<ul style="list-style-type: none"> • Para proteger el cableado del prototipo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura ambiente. • Color: Negra • Para uso continuo entre - 20° C y 80° C.
LONA TERMOSELLADA		<ul style="list-style-type: none"> • Proteger y aislar el Tanque. 	<ul style="list-style-type: none"> • Carpa 3 x 3 Mts • Lona termo sellada Súper reforzada
CORCHO		<ul style="list-style-type: none"> • Para realizar los empaques. 	
CABLE COAXIAL RG-58 BLINDADO			50 ohmios
PONCHADORA RJ45			
CONECTORES RJ-45			
TANQUE CILINDRICO VERTICAL DE POLIETILENO 1100 lt NEGRO			<ul style="list-style-type: none"> • Color Negro. • Capacidad 1100 lt. • Material Polietileno.
SPRY PARA PROTEGER CIRCUITOS ELECTRONICOS CONTRA HUMEDAD			
CONECTORES DB-15			
CONECTORES COAXIAL SMA			
CABLE UTP			

<u>EQUIPOS Y OTROS</u>			
OSCILOSCOPIO DIGITAL DE 4 CANALES 200 MHZ			
MULTÍMETRO DIGITAL DE ALTA TENSION.		<ul style="list-style-type: none"> • Para realizar las pruebas pertinentes de cada uno de los elementos (resistencias, tarjetas u otros). 	<ul style="list-style-type: none"> • Que soporte un mínimo de medida de 2000V.
KIT DE SOLDADURA (CAUTÍN, ESTAÑO, PASTA, MALLA, FLUCK)			
GENERADOR DE ONDAS 50 MHZ			
Módulo GPS			SALIDA PPS
Antena GPS			
Módulo de Presión			Buena resolución y precisión 14 Bit ADC resolution . 300-1100hpa rango de presión . voltage 2.2v-3.6v . -40°C to + 85°C rango de operación .inteface I 2 C
Balde de plástico			Para ubicarle en la parte superior del pmt y poder también ajustarlo en la tapa del tanque.