



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias de la Electrónica



Caracterización de un detector de partículas con respecto a variables atmosféricas

Tesis presentada para obtener el grado de
Licenciado en Electrónica

Presenta

Giovanny Cordero Florentino

Asesores

Dr. Jaime Hernández Sánchez

Dr. Eduardo Moreno Barbosa

Junio 2015



ÍNDICE GENERAL

<i>Índice de figuras</i>	<i>vii</i>
<i>Índice de tablas</i>	<i>xiii</i>
<i>Resumen</i>	<i>xiv</i>
<i>Objetivos</i>	<i>xiv</i>
<i>Introducción</i>	<i>xv</i>
<i>Prefacio</i>	<i>xix</i>

CAPÍTULO 1

Teoría de Rayos Cósmicos y Gamma

1.1 Rayos Cósmicos y Gamma	1
1.2 Cascadas Atmosféricas Extendidas	2
1.3 Efecto Cherenkov	3
1.4 Detectores Cherenkov de Agua	4
1.5 Técnica de la Partícula Individual	6

CAPÍTULO 2

Tubo Fotomultiplicador

2.1 Funcionamiento básico	8
2.1.1 Emisión de electrones	10
2.1.2 Trayectoria de los electrones	12
2.1.3 Multiplicación de electrones y Ganancia del PMT	13
2.1.4 Ánodo	15
2.2 Características	15
2.2.1 Divisor de voltaje y pulso característico	15
2.2.2 Tiempos característicos	16



2.2.3 Corriente oscura	17
2.1.4 Respuesta a un solo electrón	18
2.2.5 Regiones de trabajo del PMT	21
2.2.6 Linealidad	21
2.2.7 Razón señal – ruido	21
2.2.8 Exposición a la luz	22
2.3 Distribución de datos en estudios de detección	22
2.4 Instrumentación y montaje	24
2.4.1 Preparación de divisor de voltaje	24
2.4.2 Instrumentación	27
2.4.3 Montaje general	27
2.5 Sistema para caracterizar un PMT	28
2.5.1 Adquisición de datos	28
2.5.1.1 Conexión y reconocimiento USB	29
2.5.1.2 Instrucciones VISA – Instrucciones GPIB	29
2.5.2 Procesamiento de datos	31

CAPÍTULO 3

Implementación de Sistema de Caracterización de Conteo

3.1 Sistema electrónico para medir la variación en la tasa de conteo del detector	34
3.1.1 Programación de GPS	34
3.1.2 Control de la tarjeta de conteo	36
3.1.3 Envío, recepción y procesamiento de datos de conteo	36
3.2 Sistema electrónico digital para registrar variables atmosféricas	38
3.2.1 Programación de Sensor de Temperatura y Presión Atmosférica	39
3.2.2 Programación de Sensor de Temperatura y Humedad	47
3.2.3 Programación de GPS	51
3.2.4 Envío, recepción y procesamiento de información de sensores	54
3.3 Construcción del Detector Cherenkov de Agua	56
3.4 Monitoreo de los datos	58



CAPÍTULO 4

Pruebas y Resultados

4.1 Caracterización de Tubos Fotomultiplicadores	59
4.1.1 Prueba de corriente oscura	59
4.1.2 Prueba de observación de un fotoelectrón	61
4.1.3 Obtención de la ganancia del Tubo Fotomultiplicador	64
4.1.4 Prueba de linealidad	66
4.1.5 Elección del PMT	70
4.1.6 Prueba de detección	71
4.2 Caracterización de tarjeta de conteo	72
4.2.1 Prueba de verificación de niveles de referencia	73
4.2.2 Prueba de ruido	74
4.2.3 Prueba de linealidad	77
4.3 Pruebas con los sensores de variables atmosféricas	80
4.4 Prueba con el sistema completo en Puebla (CU) / 2149 msnm	85
4.5 Prueba con el sistema completo en montaña Sierra Negra / 4600 msnm	91
4.6 Llamarada solar (7 de Noviembre del 2014)	98
4.7 Evento detectado (7 – 8 de Noviembre del 2014)	100
 <i>Conclusiones</i>	 102
 <i>Apéndices</i>	 102
A Programas de Software utilizados	103
A.1 LabVIEW	103
A.2 VHDL	103
A.3 Python	104
A.4 ROOT	104
A.5 Matplotlib	104
A.6 Altium Designer	104
B Instrucciones y Protocolos de Comunicación utilizados	105
B.1 Instrucciones GPIB	105



B.2 Instrucciones VISA	105
B.3 Protocolo SPI	106
B.4 Protocolo I ² C	106
B.5 Mensajes NMEA	107
B.6 Comandos Oncore	107
B.7 Protocolo RS-232	107
C Características de dispositivos	108
C.1 Tarjeta Nexys2	108
C.2 Sensor MPL115A1	109
C.3 Sensor BMP085	110
C.4 Sensor HHT02D	111
C.5 GPS EM-408	112
C.6 GPS R5122U1155 Motorola	113
C.7 Tarjeta de conteo	113
C.8 Tubo Fotomultiplicador 9453KFLB	114
C.9 Tubo Fotomultiplicador R1463	115
D Cálculo de valores finales de variables atmosféricas	115
E Acrónimos	121
<i>Bibliografía</i>	122



A mi Familia



Agradecimientos

Agradezco al PRODEP-SEP y a la VIEP-BUAP, por el apoyo otorgado para la realización de este proyecto de tesis, desde su etapa inicial.

Agradezco al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo otorgado para la realización de este proyecto de tesis.

De igual manera, agradezco a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) y a la Facultad de Ciencias de la Electrónica (FCE), por su formación humana, académica y profesional.

Al Dr. Jaime Hernández Sánchez y al Dr. Eduardo Moreno Barbosa por brindarme su apoyo, sus conocimientos y la oportunidad de trabajar con ellos, y también por sus observaciones para desarrollar mejor este trabajo.



Índice de Figuras

Capítulo 1

Figura 1.1: Generación de Cascadas Atmosféricas Extendidas en la atmósfera terrestre	2
Figura 1.2: Onda de choque de forma cónica	4
Figura 1.3: Efecto Cherenkov producido en una planta nuclear	4
Figura 1.4: Tanque Cherenkov con un PMT en su parte superior, mirando hacia abajo [1]	6
Figura 1.5: Tanque Cherenkov con un PMT en su parte inferior, mirando hacia arriba [1e]	6
Figura 1.6: Diferencia entre buscar la cascada y detectar una sola partícula	7

Capítulo 2

Figura 2.1: Partes de un Tubo Fotomultiplicador [46]	9
Figura 2.2: Modelo de bandas del fotocátodo	11
Figura 2.3: Sección transversal de la configuración de los dinodos para un tubo fotomultiplicador circular	13
Figura 2.4. Emisión secundaria del dinodo	14
Figura 2.5: Tasa de emisión secundaria del dinodo	14
Figura 2.6: Ejemplo de un pulso de salida de un PMT. El ancho del pulso es aproximadamente 40 ns, y la amplitud es 400 mV [42]	16
Figura 2.7: Sistema del Tubo Fotomultiplicador alimentado con Alto Voltaje	16
Figura 2.8: Tiempos característicos típicos vs. el voltaje aplicado	17
Figura 2.9: Definiciones de Tiempos de ascenso y descenso, y el tiempo de tránsito del electrón	17
Figura 2.10: Comportamiento de la corriente oscura en un PMT, de acuerdo al voltaje aplicado	18
Figura 2.11: a) Distribución de electrones secundarios con un valor de δ pequeño. b) Distribución de electrones secundarios con un valor de δ grande [48]	20
Figura 2.12: Imagen de la RSE [49]	20
Figura 2.13. Ejemplo de razón señal-ruido	22
Figura 2.14: Distribución gaussiana [52]	23
Figura 2.15: Distribución Landau [52]	23
Figura 2.16: Fotomultiplicador 9453FFLB	24
Figura 2.17: Fotomultiplicador R1463	24
Figura 2.18: Diagrama eléctrico del divisor de voltaje para el 9453KFLB [53]	25
Figura 2.19: Diseño realizado para construir el divisor de voltaje	25
Figura 2.20: Diagrama de conexión: Divisor – Base – PMT 9453KFLB	26



Figura 2.21: Diagrama eléctrico del divisor de voltaje para alimentar al R1463 [53]	26
Figura 2.22: Diagrama de conexión Base – PMT R1463	26
Figura 2.23: Montaje del tubo fotomultiplicador	27
Figura 2.24: Ejemplo de una señal de salida del PMT 9453KFLB	28
Figura 2.25: Pasos seguidos para la adquisición de datos del osciloscopio	28
Figura 2.26: Obtención de la dirección asignada al osciloscopio, con la instrucción VISA find resource	29
Figura 2.27: Obtención de la dirección asignada al osciloscopio, con la aplicación NI MAX	29
Figura 2.28: Procedimiento para utilizar una orden GPIB, mediante instrucciones VISA	30
Figura 2.29: Ejemplo de archivo con la información de la curva en la pantalla del osciloscopio	31
Figura 2.30: Diagrama de bloques del procesamiento de datos	32

Capítulo 3

Figura 3.1: Diagrama de bloques del sistema de caracterización	33
Figura 3.2: Montaje del sistema de conteo de partículas	34
Figura 3.3: Circuito para la conexión del GPS R5122U1155 a una tarjeta Nexys 2	35
Figura 3.4: Menú para introducir los umbrales de voltaje	36
Figura 3.5: Formato de archivo de salida con información de conteo	37
Figura 3.6: Ejemplo de archivo de salida con información de conteo, cada milisegundo	37
Figura 3.7: Archivo final con información de conteo, cada segundo	37
Figura 3.8: Diagrama de bloques del sistema para registrar fecha/hora, presión atmosférica, temperatura y humedad	38
Figura 3.9: Sensor de presión y temperatura MPL115A1	39
Figura 3.10: Lectura los coeficientes de compensación	41
Figura 3.11: Indicación de la Conversión Analógico-Digital de las mediciones del sensor	41
Figura 3.12: Lectura de las mediciones de Temperatura y Presión Atmosférica	41
Figura 3.13: Asignación de los datos leídos del MPL115A1 a variables auxiliares (Las casillas en azul, se refieren a los bits no utilizados en los LSB)	42
Figura 3.14: Sensor de temperatura y presión atmosférica BMP085	42
Figura 3.15: Simulación de la secuencia de start requerida para la comunicación con el sensor BMP085	43
Figura 3.16: Secuencia para medir presión atmosférica	43
Figura 3.17: Secuencia para condición de stop	45
Figura 3.18: Secuencia para leer la presión atmosférica medida	45
Figura 3.19: Recepción de las mediciones	46



Figura 3.20: Asignación de los datos leídos del BMP085 a variables auxiliares (las casillas en gris corresponden a los bits recuperados de las mediciones de presión y temperatura)	47
Figura 3.21: Concatenación del bit recuperado con los 7 bits menos significativos del LSB de presión (sensor BMP085)	47
Figura 3.22: Sensor de Temperatura y Humedad Relativa HHT02D	47
Figura 3.23: Diagrama eléctrico del circuito para conectar el HHT02D a la tarjeta Nexys2	48
Figura 3.24: Ejemplo de medición de temperatura con el sensor	49
Figura 3.25: Temperatura digital, con longitud de 14 bits	49
Figura 3.26: Proceso para conservar el bit más significativo del LSB de la Temperatura digital	50
Figura 3.27: Concatenación del bit recuperado con los 7 bits menos significativos del LSB de temperatura (sensor HHT02D)	50
Figura 3.28: Asignación de los datos leídos del HHT02D a variables auxiliares (Las casillas en azul se refieren a los bits no utilizados en los MSB de temperatura y humedad. Las casillas en rojo corresponden a los bits recuperados de las mediciones de temperatura y humedad)	51
Figura 3.29: GPS modelo EM-408	51
Figura 3.30: Diseño del diagrama eléctrico para el funcionamiento y conexión del GPS en la tarjeta Nexys 2	52
Figura 3.31: Mensajes que entrega el GPS, al ser energizado	52
Figura 3.32: Formatos del mensaje RMC, del GPS EM-408, donde se distingue la hora (hhmmss), subrayada con rojo, y la fecha subrayada con azul (DDMMYY)	53
Figura 3.33: Algoritmo para la obtención de Fecha/Hora del GPS	54
Figura 3.34: Asignación de caracteres de Fecha/Hora a variables temporales	54
Figura 3.35: Algoritmo para llevar a cabo la recepción y el procesamiento de la información de los sensores y el GPS	55
Figura 3.36: Línea de ejemplo del archivo que contiene: Fecha/Hora (UTC) - Presión atmosférica (mB) - Temperatura 1 (°C) - Temperatura 2 (°C) - Humedad (RH%)	55
Figura 3.37: Instalación del PMT en el interior del tanque	56
Figura 3.38: Sistema Electrónico Digital para medir la variación en la tasa de conteo, y el registro de variables atmosféricas	56
Figura 3.39: Detector Cherenkov en Puebla-CU / 2149 msnm	57
Figura 3.40: Detector Cherenkov en Sierra Negra / 4600 msnm	57

Capítulo 4

Figura 4.1: Valores medios de las distribuciones de carga – PMT 9453KFLB	60
Figura 4.2: Valores medios de las distribuciones de voltaje – PMT 9453KFLB	60



Figura 4.3: Valores medios de las distribuciones de carga – PMT R1463	61
Figura 4.4: Valores medios de las distribuciones de voltaje – PMT R1463	61
Figura 4.5: Caja oscura (vista desde arriba), con el arreglo para que la luz del led se refleje y disperse en la hoja tyvek, y lleguen pocos fotones al fotocátodo del PMT	62
Figura 4.6: Observación de un fotoelectrón. Se muestran los resultados con a) 1350, b) 1400 y c) 1450V de alimentación del PMT KFLB9453	63
Figura 4.7: Observación de un fotoelectrón. Se muestran los resultados con a) 1150, b) 1200 y c) 1250V de alimentación del PMT R1463	64
Figura 4.8: Curva de las ganancias obtenidas en la prueba de observación de un fotoelectrón (Fotomultiplicador 9453KFLB)	66
Figura 4.9: Curva de las ganancias obtenidas en la prueba de observación de un fotoelectrón (Fotomultiplicador R1463)	66
Figura 4.10: Arreglo de los instrumentos y el fotomultiplicador para la prueba de linealidad	67
Figura 4.11: Señal de detección constante del PMT 9453KFLB observada en el osciloscopio	67
Figura 4.12: Curva de cargas del PMT 9453KFLB / Prueba de linealidad	69
Figura 4.13: Curva de voltajes del PMT 9453KFLB / Prueba de linealidad	69
Figura 4.14: Curva de cargas del PMT R1463 / Prueba de linealidad	70
Figura 4.15: Curva de voltajes del PMT R1463 / Prueba de linealidad	70
Figura 4.16: Distribución de cargas que se ajusta a una función Landau	71
Figura 4.17: Distribución de voltajes que se ajusta a una función Landau	71
Figura 4.18: Gráfica de dispersión de Tiempo (0-50%) vs Carga	72
Figura 4.19: Gráfica de dispersión de Tiempo (10-90%) vs Carga	72
Figura 4.20: Cuentas obtenidas con umbrales de a) 90 y b) 93. Señal de entrada del generador	73
Figura 4.21: Umbrales obtenidos para la prueba de niveles de referencia. Señal de entrada del generador	74
Figura 4.22: Cuentas obtenidas con umbrales de a) 25, b) 45 y c) 85. Señal de entrada del PMT	75
Figura 4.23: Umbrales obtenidos para la prueba de niveles de referencia. Señal de entrada del PMT	75
Figura 4.24: Distribuciones obtenidas en la prueba de ruido, para las señales de entrada del Generador y el PMT	76
Figura 4.25: Distribuciones obtenidas en la prueba de linealidad, para señales de entrada del Generador, con frecuencias mayores a 1 kHz	78
Figura 4.26: Gráfica de linealidad de la tarjeta de conteo	78
Figura 4.27: Distribuciones obtenidas en la prueba de linealidad, para señales de entrada del Generador, con frecuencias menores a 1 kHz	79
Figura 4.28: Prueba de Temperatura – Sensor MPL115A1	80



Figura 4.29: Prueba de Presión – Sensor MPL115A1	80
Figura 4.30: Prueba de Temperatura – Sensor BMP085	81
Figura 4.31: Prueba de Presión – Sensor BMP085	81
Figura 4.32: Prueba de Temperatura – Sensor HHT02D	82
Figura 4.33: Comparación de temperaturas del sensor BMP085 y el sensor comercial CI-6525 PASCO	83
Figura 4.34: Comparación de temperaturas del sensor HHT02D y el sensor comercial CI-6525 PASCO	84
Figura 4.35: Comparación de presiones atmosféricas del sensor HHT02D y el sensor comercial CI-6532A PASCO	84
Figura 4.36: Correlación de las mediciones de temperatura de los sensores BMP085 y HHT02D (1 mes / Puebla-CU)	85
Figura 4.37: Histograma de mediciones de temperatura en Puebla-CU (1 mes)	86
Figura 4.38: Frecuencia de Conteo (azul) - Temperatura (verde) vs Hora-Fecha (1 día / Puebla-CU). Se tomaron como muestra los datos del 02 de Julio del 2014	86
Figura 4.39: Frecuencia de Conteo (azul) - Temperatura (verde) vs Hora-Fecha (1 semana / Puebla-CU). Se tomaron como muestra los datos del 28 de Junio al 04 de Julio del 2014	87
Figura 4.40: Frecuencia de Conteo (azul) - Temperatura (verde) vs Hora-Fecha (1 mes / Puebla-CU). Se tomaron los datos del 14 de Junio al 11 de Julio del 2014	87
Figura 4.41: Histograma de mediciones de presión atmosférica en Puebla-CU (1 mes)	88
Figura 4.42: Frecuencia de Conteo (azul)-Presión atmosférica (rojo) vs Hora-Fecha (1 día / Puebla-CU). Se tomaron como muestra los datos del 02 de Julio del 2014	88
Figura 4.43: Frecuencia de Conteo (azul)-Presión atmosférica (rojo) vs Hora-Fecha (1 semana / Puebla-CU). Se tomaron como muestra los datos del 28 de Junio al 04 de Julio	89
Figura 4.44: Frecuencia de Conteo (azul)-Presión atmosférica (rojo) vs Hora-Fecha (1 mes / Puebla-CU). Se tomaron los datos del 14 de Junio al 11 de Julio del 2014	89
Figura 4.45: Correlación negativa entre presión atmosférica y conteo por minuto (Puebla/2149 msnm)	90
Figura 4.46: Histograma de valores de frecuencia de conteo en Sierra Negra (1 mes) tomando la desviación estándar como parámetro de error	91
Figura 4.47: Correlación de las mediciones de temperatura de los sensores BMP085 y HHT02D (1 mes / Sierra Negra)	92
Figura 4.48: Histograma de mediciones de temperatura en Sierra Negra (1 mes)	93
Figura 4.49: Frecuencia de Conteo (azul) – Temperatura (verde) vs Hora-Fecha (1 día / Sierra Negra). Se tomaron como muestra los datos del 03 de Noviembre del 2014	93
Figura 4.50: Frecuencia de Conteo (azul) – Temperatura (verde) vs Hora-Fecha (1 semana / Sierra Negra). Se tomaron como muestra los datos del 30 de Octubre al 05 de Noviembre del 2014	94



Figura 4.51: Frecuencia de Conteo (azul) - Temperatura (verde) vs Hora-Fecha (1 mes / Sierra Negra). Se muestran los datos del 16 de Octubre al 12 de Noviembre del 2014	94
Figura 4.52: Histograma de mediciones de presión atmosférica en Sierra Negra (1 mes)	95
Figura 4.53: Frecuencia de Conteo (azul) - Presión atmosférica (rojo) vs Hora-Fecha (1 día / Sierra Negra). Se tomaron como muestra los datos del 03 de Noviembre del 2014	95
Figura 4.54: Frecuencia de Conteo (azul) - Presión atmosférica (rojo) vs Hora-Fecha (1 semana / Sierra Negra). Se tomaron como muestra los datos del 30 de Octubre al 05 de Noviembre del 2014	96
Figura 4.55: Frecuencia de Conteo (azul) - Presión atmosférica (rojo) vs Hora-Fecha (1 mes / Sierra Negra). Se muestran los datos del 16 de Octubre al 12 de Noviembre del 2014	96
Figura 4.56: Correlación negativa entre presión atmosférica y conteo por minuto (Sierra Negra)	97
Figura 4.57: Histograma de valores de frecuencia de conteo en Sierra Negra (1 mes) tomando la desviación estándar como parámetro de error	98
Figura 4.58: Imagen de la llamarada solar del 7 de Nov, tomada con la sonda SDO (Solar Dynamics Observatory) [3e]	99
Figura 4.59: Flujo de rayos X que excedió la categoría X en la escala GOES [3e]	99
Figura 4.60: Máximas frecuencias de radio afectadas por la absorción de la radiación de la llamarada X1.6 en el lado diurno de la Tierra [3e]	100
Figura 4.61: Aumento de conteo de partículas / siete de Noviembre del 2014	101
Figura 4.62: Aumento de conteo de partículas / ocho de Noviembre del 2014	101

Apéndices

Figura B.1: Esquema de conexión típica de un Bus Serie SPI	106
Figura B.2: Esquema de conexión del protocolo I ² C	107
Figura C.1: Esquema del MPL115A1	109
Figura C.2: Esquema del sensor BMP085	111
Figura C.3: Esquema del sensor HHT02D	112



Índice de Tablas

Capítulo 3

Tabla 3.1: Comandos SPI para comunicarse con el sensor MPL115A1 (X=no importa su valor)	40
Tabla 3.2: Comandos I ² C para comunicarse con el sensor BMP085	44
Tabla 3.3: Comandos para comunicarse con el sensor HHT02D	49

Capítulo 4

Tabla 4.1: Parámetros del generador de señales, para la prueba de Observación de un fotoelectrón (V _{pp} significa Volts pico a pico)	62
Tabla 4.2: Ganancia del 9453KFLB con respecto a voltaje de alimentación	65
Tabla 4.3: Ganancia del R1463 con respecto a voltaje de alimentación	65
Tabla 4.4: Parámetros del generador de señales, para la prueba de Linealidad	67
Tabla 4.5: Valores obtenidos en la prueba de linealidad con el Fotomultiplicador 9453KFLB	68
Tabla 4.6: Valores obtenidos en la prueba de linealidad con el Fotomultiplicador R1463	68
Tabla 4.7: Configuración del generador para la prueba de niveles de referencia, con señal de entrada del mismo generador	73
Tabla 4.8: Configuración del generador para la prueba de niveles de referencia, con señal de entrada del PMT	74
Tabla 4.9: Configuración del generador para la prueba de linealidad	77
Tabla 4.10: Valores de frecuencia de la señal, y de cuentas obtenidos en la prueba de linealidad	77

Apéndices

Tabla C.1: Equivalencia de conversión de salida de la tarjeta de conteo	114
Tabla D.1: Coeficientes y mediciones obtenidas, del sensor BMP085	118
Tabla D.2: Coeficientes de compensación del sensor HHT02D	120



Resumen

En esta tesis, se presenta la construcción e instrumentación de un Detector Cherenkov de Agua, así como la caracterización de la variación en el número de partículas secundarias que se observan en la superficie de la Tierra, con respecto a variables atmosféricas, en específico temperatura y presión atmosférica. El experimento se realizó en dos alturas distintas sobre el nivel del mar, y se presentan los resultados obtenidos. Este trabajo se ubica en el área de Instrumentación en Física de Partículas.

Objetivos

Objetivo General

Instrumentar un “Detector Cherenkov de Agua”, e implementar un sistema electrónico para medir la variación de la tasa de conteo de partículas secundarias del detector, comparando los resultados respecto a la temperatura y presión atmosférica, en dos alturas diferentes sobre el nivel del mar.

Objetivos Específicos

- Caracterizar un Tubo Fotomultiplicador (PMT).
- Instrumentar un Detector Cherenkov de Agua.
- Diseñar e implementar un sistema electrónico para registrar cada determinado tiempo, las variables atmosféricas de: temperatura, presión atmosférica y humedad.
- Medir la tasa de conteo a 2149 msnm y 4600 msnm.

Resultados esperados

- Programación y control de tarjetas de adquisición de datos.
- Bases de datos de variables atmosféricas y conteo, en dos alturas distintas sobre el nivel del mar.
- Monitoreo de partículas.

Introducción

Existen partículas denominadas Rayos Cósmicos (RC), que proceden del espacio exterior y tienen energía muy elevada debido a su gran velocidad, pueden ser partículas producidas por el sol, partículas galácticas, y extragalácticas [1, 2, 3].

Si llegan a la Tierra, tienen la probabilidad de interactuar con la atmósfera, y generar diferentes Cascadas Atmosféricas Extendidas (CAE) de partículas secundarias (dependiendo de las partículas incidentes), las cuales pueden llegar hasta la superficie terrestre, y una forma de detectarlas es mediante un “Detector Cherenkov de Agua” (WCD, por sus siglas en inglés). Este tipo de detector utiliza el Efecto Cherenkov (generado en el agua o aire, aunque en este trabajo solo se trata el caso del agua) para su funcionamiento.

La energía de los RC varía en muchos órdenes de magnitud (10^7 - 10^{20} eV), y al aumentar, a partir de 10^9 eV, el flujo de las partículas disminuye como una ley de potencias, tal que en un rango de $\approx 10^{11} - 10^{12}$ eV, se tiene un ritmo de llegada de 1 partícula por m^2 por seg, para $\approx 10^{16}$ eV: 1 partícula por m^2 por año, y para $\approx 10^{18} - 10^{19}$ eV: 1 partícula por km^2 por año. Por ello el espectro en energía de éstas se conoce bien a bajas energías, pero se tiene poca información sobre las regiones de altas energías, lo cual hace necesario investigar los fenómenos que generan dichas partículas, para aportar más información sobre ellos. El estudio se realiza mediante la detección de las partículas, a través de elementos de diversa geometría y capacidad, dependiendo del intervalo de energía de análisis. Existen dos métodos de detección: el directo y el indirecto [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11].

Los Rayos Cósmicos que arriban con energías inferiores a 10^{15} eV se pueden detectar directamente a través de globos y satélites. Pero en energías por encima de este rango el ritmo de llegada es tan lento que resultan invisibles a las técnicas de detección directa, y como solución a este inconveniente se han desarrollado técnicas de detección indirecta, ya que los RC, provocan la formación de cascadas de partículas secundarias, las cuales pueden ser observadas con detectores instalados en la superficie terrestre (los métodos indirectos permiten cubrir un amplio margen de energía que va desde 10^{11} a 10^{20} eV) [4, 6].

Una de estas técnicas, consiste en detectar la luz producida (efecto Cherenkov) por las partículas secundarias de la cascada.

En este trabajo se busca observar la variación en la tasa de conteo de partículas secundarias generadas por los Rayos Cósmicos, mediante un detector de superficie, cuyo medio radiador es el agua¹.

Las partículas secundarias producidas en las Cascadas Atmosféricas Extendidas (CAE) se distribuyen desde cientos de metros cuadrados hasta miles de metros, así un detector en la superficie del planeta no necesita estar en la ruta de la partícula incidente para detectarla [1].

Los WCD pueden ver todo el cielo sobre ellos y trabajar las 24 horas del día, por lo que, son excelentes para detectar y estudiar las cascadas atmosféricas.

¹ Se requiere que el agua sea pura, para evitar la atenuación de la señal de las partículas secundarias [4].

La principal ventaja de los detectores Cherenkov de agua sobre uno espacial es su tamaño, ya que para detectar partículas de alta energía se requieren grandes áreas de detección, y mientras el área es un límite de superficie de detección en el espacio, uno puede ocupar desde decenas hasta miles de metros cuadrados en el suelo. Además los observatorios satelitales en ocasiones constituyen laboratorios con un peso de varias toneladas.

Se encuentra que los detectores espaciales representan mayor complejidad en su desarrollo, por lo que no es la opción más viable, y es muy costosa. En cambio el WCD es una alternativa muy buena para los objetivos de este trabajo, ya que el instrumental requerido tiene costos manejables dentro de las disponibilidades financieras. Estos dos tipos de instrumentos pueden ser complementarios (detección directa/indirecta), ya que la información de ambos instrumentos se puede usar para confirmar la detección de un evento en tierra [7, 12].

Existen diversos instrumentos en la superficie, que sirven para la detección de diferentes partículas, producidas en las CAE, generadas por Rayos Cósmicos, y están basados en sólidos (plástico centellador), líquidos (detectores Cherenkov de agua), gaseosos, o combinación de estos para identificar diversos tipos de partículas.

En comparación con un centellador, a igual superficie, un detector Cherenkov de agua detecta 10 veces más partículas que un centellador plástico. La principal limitación de los centelladores para detectar destellos gamma es su falta de sensibilidad a los fotones. En una cascada originada por un fotón, el 90% de las partículas secundarias que llegan al nivel del suelo son fotones secundarios, los cuales interactúan muy poco en los centelladores plásticos, ya que estos tienen poco espesor, por esto, los centelladores plásticos se usan más como detectores de partículas cargadas.

Los detectores Cherenkov de agua se presentan como los más sensibles a los fotones secundarios, gracias a que estos últimos producen partículas cargadas en el agua, las cuales generan un haz de energía conocido como luz Cherenkov, pudiendo así, ser detectados.

Por lo tanto, en comparación con otros detectores de partículas, es más factible la propuesta de desarrollar un WCD [1, 3, 12, 13, 14, 15].

Este tipo de experimentos tienen un tiempo de vida promedio de 10 años, dependiendo del uso y cuidados del Tubo Fotomultiplicador utilizado. Como ejemplo, se puede tomar el periodo activo de MILAGRO (Multi Institutional Los Alamos Gamma Ray Observatory): año 1999-2008 [16, 17, 18, 19, 20].

Una vez decidido el tipo de detector a construir, se analizó cómo afecta la altitud en la formación de cascadas atmosféricas, y por lo tanto en dónde se instalan los detectores. Normalmente las primeras interacciones de partículas primarias con la atmósfera, en las que se generan cascadas atmosféricas, se dan a 20 km de altitud sobre el nivel del mar, y el máximo número de partículas secundarias producidas ocurre entre 8-12 km sobre el nivel del mar, dependiendo del rango de energía (por ejemplo, típicamente un protón primario de 10^{10} eV provoca una cascada con su máxima emisión de partículas secundarias en altitudes mayores a 12 km, mientras que uno de 10^{16} produce una cascada con máxima emisión alrededor de 4 km de altitud), solo una pequeña fracción de estas partículas secundarias llega a la superficie terrestre, mientras que las demás son absorbidas por la atmósfera [5, 21, 22, 23].

Por lo tanto, mientras más alto se coloquen los detectores, mayor será su sensibilidad. Debido a esto, se instalan detectores en sitios de altura como Sierra Negra (4600msnm), Chacaltaya (5230msnm), Pico Espejo (4765msnm) [1, 13].

También se debe tomar en cuenta que la respuesta de un detector puede sufrir modificaciones en su funcionamiento debido a factores inherentes al diseño y la electrónica usada, como son voltajes de operación o de alimentación, sensibilidad de los sistemas; y a factores ambientales, como temperatura, presión atmosférica, humedad, etc. Estos experimentos, al ubicarse en condiciones extremas, se requiere que los detectores se caractericen bajo estas condiciones.

De esta manera, en el presente trabajo, se decidió que la colocación y caracterización del detector se hiciera a la altura de la ciudad de Puebla, y además a una altura por encima de los 4000 msnm, para observar el efecto de la interferencia de la atmósfera en la detección de las partículas producidas por Rayos Cósmicos y Gamma, y analizar el comportamiento del detector en condiciones de alta montaña, y después corregir los datos observados.

Se realizó la comparación de resultados en el campus de ciudad universitaria de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla a 2149 msnm, y en el Consorcio Sierra Negra (CSN por sus siglas en inglés) a 4600 msnm; ya que gracias al INAOE (Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica) y otras colaboraciones, el lugar cuenta con las condiciones académicas y de infraestructura necesarias para realizar el trabajo. El CSN provee servicios como sitio de acceso, electricidad, internet, comunicaciones, abastecimiento de agua, seguridad, mantenimiento, etc. [1e].

Hablando de los antecedentes, los primeros instrumentos de luz Cherenkov se construyeron desde los años sesenta. Estos buscaron fuentes astrofísicas de rayos gamma de alta y muy alta energía sin fruto alguno. Pero poco a poco se refinó la técnica.

El primer observatorio de luz Cherenkov en Agua, operacional y con resultados científicos, fue MILAGRO, que operó de 1999 a 2008 en las montañas de Jemez, Nuevo México a una altitud entre 2600 y 2630 msnm. Este observatorio mostró sus capacidades con el descubrimiento de fuentes extensas de rayos gamma de alta energía como la Vía Láctea, el monitoreo del cielo y detección de fuentes transitorias como Destellos de Rayos Gamma. El funcionamiento de los detectores Cherenkov de agua, como detectores de rayos gamma, ha sido corroborado con el experimento MILAGRO [16, 17, 18].

Hoy en día, existen diversos experimentos de gran importancia, que estudian Rayos Cósmicos, ubicados generalmente en lugares de grandes extensiones planas y cerca del nivel del mar (Auger), otros donde se buscan Destellos de Rayos Gamma de alta energía, los cuales están ubicados a alturas mayores que 4000 msnm (HAWC, LAGO), en los que también se desarrolla y mejora tecnología en Detectores de Superficie.

- Actualmente, HAWC (High Altitud Water Cherenkov) es el observatorio más importante de su tipo, y es respaldado por los resultados y experiencia de su antecesor MILAGRO. Es un observatorio de frontera de rayos gamma y rayos cósmicos cargados concebido en 2005. Está basado en la detección de las partículas de las Cascadas Atmosféricas Extendidas, mediante la emisión de luz Cherenkov en

agua, con detectores de superficie. Instalado a 4100msnm, está lo más cerca posible del máximo desarrollo de las CAE. HAWC utiliza tanques de 7.3m de diámetro y 4.5m de altura. [18, 24, 25, 26].

- Otro importante proyecto es LAGO (Large Aperture GRB Observatory), que consiste en instalar una red de detectores terrestres para detectar fotones de alta energía provenientes de explosiones de rayos gamma (GRBs), utilizando la “Técnica de la Partícula Individual (SPT por sus siglas en inglés)” con Detectores Cherenkov de Agua, además de estudiar la actividad del Sol. En LAGO, existen tanques de 2m² de área y 1.5m de alto (3m³), y otros de 75cm de alto (1.5 m³) [12, 13, 15, 24, 27, 28].
- El Observatorio Auger, en Argentina, estudia los rayos cósmicos de las más altas energías (mayores a 10¹⁹ eV). Se ubica a 1400 msnm. En Auger, los tanques miden entre 3.8 y 3.6m de diámetro y entre 1.2 y 1.6m de altura [7, 12, 29].
- En la BUAP - FCFM, también se han desarrollado Detectores Cherenkov de Agua, como parte del Proyecto EAS-BUAP. El cual es un Arreglo Híbrido que constó de 18 detectores centelladores y 6 Cherenkov de agua. Este observatorio sirvió para medir la energía primaria y la dirección de llegada de cascadas extendidas de rayos cósmicos con energías en el rango de 10¹⁴-10¹⁶ eV, aprovechando la altitud de la ciudad de Puebla (aprox. 2200msnm). En el EAS-BUAP los tanques utilizados tienen un diámetro de 1.54m y altura de 1.30m llenos hasta una altura de 1.2m con agua purificada [30, 31, 32, 33].



Prefacio

En la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la BUAP, anteriormente se ha implementado electrónica similar a la del presente trabajo, pero actualmente no se cuenta con la información técnica de lo realizado. Además, se requiere actualizar las herramientas, debido al surgimiento de nuevas tecnologías que permiten una mejor integración.

Al desarrollar este trabajo de tesis, se aportarán nuevos conocimientos, gracias al análisis de datos que no se tenían con otros detectores. Y también se actualizará la electrónica utilizada en proyectos anteriores. Se requiere aún mucha investigación, y al llevar a cabo este trabajo, se puede conocer más acerca de los fenómenos ultraenergéticos que ocurren en el espacio, y en qué forma podrían afectar nuestra vida.

La tesis se organiza de la siguiente manera. En el *resumen* se presenta una síntesis del trabajo realizado en el desarrollo de esta tesis. En el apartado de *objetivos* se establece el objetivo general, los objetivos específicos y los resultados esperados del proyecto. En la *introducción* se expone la justificación, aportaciones y estructura de la tesis, además los antecedentes y los últimos trabajos desarrollados en el área. En el *capítulo 1* se estudia la teoría y la física necesarias para este trabajo. En el *capítulo 2* se detalla el funcionamiento del elemento esencial en la mayoría de los sistemas de detección de las CAE, el Tubo Fotomultiplicador, y de los elementos utilizados para su caracterización: preparación de circuitos, instrumentación, montaje, y el desarrollo de un sistema de adquisición y procesamiento de datos utilizando LabView. A lo largo del *capítulo 3* se describe la implementación de un sistema electrónico para medir la variación en la tasa de conteo del detector respecto a temperatura y presión atmosférica, mediante la adaptación de hardware, uso de distintos protocolos de software, desarrollo de firmware en VHDL, elaboración de programas en lenguajes como Python, y la realización de gráficas en ROOT y Matplotlib. Durante el *capítulo 4* se muestran las pruebas realizadas para caracterizar dos Tubos Fotomultiplicadores y una tarjeta de conteo, así como las pruebas llevadas a cabo con el sistema completo. Finalmente, se presentan las *conclusiones* acerca del trabajo realizado.

Los programas elaborados en esta Tesis, son de código abierto, y si se requieren revisar o utilizar, se pueden pedir al autor, al correo giovannyc_f@hotmail.com, y referenciando el nombre de este trabajo.





Capítulo 1

Teoría de Rayos Cósmicos y Gamma

En este capítulo, se describen los fenómenos que se estudiarán, y su forma de detección, a través de un Detector Cherenkov de Agua, así como las características del mismo.

1.1 Rayos Cósmicos y Gamma

Rayos Cósmicos

A la Tierra llegan constantemente miles de partículas que impactan sobre las capas de la atmósfera. Estas partículas se denominan Rayos Cósmicos, proceden del espacio exterior y tienen energía muy elevada debido a su gran velocidad, cercana a la de la luz, pero no llegan hasta nosotros debido a su interacción con la atmósfera; van desde partículas producidas por el Sol (con energías hasta 10^9 eV), partículas galácticas (10^9 a 10^{17} eV) hasta partículas extragalácticas (energías mayores a 10^{17} eV). Se ha demostrado que estas partículas están constituidas por partículas cargadas (protones $\sim 90\%$ y núcleos atómicos $\sim 9\%$) y neutras (principalmente fotones y neutrones $\sim 1\%$) [1, 2, 3, 7, 16, 34].

Los rayos cósmicos más comunes que llegan hasta nuestro planeta se generan en el Sol. Nuestra estrella es una gigantesca fábrica de radiación de todas las longitudes de onda. Esta emisión es de forma continua, y se le conoce como viento solar; otras emisiones suceden de forma espontánea y con un carácter explosivo; estas últimas son las partículas energéticas solares o rayos cósmicos solares, generadas en los sucesos de llamaradas solares [3, 16, 35].

Rayos Gamma

Entre los Rayos Cósmicos que llegan a la Tierra un porcentaje de ellos son Rayos Gamma (RG), formados por fotones. Los Rayos X y los Rayos Gamma, por ejemplo, son distintas manifestaciones de los fotones, lo que los diferencia es su longitud de onda o la energía del fotón. Esta distribución de energía se llama espectro electromagnético y se divide en diferentes regiones, definidas por su forma de detección, así los fotones más energéticos en

la Tierra son los rayos gamma que emiten los materiales radioactivos. Experimentos de la última década han confirmado que existen fotones millones de veces más energéticos que los generados en plantas nucleares.

Existen en el universo, también, explosiones súbitas de fotones con energías superiores a 10^{20} eV, llamados Destellos de Rayos Gamma (GRB por sus siglas en inglés). Estos destellos pueden durar desde decenas de milisegundos hasta varios minutos. Tradicionalmente, han sido clasificados según su duración, mayor a 2 segundos (largos), y con duración menor a 2 segundos (cortos). Observaciones recientes han revelado la existencia de una tercera clase de GRB's que exhiben una duración menor a 0.1 segundos. Su gran brillantez y lejanía implican que se trata de los fenómenos explosivos más energéticos en el universo, ocurren en promedio pocos por día, y en segundos inundan con su radiación el cielo. Fueron descubiertos fortuitamente en los años 60 por los satélites militares estadounidenses VELA, encargados de rastrear actividad de ensayos de dispositivos nucleares en la Tierra [1, 12, 13, 15, 27, 28, 36, 37, 38, 39].

1.2 Cascadas Atmosféricas Extendidas

Al interactuar un Rayo Cósmico o Gamma con la atmósfera terrestre se generan otras partículas que interactúan de nuevo o se desintegran, de esta forma se genera una reacción en cadena cuyo resultado es una Cascada Atmosférica Extendida que se propaga por la atmósfera (Figura 1.1), este término fue introducido por Pierre Auger en 1938 tras observar la llegada simultánea de partículas a diferentes detectores ubicados a cientos de metros de distancia entre ellos.

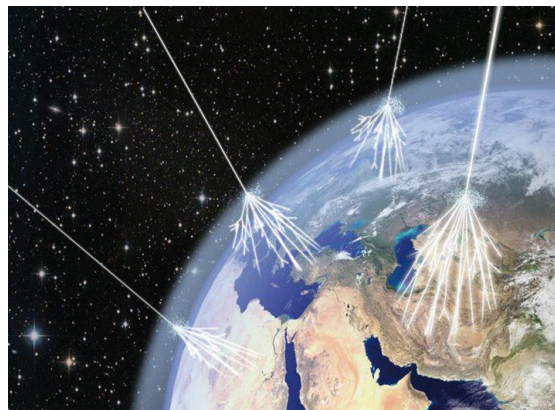


Figura 1.1: Generación de Cascadas Atmosféricas Extendidas en la atmósfera terrestre.

Las partículas que originan la cascada se conocen como partículas primarias, mientras que las partículas que la componen se denominan partículas secundarias. Cuando las primarias chocan con los gases de la atmósfera, tiene lugar una variedad muy grande de reacciones

nucleares, como liberación de electrones, excitación de átomos y formación de nuevas partículas, que a su vez, decaen o chocan con otras, transportan la energía remanente, e interactúan con otros átomos de la atmósfera.

Este proceso de multiplicación continúa hasta que la energía disponible no permite nuevas creaciones de partículas y se producen fenómenos de absorción y pérdida de energía. Se puede generar hasta una cantidad del orden de 10^{11} nuevas partículas y una importante porción de ellas puede alcanzar el nivel de la superficie terrestre [1, 7, 16, 34, 40, 41].

Hay dos tipos de cascadas atmosféricas: las cascadas electromagnéticas, inducidas por rayos gamma, y las cascadas hadrónicas, iniciadas por la interacción de un rayo cósmico con la atmósfera. En el primer caso, al chocar con las moléculas de aire en la atmósfera, los rayos gamma primarios generan un par de partículas: electrón – positrón, y además se irradian fotones de menor energía que la del fotón original, y producto de las sucesivas colisiones y decaimientos de los mismos, se multiplican los pares y fotones, generándose una reacción en cadena que produce una cascada electromagnética de partículas. En el segundo caso, los rayos cósmicos generan cascadas hadrónicas, al chocar con un núcleo atmosférico (nitrógeno u oxígeno), producen partículas cargadas y neutras, que dan lugar a partículas como electrones, muones y fotones, por lo que las cascadas hadrónicas contienen una mayor variedad de partículas que las electromagnéticas.

El diferente proceso de formación de las cascadas hace que también su forma y desarrollo en la atmósfera sea diferente, mientras las cascadas electromagnéticas producen una única traza a lo largo de la dirección del rayo gamma y en general empiezan a gran altura en la atmósfera, las cascadas hadrónicas son más ensanchadas y formadas de varias componentes. Algunas de las partículas secundarias que llegan a la superficie de la Tierra, si cuentan con la velocidad necesaria, producen radiación luminosa, en materiales como el agua, este proceso es llamado Efecto Cherenkov (descrito en la siguiente sección) [4, 7, 16, 33, 40].

1.3 Efecto Cherenkov

El Efecto Cherenkov (descubierto en 1934 por Pavel A. Cherenkov) consiste en la emisión de radiación luminosa predominantemente azulada o violeta cuando partículas cargadas eléctricamente atraviesan un medio transparente dieléctrico con índice de refracción n , con una velocidad mayor que la de la luz c en ese mismo medio, ya que la velocidad de la luz en cualquier medio transparente es menor que la velocidad de la luz c en el vacío, de acuerdo a la fórmula $v = c/n$, (en el aire $n = 1.0003$, mientras que en el agua $n=1.33$). Por ejemplo, en el agua, la luz viaja a una velocidad 25% menor que en el vacío. Cuando la partícula cargada atraviesa el material distorsiona las distribuciones de carga de las moléculas y su variación con el tiempo provoca la emisión de la luz. Esta luz no se emite en todas direcciones, sino dentro de un cono (en la misma dirección que viaja la partícula) cuya apertura depende del índice de refracción del medio, ya que las ondas

electromagnéticas emitidas forman aproximadamente el mismo ángulo respecto a la velocidad de la partícula. En el caso del agua, esta apertura es de 45° y en el aire es de 1° [3, 42]. El efecto es análogo a la creación de una onda de choque que produce un avión supersónico, al exceder la velocidad del sonido en el aire (Figura 1.2).

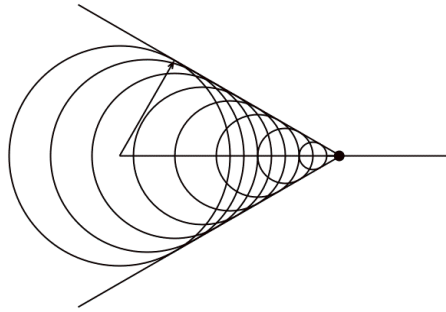


Figura 1.2: Onda de choque de forma cónica.

Este tipo de radiación se observa en los reactores nucleares (Figura 1.3), los cuales producen partículas cargadas que se mueven más rápido que la luz en el agua.



Figura 1.3: Efecto Cherenkov producido en una planta nuclear.

1.4 Detectores Cherenkov de Agua (WCD)

Un “Detector Cherenkov de Agua” es un instrumento que sirve para detectar partículas secundarias, producidas en las Cascadas Atmosféricas Extendidas. Este tipo de detectores utiliza el Efecto Cherenkov, para su funcionamiento.

El WCD se compone de un tanque de forma generalmente cilíndrica, lleno de agua pura (medio radiador, por el que pasan las partículas), el cual consta de un material reflectivo y

difusor en la parte interior (depende del tipo de fenómeno a observar) y aislado de la luz externa, en su interior cuenta con un dispositivo sensible a la luz, generalmente un Tubo Fotomultiplicador (PMT, Photo Multiplier Tube), el cual es capaz de detectar incluso hasta un fotón, y entregar un pulso eléctrico medible a su salida.

El aumento en sensibilidad para los detectores se logra por: mayor altitud del sitio, por el incremento del área física, y por un correcto aislamiento óptico de los fotosensores.

El máximo número de las partículas producidas en las cascadas se da a una altitud aproximada de entre 8 y 12 km sobre el nivel del mar, y sólo una pequeña fracción de estas partículas llega a la superficie terrestre al nivel del mar, mientras que las demás son absorbidas por la atmósfera, tal que a 1400 msnm (detector Pierre Auger), la cantidad de partículas es 100 veces menor que a 5200 msnm (detector Chacaltaya), por lo que mientras más alto se coloquen los detectores, mayor será su sensibilidad [5, 12, 13, 21, 22, 23, 43].

El incremento en área del detector implica más espacio para que pueda llegar una mayor cantidad de partículas secundarias al mismo y una mejor resolución angular, ya que se puede determinar mejor la curvatura del frente de la cascada y la localización de su centro, aunque en este trabajo no se busca determinar el centro o la dirección de las cascadas de partículas, sino solo detectar el evento mediante el incremento del conteo de las partículas en un detector. Para las dimensiones de los tanques utilizados, no existe un estándar, estas dependen tanto del rango de energías a estudiar como de la naturaleza del RC.

En cuanto al aislamiento óptico, este procedimiento es útil, para evitar que cualquier fotón o luz externa pueda ingresar al tanque y afecten la toma de datos. El interior del tanque también es importante, ya que la colección y detección de luz deben ser tan eficientes como sea posible, para esto, la luz producida se refleja gracias a un elemento reflectivo y difusor que ayuda a captar la mayor cantidad de luz generada [30]. Las partículas secundarias de las cascadas atmosféricas pueden atravesar las paredes del tanque sin ser absorbidas por ellas, pero al entrar en contacto con el agua producen fotones Cherenkov, los cuales son los que rebotan dentro del tanque para ser detectados, mientras que las partículas secundarias siguen su camino.

Existen diferentes topologías para la ubicación de un Tubo Fotomultiplicador; en este tipo de detectores de agua son colocados regularmente en la parte superior mirando hacia abajo (Figura 1.4) o mirando hacia arriba, anclado a la parte inferior (Figura 1.5).

Al colocar al tubo fotomultiplicador en la parte de arriba, se tiene la ventaja de que las partículas secundarias de menor energía (electrones) y las partículas más energéticas (muones) que generaran fotones sean captadas por el fotomultiplicador.

Cuando un PMT se coloca en la parte de abajo, observará las señales producidas por el decaimiento del par electrón-positrón generados por la cascada electromagnética producida por un rayos gamma, aún con esto, el diseño del WCD no garantiza una buena separación entre las RC y los RG.

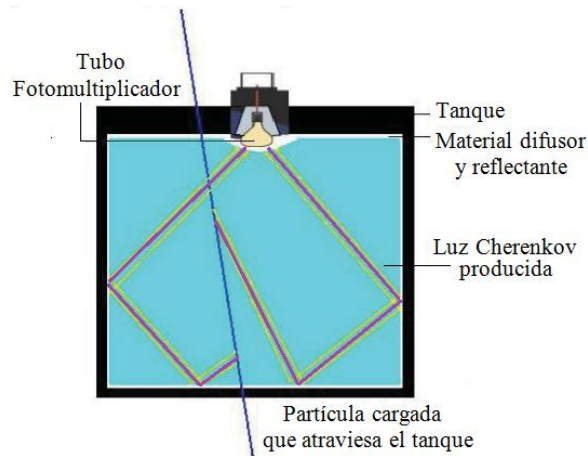


Figura 1.4: Tanque Cherenkov con un PMT en su parte superior, mirando hacia abajo [1].

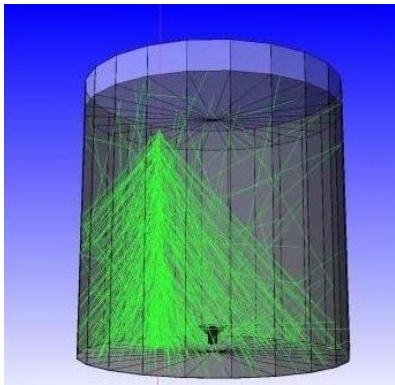


Figura 1.5: Tanque Cherenkov con un PMT en su parte inferior, mirando hacia arriba [1e].

Parte importante de estos detectores es la calidad del agua, ya que dependiendo de este parámetro se aumenta la probabilidad de que los fotones generados por la interacción de las partículas secundarias alcancen la parte sensible del PMT, en lugar de que se atenúen en el medio. Para ello se requiere muy alta pureza en el agua de los tanques por 2 razones: por un lado, no debe contener contaminantes, y por otro, debe estar suficientemente libre de bacterias y nutrientes que absorban la luz Cherenkov. Si el agua es bastante pura, los fotones no perderán mucha energía por absorción y llegarán al PMT después de varios rebotes resultando en varios picos en el pulso eléctrico [4, 29].

1.5 Técnica de la Partícula Individual

Para detectar sucesos espaciales con gran liberación de energía como son los GRB y/u otro fenómeno transitorio como son las llamaradas solares, se puede intentar detectar la cascada

atmosférica generada (donde el objetivo principal es reconstruir la energía y dirección original de dicho evento), ó detectar solo el aumento en el conteo de partículas de fondo, producido por dicho evento, debido a que en todo momento existe un ruido de fondo de partículas originadas por rayos cósmicos cargados, que son miles de veces más frecuentes que las provocadas por GRBs, por ejemplo.

Este último método es llamado “Técnica de la Partícula Individual” (SPT por sus siglas en inglés). Cuando eventos espaciales como los mencionados tienen lugar, las partículas alcanzan la atmósfera, y producen chubascos de partículas secundarias, pero al adentrarse en la atmósfera, estas van siendo absorbidas, y la mayoría no llega a la superficie terrestre, ni siquiera a alturas grandes sobre el nivel del mar.

La idea consiste en no intentar detectar la cascada completa, sino a lo mejor algunas de las partículas sobrevivientes de la cascada que no son absorbidas por la atmósfera, con arreglos de detectores de superficie en tierra. Si suficientes partículas secundarias llegan al tanque durante unos segundos, se puede esperar que se generen muchos fotones gracias al efecto Cherenkov. Así, se podrá ver un incremento en la razón de conteo de las partículas secundarias de fondo (debidas a los rayos cósmicos más frecuentes) en los detectores durante ese período corto de tiempo, y de esta forma detectar el evento (Figura 1.6).

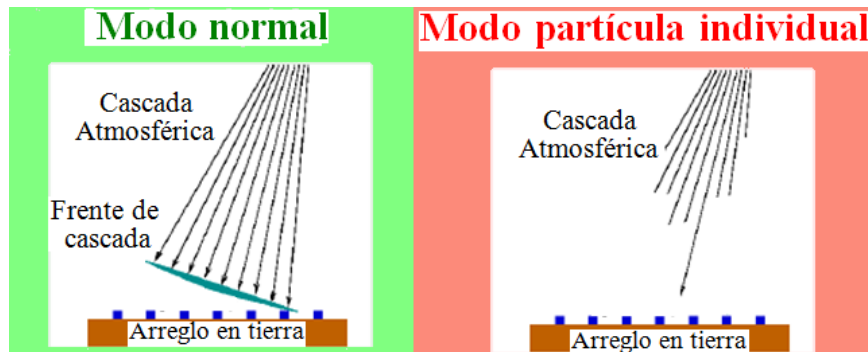


Figura 1.6: Diferencia entre buscar la cascada y detectar una sola partícula.

La detección se confirma correlacionando las fluctuaciones observadas en el conteo, con registros de satélite. Esta técnica ya se aplicó en INCA² (en Chacaltaya), y en ARGO³ (en Tibet) [12, 13, 15, 27, 28, 44, 45, 46].

El detector de este experimento trabajará en modo de conteo de partículas, mediante la Técnica de la Partícula Individual ("Single Particle Technique" ó SPT).

² INCA (Investigation of Cosmic Anomalies) es un experimento para detectar rayos gamma con energías del orden de GeV, desarrollado en el Monte Chacaltaya, Bolivia, a 5200 m sobre el nivel del mar [43, 46].

³ El experimento ARGO, localizado en Yangbajing, Tibet, China, estudia rayos cósmicos y rayos gamma con energías menores a TeV y GRB con energías de GeV [47].

Capítulo 2

Tubo Fotomultiplicador

En este capítulo se estudia el funcionamiento de un Tubo Fotomultiplicador, y sus características. También se presenta la instrumentación, el montaje general, y el desarrollo de un sistema de adquisición y procesamiento de datos, elementos necesarios para realizar las pruebas de caracterización del dispositivo, y así conocer su rango dinámico.

2.1 Funcionamiento básico

El instrumento comúnmente usado para la medición de señales rápidas y de poca intensidad de luz es el Tubo Fotomultiplicador, el cual es un dispositivo altamente sensible a la luz.

Debido a que la luz Cherenkov producida por las partículas secundarias de una cascada atmosférica es muy tenue en tiempo (aprox. de cientos de nanosegundos como máximo) y magnitud, usualmente entre el rango azul y ultravioleta, es requerido un elemento que permita la detección de esta, para ello se utiliza un Tubo Fotomultiplicador, que cuando detecta una pequeña cantidad de fotones (incluso un fotón), genera un flujo de corriente eléctrica que se puede medir, y que es proporcional a la energía de los fotones incidentes [1, 2, 42, 48, 49, 50].

El PMT está formado por un tubo al vacío que consta de una ventana de entrada (de vidrio o cuarzo), un fotocátodo que desprende electrones bajo la acción de la luz, seguido por un sistema de recolección de electrones, una sección multiplicadora de electrones o dinodos, y un ánodo en donde se toma la señal eléctrica correspondiente [51, 52].

La Figura 2.1 muestra el esquema de un Fotomultiplicador. Para su funcionamiento se aplica un alto voltaje (alrededor de 1000 volts, dependiendo de cada fotomultiplicador), mediante un circuito eléctrico (divisor de voltaje), al cátodo, dinodos y al ánodo para generar distintas diferencias de potencial a lo largo de la estructura del fotomultiplicador.

La luz que entra en un tubo fotomultiplicador es detectada y transformada en una señal eléctrica de salida a través del siguiente proceso:

- La luz pasa a través de la ventana de entrada.
- La luz excita a los electrones en el fotocátodo, generándose así fotoelectrones, los cuales son emitidos hacia el vacío (efecto fotoeléctrico).
- Los fotoelectrones son enfocados por unos electrodos, después se aceleran y chocan contra cada dinodo, donde se multiplican, por medio de una emisión secundaria de electrones. Este proceso se repite con la diferencia de potencial creciendo en cada uno de los dinodos sucesivos, aumentando el número de electrones participantes y amplificando la señal inicial.
- La multiplicación de electrones emitidos por los dinodos, es finalmente recolectada por el ánodo, en un pulso eléctrico detectable por sistemas electrónicos, como voltímetros, multímetros u osciloscopios.

Todo este proceso debe hacerse en vacío para que los electrones no se pierdan por el camino [2, 48, 49, 50, 51, 52].

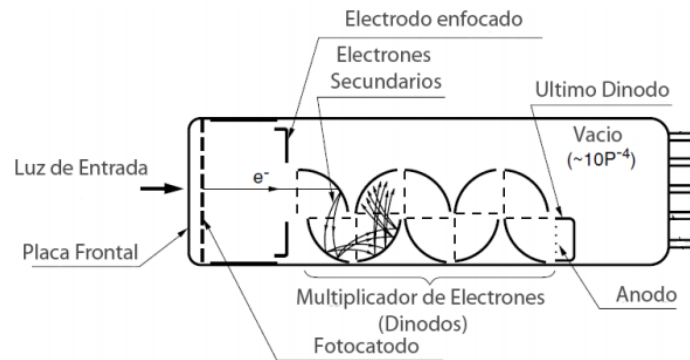


Figura 2.1: Partes de un Tubo Fotomultiplicador [52].

Si se supone al subsistema formado por el cátodo y el dinodo como lineal, entonces la corriente de salida del PMT es directamente proporcional al número de fotones que inciden. La eficiencia para conversión fotoeléctrica (sensitividad) varía con la frecuencia de la luz incidente y la estructura del material. Esta respuesta espectral característica se expresa por la *eficiencia cuántica*.

La eficiencia cuántica es el número de fotoelectrones emitidos desde el fotocátodo dividido por el número de fotones incidentes (Ecuación 2.1). Para los fotomultiplicadores es entre el 20 y 30 %, siendo generalmente mayor para los azules y menor para los rojos, no obstante existen fotomultiplicadores optimizados para tener una mayor eficiencia cuántica en determinados rangos del espectro (ultravioletas, verdes, rojos, etc.).

$$n(\lambda) = \frac{\text{número de fotoelectrones producidos}}{\text{número de fotones incidentes}} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

La sensibilidad es definida como la corriente fotoeléctrica generada por el fotocátodo dividida por el flujo radiante incidente a una determinada longitud de onda, es decir:

$$S(\lambda) = \frac{I_k}{P(\lambda)} \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

donde I_k es la corriente de emisión fotoeléctrica proveniente del cátodo y $P(\lambda)$ es la potencia radiante incidente. Este parámetro caracteriza la eficiencia de las conversiones de la luz en fotoelectrones. La sensibilidad del cátodo se da usualmente en unidades de *Ampere/Watt*:

$$S(\lambda) = \frac{\lambda_n(\lambda)}{1240} [A/W] \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

Una tercera cantidad es la *sensibilidad luminosa del cátodo*, la cual se define como la corriente por lumen del flujo incidente. Es un parámetro que caracteriza la eficiencia de las conversiones de la luz en fotoelectrones [48, 49, 50, 52].

2.1.1 Emisión de electrones

La conversión de electrones puede ser clasificada dentro del efecto fotoeléctrico externo donde los fotoelectrones son emitidos por el material y el efecto fotoeléctrico interno donde los fotones se excitan dentro de la banda de conducción del material. El fotocátodo tiene los efectos anteriores y también está constituido por el efecto fotoconductor o fotovoltaico. Como el fotocátodo está hecho de un material semiconductor, este puede ser descrito usando el modelo de bandas como se muestra en la Figura 2.2 a) Fotocátodos Alcalinos, b) Cátodos Semiconductores.

En el modelo de bandas de un semiconductor, existe una zona de bandas de energía prohibidas (EG por sus siglas en inglés) la cuales no pueden ser ocupadas por los electrones; la afinidad electrónica (EA por sus siglas en inglés) es el intervalo que se encuentra entre la banda de conducción y la barrera de vacío (nivel de vacío), y la función de trabajo (ψ) que es una energía diferente entre el nivel de fermi y el nivel del vacío.

Cuando los fotones llegan al fotocátodo, electrones en la banda de valencia absorben su energía ($h\nu$) excitándose y difundiendo hacia la superficie del fotocátodo. Si la difusión de electrones tiene la suficiente energía para superar la barrera del nivel de vacío, habrá una emisión de fotoelectrones. Esto puede ser expresado en un proceso probabilístico, y por lo

tanto la eficiencia cuántica $n(\nu)$, será una relación entre los electrones de salida y los fotones incidentes, esta relación se encuentra dada por:

$$\eta(\nu) = (1 - R) \frac{P_v}{k} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{kL}} \right) \cdot P_s \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

Donde:

R = Coeficiente de Reflexión.

K = Coeficiente de Absorción de Fotones.

P_v = Probabilidad de que la luz absorbida pueda excitar los electrones a un nivel superior al nivel de vacío.

L = Longitud de escape medio de los electrones excitados.

P_s = Probabilidad de que los electrones que alcanzan la superficie del fotocátodo puedan liberarse en el vacío.

ν = Frecuencia de la Luz.

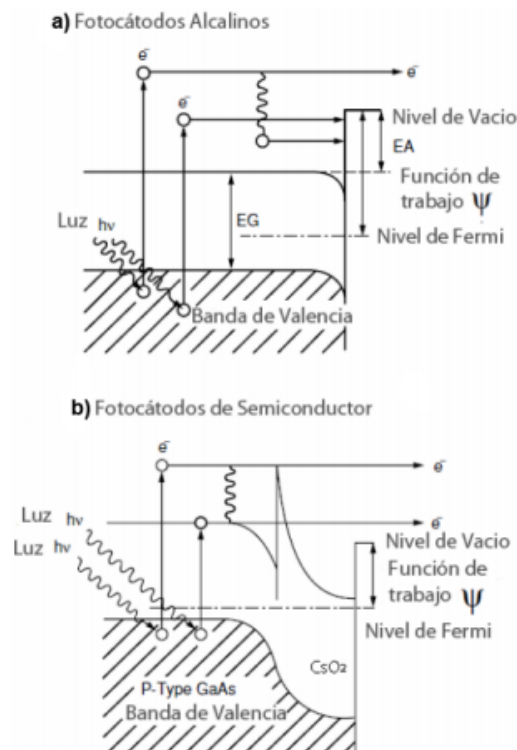


Figura 2.2: Modelo de bandas del fotocátodo.

En la Ecuación 2.4, si se elige un material apropiado con los parámetros determinados R , k y P , el factor que domina a la eficiencia cuántica deberá ser L y P_s .

L se puede hacer mayor con el uso de un cristal mejor y P_s depende en gran medida de la afinidad eléctrica (EA).

La Figura 2.2 muestra el modelo de bandas que se usa para los semiconductores. Si una capa superficial de material electropositivo como CsO_2 es aplicada al fotocátodo, se forma una capa de agotamiento, haciendo que la estructura de bandas se incline hacia abajo. Esta flexión puede hacer que la afinidad electrónica sea negativa. Este estado es llamado afinidad electrónica negativa o NEA. El efecto NEA incrementa la probabilidad (P_s) de que los electrones que lleguen a la superficie del fotocátodo pueden ser propagados en el vacío. En particular, se mejora la eficiencia cuántica en longitudes de onda largas con menor energía de excitación. Además, se alarga la distancia media de escape (L) de los electrones excitados, debido al agotamiento de capa.

Los fotocátodos pueden ser clasificados por el proceso de emisión de fotoelectrones en un modo de reflexión y un modo de transmisión. El modo de reflexión del fotocátodo se forma usualmente en una placa de metal, donde el fotoelectrón es emitido en una dirección opuesta a la de la luz incidente. El modo de transmisión del fotocátodo es usualmente generado en una película delgada sobre una placa de vidrio que es ópticamente transparente, en donde los fotoelectrones son emitidos en la misma dirección que la luz incidente. El modo de reflexión del fotocátodo es principalmente utilizado por el lado exterior del tubo fotomultiplicador mientras que el modo de transmisión del fotocátodo es usado en la cabeza de entrada del tubo, donde se detecta la luz de entrada [16, 52, 53].

2.1.2 Trayectoria de los electrones

El movimiento de los electrones en el tubo fotomultiplicador está influenciado por el campo eléctrico dado por la configuración de electrodos (dinodos) y por el alto voltaje aplicado. Cuando se diseña un tubo fotomultiplicador, se debe considerar la forma del fotocátodo (ventana esférica o plana), la forma y arreglo de los electrodos de enfoque y el voltaje aplicado, para asegurar que los fotoelectrones emitidos desde el fotocátodo estén lo suficientemente enfocados hacia su viaje al primer dinodo, y así poder evitar la pérdida considerable de estos en la trayectoria recorrida. La eficiencia de recolección del primer dinodo, es la tasa del número de electrones que llegan al área efectiva, sobre el número de fotoelectrones emitidos. Esto es usualmente mayor al 60 o 90 por ciento.

La sección de dinodos usualmente se construye de más de diez etapas de electrodos de emisión secundaria, que tienen una superficie curvada, para intensificar la eficiencia de

recolección de cada dinodo y minimizar las fluctuaciones de tiempo de tránsito del electrón, la configuración óptima y arreglos serán determinadas del análisis de las trayectorias de los electrones. El arreglo de los dinodos también se debe diseñar para prevenir la luz de retroalimentación de las etapas posteriores.

En la Figura 2.3 se muestra una sección transversal de un tubo fotomultiplicador circular y su estructura de dinodos, mostrando las trayectorias típicas de los electrones.

La trayectoria que sigue el electrón está dirigida por un sistema óptico de entrada, el cual trabaja de la siguiente manera: después de la emisión del fotocátodo, los electrones son recolectados y enfocados hacia la primera etapa de la sección multiplicadora de electrones mediante campos eléctricos [52].

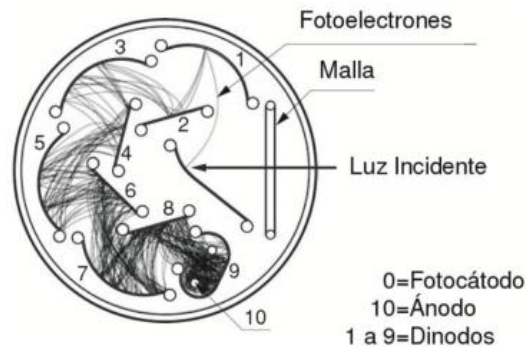


Figura 2.3: Sección transversal de la configuración de los dinodos para un tubo fotomultiplicador circular.

2.1.3 Multiplicación de los electrones y Ganancia del PMT

Los fotoelectrones emitidos en el fotocátodo son multiplicados en cada una de las etapas de dinodos, con una amplificación en la corriente en un rango de 10 a 100 veces más, y finalmente son enviados al ánodo.

Los materiales usados como dinodos con mayor emisión secundaria son los alcalinos de antimonio, óxido de berilio (BeO), óxido de magnesio (MgO), fosfuro de galio (GaP) y GaAsP. Estos materiales son cubiertos con un sustrato hecho de níquel, acero inoxidable o una aleación de cobre-berilio. En la Figura 2.4 se muestra un modelo de la multiplicación de la emisión secundaria del dinodo.

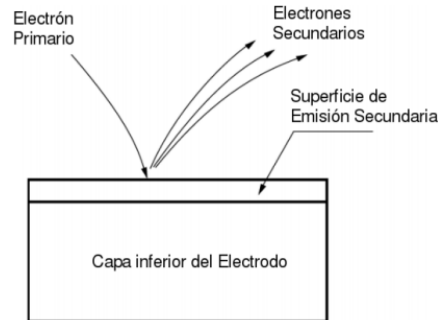


Figura 2.4. Emisión secundaria del dinodo.

Cuando un electrón primario con energía E_p golpea la superficie de un dinodo, se emiten electrones secundarios. Esto, es llamado tasa de emisión secundaria y no es otra cosa que el número de electrones secundarios por electrón primario. La Figura 2.5 muestra la tasa de emisión secundaria, para varios materiales usados como dinodos, como una función del voltaje de aceleración para los electrones primarios.

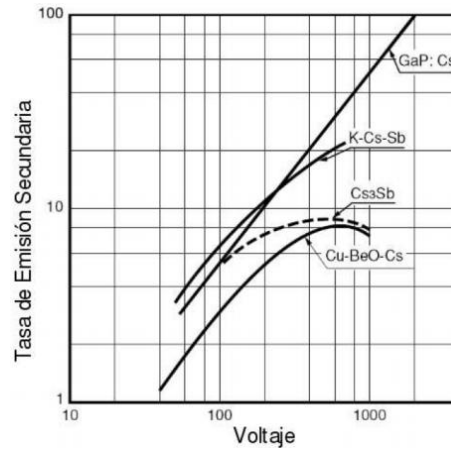


Figura 2.5: Tasa de emisión secundaria del dinodo

Idealmente, la amplificación de la corriente o ganancia para un Tubo Fotomultiplicador con n etapas en la sección multiplicadora y una tasa de emisión secundaria promedio δ , se obtiene simplemente por:

$$\text{Ganancia de un fotomultiplicador} = \alpha \delta^n \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

Donde α es la fracción de todos los fotoelectrones recolectados por la estructura multiplicadora. La ganancia de un PMT es una función del voltaje aplicado [52, 53, 54].

2.1.4 Ánodo

El ánodo en el tubo fotomultiplicador es un electrodo que recolecta los electrones secundarios multiplicados en el proceso de cascada a lo largo de los dinodos y proporciona una corriente de electrones a un circuito externo.

Los ánodos son cuidadosamente diseñados para obtener una estructura óptima para las trayectorias de los electrones y generalmente un ánodo se fabrica en la forma de un electrodo de barra, placa o malla. Uno de los factores más importantes en el diseño de un ánodo es lograr un potencial estable entre el último dinodo y el ánodo para obtener una mayor magnitud de corriente a la salida.

La señal de salida del ánodo es una corriente negativa, formada por cargas eléctricas en movimiento (electrones), la carga total es proporcional al número inicial de electrones emitidos por el fotocátodo, y es lo suficientemente grande (del orden de pC) para ser detectada por electrónica simple [48].

2.2 Características

2.2.1 Divisor de voltaje y pulso característico

Para distribuir el voltaje proporcionado por la fuente de alta tensión a los diferentes dinodos, se emplea un circuito divisor de voltaje contenido en una base, acoplada al tubo fotomultiplicador. El PMT proporciona a la salida la corriente mencionada anteriormente, esta pequeña corriente puede ser vista en un osciloscopio como un pulso analógico de voltaje (con duración del orden de nanosegundos y amplitud del orden de milivolts), gracias al circuito divisor de voltaje.

El pulso de voltaje obtenido varía en tamaño y amplitud dependiendo del número de fotones que golpean el fotocátodo del PMT (menos fotones producen un pulso más pequeño). En la Figura 2.6 se muestra el ejemplo de un pulso de voltaje obtenido como señal de salida de un Tubo Fotomultiplicador.

El máximo del pulso corresponde a los primeros fotones que llegan al PMT y los picos subsecuentes pertenecen a los fotones que rebotan dentro del tanque más de una vez en las paredes difusas del detector hasta llegar al PMT o absorberse en el agua.

Cabe mencionar que la configuración del divisor de voltaje, así como de la base dependen del modelo de Tubo Fotomultiplicador que se utilice, pero manteniendo terminales para alimentación de alto voltaje, tierra, y señal de salida del PMT [1, 48, 50].

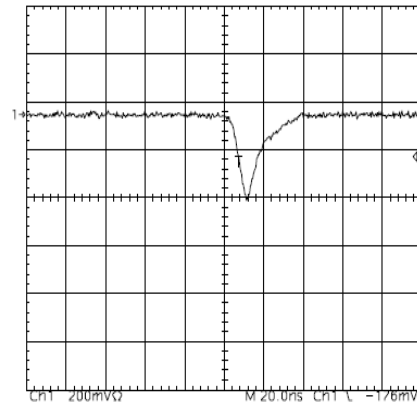


Figura 2.6: Ejemplo de un pulso de salida de un PMT. El ancho del pulso es aproximadamente 40 ns, y la amplitud es 400 mV [48].

En la Figura 2.7 se muestra cómo funciona el fotomultiplicador, con un esquema básico de un divisor de voltaje.

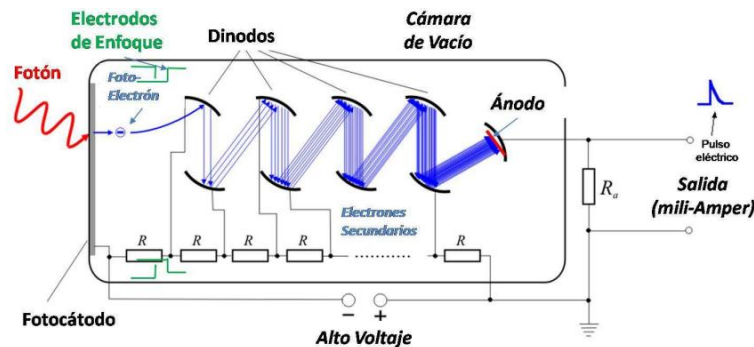


Figura 2.7: Sistema del Tubo Fotomultiplicador alimentado con Alto Voltaje.

2.2.2 Tiempos Característicos

Los tubos fotomultiplicadores son fotodetectores que tienen un tiempo de respuesta muy rápido. El tiempo de respuesta está determinado principalmente por el tiempo de tránsito requerido para que los fotoelectrones emitidos desde el fotocátodo alcancen el ánodo después de ser multiplicados así como por la diferencia de tiempo de tránsito entre cada fotoelectrón. Incrementando la intensidad del voltaje aplicado (existiendo un límite) se mejora la velocidad del tránsito del electrón y por lo tanto se obtienen tiempos de tránsito más cortos. En general, el tiempo de respuesta mejora en proporción inversa a la raíz cuadrada del voltaje aplicado. La Figura 2.8 muestra una respuesta típica característica contra el voltaje aplicado.

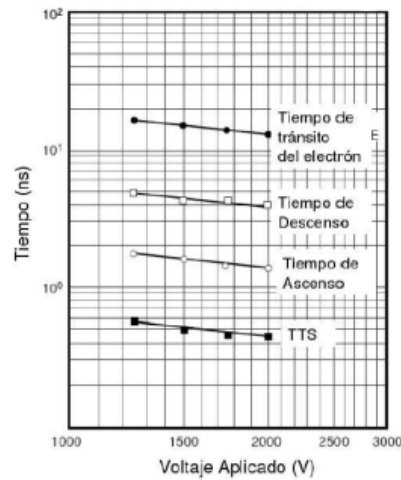


Figura 2.8: Tiempos característicos típicos vs. el voltaje aplicado.

Los tiempos característicos principales son: tiempo de ascenso, tiempo de descenso y tiempo de tránsito del electrón.

El tiempo de ascenso se define como el tiempo para el cual el pulso de salida se incrementa del 10 al 90% del pico de la altura del pulso. A su vez, el tiempo de descenso se define como el tiempo requerido para decrecer del 90 al 10% la altura del pico de salida.

La definición del tiempo de tránsito del electrón es: cuando un fotocátodo es completamente iluminado solo con electrones, el tiempo de tránsito de cada pulso de fotoelectrón tiene una fluctuación (Figura 2.9). Conocer estos tiempos sirve para diferenciar qué clase de partículas se están detectando [52].

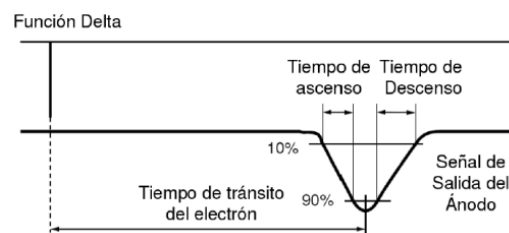


Figura 2.9: Definiciones de Tiempos de ascenso y descenso, y el tiempo de tránsito del electrón.

2.2.3 Corriente Oscura

Una pequeña cantidad de corriente fluye en un tubo fotomultiplicador incluso cuando opera en un estado de completa oscuridad. Esta corriente de salida se llama corriente oscura.

Algunas causas pueden ser:

- Emisión termiónica de corriente del fotocátodo y dinodos.
- Corrientes de fuga.
- Contaminación radiactiva.
- Ruido térmico.

Generalmente, la corriente oscura debe ser muy pequeña y en la mayoría de los PMT no es más de unos pocos nano-amperes. La corriente oscura incrementa con un aumento en el voltaje aplicado, pero la tasa de incremento no es constante. En la Figura 2.10 se muestra esta descripción [52].

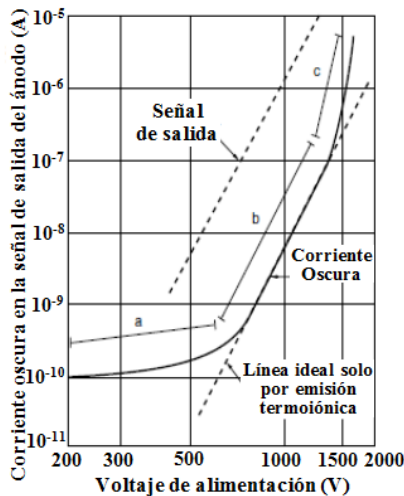


Figura 2.10: Comportamiento de la corriente oscura en un PMT, de acuerdo al voltaje aplicado.

2.2.4 Respuesta a un solo electrón

Para lograr ganancias en el orden de 1×10^6 , los PMT's utilizan múltiples etapas, en las cuales, los electrones que abandonan el fotocátodo son atraídos al primer dinodo y producen δ electrones por cada fotoelectrón incidente. Los secundarios que son producidos en la superficie del primer dinodo tienen muy bajas energías, típicamente unos pocos eV. Así, ellos son fácilmente guiados por otros campos electrostáticos establecidos entre dinodos consecutivos. Convenientemente los materiales de los dinodos son caracterizados por un valor típico de $\delta = 5$ [52, 53, 54].

Si δ fuera estrictamente una constante, cada fotoelectrón debería estar sujeto a exactamente el mismo factor de multiplicación. Bajo condiciones de operación fijas, todos los pulsos de

salida que se originan de un solo fotoelectrón deberían entonces tener la misma amplitud. En la práctica, la emisión de electrones secundarios es un proceso estadístico, y por consiguiente, el valor específico de δ en un dinodo dado fluctuará de un evento a otro alrededor de un valor medio. La forma del pulso de un único fotoelectrón observado de un real PMT es una medida indirecta del grado de fluctuación en δ .

En el modelo más simple, la producción de electrones secundarios en un dinodo puede ser asumida para seguir una distribución Poisson, alrededor del valor medio de la distribución.

Para un solo fotoelectrón incidente en el primer dinodo, el número de secundarios producidos tiene un valor medio de δ y desviación estándar σ de $\sqrt{\delta}$. La varianza relativa, definida como $(\sigma/\delta)^2$, es así igual a $1/\delta$. Cuando este proceso es combinado sobre n idénticas etapas del PMT, el número medio de electrones recolectados en el ánodo (y por lo tanto la amplitud del pulso) es dado por δ^n . Esto puede demostrarse con las propiedades estadísticas de Poisson, donde la varianza relativa en éste número es ahora:

$$\frac{1}{\delta} + \frac{1}{\delta^2} + \frac{1}{\delta^3} + \frac{1}{\delta^n} \cong \frac{1}{\delta-1} \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

Así, si $\delta \gg 1$, la varianza relativa en la amplitud del pulso de salida es dominada por fluctuaciones en el campo del primer dinodo, donde el número absoluto de electrones es el más pequeño.

En muchas aplicaciones de centelladores, cientos o miles de fotoelectrones contribuyen a cada pulso, y ellos son mucho más grandes que pulsos de un solo fotoelectrón. Cuando existe una pobre recolección de luz o radiaciones de baja energía, de cualquier manera existen señales correspondientes a unos pocos fotoelectrones. Entonces las fluctuaciones en la multiplicación de electrones pueden interferir con la habilidad para discriminar en contra de eventos de ruido, muchos de los cuales corresponden a un solo fotoelectrón.

La Figura 2.11 muestra la distribución esperada en el número de secundarios producidos por el primer dinodo, cuando es golpeado por diferentes cantidades de fotoelectrones. Si el valor de δ es pequeño, es imposible separar claramente los eventos causados por un solo fotoelectrón de aquellos en los que están involucrados más fotoelectrones. Sin embargo, si los dinodos están caracterizados por un valor más grande de δ , la separación es mucho mejor definida y es posible distinguir los picos en la distribución correspondiente a números discretos de fotoelectrones hasta aproximadamente 4 o 5 [54].

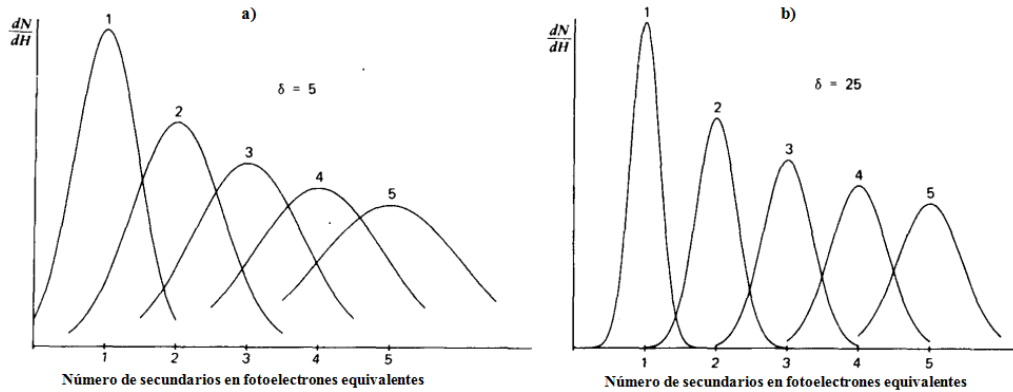


Figura 2.11: a) Distribución de electrones secundarios con un valor de δ pequeño. b) Distribución de electrones secundarios con un valor de δ grande [54].

En mediciones experimentales para el estudio de la señal producida por un solo fotón se busca un perfil típico como el de la Figura 2.12, en el que generalmente se muestra una distribución con picos, pero con una varianza relativa más grande que aquellas previstas por el modelo Poisson. Este procedimiento se conoce como “Respuesta a un Solo Electrón” (RSE), y sirve para la obtención de la ganancia del Tubo Fotomultiplicador.

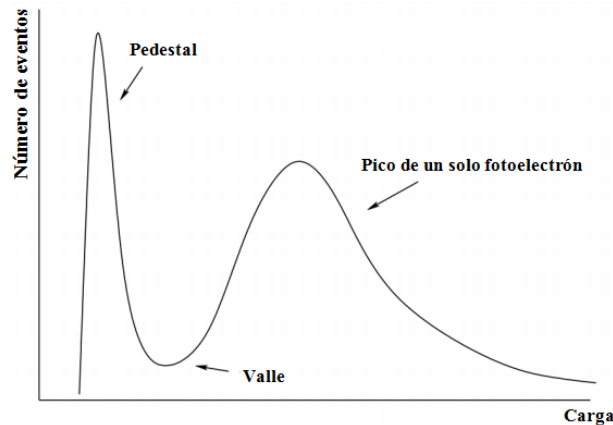


Figura 2.12: Imagen de la RSE [55].

En la Figura 2.12 el pico de la izquierda es el que se corresponde al pedestal, que es aquel pico que se produce al no tener ningún evento de fotoelectrones (ruido). Se nota que se puede usar una distribución gaussiana para ajustarlo. El segundo pico corresponde a la respuesta del PMT ante sólo un fotoelectrón. Este pico también se puede ajustar a una gaussiana. Por último nos queda la zona conocida como valle. En esa zona se localizan los eventos de corriente oscura que por su naturaleza aleatorio podemos ajustar a una exponencial decreciente [55].

2.2.5 Regiones de trabajo del PMT

Un PMT se caracteriza por tener las siguientes regiones de trabajo: exponencial, lineal y estable. Estas regiones surgen por la forma en que los electrones son desprendidos de las moléculas que componen los electrodos. A medida que la tensión de alimentación se incrementa desde el mínimo funcional, los electrones de las capas más internas son desprendidos y dan lugar a una región de flujo exponencial de corriente. Si el voltaje sigue aumentando, los electrones de valencia de los electrodos son acelerados, generando un flujo de corriente de forma lineal, en relación con el aumento de tensión. Después de cierto voltaje, no es posible desprender más electrones, llegando a una región donde el flujo de electrones permanece constante al aumento de tensión de alimentación [56].

2.2.6 Linealidad

Los tubos fotomultiplicadores muestran una buena linealidad, esto significa que la corriente de salida del ánodo es proporcional a la luz incidente. Sin embargo, si la cantidad de luz incidente es demasiado grande, la salida empieza a desviarse de la linealidad. Esto es causado principalmente por las características de linealidad del ánodo y por las características de linealidad del cátodo. Ambas características de linealidad dependen solo del valor de la corriente si el voltaje aplicado es constante, a la vez que son independientes de la longitud de onda de la luz incidente.

El fotocátodo es un semiconductor y su resistencia eléctrica depende del material del que esté hecho. Por lo que la linealidad del cátodo también difiere, dependiendo del material del fotocátodo [52].

2.2.7 Razón señal-ruido

Cuando miramos la forma de la onda a la salida del PMT, se pueden observar dos componentes, uno está presente incluso sin luz incidiendo (ruido) y el otro es generado por la luz de la señal de entrada. Normalmente, esta componente de ruido está gobernada por la corriente oscura generada por la emisión termoiónica del fotocátodo y por el ruido de disparo que se usa como referencia de la señal de corriente [46]. La razón señal ruido se expresa como RMS (root mean square). Cuando la señal y la forma de la onda del ruido son como las que se muestran en la Figura 2.13, se puede analizar como sigue:

I_d es el valor medio de la componente de ruido

i_d (RMS) es la componente AC de ruido

I_{p+d} es el valor medio de la señal (componente de ruido incluido)

$i_{p+d}(\text{RMS})$ es la componente AC de la señal (componente de ruido incluido)

Usando estos factores, la razón señal-ruido está dada por:

$$SN = \frac{I_p}{i_{p+d}} \quad (\text{Ecuación 2.7})$$

en donde I_p se obtiene restando I_d de I_{p+d} .

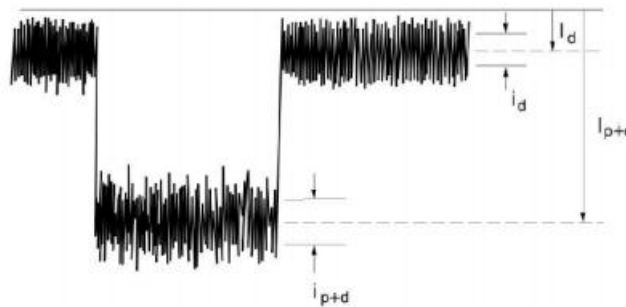


Figura 2.13. Ejemplo de razón señal-ruido.

2.2.8 Exposición a la luz ambiental

Los tubos fotomultiplicadores son extremadamente sensibles, por eso se debe tener cuidado de no exponerlos a la luz ambiental mientras el voltaje de alimentación está conectado. Porque en ese caso, la corriente resultante en el tubo puede causar una detección errónea, dar un aumento en los efectos de inestabilidad o dañar el PMT [52].

2.3 Distribución de datos en estudios de detección

Al usar PMT's es normal realizar gráficas para estudiar las amplitudes de los pulsos que entrega. Si se realiza un histograma de amplitudes de los pulsos del PMT de un WCD, la forma que este tome dependerá de los valores de las amplitudes, si solo se detecta luz debida a ruido o a eventos poco energéticos se espera una distribución que tiende a Gaussiana alrededor de un valor promedio (Figura 2.14), pero si se detecta luz debida a eventos más energéticos, la distribución gaussiana comienza a tender a una distribución Landau.

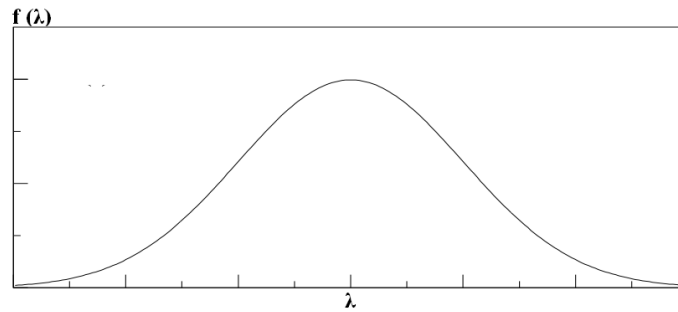


Figura 2.14: Distribución gaussiana [57].

La distribución Landau sirve para representar la fluctuación de la pérdida de energía por ionización por una partícula cargada rápida, y para el número de pares de iones producidos en el proceso, en torno a un promedio. Es asimétrica, su inclinación es muy pronunciada y tiene una larga cola que se extiende hasta altos valores en el eje horizontal (Figura 2.15). La cola de la Landau ajusta la distribución de amplitudes de los pulsos muy bien ya que dicha sección indica que aunque sean raras existen interacciones muy energéticas que producen una importante cantidad de luz [48, 57, 58].

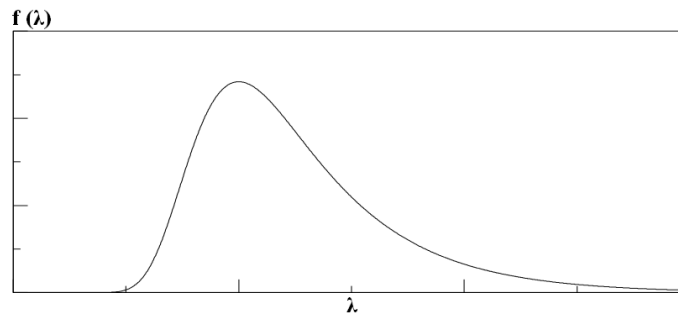


Figura 2.15: Distribución Landau [57].

La fórmula matemática para una distribución Landau es [42, 48, 57]:

$$L(\lambda) = e^{-\frac{1}{2}(\lambda + e^{-\lambda})} \quad (\text{Ecuación 2.8})$$

Para valores reales de λ , y con:

$$\lambda = \frac{x - x_{prom}}{\sigma} \quad (\text{Ecuación 2.9})$$

σ = desviación estándar

El ajuste a esta distribución de un conjunto de datos se puede realizar con el programa de software ROOT (características de este software en Apéndices A.4), el cual está optimizado para analizar cantidades grandes de datos.

2.4 Instrumentación y montaje

En este trabajo, se realizaron pruebas con 2 modelos de Tubos Fotomultiplicadores: el 9453KFLB y el R1463 (Figuras 2.16 y 2.17, respectivamente). Posteriormente con el análisis de los resultados, se eligió al dispositivo incluido en este trabajo.



Figura 2.16: Fotomultiplicador 9453FFLB.



Figura 2.17: Fotomultiplicador R1463.

2.4.1 Preparación de divisor de voltaje

A continuación, se muestran las configuraciones de los circuitos divisores correspondientes.

Divisor de voltaje del 9453KFLB

El 9453KFLB cuenta con diferentes configuraciones de divisores en la hoja de datos de ET Enterprises (empresa distribuidora), dependiendo de lo que se requiera. La configuración

seleccionada para este dispositivo se muestra en la Figura 2.18, y su elección se debió a que los valores de resistores aumentan hacia el ánodo, y esto ayuda para superar efectos de carga que conducen a la no linealidad cuando se trata con pulsos de corriente altos [59].

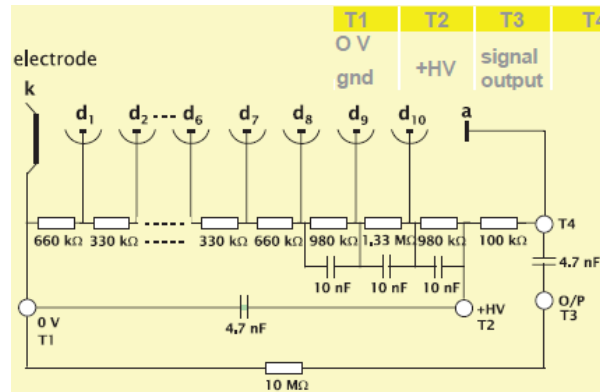


Figura 2.18: Diagrama eléctrico del divisor de voltaje para el 9453KFLB [59].

Este circuito se diseñó y construyó, tomando en cuenta los altos voltajes a los que fue sometido. Además sus componentes son para altas frecuencias, ya que los pulsos que el PMT proporciona, pueden ser de órdenes temporales muy pequeños. En la Figura 2.19 se muestra el diseño realizado del divisor de voltaje, en el programa Altium Designer Winter 09 (ver características en Apéndices A.6).

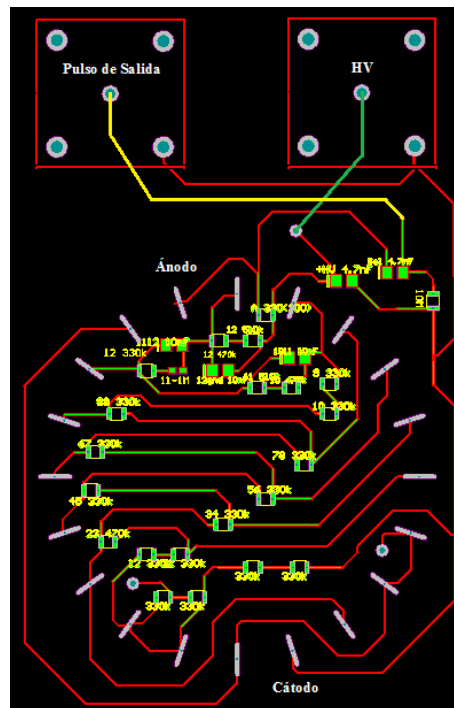


Figura 2.19: Diseño realizado para construir el divisor de voltaje.

El divisor construido se acopló a una base comercial, la cual contenía al PMT (Figura 2.20).

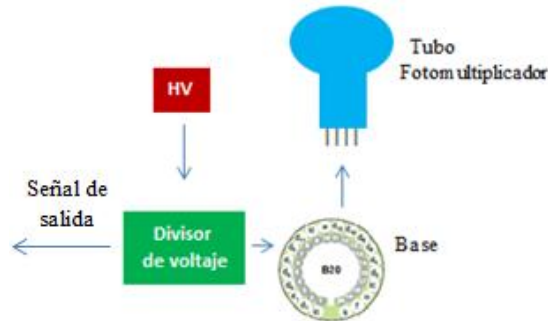


Figura 2.20: Diagrama de conexión: Divisor – Base – PMT 9453KFLB.

Divisor de voltaje del R1463

Para este PMT, se utilizó una base comercial, la E849-35, que contiene en su interior un circuito divisor de voltaje, con la configuración de la Figura 21 [60].

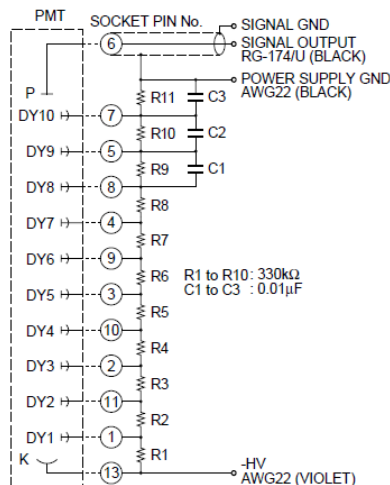


Figura 2.21: Diagrama eléctrico del divisor de voltaje para alimentar al R1463 [60].

En este caso, el Fotomultiplicador se acopló a la base, la cual cuenta con las respectivas terminales para señal de salida, y alimentación de alto voltaje (Figura 2.22).



Figura 2.22: Diagrama de conexión Base – PMT R1463.

2.4.2 Instrumentación

Los aparatos electrónicos que se utilizaron para las pruebas con los PMT son:

- *Fuente de alto voltaje (HV)*: Se utilizó la fuente variable PS325/2500V-25W (de Stanford Research Systems, Inc.), capaz de proporcionar voltajes del orden de kilovolts
- *Osciloscopio digital*: Es un instrumento capaz de detectar la señal resultante en el ánodo del PMT. Al igual que con la fuente de alto voltaje, el osciloscopio se ajusta de acuerdo a la prueba que se realice. En estas pruebas se utilizó el osciloscopio TDS2024B.
- *Generador de pulsos*: Se utilizó el generador Tektronix AFG 3101, el cual proporciona diferentes señales de salida, configurables en amplitud, duración, periodo, etc.
- *Computadora*: Se utilizó una PC, con dos puertos USB. Este elemento se sirvió para adquirir, procesar, almacenar y analizar los datos obtenidos en las distintas pruebas de caracterización.

2.4.3 Montaje experimental

Como primer paso, se buscó observar un pulso de detección del PMT en el osciloscopio, para eso se realizó el montaje, que consistió en colocar el Tubo Fotomultiplicador dentro de una caja oscura, aislándolo de la luz exterior, para evitar que se dañara el instrumento o que se produjeran detecciones erróneas. El divisor de voltaje y la base se conectaron al PMT, y los cables de alimentación y señal de detección, se conectaron a la fuente de alto voltaje y al osciloscopio, respectivamente, como se observa en la Figura 2.23. En la fuente se asignó un voltaje, dentro del rango que permite el PMT, en este caso fue de 1250v para el 9453KFLB y 1000v para el R1463 [60, 61].

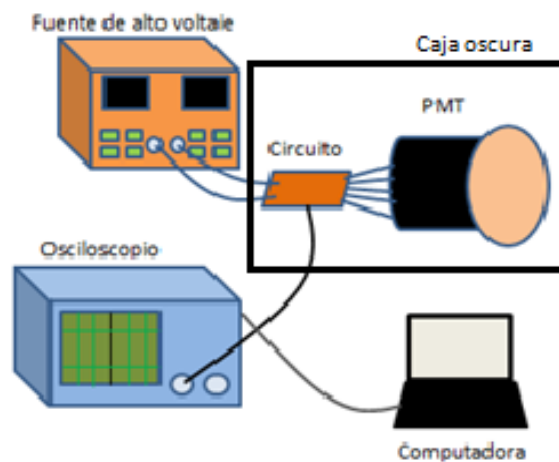


Figura 2.23: Montaje del tubo fotomultiplicador.

Se ajustaron los parámetros del osciloscopio, como escala de tiempo, escala de voltaje y trigger (nivel de disparo), para poder observar las detecciones que el fotomultiplicador realice, ya que son del orden de nanosegundos y milivolts. En la Figura 2.24 se observa un ejemplo de una señal de detección.

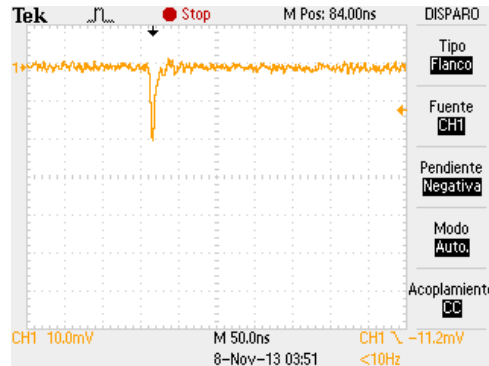


Figura 2.24: Ejemplo de una señal de salida del PMT 9453KFLB.

2.5 Sistema para la Caracterización de los PMT

Cuando se lograron observar señales de detección del PMT en el osciloscopio, la información acerca de éstas se debió transmitir hacia la computadora para almacenamiento, procesamiento y análisis; el software de programación utilizado para esta tarea fue LabVIEW (más información de este software en Apéndices A.1) [62, 63, 64, 65, 66].

2.5.1 Adquisición de datos

En primer lugar se llevó a cabo la adquisición de los datos de la pantalla del osciloscopio, siguiendo el esquema de la Figura 2.25

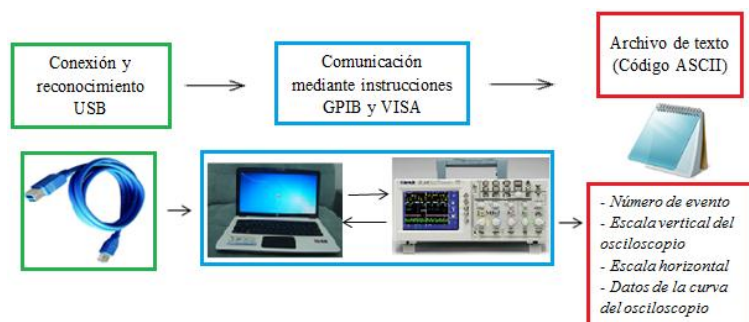


Figura 2.25: Pasos seguidos para la adquisición de datos del osciloscopio.

2.5.1.1 Conexión y reconocimiento USB

Para comenzar se conecta el osciloscopio a la PC, por medio de un cable USB, y Labview reconoce cuando un dispositivo está conectado a un puerto, asignándole una dirección. Para conocer esta dirección, se genera un pequeño programa en Labview, con la instrucción VISA find resource, que busca los dispositivos conectados con interfaz VISA (Figura 2.26).

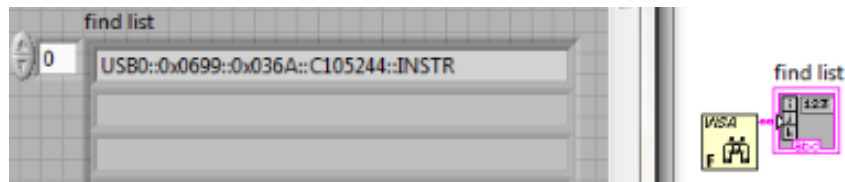


Figura 2.26: Obtención de la dirección asignada al osciloscopio, con la instrucción VISA find resource.

Otro método es abrir la aplicación NI MAX (que se instala junto a LabView) de National Instruments, y dar click en: My System -> Devices and Interfaces (Figura 2.27)

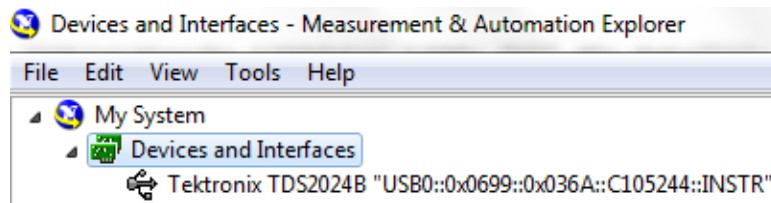


Figura 2.27: Obtención de la dirección asignada al osciloscopio, con la aplicación NI MAX.

2.5.1.2 Instrucciones VISA – Instrucciones GPIB

En la hoja de datos del osciloscopio TDS2024B, se encuentran las instrucciones GPIB (detalladas en Apéndices B.1) requeridas para que se comunique con una PC. Una vez que se conoció la dirección asignada al osciloscopio, se utilizó para mandarle las siguientes órdenes, las cuales deben ser secuenciales [62]:

- 1 - `*cls` .- Limpia el estatus del puerto.
- 2 - `Select:ch1 on` .- Despliega canal1 del osciloscopio.
- 3 - `ACQuire:mode sample` .- Establece el modo de adquisición de muestreo.
- 4 - `ACQuire:stopafter sequence` .- Establece una sola secuencia de adquisición.

- 5 - *DATA:SOURce ch1* .- Especifica la fuente de la curva del osciloscopio.
- 6 - *DATA:enc rpb* .- Establece el formato de codificación para ser entero positivo cuando el bit más significativo es transferido primero.
- 7 - *DATA:WIDTH 1* .- Establece el ancho de datos en un byte por punto de datos de la curva.
- 8 - *DATA:START* .- Establece el punto de inicio para la transferencia de los datos de la curva.
- 9 - *DATA:STOP* .- Establece el punto final en la transferencia de los datos de la curva.
- 10 - *CURVe?* .- Orden para transferir los datos de la curva.

Los comandos GPIB anteriores se programaron de la siguiente forma, en LabVIEW:

Primero se inicia una sesión VISA, con VISA Open; después se escribe la instrucción GPIB hacia el osciloscopio, con VISA Write; enseguida se lee la información requerida, con VISA Read; y finalmente se cierra la sesión y se libera el puerto con VISA Close.

El grupo de órdenes VISA son secuenciales para cada orden GPIB, por esto se usa un Stacked Sequence Structure, que consiste en un grupo de subdiagramas que se ejecutan secuencialmente.

Para mayor comodidad, se creó un subVI, con los 4 comandos VISA anteriores. Después, se utilizó un nuevo Stacked Sequence Structure, con 10 subdiagramas (cada uno con el subVI mencionado) para las 10 órdenes GPIB (Figura 2.28).

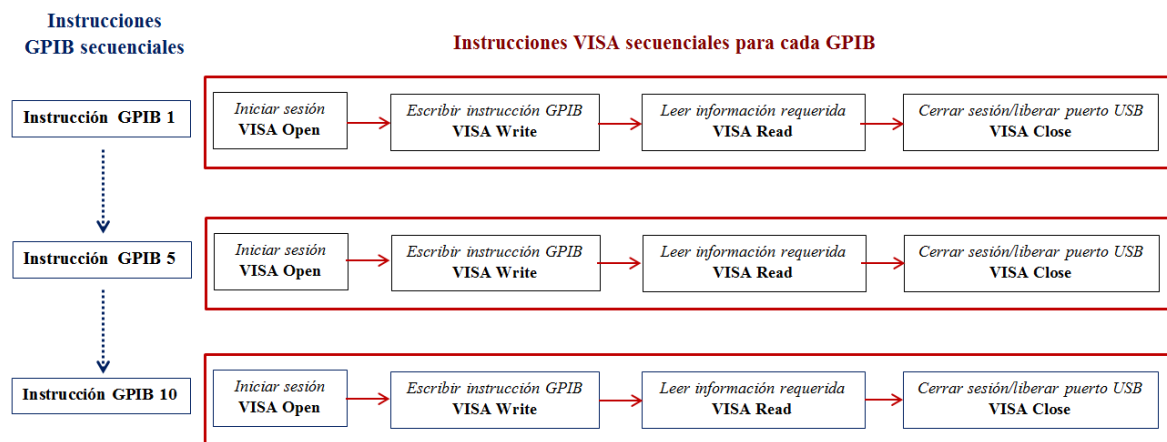


Figura 2.28: Procedimiento para utilizar una orden GPIB, mediante instrucciones VISA.

Se terminó de elaborar el programa, que genera un archivo de texto ASCII con la información de la curva observada en la pantalla del osciloscopio. En el archivo se distingue un encabezado (1#2#3#4#5#), el número de evento (1), la fecha (20132911) y hora (055650), el valor del parámetro de la escala vertical (5.0E-3 volts), y el de la escala horizontal (5.0E-8 segs.), el encabezado que manda el osciloscopio (#4), la cantidad de puntos de datos mandados (1250), y por último los 1250 puntos de datos (Figura 2.29).



Figura 2.29: Ejemplo de archivo con la información de la curva en la pantalla del osciloscopio.

La pantalla del osciloscopio utilizado contiene 2500 puntos de información, divididos en 10 cuadros, pero solo se transfieren los puntos necesarios dependiendo de la prueba que se realice. Para tener una referencia del tiempo de envío de datos, se realizó una prueba, donde se ocupó un tiempo aproximado de 35 minutos al enviar mil trazas de 2500 puntos de datos, de la pantalla del osciloscopio hacia la computadora, y aproximadamente 4 minutos y medio en enviar 1000 trazas de 250 puntos.

2.5.2 Procesamiento de datos

El siguiente punto se basa en convertir el archivo de texto ASCII en datos útiles para nuestro estudio. Se elaboró un nuevo programa en LabVIEW, que toma la cadena con los puntos de datos, y se crearon procesos para calcular diferentes cantidades. Finalmente el programa genera un archivo, que cuenta con 7 columnas de datos, la primera es el número de evento, la segunda es la carga del pulso (pC), la tercera y cuarta se refieren al tiempo que tarda el pulso en ir del 10% al 90% de su valor máximo de carga (ns), y el tiempo que tarda en ir del 50% al 100% de su máximo valor de carga (ns), respectivamente, la quinta columna es el máximo valor de voltaje del pulso (V), y las dos columnas restantes son fecha y hora del evento (Figura 2.30) [52].

La cadena de datos leídos representa la curva del osciloscopio (con amplitud en milivolts), por esta razón, se deben integrar los puntos de datos para obtener la carga de cada pulso. Dentro de la cantidad de puntos que se transfieran, se deben observar en qué rango de la pantalla se observó el pulso de detección, y solo integrar esa porción. Como ejemplo se puede observar la Figura 2.24, donde se nota que el pulso existió en el cuarto cuadro de la pantalla, esto quiere decir que solo se integra la curva del punto 750 al punto 1000 (inicio de integración: punto 750, y ancho de integración: 250 puntos).

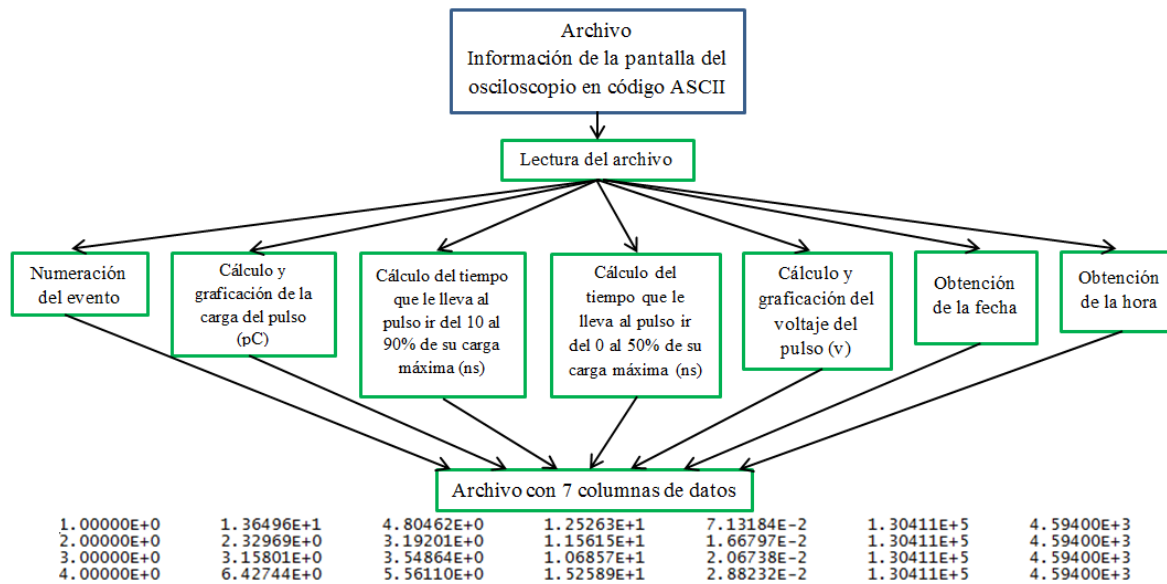


Figura 2.30: Diagrama de bloques del procesamiento de datos.

Capítulo 3

Implementación de Sistema de Caracterización de Conteo

En este capítulo se muestra el trabajo realizado para elaborar el sistema completo de adquisición y caracterización, mediante el desarrollo y control de un sistema electrónico de conteo de partículas, el diseño e implementación de un sistema electrónico para registrar variables atmosféricas, y la construcción del Detector Cherenkov de Agua. En la Figura 3.1 se observa el diagrama general del sistema.

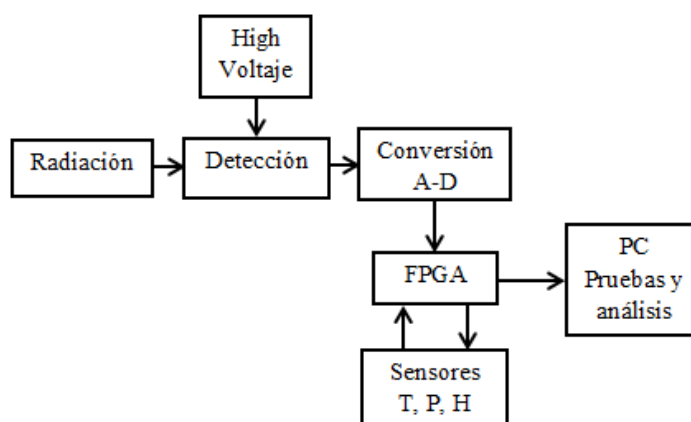


Figura 3.1: Diagrama de bloques del sistema de caracterización.

La radiación se refiere a la luz Cherenkov que se produce en el agua del tanque. La detección se realiza mediante el PMT (alimentado con alto voltaje) en el interior del detector.

Los pulsos eléctricos de detección del fotomultiplicador son muestreados por una tarjeta de Conversión Analógico – Digital cada milisegundo, para realizar el conteo de partículas. Los datos digitales resultantes se introducen al bloque FPGA, el cual se programa para recibir dicha información y enviarla a un equipo de cómputo, donde se puede almacenar y analizar.

La etapa del FPGA, también se programó para tener comunicación cada determinado tiempo con sensores digitales de temperatura, presión atmosférica y humedad, además de un GPS, obtener las mediciones e información de éstos, y enviarlas a la PC, para relacionarlos con los datos de conteo.

3.1 Sistema electrónico digital para medir la variación en la tasa de conteo del detector

En esta etapa se utilizó, para el conteo de partículas, una tarjeta que tiene 4 canales de entrada, cada uno con un convertidor analógico digital, los cuales transforman las señales de entrada a valores de salida de 10 bits.

Primero se conectó una señal a uno de los canales de la tarjeta de conteo, y después, ésta se acopló a una tarjeta Nexys2, la cual contiene una FPGA (las principales características de esta tarjeta se observan en Apéndices C.1). Un dispositivo de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés), se integró además a la tarjeta, para tener una referencia de tiempo, en las señales detectadas. Este montaje se conectó con un cable serial-USB a una PC, para el intercambio de datos. El arreglo se muestra en la Figura 3.2.

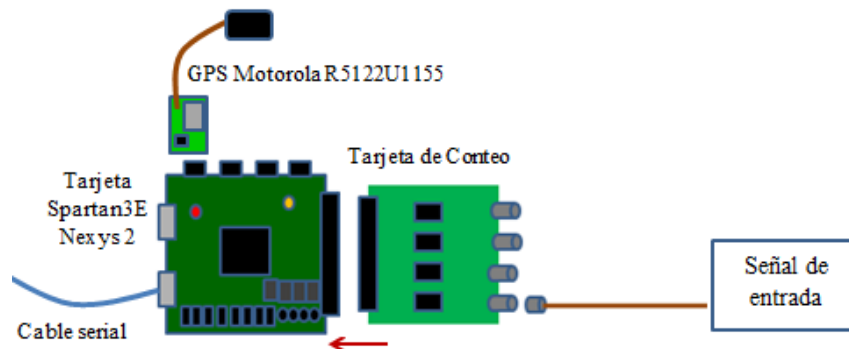


Figura 3.2: Montaje del sistema de conteo de partículas.

3.1.1 Programación del GPS

El presente arreglo utiliza el GPS modelo R5122U1155 de Motorola (ver características del dispositivo en Apéndices C.6) [67]. Se debió construir un circuito que permitiera conectar este dispositivo a la tarjeta, el diseño se realizó en Altium Designer Winter 09, y se muestra en la Figura 3.3.

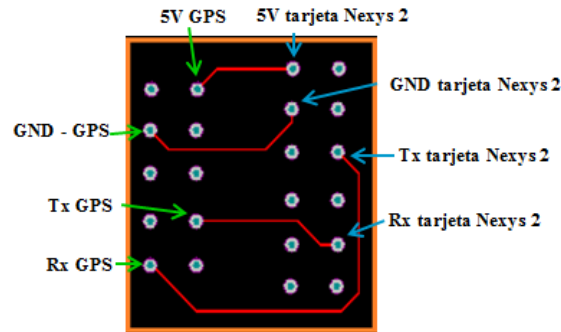


Figura 3.3: Circuito para la conexión del GPS R5122U1155 a una tarjeta Nexys 2.

Este dispositivo requiere ser inicializado, y para lograr esto, se debe instalar en la PC el software *Darkgps*, el cual trae integrada la aplicación *gpsdisplay* y sus instrucciones de uso, además se programó la FPGA, para entablar comunicación directa entre la aplicación mencionada y el GPS. Una vez realizados estos pasos, en una terminal de Linux, se teclea el siguiente comando:

```
$ perl ./gpsdisplay -r M -s /dev/ttyUSB0
```

Donde, *perl* se refiere a que el software está basado el programa *gpsdisplay*.

./gpsdisplay ejecuta la aplicación.

-r M es la configuración para comunicarse con un dispositivo Motorola.

-s /dev/ttyUSB0 establece el puerto de la computadora a utilizar.

Dentro de la aplicación se puede visualizar la cantidad de satélites detectados al momento, la fecha/hora de la PC, fecha/hora establecida por el GPS, instrucciones bidireccionales entre la aplicación y el GPS, entre otros datos. Para acelerar la adquisición de la señal de los satélites, se puede conectar una antena GPS, o bien introducir en la aplicación, las órdenes:

```
@@Aa# 175030
```

```
@@Ac# 04072014
```

Las cuales indican la hora y fecha, respectivamente; estas instrucciones deben escribirse cuando aún no se han detectado satélites. En este trabajo, primero se teclearon hacia el GPS las órdenes mencionadas, y después se conectó la antena ANT-GPS-UC-MCX [68, 69].

Cuando el GPS adquirió la hora y fecha correctas, sincronizando las señales de los satélites, se cierra la aplicación *gpsdisplay*, y se reinicia la tarjeta FPGA, sin desconectar al GPS de la alimentación eléctrica por más de 30 minutos (ya que perdería los datos adquiridos), este tiempo es aproximado, y se obtuvo tras realizar numerosas pruebas.

3.1.2 Control de la tarjeta de conteo

Para manejar la tarjeta, esta se programa para la opción de rate, se abre una terminal de Linux (en la PC que recibe los datos), y se establece la ruta de la carpeta donde se encuentran los scripts a utilizar.

Se introduce el comando: ***sudo kermi***

Con kermi se parametriza el puerto USB que se utilice:

set line /dev/ttyUSB0

set carrier-watch off

set speed 115200

connect

En una nueva terminal (con la misma ruta) se ejecuta el script para controlar la tarjeta:

sudo bin/bash ./rate10min.sh.

Enseguida aparece una pantalla como la de la Figura 3.4 y se deben especificar 4 umbrales para cada canal. Si un canal no se está utilizando, no importan los valores introducidos para ese canal. Esto sirve para que la tarjeta considere eventos con voltajes de entrada menor o iguales a determinado umbral, y envíe la cantidad de datos detectados en ese rango. Cada unidad de umbral equivale a un rango de 2 mV.

```
Determine el threshold 1 para el canal 1: 5
Determine el threshold 2 para el canal 1: 5
Determine el threshold 3 para el canal 1: 5
Determine el threshold 4 para el canal 1: 5
-----
Determine el threshold 1 para el canal 2: 5
Determine el threshold 2 para el canal 2: 5
Determine el threshold 3 para el canal 2: 5
Determine el threshold 4 para el canal 2: 5
-----
Determine el threshold 1 para el canal 3: 5
Determine el threshold 2 para el canal 3: 5
Determine el threshold 3 para el canal 3: 5
Determine el threshold 4 para el canal 3: 5
-----
Determine el threshold 1 para el canal 4: 1
Determine el threshold 2 para el canal 4: 2
Determine el threshold 3 para el canal 4: 3
Determine el threshold 4 para el canal 4: 4
```

Figura 3.4: Menú para introducir los umbrales de voltaje.

3.1.3 Envío, recepción y procesamiento de los datos de conteo

Los datos de la tarjeta de conteo y del GPS se envían con una velocidad de 115200 baudios por segundo (bps) al equipo de cómputo. Se guarda un archivo de texto cada 10 minutos,

que contiene la información del número de evento, el canal correspondiente, y el número de detecciones dependiendo de los umbrales establecidos (Figuras 3.5 y 3.6).

Número de evento	Canal 1	Cuentas obtenidas de acuerdo al umbral 4 introducido en el canal 1	Cuentas obtenidas de acuerdo al umbral 3 introducido en el canal 1	Cuentas obtenidas de acuerdo al umbral 2 introducido en el canal 1	Cuentas obtenidas de acuerdo al umbral 1 introducido en el canal 1	...	Canal 4	Cuentas obtenidas de acuerdo al umbral 4 introducido en el canal 4	Cuentas obtenidas de acuerdo al umbral 3 introducido en el canal 4	Cuentas obtenidas de acuerdo al umbral 2 introducido en el canal 4	Cuentas obtenidas de acuerdo al umbral 1 introducido en el canal 4
		1	1	1	1			4	4	4	4

Figura 3.5: Formato de archivo de salida con información de conteo.

```

0 10000 20000 30000 40015 60
1 10000 20000 30000 40015 60
2 10000 20000 30000 40015 60
:
197 10000 20000 30000 40015 60
198 10000 20000 30000 40015 60
199 10000 20000 30000 40015 60
64 1 255 255 255 255 2 7 222 3 27 3 20 19 45 32 4 252 252 252 252
0 10000 20000 30000 40015 60
1 10000 20000 30000 40015 63
2 10000 20000 30000 40015 63

```

Figura 3.6: Ejemplo de archivo de salida con información de conteo, cada milisegundo.

En la Figura 3.6 se observa una línea que inicia con 64, con datos diferentes a las demás líneas, esto se debe a que cada 200 eventos, la tarjeta envía una línea que contiene fecha y hora del GPS (3/27-20:19:45), entre otros datos no relevantes para este trabajo.

Después se procesó este archivo para generar uno nuevo con fecha-hora en formato UTC⁴ (columna 1), el canal de la tarjeta usado (columna 2), y la frecuencia de conteo debido al umbral introducido (columnas 3 a 6), como se muestra en la Figura 3.7:

```

1401943745 4 0 0 9902 75115
1401943746 4 0 0 9288 76870
1401943747 4 0 0 6834 52396
1401943748 4 0 0 8899 76009
1401943749 4 0 0 8667 75951

```

Figura 3.7: Archivo final con información de conteo, cada segundo.

⁴ México está atrasado 5 horas del tiempo UTC en el horario de verano, y 6 horas en el horario de invierno.

3.2 Sistema electrónico digital para registrar variables atmosféricas

Los dos principales componentes meteorológicos que afectan en la observación de rayos cósmicos son la temperatura y la presión atmosférica [3]. Por esta razón se tomó en cuenta la influencia de la variación de dichas variables atmosféricas sobre el comportamiento del detector. Además, fue importante conocer la humedad, para que ésta no afectara el buen funcionamiento del sistema, ya que dependiendo de la cantidad de humedad existente, puede haber rocío, neblina, o escarcha. Conocer los valores de humedad ayuda, ya que cuando se hagan mediciones en alta montaña existirán condiciones ambientales extremas, y se deben conocer los límites para el funcionamiento del sistema (incluyendo el WCD y la electrónica utilizada).

En base a esto, a continuación se presenta la elaboración de un sistema electrónico digital para registrar las variables atmosféricas mencionadas (Figura 3.8), en el que se implementaron protocolos específicos de software y hardware.

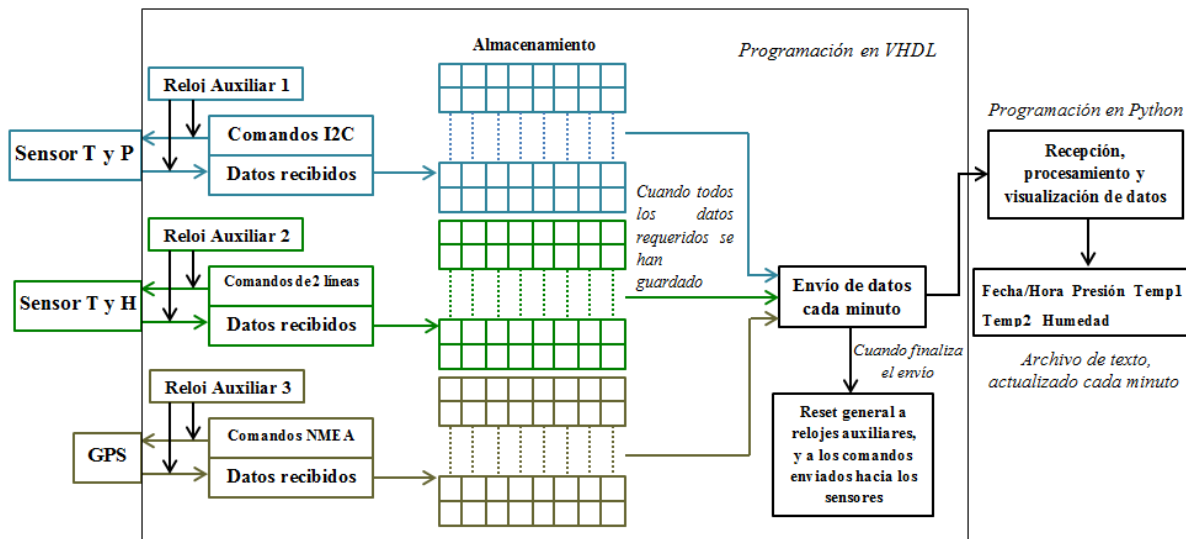


Figura 3.8: Diagrama de bloques del sistema para registrar fecha/hora, presión atmosférica, temperatura y humedad.

El desarrollo consistió en la programación y manejo de un sensor de temperatura y presión atmosférica, un sensor de temperatura y humedad relativa, ambos con salida digital, así como de un GPS, para registrar el instante en el que se realizaron las mediciones, y relacionar dichos valores con los eventos de detección. Los dos valores de temperatura sirven para obtener una correlación en los datos de esa variable.

El control y comunicación con estos dispositivos se programó en VHDL [70, 71, 72].

3.2.1 Programación de Sensor de Temperatura y Presión Atmosférica

En esta sección se presenta la programación del sensor MPL115A1 y del BMP085. El dispositivo incluido en el sistema final, fue el BMP085, la comparación y razones de esto, se presentan en el capítulo de Pruebas y Resultados.

Sensor MPL115A1

El MPL115A1 es un sensor de presión absoluta y temperatura, con salida digital (Figura 3.9).

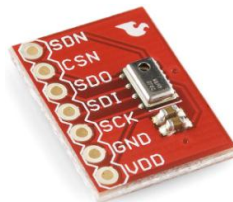


Figura 3.9: Sensor de presión y temperatura MPL115A1.

Este dispositivo trabaja con una resolución digital de 10 bits. Tiene almacenados 4 coeficientes de corrección de presión internamente, los cuales tienen longitud de 2 bytes, y son constantes, para cada encapsulado MPL115A1. Se puede acceder a ellos y a los valores de presión y temperatura medidos, a través de la interfaz digital. El MPL115A1 utiliza el Protocolo de comunicación SPI (descrito en Apéndices B.3). Más características del presente dispositivo se pueden consultar en Apéndices C.2.

Pines y conexión

Descripción de los pines de este sensor, utilizados en este trabajo:

VDD y *GND* para la alimentación eléctrica. *SHDN* (activo bajo), se conecta a tierra para deshabilitar el dispositivo, ó a *VDD* para operación normal. *CS*, activo bajo, línea de selección de chip. *MISO*, salida serial de datos. *MOSI*, entrada serial de datos. *SCLK*, reloj serial para la comunicación.

El dispositivo se instaló en el conector de expansión (Pmod x 4) JC1 de la tarjeta Nexys2, que incluye conexión a *GND* y a *VDD*. El FPGA fue el master, y el Sensor MPL115A1 el slave. En primer lugar, el pin *SHDN* se conecta a *GND*, de esta forma, los pines para la comunicación entran en estado de alta impedancia, y los registros del sensor se limpian, luego el mismo pin se conecta a *VDD* para trabajar normalmente. Después, la línea de *CS*, se conecta a *GND*, para habilitar el sensor [73, 74].

Programación

Para comenzar, se configuró un reloj (utilizado en la línea SCLK) en el proceso, con una frecuencia menor o igual a la frecuencia máxima que soporta el dispositivo esclavo, que en este caso es de 8 MHz. Las operaciones en el programa se realizan cada vez que hay un flanco ascendente del reloj.

Acción	Comando (Binario)	Comando (Hexadecimal)
Conversión Analógico-Digital	0010010X	0x24
Leer Presión MSB	1000000X	0x80
Leer Presión LSB	1000001X	0x82
Leer Temperatura MSB	1000010X	0x84
Leer Temperatura LSB	1000011X	0x86
Leer Coeficiente a0 MSB	1000100X	0x88
Leer Coeficiente a0 LSB	1000101X	0x8A
Leer Coeficiente b1 MSB	1000110X	0x8C
Leer Coeficiente b1 LSB	1000111X	0x8E
Leer Coeficiente b2 MSB	1001000X	0x90
Leer Coeficiente b2 LSB	1001001X	0x92
Leer Coeficiente c12 MSB	1001010X	0x94
Leer Coeficiente c12 LSB	1001011X	0x96

Tabla 3.1: Comandos SPI para comunicarse con el sensor MPL115A1 (X = no importa su valor).

Primero se mandan a leer los coeficientes de compensación de presión (Tabla 3.1). Mediante un registro de desplazamiento A, se envía el primer segmento de 8 bits: 0x88, desde la tarjeta al sensor, para pedir la lectura del MSB del primer coeficiente de compensación; esto a través de la línea MOSI, en tanto que la línea MISO permanece a la espera (Figura 3.10). En el siguiente bloque de 8 bits, ahora la línea MOSI permanece en espera (mandándole el bloque “00000000”), y al mismo tiempo se recibe el MSB del primer coeficiente, por la línea MISO, almacenándose en un registro de desplazamiento. Estas acciones son repetidas para los MSB y LSB de los demás coeficientes.

Posteriormente se envía el comando para que el sensor realice la conversión A-D de las mediciones de temperatura y presión atmosférica (Figura 3.11), y guarde los valores obtenidos. La conversión se completa en un máximo tiempo de conversión de 3ms. El Master debe esperar por lo menos durante ese período de tiempo antes de comenzar a emitir los próximos comandos y ciclos de reloj.

Enseguida, el FPGA envía el comando para leer los resultados de temperatura y presión contenidos en los registros internos del sensor por la línea MOSI, seguido cada uno de un

segmento “00000000” (Figura 3.12). Como ya se mencionó, intercaladamente por la línea MISO, se reciben las mediciones pedidas, y se almacenan en el registro.

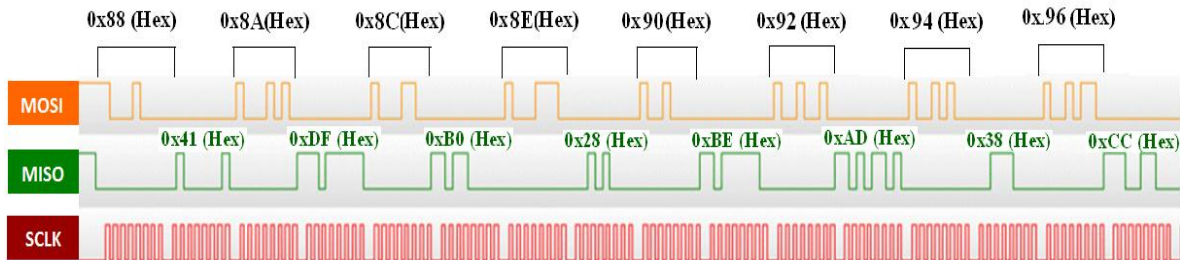


Figura 3.10: Lectura los coeficientes de compensación.

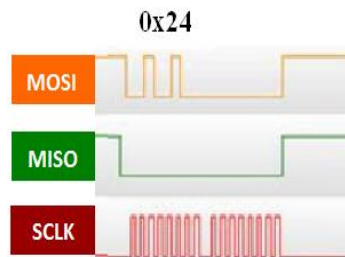


Figura 3.11: Indicación de la Conversión Analógico-Digital de las mediciones del sensor.

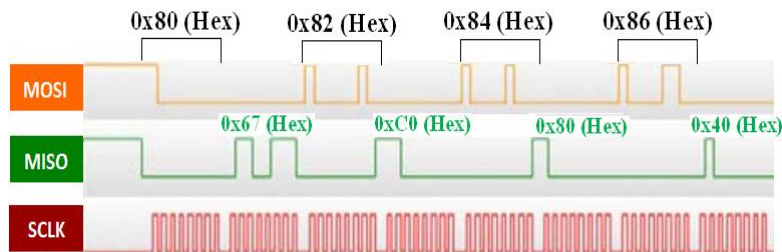


Figura 3.12: Lectura de las mediciones de Temperatura y Presión Atmosférica.

Cuando se termina la comunicación se asignan a señales auxiliares, los valores guardados en el registro de desplazamiento, correspondientes a los coeficientes y las mediciones (Figura 3.13).

El siguiente paso es el envío de los datos obtenidos hacia una computadora para el cálculo de los valores finales de Temperatura y Presión Atmosférica, además del almacenamiento de los mismos en un archivo de texto.

Esta comunicación se realiza vía serial entre la tarjeta Nexys2 y un equipo de cómputo, utilizando el protocolo RS232. El envío de datos y los cálculos, se detallan más adelante en este capítulo.

Señales Auxiliares		Valores Binarios	Valores Hexadecimales
Coefficiente_a0 MSB	←	0 1 0 0 0 0 0 1	41
Coefficiente_a0 LSB	←	1 1 0 1 1 1 1 1	DF
Coefficiente_b1 MSB	←	1 0 1 1 0 0 0 0	B0
Coefficiente_b1 LSB	←	0 0 1 0 1 0 0 0	28
Coefficiente_b2 MSB	←	1 0 1 1 1 1 1 0	BE
Coefficiente_b2 LSB	←	1 0 1 0 1 1 0 1	AD
Coefficiente_c12 MSB	←	0 0 1 1 1 0 0 0	38
Coefficiente_c12 LSB	←	1 1 0 0 1 1 0 0	CC
Temperatura MSB	←	1 0 0 0 0 0 0 0	80
Temperatura LSB	←	0 1 0 0 0 0 0 0	40
Presión atm MSB	←	0 1 1 0 0 1 1 1	67
Presión atm LSB	←	1 1 0 0 0 0 0 0	C0

Figura 3.13: Asignación de los datos leídos del MPL115A1 a variables auxiliares (Las casillas en azul, se refieren a los bits no utilizados en los LSB).

Sensor BMP085

El presente sensor entrega valores de presión atmosférica y temperatura, descompensados.



Figura 3.14: Sensor de temperatura y presión atmosférica BMP085.

Su resolución es la siguiente: temperatura = 16 bits, presión atmosférica = 16 bits. Tiene almacenados internamente 11 bytes de datos de calibración individual, estos son utilizados para compensar las mediciones digitales. El BMP085 se comunica por medio de la interfaz serial I²C (descrito en Apéndices B.4). Más información acerca de este sensor se puede encontrar en Apéndices C.3 [75].

Pines y conexión

Los pines utilizados del sensor fueron: VDD y GND, para la alimentación eléctrica; SDA (bidireccional), mantiene la comunicación desde y hacia el sensor; SCL controlará la

frecuencia de trabajo del sensor. La línea *EOC* anuncia el final de la conversión analógico – digital del dato requerido (presión o temperatura), mandando un '1' lógico hacia la tarjeta Nexys 2.

El sensor se instaló en el conector Pmod x 4 JB1 de la tarjeta Nexys2. El FPGA se utilizó como master, y el BMP085 como slave.

Programación

El primer paso fue enviar una secuencia de start. Esta consiste en que la línea de datos SDA tenga un flanco negativo mientras el reloj SCL está en nivel alto [75].

Para dicha tarea, se elaboraron dos procesos: el primero define un reloj *sclk* con frecuencia fija, y el segundo, define un reloj con la misma frecuencia que *sclk* pero inverso, y con su primer pulso al doble de duración, y se utilizó en la línea SCL. Así, cuando el reloj de frecuencia fija tiene un flanco positivo, se puede utilizar para cambiar de estado a “SDA”, mientras la línea “SCL” continúa en estado alto. Cabe mencionar, que “SDA” y “SCL” son las líneas que se comunicaron con el sensor, mientras que *sclk* se utiliza solo en software. A continuación, en la Figura 3.15 se muestra la simulación del código, donde se cumple con la secuencia de start.

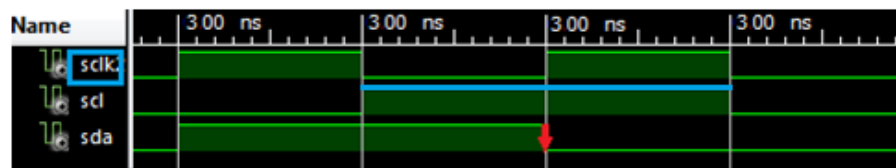


Figura 3.15: Simulación de la secuencia de start requerida para la comunicación con el sensor BMP085.

La comunicación se realiza mandando segmentos de 8 bits (transmitiendo un bit por ciclo del reloj SCL) hacia al sensor. Primero se ordena la medición de presión atmosférica y temperatura, después se leen las mediciones de las variables, y también se leen los coeficientes. En la Tabla 3.2 se muestran los comandos necesarios para cada acción.

Para medir la Presión, se envía al sensor la secuencia de comandos de la Figura 3.16 por medio de SDA.

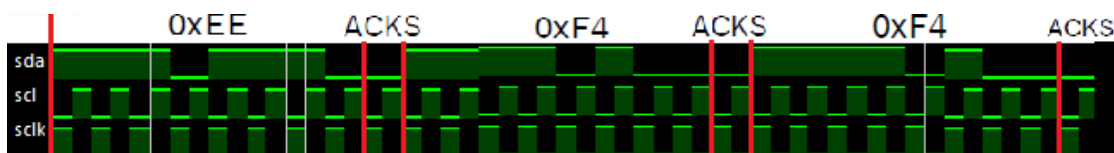


Figura 3.16: Secuencia para medir presión atmosférica.

Acción	Comando (Binario)	Comando (Hexadecimal)
Leer coeficiente ac1 MSB	10101010	0xAA
Leer coeficiente ac1 LSB	10101011	0xAB
Leer coeficiente ac2 MSB	10101100	0xAC
Leer coeficiente ac2 LSB	10101101	0xAD
Leer coeficiente ac3 MSB	10101110	0xAE
Leer coeficiente ac3 LSB	10101111	0xAF
Leer coeficiente ac4 MSB	10110000	0xB0
Leer coeficiente ac4 LSB	10110001	0xB1
Leer coeficiente ac5 MSB	10110010	0xB2
Leer coeficiente ac5 LSB	10110011	0xB3
Leer coeficiente ac6 MSB	10110100	0xB4
Leer coeficiente ac6 LSB	10110101	0xB5
Leer coeficiente b1 MSB	10110110	0xB6
Leer coeficiente b1 LSB	10110111	0xB7
Leer coeficiente b2 MSB	10111000	0xB8
Leer coeficiente b2 LSB	10111001	0xB9
Leer coeficiente mb MSB	10111010	0xBA
Leer coeficiente mb LSB	10111011	0xBB
Leer coeficiente mc MSB	10111100	0xBC
Leer coeficiente mc LSB	10111101	0xBD
Leer coeficiente md MSB	10111110	0xBE
Leer coeficiente md LSB	10111111	0xBF
Medir Presión Atmosférica	11110100	0xF4
Medir Temperatura	00101110	0x2E
Leer Presión o Temperatura	11110100	0xF6

Tabla 3.2: Comandos I²C para comunicarse con el sensor BMP085.

Cuando se envía la cadena “0xEE” (hexadecimal) ó “11101110” (binario), se accesa a la dirección del módulo del BMP085 para indicarle una operación de escritura. La cadena “0xF4” llevaba a la dirección de registro. Y por último se envió la secuencia que sirve para pedirle al sensor cuál medición se requiere, en esta ocasión fue “0xF4”, para la presión; si se necesita medir temperatura, la secuencia se cambia por “0x2E”.

Entre cada secuencia se liberó la línea SDA, para que el sensor la utilizara y enviara una señal que confirma que recibió la secuencia enviada, esta señal es llamada ACKS y es un '0' lógico.

Finalmente se envió una secuencia de stop (Figura 3.17) para terminar la comunicación con el sensor, esta consiste en que la línea SDA tenga un flanco positivo mientras SCL continúa en nivel alto [75].



Figura 3.17: Secuencia para condición de stop.

Se requiere un tiempo de espera, para que el BMP085 lleve a cabo la conversión analógico – digital, y guarde las mediciones internamente. Para la presión, este tiempo es de aproximadamente 25.5 ms. Para la temperatura, el tiempo de espera es aproximadamente 4.5 ms.

El siguiente paso es leer los resultados de las mediciones. Se inició con una secuencia de Start, y nuevamente se accedió al módulo BMP085, mediante su dirección “0xEE”, seguida por una señal ACKS (descrita anteriormente).

A continuación se manda la cadena “0xF6”, para leer el byte más significativo (MSB), ya sea de presión o temperatura, consecutivamente otra señal ACKS.

Ahora se requiere una señal de Restart, consistente en que la línea SDA tenga un flanco negativo, durante un nivel alto del reloj SCL.

La siguiente cadena se envió para indicar una lectura, y es “0xEF”. Finalmente se recibió una señal ACKS desde el sensor, indicando que éste ha recibido correctamente las secuencias anteriores (Figura 3.18).

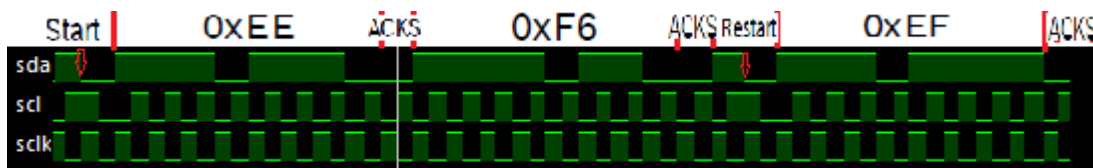


Figura 3.18: Secuencia para leer la presión atmosférica medida.

Enseguida, se recibió en el FPGA, el MSB de la medición, proveniente del sensor, y se almacenó en un registro de corrimiento C. Después, desde el dispositivo master se envió una señal ACKM como acuse de recibido, este consiste en poner la línea SDA en estado bajo '0'.

Posteriormente se debió liberar la línea, para que la controlara de nuevo el sensor y se envió el LSB para liberarla, se le asignó a ésta una 'Z' (alta impedancia), así el sensor pudo retomar el mando de la línea. Pero la asignación: $SDA \leq 'Z'$, se tiene que llevar a cabo en

el ciclo de reloj inmediato a ACKM, esto provocaba que no se recibiera el primer bit del LSB de la medición (noveno bit más significativo del dato, considerando los 2 bytes) correctamente, en su lugar siempre se obtenía '0' (debido a 'Z'), ocasionando que las mediciones fueran erróneas.

Para resolver este inconveniente, se ideó crear un nuevo proceso de reloj, que es controlado por el reloj de la línea SCL, el cual tiene un desfase respecto a sclk (reloj auxiliar, que originalmente controla los cambios en SDA).

En este nuevo proceso, cuando llega el ciclo de reloj correspondiente al bit perdido, la línea SDA se asigna a una señal auxiliar, recuperando y guardando el bit mencionado (Figura 3.19).

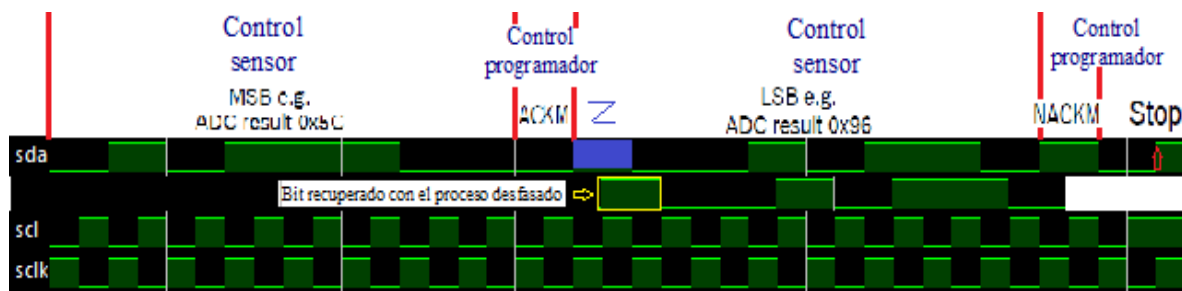


Figura 3.19: Recepción de las mediciones.

En el momento que el sensor vuelve a manejar la línea SDA, manda el segundo byte (LSB) de la medición, guardándose en el registro de corrimiento; terminando esto, se debe mandar un bit NACKM al sensor, desde la tarjeta al sensor para anunciar el final de la recepción, este bit consiste en poner la línea SDA en '1'. Se termina la comunicación con una señal Stop, descrita anteriormente (Figura 3.17).

El proceso se repite para medir la temperatura, solo sustituyendo el comando necesario (Tabla 3.2).

Después se leen los 11 coeficientes, cada uno de 2 bytes de longitud, para la compensación de las variables, recordando que los coeficientes son constantes para cada encapsulado BMP085. Para conseguir esto se repiten los mismos pasos descritos anteriormente, para leer la presión atmosférica, y solo se cambia el comando para leer dicha variable por los correspondientes para leer los bytes de los coeficientes.

Las variables y coeficientes leídos guardados, se asignan a señales auxiliares (Figura 3.20). Finalmente se concatena el bit recuperado con los 7 bits menos significativos del LSB recibido de cada medición (Figura 3.21). El envío de datos se detalla en la Sección 3.2.4.

Señales Auxiliares	Valores Binarios	Señales Auxiliares	Valores Binarios
Coefficiente_ac1 MSB	0 0 1 0 0 0 0 0	Coefficiente_b1 LSB	0 1 1 1 1 0 1 0
Coefficiente_ac1 LSB	0 0 0 1 1 0 0 1	Coefficiente_b2 MSB	0 0 0 0 0 0 0 0
Coefficiente_ac2 MSB	1 1 1 1 1 0 1 1	Coefficiente_b2 LSB	0 1 0 0 0 1 0 0
Coefficiente_ac2 LSB	0 0 1 0 0 0 1 1	Coefficiente_mb MSB	1 0 0 0 0 0 0 0
Coefficiente_ac3 MSB	1 1 0 0 0 1 1 1	Coefficiente_mb LSB	0 0 0 0 0 0 0 0
Coefficiente_ac3 LSB	0 1 0 0 1 0 1 1	Coefficiente_mc MSB	1 1 0 1 0 1 0 0
Coefficiente_ac4 MSB	1 0 0 0 0 0 1 1	Coefficiente_mc LSB	1 0 1 1 1 1 0 1
Coefficiente_ac4 LSB	1 1 1 1 1 0 0 1	Coefficiente_md MSB	0 0 0 0 1 0 0 1
Coefficiente_ac5 MSB	0 1 1 0 0 0 0 0	Coefficiente_md LSB	1 0 0 0 0 0 0 0
Coefficiente_ac5 LSB	0 0 1 1 1 0 0 1	Presión MSB	1 0 0 0 0 1 1 1
Coefficiente_ac6 MSB	0 1 0 1 0 0 1 0	Presión LSB	1 1 1 1 1 0 1 1
Coefficiente_ac6 LSB	1 1 1 0 1 0 0 0	Temperatura MSB	0 1 1 1 0 1 1 0
Coefficiente_b1 MSB	0 0 0 1 0 1 0 1	Temperatura LSB	1 0 0 0 0 1 0 0

Figura 3.20: Asignación de los datos leídos del BMP085 a variables auxiliares (las casillas en gris corresponden a los bits recuperados de las mediciones de presión y temperatura).

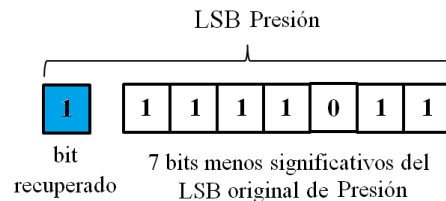


Figura 3.21: Concatenación del bit recuperado con los 7 bits menos significativos del LSB de presión (sensor BMP085).

3.2.2 Programación de Sensor de Temperatura y Humedad

Sensor HHT02D

El HHT02D es un chip de sensores múltiples, de humedad relativa y temperatura, con salida digital (Figura 3.22).

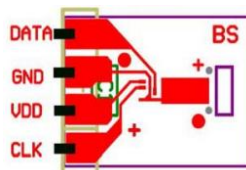


Figura 3.22: Sensor de Temperatura y Humedad Relativa HHT02D.

Se puede seleccionar la resolución de las mediciones. Esto es, para la temperatura, se pueden obtener mediciones de 14 ó 12 bits. Y para la humedad 12 u 8 bits. El sensor por default entrega mediciones de 14 bits (temperatura) y 12 bits (humedad). Se decidió utilizar la resolución por default. Este dispositivo no cuenta con coeficientes de calibración internos. Más información acerca del HHT02D se puede consultar en Apéndices C.4. Este sensor utiliza una interfaz en serie de 2 líneas. Una bidireccional de transferencia de datos entre el sensor y el FPGA, y una de reloj para sincronizar la comunicación.

Pines y conexión

El HHT02D cuenta con la línea de intercambio de información DATA (bidireccional) y una línea de reloj sclKH (un sentido). El pin DATA se debe conectar con una resistencia (10 Kohms) a Vdd [76].

Por la configuración del encapsulado, y la necesidad de componentes externos, se diseñó y construyó un circuito para permitir la conexión del sensor a la tarjeta Nexys2. El diseño se realizó en Altium Designer Winter 09 (Figura 3.23).

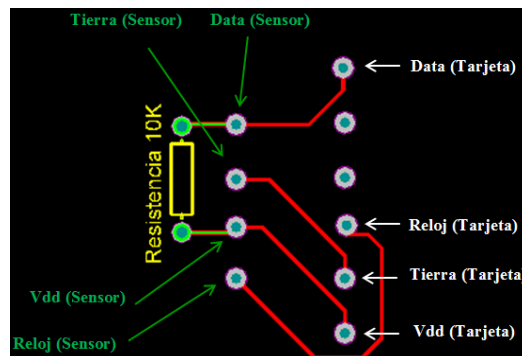


Figura 3.23: Diagrama eléctrico del circuito para conectar el HHT02D a la tarjeta Nexys2.

El sensor se instaló mediante el circuito construido, en el conector Pmod x4 A1 de la tarjeta Nexys2 (que incluye Vdd y GND). Después del encendido, el dispositivo necesita 11 ms para alcanzar su estado “sleep”. No se deben enviar comandos antes de ese momento [76].

Programación

Para iniciar se tiene que emitir una secuencia de Start. Se trata de un descenso de la línea DATA mientras la línea de reloj sclKH está en alto, seguido por un pulso bajo del reloj y elevar DATA cuando sclKH vuelve a estar en nivel alto [76]. Se usaron los relojes que fueron diseñados para el sensor anterior (Figura 3.24).

Los comandos para las mediciones se muestran en la Tabla 3.3:

Acción	Comando (Binario)	Comando (Hexadecimal)
Medir y leer Temperatura	00000011	0x03
Medir y leer Humedad	00000101	0x05

Tabla 3.3: Comandos para comunicarse con el sensor HHT02D.

Al transmitir datos, estos se cambian después del flanco de bajada y se validan en el flanco ascendente de la línea sclkH. El sensor indica la correcta recepción de un comando poniendo en nivel bajo la línea de datos (bit ACK) tras el octavo flanco de bajada del reloj sclkH. Después de emitir una orden de medición, el usuario tiene que esperar a que la medición sea completada. Esto tarda aproximadamente 11/55/210 ms para una medición de 8/12/14bits, respectivamente. Para indicar la finalización de una medición, el HHT02D pone en bajo la línea de datos, después del noveno flanco de bajada del reloj sclkH.

Como ejemplo, en la Figura 3.24 se observa el comando “00000011” para solicitar la medición de temperatura. Después, el sensor toma el control de la línea DATO, con el bit ACK, poniendo la línea a '0'. Continúa con un pulso del ancho del tiempo de espera, y cuando la línea DATO vuelve a estado bajo, significa que ha terminado la medición.

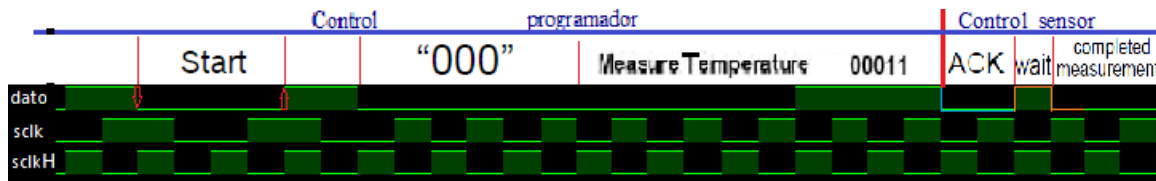


Figura 3.24: Ejemplo de medición de temperatura con el sensor.

Dos bytes de mediciones de Temperatura serán transmitidos desde el sensor hacia el FPGA. Primero es enviado el MSB, justificado a la derecha, ya que este tiene longitud de 6 bits (el MSB de la humedad tiene longitud de 14 bits) (Figura 3.25).

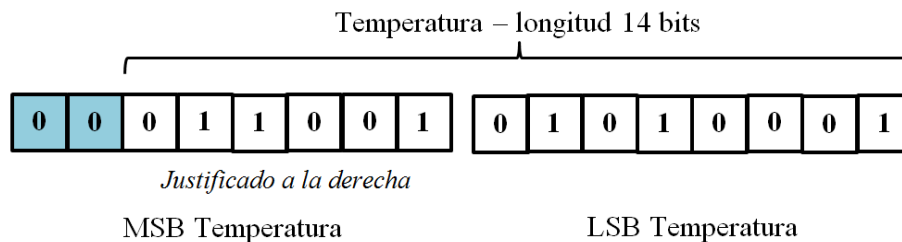


Figura 3.25: Temperatura digital, con longitud de 14 bits.

Cuando se termina la recepción del primer byte (MSB), se debe interrumpir la transmisión en la línea DATO desde la tarjeta, con un bit ACK, después liberar la línea y entonces se puede recibir el segundo byte.

En este caso, se estableció el bit ACK en un ciclo de reloj, y para liberar la línea, se le asignó 'Z' en el siguiente ciclo, para que el sensor retome el control de la misma. Pero, la asignación de alta impedancia se realiza en el ciclo correspondiente al primer bit del LSB de la medición, por esta causa, el bit se pierde en la recepción. Por lo tanto, al igual que con el sensor anterior, se creó un nuevo proceso desfasado por medio ciclo, del reloj inicial, de esta manera se rescató el bit mencionado, evitando valores errados (Figura 3.26).

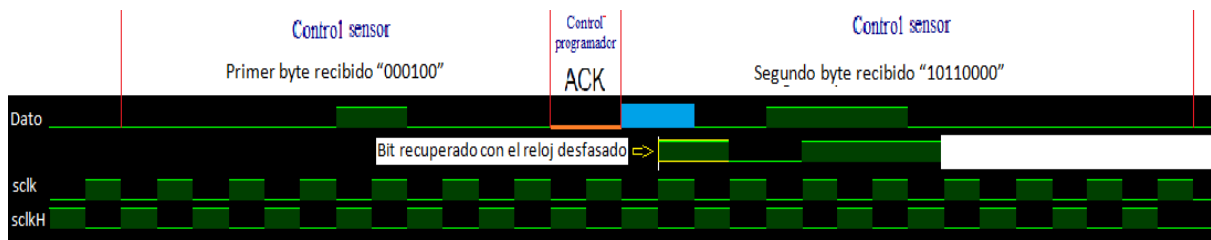


Figura 3.26: Proceso para conservar el bit más significativo del LSB de la Temperatura digital.

El bit recuperado se almacena en una señal auxiliar, dentro del nuevo proceso, y se concatena con los 7 bits menos significativos del LSB recibido de cada medición, como se ve en la Figura 3.27.

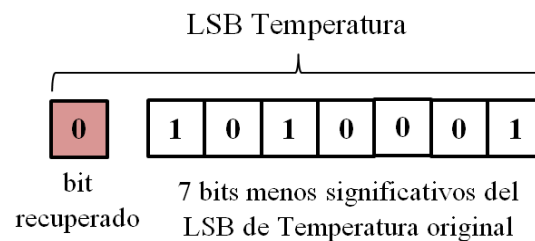


Figura 3.27: Concatenación del bit recuperado con los 7 bits menos significativos del LSB de temperatura (sensor HHT02D).

El dispositivo vuelve automáticamente al modo de suspensión después de transmitir las mediciones, y la comunicación ha terminado. Los pasos anteriores se repite para pedir la medición y lectura de la humedad relativa.

Para terminar, se asigna a señales auxiliares, los segmentos correspondientes del registro de desplazamiento (Figura 3.28). El envío de datos se describe en la sección 3.2.4.

Señales Auxiliares		Valores Binarios								Valores Hexadecimales
Temperatura MSB	←	0	0	0	1	1	0	0	1	19
Temperatura LSB	←	0	1	0	1	0	0	0	1	51
Humedad MSB	←	0	0	0	0	0	1	0	0	04
Humedad LSB	←	0	0	0	1	0	1	0	1	15

Figura 3.28: Asignación de los datos leídos del HHT02D a variables auxiliares (Las casillas en azul se refieren a los bits no utilizados en los MSB de temperatura y humedad. Las casillas en rojo corresponden a los bits recuperados de las mediciones de temperatura y humedad).

3.2.3 Programación de GPS

En este trabajo se utilizó el GPS EM-408 (Figura 3.29), el cual es capaz de proporcionar la fecha/hora UTC actual.



Figura 3.29: GPS modelo EM-408.

Pines y conexión

Este dispositivo cuenta con 5 pines: VIN, entrada de voltaje de 3.3V. GND, entrada de tierra. GPS-TX, salida de datos del GPS, hacia el programador. GPS-RX, receptor de comandos de software del GPS. Enable, habilita el dispositivo.

Si no se utiliza el pin GPS-RX (para mandar órdenes desde el programador al GPS) se debe conectar una resistencia de 470Ω entre este pin y la fuente de VIN. En caso de requerir mandar información hacia el dispositivo, se elimina la resistencia. Para más información acerca de este elemento ver Apéndices C.5 [77].

Se diseñó y construyó un circuito eléctrico, para poder conectar el GPS al conector Pmod x4 D1 de la tarjeta Nexys2. El diseño se realizó en Altium Designer Winter 09 (Figura 3.30).

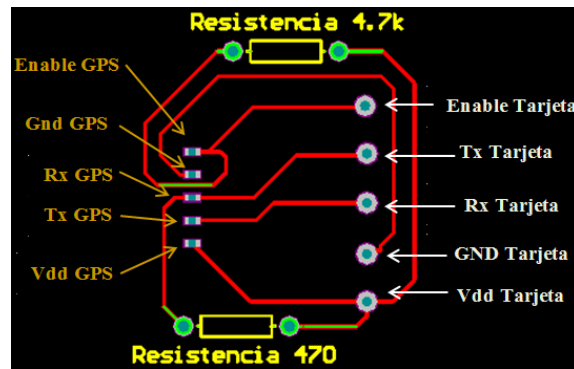


Figura 3.30: Diseño del diagrama eléctrico para el funcionamiento y conexión del GPS en la tarjeta Nexys 2.

Mensajes NMEA

Este dispositivo se comunica por medio de mensajes NMEA, que pueden ser de entrada o salida. Los mensajes de entrada, son opcionales, ya que el GPS, con conectarse al voltaje de alimentación, comienza a transmitir información hacia la tarjeta.

Los mensajes de salida, desde el GPS hacia la tarjeta, contienen datos de localización, tiempo, entre otros, y de igual forma son transferidos en formato binario, representando caracteres ASCII, a través de la línea GPS-TX [77, 78, 79].

Los diferentes mensajes de datos que proporciona el GPS son actualizados (dependiendo de la cantidad de satélites detectados) y transmitidos nuevamente aproximadamente cada segundo (Figura 3.31).

```
$GPGSA,A,1,,,,,,,,,,,,,*1E
$GPRMC,053004.254,V,,,,,,,,,251113,,*2B
$GPGGA,053005.245,,,,,0,00,,M,0.0,M,,0000*56
$GPGSA,A,1,,,,,,,,,,,,,*1E
$GPRMC,053005.245,V,,,,,,,,,251113,,*2A
$GPGGA,053006.245,,,,,0,00,,M,0.0,M,,0000*55
$GPGSA,A,1,,,,,,,,,,,,,*1E
$GPRMC,053006.245,V,,,,,,,,,251113,,*29
$GPGGA,053007.251,,,,,0,00,,M,0.0,M,,0000*51
$GPGSA,A,1,,,,,,,,,,,,,*1E
$GPGSV,3,1,12,16,67,035,,20,54,253,,32,53,189,,23,42,337,*78
```

Figura 3.31: Mensajes que entrega el GPS, al ser energizado.

Para este trabajo, únicamente se necesita fecha y hora, y el mensaje de datos que contiene esa información es RMC (Recommended Minimum Specific Data). Los formatos en los que el EM-408 entrega este mensaje se muestran en la Figura 3.32.

```
$GPRMC,013132.000,A,1859.5452,N,09814.3419,W,0.11,D176.32,081013,,*11
$GPRMC,013132.000,A,1859.5452,N,09814.3419,W,0.11,176.32,081013,,*11
$GPRMC,013032.000,A,1859.5443,N,09814.3439,W,1.23,20.84,081013,,*2D
$GPRMC,012632.000,A,1859.5432,N,09814.3412,W,0.97,8.63,081013,,*18
$GPRMC,050841.000,A,1859.5529,N,09814.4087,W,,131013,,*19
$GPRMC,191548.309,V,,,,,101013,,*27
```

Figura 3.32: Formatos del mensaje RMC, del GPS EM-408, donde se distingue la hora (hhmmss), subrayada con rojo, y la fecha subrayada con azul (DDMMYY).

Esta variación de presentaciones se debe a que, recién conectado a la alimentación, el GPS comienza a buscar las señales de los satélites, y actualiza constantemente su información, hasta que completa todos sus datos. De cualquier manera, los datos útiles para nuestro trabajo (fecha y hora) se encuentran presentes en todas las opciones del mensaje RMC.

Programación

Los mensajes de salida del GPS son transmitidos a una velocidad de 4800 bps. Se elaboró un proceso para diseñar un reloj, el cual controla la transferencia de información entre el GPS y el FPGA.

En este trabajo no se envían instrucciones de la tarjeta hacia el GPS, solo se recibe la información del GPS, mediante cadenas de 8 bits, cada bit por un ciclo del. Se realizó la recepción de datos provenientes del GPS hacia la tarjeta Nexys 2, y el reconocimiento de la Fecha y Hora.

Primero se buscaron las secuencias del encabezado del mensaje: “RMC,”, enseguida se identificaron las secuencias de la hora, que en el ejemplo es 13:00 (hhmm), y se asignaron a variables auxiliares, después se debió hacer un conteo de ocho comas, contenidas en el cuerpo del mensaje RMC, y cuando fueron registradas, se asignaron las secuencias de la fecha a variables auxiliares: 140710 (yyymmdd), como se muestra en las Figuras 3.33 y 3.34.

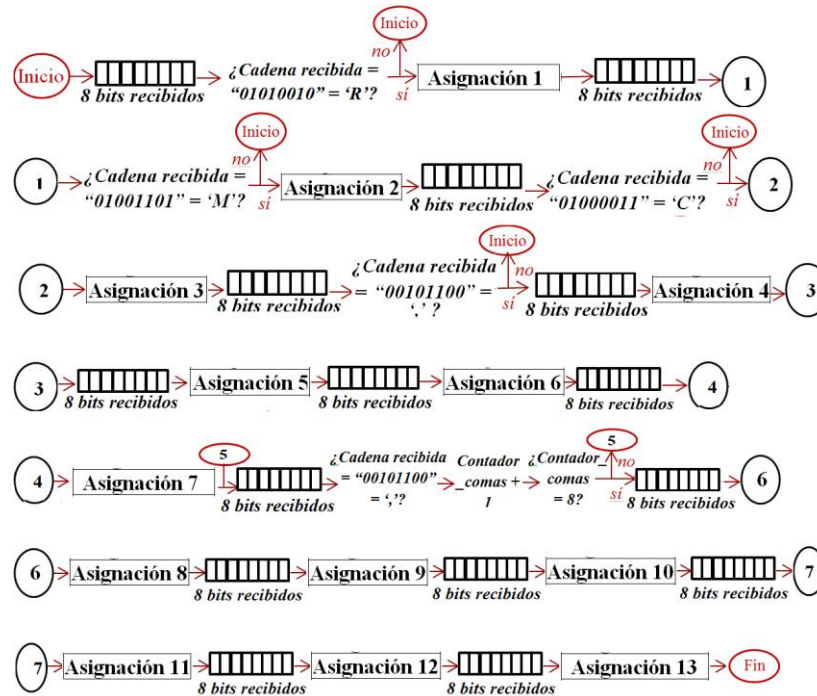


Figura 3.33: Algoritmo para la obtención de Fecha/Hora del GPS.

	Señales Auxiliares	Valores Binarios	Caracter ASCII
Asignación 1	Caracter_R	0 1 0 1 0 0 1 0	R
Asignación 2	Caracter_M	0 1 0 0 1 1 0 1	M
Asignación 3	Caracter_C	0 1 0 0 0 0 1 1	C
Asignación 4	Año_1	0 0 1 1 0 0 0 1	1
Asignación 5	Año_2	0 0 1 1 0 1 0 0	4
Asignación 6	Mes_1	0 0 1 1 0 0 0 0	0
Asignación 7	Mes_2	0 0 1 1 0 1 1 1	7
Asignación 8	Día_1	0 0 1 1 0 0 0 1	1
Asignación 9	Día_2	0 0 1 1 0 0 0 0	0
Asignación 10	Hora_1	0 0 1 1 0 0 0 1	1
Asignación 11	Hora_2	0 0 1 1 0 0 1 1	3
Asignación 12	Minuto_1	0 0 1 1 0 0 0 0	0
Asignación 13	Minuto_2	0 0 1 1 0 0 0 0	0

Figura 3.34: Asignación de caracteres de Fecha/Hora a variables temporales.

3.2.4 Envío, recepción y procesamiento de datos de sensores

Una vez que se contó con las mediciones de variables atmosféricas y fecha/hora (en forma de cadenas binarias), guardadas en variables auxiliares, se creó un proceso, para transferir

estos datos vía serial, por medio del protocolo RS232, hacia una PC con sistema operativo Linux.

Se envió un bit por ciclo de reloj a una velocidad de 4800 bps. Primero fue mandada una cadena que representa al carácter ascii “@”, después las cadenas del encabezado “R”, ”M”, ”C”, seguidas de las cadenas de fecha/hora, los coeficientes de compensación del sensor BMP085, y las mediciones de los dos sensores.

Por otro lado, en la PC con Linux, se llevó a cabo la recepción y procesamiento de datos, con programación en Python (las principales características de este lenguaje se pueden observar en Apéndices A.3) [80].

En el programa se buscó la secuencia de caracteres “@RMC” mandada desde la tarjeta Nexys2, y cuando se detecta la información correcta, se comienzan a recibir las mediciones digitales y los coeficientes (interpretados como caracteres ASCII), y se realizan conversiones de formato y operaciones aritméticas contenidas en las hojas de datos de los sensores, hasta obtener los valores decimales finales de Fecha/Hora (Formato UTC), Presión atmosférica (BMP085), Temperatura1 (BMP085), Temperatura2 (HHT02D) y Humedad (HHT02D), como se observa en la Figura 3.35 [75, 76, 81].

Finalmente los valores mencionados, se guardan en un archivo de texto (Figura 3.36).

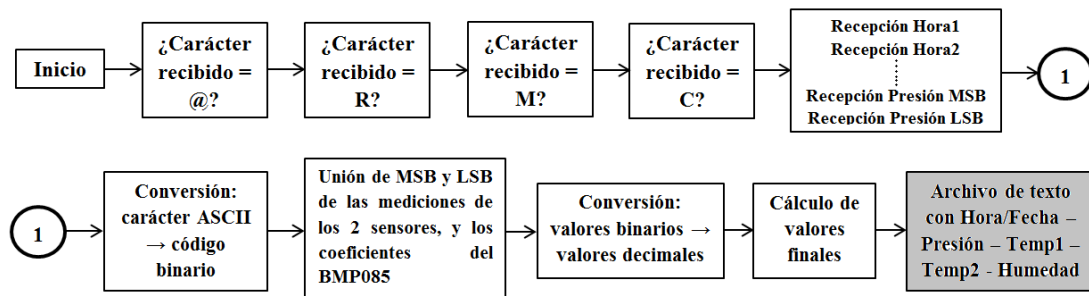


Figura 3.35: Algoritmo para llevar a cabo la recepción y el procesamiento de la información de los sensores y el GPS.

140710130000 687.53 28.0 27.04000658 48.0679048

Figura 3.36: Línea de ejemplo del archivo que contiene: Fecha/Hora (UTC) - Presión atmosférica (mB) - Temperatura 1 (°C) - Temperatura 2 (°C) - Humedad (RH%).

El proceso descrito, desde la comunicación con los sensores y GPS en VHDL, hasta la programación en Python, se repitieron cada minuto, actualizando el archivo de texto final.

3.3 Construcción del detector Cherenkov de Agua

Para la construcción del detector se utilizó un tanque de forma cilíndrica de 1.82 m de altura y 2.20 m de diámetro, y se forró por dentro con papel tyvek. Se hizo la adaptación para que las conexiones eléctricas no tocaran el agua del interior del tanque (Figura 3.37). En la Figura 3.38 se muestra el montaje del sistema electrónico digital con la tarjeta de conteo, los GPS y los sensores de variables atmosféricas.



Figura 3.37: Instalación del PMT en el interior del tanque.



Figura 3.38: Sistema Electrónico Digital para medir la variación en la tasa de conteo, y el registro de variables atmosféricas.

En la Figura 3.39 se puede apreciar el Detector Cherenkov instalado en Puebla-CU a 2149 metros sobre el nivel del mar, y en la Figura 3.40 se observa la instalación del detector a 4600 metros sobre el nivel mar, en la montaña Sierra Negra.



Figura 3.39: Detector Cherenkov en Puebla-CU / 2149 msnm.



Figura 3.40: Detector Cherenkov en Sierra Negra / 4600 msnm.



3.4 Monitoreo de los datos

Se realizó un seguimiento diario de los datos, cuando el sistema estuvo en funcionamiento, ya sea en Puebla, o en la Sierra Negra. Cada que se completaron 144 archivos de conteo de 10 minutos en un día se concatenaron, formando un solo archivo, y se sincronizaron con el mismo rango de tiempo de los valores atmosféricos.

De esta forma se pudieron graficar frecuencia de conteo y presión atmosférica / temperatura vs tiempo de manera simultánea diariamente. Estas gráficas se elaboraron en Matplotlib (las características de esta librería se encuentran en Apéndices A.5).

Cuando el sistema funcionó a 4600 msnm, no se podía viajar diariamente al lugar. Para resolver esto, se accedió de manera remota a la PC en las instalaciones de Sierra Negra, y cada media noche se enviaron los archivos creados de conteo y variables atmosféricas, hacia una PC en un laboratorio de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas en CU [82, 83].

Capítulo 4

Pruebas y Resultados

4.1 Caracterización de Tubos Fotomultiplicadores

Es importante conocer el funcionamiento del Fotomultiplicador que se utilizará en la construcción del detector, además los valores y características pueden variar más de lo esperado entre un PMT y otro del mismo modelo, por estos motivos son necesarias pruebas para caracterizar los dispositivos. Los valores obtenidos en las pruebas deben estar dentro de los rangos señalados en las hojas de especificaciones de cada modelo [55].

En esta sección se presentan las pruebas realizadas, además del análisis y comparación de resultados de los dos PMTs, para elegir el dispositivo con mejor desempeño.

Las pruebas de caracterización fueron:

- Corriente Oscura
- Observación de un fotoelectrón
- Linealidad

4.1.1 Prueba de corriente oscura

El nivel de corriente oscura de los PMTs es un parámetro muy importante a tener en cuenta cuando medimos niveles de luz muy tenues. La corriente oscura es la que fluye a través del fotomultiplicador cuando este no se encuentra iluminado por una fuente de luz.

A la hora de realizar las medidas hay que tener en cuenta que son medidas con mucha dispersión, lo que obliga a tomar una amplia estadística de eventos para que el valor medio de la distribución dé el menor margen de error [52, 55].

En esta prueba fue usado el montaje de la Figura 2.23. Se tomaron las señales del tubo fotomultiplicador variando su voltaje de alimentación (con pasos de 50v) desde 1100v hasta

1450v, para el 9453KFLB, y desde 1000v hasta 1250v, para el R1463. En cada paso de voltaje, se obtuvo un archivo de texto con mil muestras de datos, como el de la Figura 2.30. De cada archivo, se realizó un histograma, con la columna de cargas, utilizando el programa de software ROOT, este mismo programa puede calcular el valor medio y la desviación estándar en las distribuciones de carga. El proceso se repitió para las distribuciones de voltaje (tomando las columnas de voltaje de los archivos).

Para generar las gráficas de corriente oscura, se grafica en el eje x, el voltaje de alimentación, y en el eje y, el valor medio de las distribuciones, tomando como error la desviación estándar. Los resultados se observan en las Figuras 4.1 - 4.4.

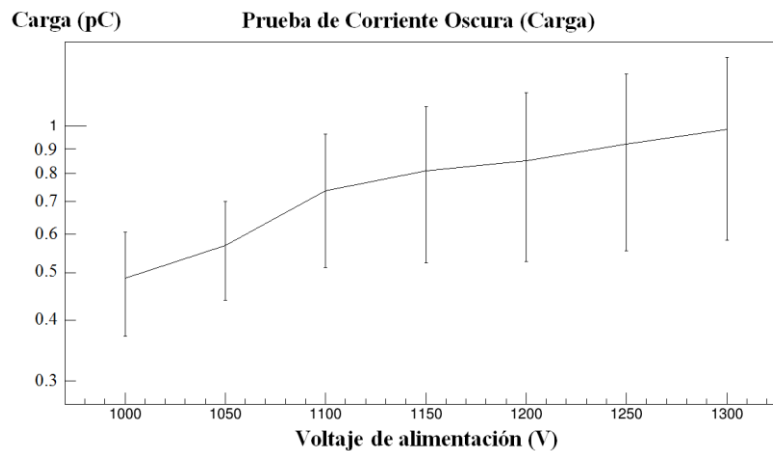


Figura 4.1: Valores medios de las distribuciones de carga – PMT 9453KFLB

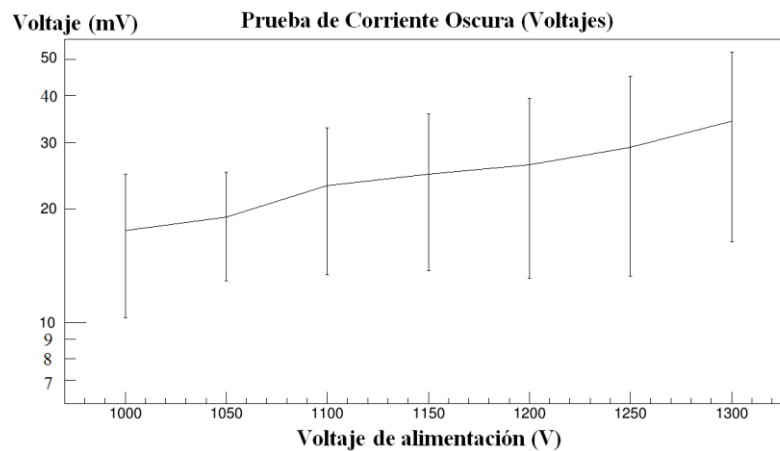


Figura 4.2: Valores medios de las distribuciones de voltaje – PMT 9453KFLB

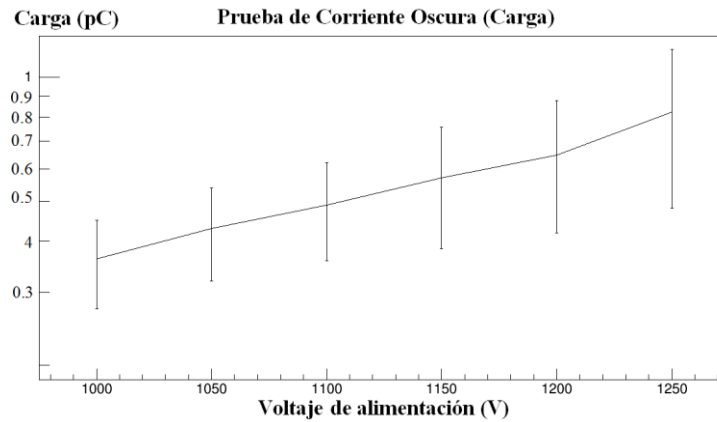


Figura 4.3: Valores medios de las distribuciones de carga – PMT R1463

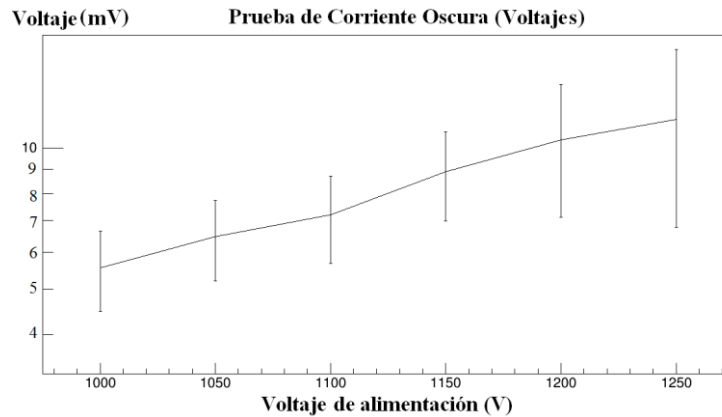


Figura 4.4: Valores medios de las distribuciones de voltaje – PMT R1463

4.1.2 Prueba de observación de un fotoelectrón

Esta prueba consiste en lograr que el fotocátodo del PMT genere solo un electrón debido a la incidencia de luz. Cuando se observa un fotoelectrón, se puede conocer la ganancia del Tubo Fotomultiplicador [52].

Para llevar a cabo esta prueba, el PMT se aísla de la luz externa en la caja oscura, pero ahora se coloca un led azul (ns) para el 9453KFLB, y uno verde (ns) para el R1463 (debido al rango de longitud de onda en el que está optimizado cada PMT), el cual emite pulsos que viajan hasta encontrarse con el tubo fotomultiplicador para ser detectados y procesados.

Además, para que la señal sea lo más pequeña posible, no se coloca a la fuente de luz viendo directamente al PMT, sino que se busca que el pulso de luz se refleje en una pantalla

con la finalidad de dispersar al pulso y de esta manera lograr señales que pueden ser de hasta un solo fotón, la pantalla que se utilizó es una hoja de tyvek (Figura 4.5).

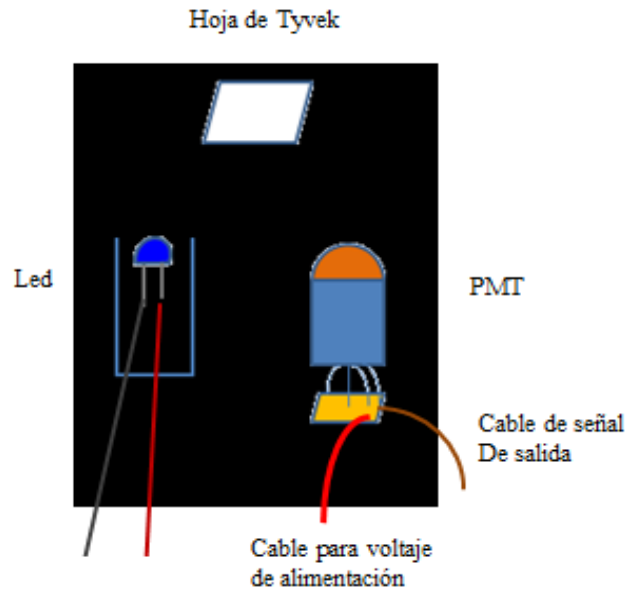


Figura 4.5: Caja oscura (vista desde arriba), con el arreglo, para que la luz del led se refleje y disperse en la hoja de tyvek, y lleguen pocos fotones al fotocátodo del PMT.

Con el generador de señales se controló al led para que los pulsos tuvieran una amplitud baja y el ancho del pulso angosto y asegurar que se emitieran pocos fotones. Para que se observaran en el osciloscopio, tanto señales de detección del PMT debidas al led, como ruido, se buscó la configuración adecuada del generador (con numerosas pruebas), consiguiendo una proporción de observación de señal a ruido de 1-10. En la Tabla 4.1 se observan los parámetros de señal para cada PMT:

Fotomultiplicador	9453KFLB	R1463
Amplitud	1.685 Vpp	2.45 Vpp
Offset	938 mV	938 mV
Frecuencia	1 kHz	1 kHz
Ancho de pulso	73 ns	73 ns

Tabla 4.1: Parámetros del generador de señales, para la prueba de Observación de un fotoelectrón (Vpp significa Volts pico a pico).

Fueron tomadas diez mil muestras de datos, realizando aumentos en el voltaje de alimentación del PMT de 50V en cada prueba.

Después, con el programa para procesar datos (descrito en la Sección 2.4.2) se obtuvieron las cargas y voltajes de las muestras, y se realizaron histogramas con el programa ROOT para analizar las distribuciones de carga.

Los resultados se muestran en las Figuras 4.6 y 4.7, en las cuales se observa que la primera curva de cada distribución corresponde al ruido de la prueba, mientras que la segunda curva equivale a la carga del fotoelectrón observado, y se comprueba que aumentando el voltaje de alimentación del PMT, se define mejor la segunda curva.

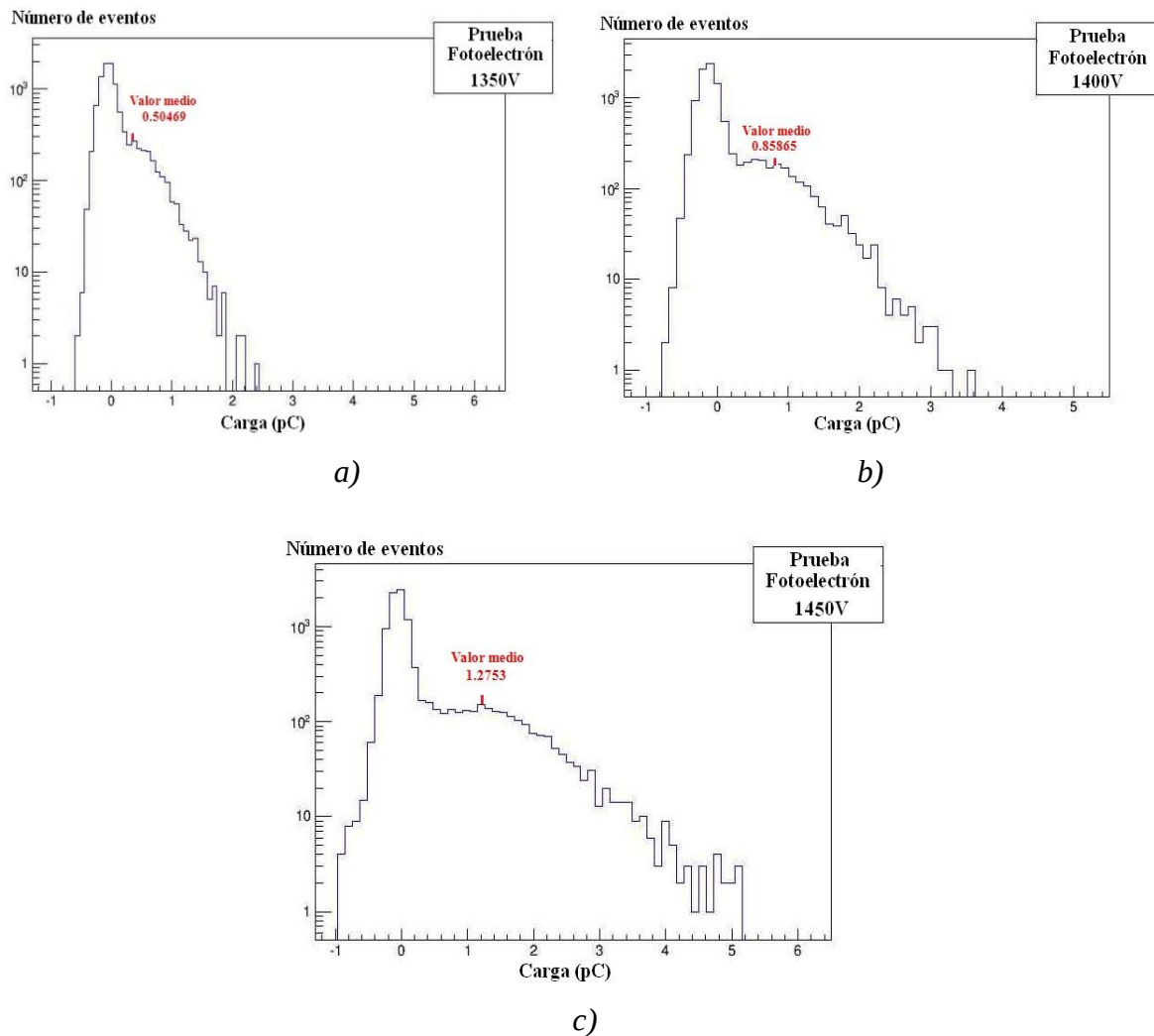


Figura 4.6: Observación de un fotoelectrón. Se muestran los resultados con a) 1350, b) 1400 y c) 1450V de alimentación del PMT KFLB9453.

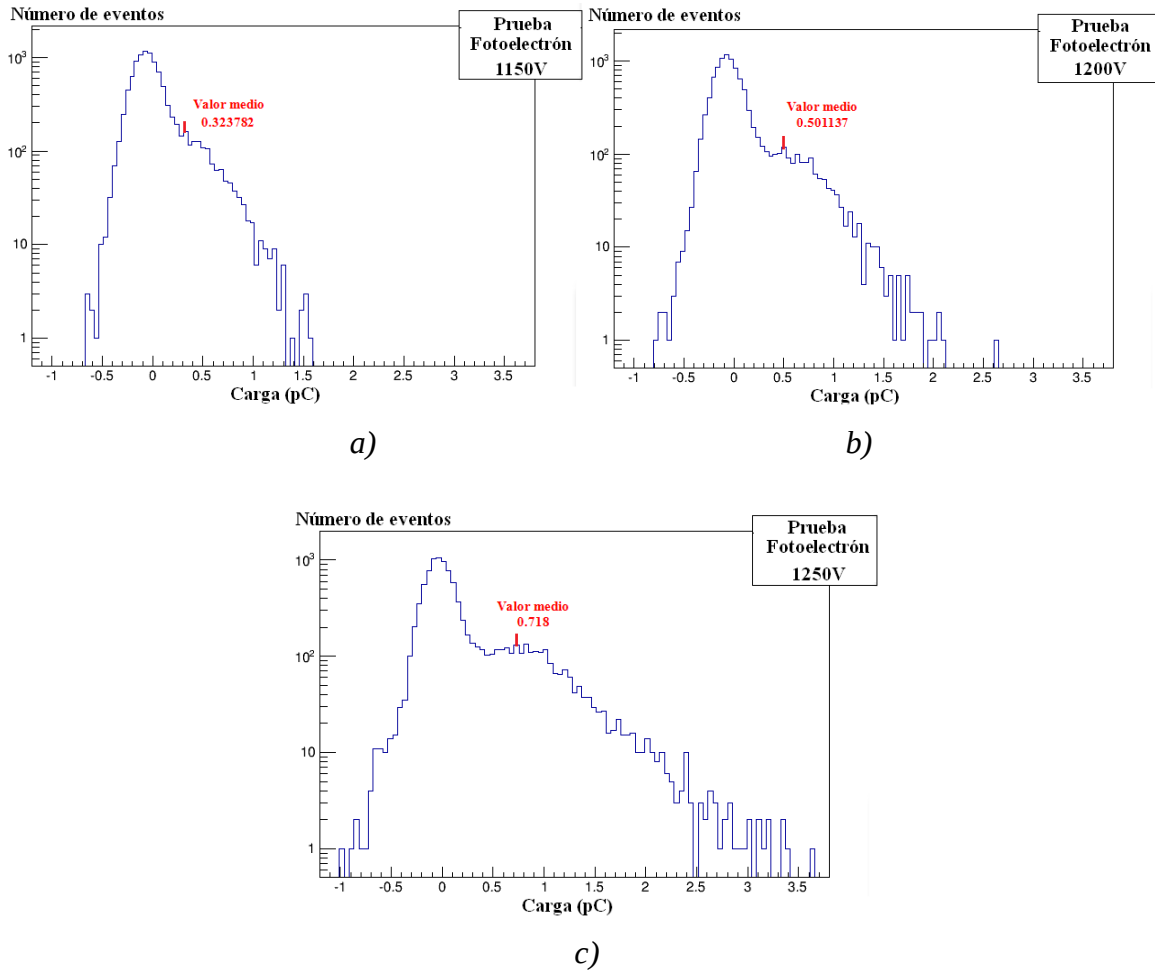


Figura 4.7: Observación de un fotoelectrón. Se muestran los resultados con a) 1150, b) 1200 y c) 1250V de alimentación del PMT R1463.

4.1.3 Obtención de la ganancia del Tubo Fotomultiplicador

Aunque los PMT son fabricados siguiendo el mismo proceso, existen diferencias entre las ganancias obtenidas para una misma señal conocida y para un mismo voltaje suministrado. Esto es debido a que, a un mismo Alto Voltaje, la fluctuación estadística en la ganancia en cada dinodo puede ser de hasta un 10%. Estas diferencias, pueden llegar a ser hasta de un orden de magnitud.

El procedimiento para la obtención de la ganancia de un PMT resulta del estudio de la señal producida por un sólo fotoelectrón (cuya prueba se realizó en la sección anterior) [55].

Se utiliza la Ecuación:

$$Ganancia = \frac{Carga\ obtenida}{Carga\ conocida} \quad (Ecuación\ 4.1)$$

Donde, la carga conocida se refiere a la carga de un electrón⁵, y la carga obtenida es el valor medio en la curva de la carga de las pruebas de observación de un fotoelectrón / Figuras 4.6 - 4.7.

Como ejemplo, se toma la carga de 1.27535×10^{-12} Coulombs, de la prueba con 1450V (Figura 4.6-c), del fotomultiplicador 9453KFLB, y por la Ecuación 4.1, se obtiene 7970937.5.

El resultado anterior se aproxima al especificado en la hoja de datos del dispositivo, al aplicar 1450 V de alimentación [61].

Para el cálculo de la ganancia del R1463, se utilizó la carga de 0.718×10^{-12} Coulombs, obtenida en la prueba con 1250V (Figura 4.7-c), y como se sabe de la Ecuación 4.1, se obtiene 4487500.

El valor obtenido es aproximado al que se menciona en la hoja de datos de este PMT, para una alimentación de 1250 V [60].

En las Tablas 4.2 y 4.3, se presentan los valores medios de las cargas y las ganancias con diferentes voltajes de alimentación, además las Figuras 4.8 y 4.9 muestran las curvas de ganancias, de los dos Tubos Fotomultiplicadores.

Voltaje de alimentación (V)	Carga (pC)	Ganancia
1250	0.131448	821550.00
1300	0.304922	1905762.50
1350	0.504693	3154331.25
1400	0.858656	5366600.00
1450	1.275350	7970937.50
1500	1.957590	12234937.50
1550	3.386710	21166937.50

Tabla 4.2: Ganancia del 9453KFLB con respecto a voltaje de alimentación.

Voltaje de alimentación (V)	Carga (pC)	Ganancia
1000	0.178530	1115812.50
1050	0.201482	1259262.50
1100	0.259040	1619000.00
1150	0.323782	2023637.50
1200	0.501137	3132106.25
1250	0.718066	4487912.50

Tabla 4.3: Ganancia del R1463 con respecto a voltaje de alimentación.

⁵ La carga de un electrón es de 1.6×10^{-19} Coulombs.

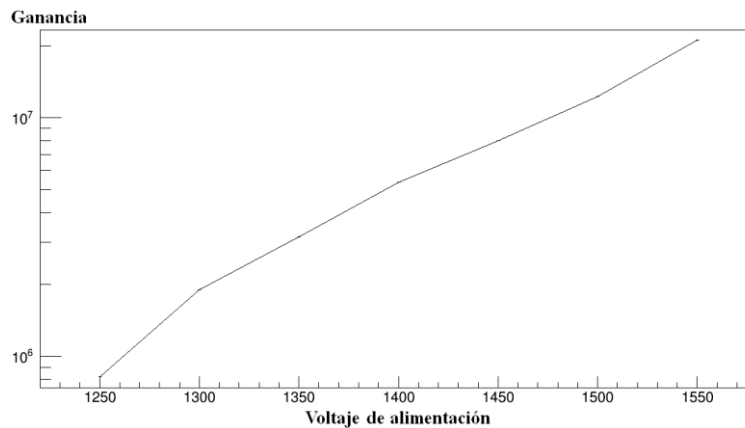


Figura 4.8: Curva de las ganancias obtenidas en la prueba de observación de un fotoelectrón (Fotomultiplicador 9453KFLB).

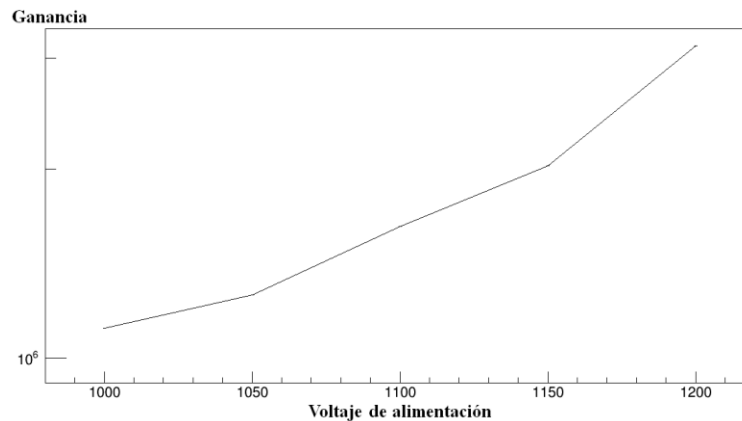


Figura 4.9: Curva de las ganancias obtenidas en la prueba de observación de un fotoelectrón (Fotomultiplicador R1463).

4.1.4 Prueba de linealidad

Esta prueba sirve para conocer en qué rango de voltajes de alimentación es lineal el PMT. Consiste en aislar al dispositivo de la luz externa, y colocar un led (su color depende de la longitud de onda que capte el Fotomultiplicador) que emita una señal con una determinada frecuencia de luz, en dirección al PMT, de forma que este pueda observar la señal constante (en vez de ruido y señal, como en la prueba anterior), por esto se buscó la configuración adecuada del generador partiendo de los parámetros en la prueba anterior (Tabla 4.4). El montaje de la presente prueba se muestra en la Figura 4.10.

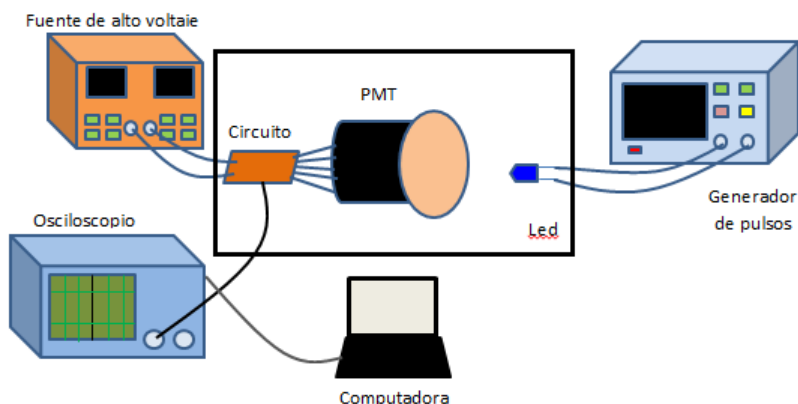


Figura 4.10: Arreglo de los instrumentos y el fotomultiplicador para la prueba de linealidad.

Fotomultiplicador	9453KFLB	R1463
Frecuencia	1 kHz	1 kHz
Amplitud	2.335 Vpp	2.89 Vpp
Offset	938 mV	938 mV
Ancho de pulso	73 ns	73 ns

Tabla 4.4: Parámetros del generador de señales, para la prueba de Linealidad

Con la nueva configuración se consiguió una señal de detección constante del PMT de aproximadamente 10 mv (Figura 4.11).

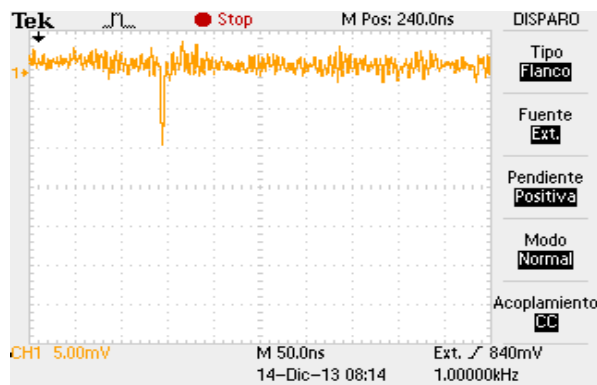


Figura 4.11: Señal de detección constante del PMT 9453KFLB observada en el osciloscopio.

Para cumplir el objetivo de esta prueba, se aumentaron pasos de 50 V en el voltaje de alimentación (1000v-1550v/9453KFLB y 800v-1250v/R1463).

Voltaje de alimentación (V)	Carga (pC)	Desviación Estándar de la carga	Voltaje de la señal (mV)	Desviación Estándar del voltaje
1000	0.188108	0.125316	1.88506	0.000262616
1050	0.326851	0.139892	2.05464	0.000322595
1100	0.593490	0.213074	2.63629	0.000476340
1150	1.012070	0.313279	3.84616	0.000847327
1200	1.941680	0.513331	6.31327	0.001510180
1250	3.525030	0.893414	11.03360	0.002797550
1300	6.111370	1.508390	18.68460	0.004860600
1350	10.204600	2.488130	29.76410	0.007155000
1400	16.542500	3.997680	50.35340	0.012945500
1450	27.368100	6.742510	82.37060	0.021807500
1500	49.200200	12.670000	147.68200	0.039775400
1550	76.863900	19.340000	236.69900	0.060116300

Tabla 4.5: Valores obtenidos en la prueba de linealidad con el Fotomultiplicador 9453KFLB.

Voltaje de alimentación (V)	Carga (pC)	Desviación Estándar de la carga	Voltaje de la señal (mV)	Desviación Estándar del voltaje
800	0.0172377	0.139243	1.62510	0.000185400
850	0.0968209	0.157013	1.99169	0.000319316
900	0.2012450	0.195666	2.17400	0.000476340
950	0.2956120	0.232975	2.83828	0.001668000
1000	0.4871790	0.325905	3.88127	0.001845750
1050	0.6878480	0.456219	5.65836	0.002386410
1100	0.9885600	0.648735	7.91109	0.003328540
1150	1.4842400	0.849347	11.19630	0.004476920
1200	2.0916000	1.160590	15.46880	0.005907690
1250	2.8098700	1.552760	20.15740	0.007349500

Tabla 4.6: Valores obtenidos en la prueba de linealidad con el Fotomultiplicador R1463.

En cada prueba, se recopilaron 3000 datos, y se obtuvieron cargas y voltajes (Tabla 4.5 y 4.6), para realizar los histogramas, en los que el programa ROOT calcula el valor medio y la desviación estándar de cada distribución.

En las Figuras 4.12 - 4.15 se muestran las gráficas de carga y voltaje de los dos Tubos Fotomultiplicadores. En estas imágenes se observa que el 9453KFLB tiene buena linealidad en el rango de 1200 a 1450v, a su vez, el R1463 presenta buena linealidad en el rango de 1000 a 1200v.

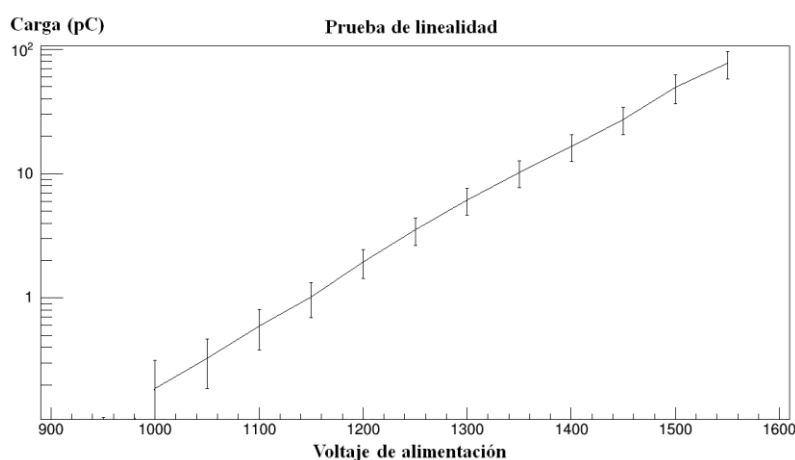


Figura 4.12: Curva de cargas del PMT 9453KFLB / Prueba de linealidad

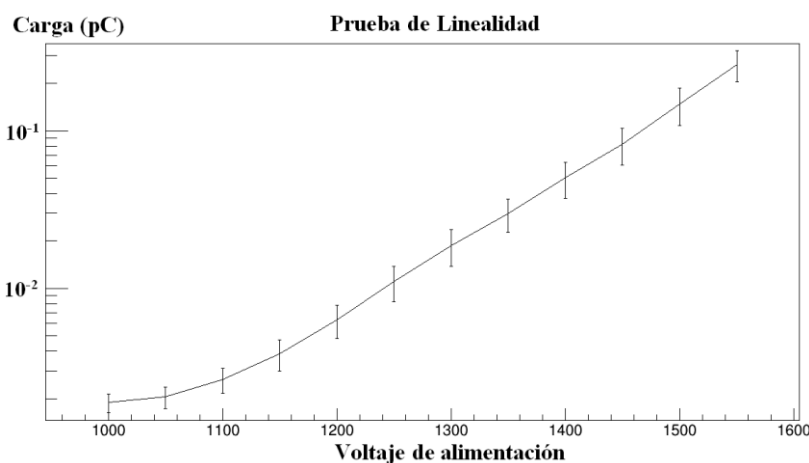


Figura 4.13: Curva de voltajes del PMT 9453KFLB / Prueba de linealidad

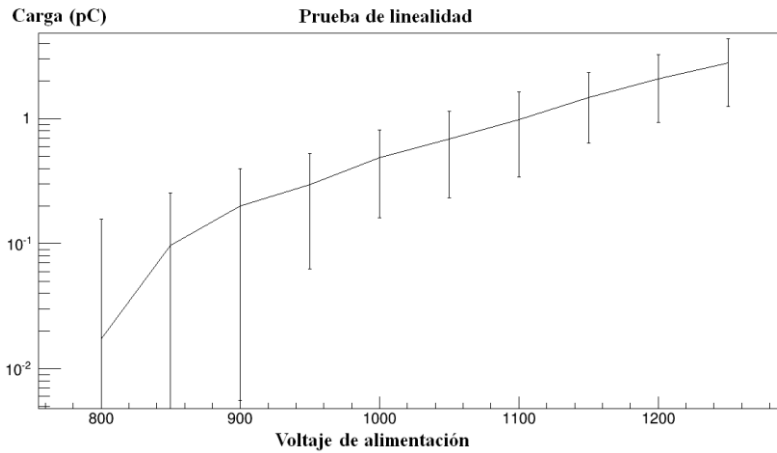


Figura 4.14: Curva de cargas del PMT R1463 / Prueba de linealidad

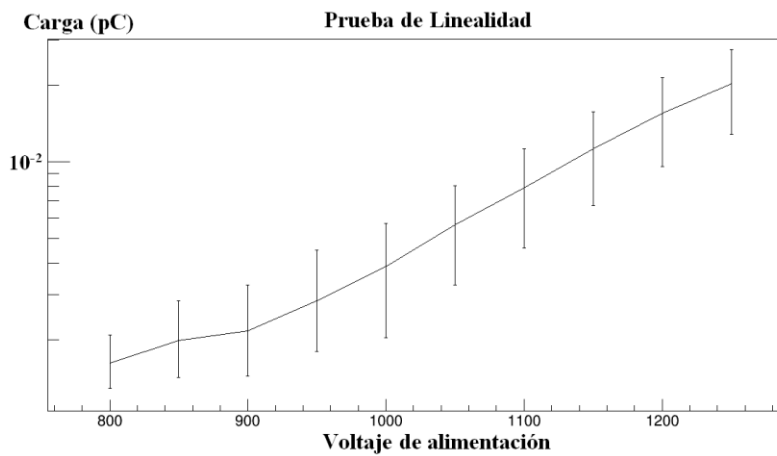


Figura 4.15: Curva de voltajes del PMT R1463 / Prueba de linealidad

4.1.5 Elección del PMT

En la comparación de los resultados obtenidos en las pruebas de caracterización, de los dos Tubos Fotomultiplicadores, el modelo 9453KFLB mostró un mayor rango de linealidad, con menos desviación estándar que el R1463, además presentó una mayor ganancia, de esta forma se pueden percibir señales más débiles de luz

Por lo tanto se eligió al 9453KFLB para utilizarlo en las siguientes pruebas, y en el resto de este trabajo.

4.1.6 Prueba de detección

Cuando se eligió el PMT, se probó su capacidad de detectar eventos energéticos. Se montó el dispositivo en el Tanque Cherenkov, alimentándolo con 1300 V (valor dentro del rango de linealidad encontrado), y se tomaron 100000 muestras de datos con el sistema desarrollado en LabVIEW. Enseguida se realizaron los histogramas de las carga, voltaje (Figuras 4.16 y 4.17).

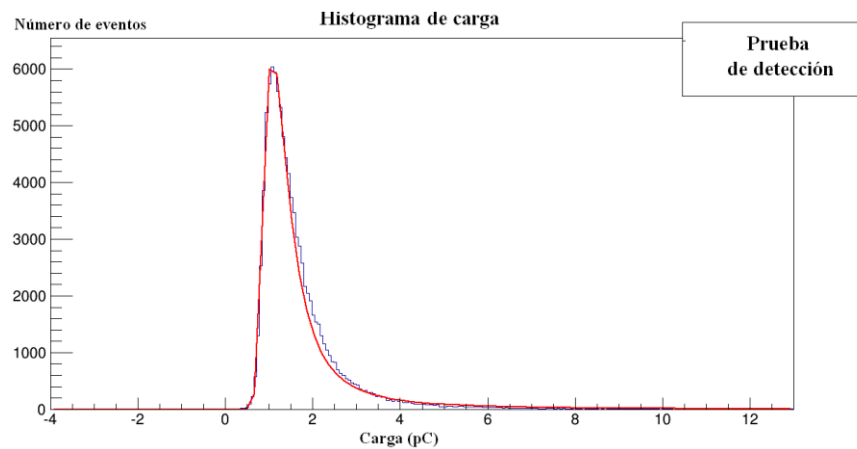


Figura 4.16: Distribución de cargas que se ajusta a una función Landau.

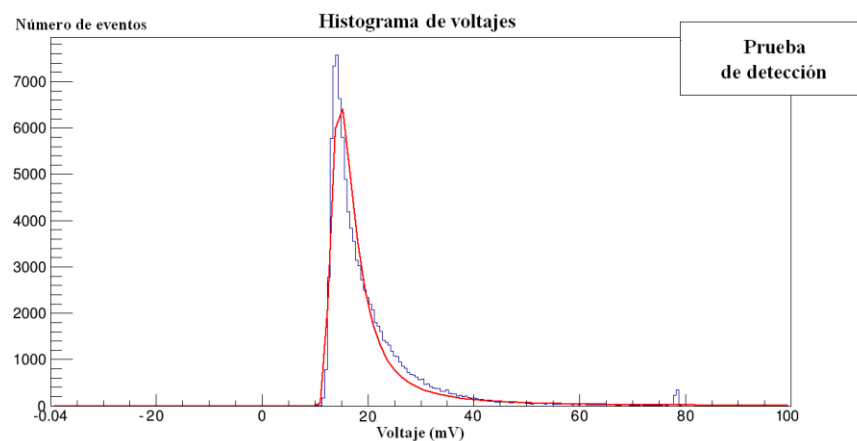


Figura 4.17: Distribución de voltajes que se ajusta a una función Landau.

También se elaboró una gráfica de dispersión de Tiempo (0-50%) vs Carga (Figura 4.18) y una de Tiempo (10-90%) vs Carga (Figura 4.19).

En las gráficas de Tiempos vs Carga, los puntos de amarillo son debido a ruido (con valores de carga cercanos a 0), los puntos verdes son del fondo de partículas que siempre se detecta, y los puntos naranja se deben a los eventos más energéticos (con mayor valores de carga y además menor tiempo en alcanzar el 50% de su máximo valor).

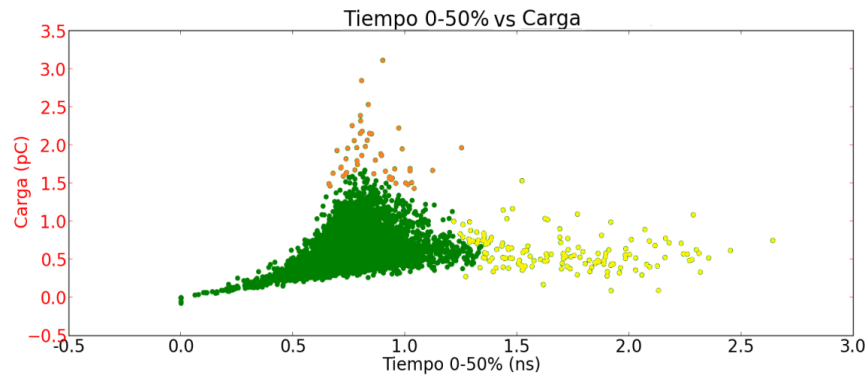


Figura 4.18: Gráfica de dispersión de Tiempo (0-50%) vs Carga.

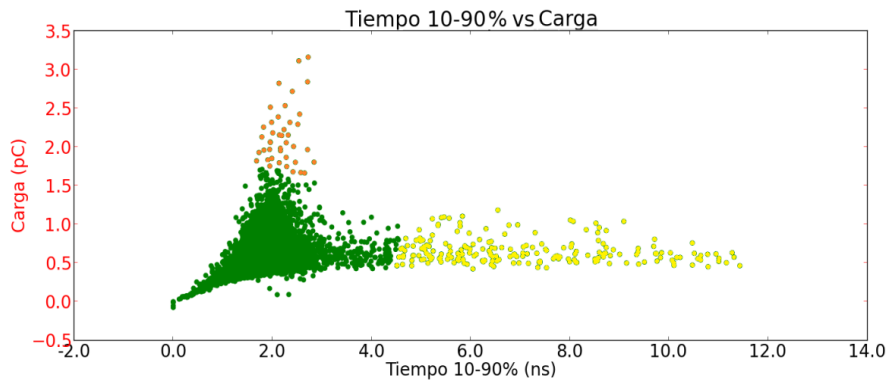


Figura 4.19: Gráfica de dispersión de Tiempo (10-90%) vs Carga.

4.2 Caracterización de la tarjeta de conteo

La tarjeta de conteo utilizada, contiene componentes electrónicos con valores dentro de rangos de funcionamiento, que pueden variar de acuerdo a condiciones como voltaje de alimentación, voltajes de operación, ruido electrónico, etc. Por esta razón, se debió caracterizar la tarjeta que se utilizara. Las pruebas realizadas para esto fueron:

- Prueba de verificación de niveles de referencia
- Prueba de ruido

- Prueba de linealidad

El montaje es el mismo que el de la Figura 3.2, solo cambiará la fuente de la señal de entrada. Las pruebas se realizaron en los cuatro canales de la tarjeta, pero en este trabajo solo se muestran los resultados del canal 4, que fue el utilizado finalmente.

4.2.1 Prueba de verificación de niveles de referencia

En esta prueba se buscaron los umbrales de la tarjeta, con los cuales se observa señal, y a partir de cuales ya no se observa. El procedimiento se realizó con dos fuentes de señal:

a) La señal de un led azul controlado por un Generador de funciones configurado con los parámetros de la Tabla 4.7.

Frecuencia de la señal	10 kHz
Amplitud de la señal	200 mVpp
Offset	-95 mV
Ancho de pulso	50 ns

Tabla 4.7: Configuración del generador para la prueba de niveles de referencia, con señal de entrada del mismo generador.

Fueron elaborados histogramas de cuentas con diferentes umbrales (Figura 4.20), y se encontró que para valores ≤ 91 (182mV) la tarjeta entrega 10 cuentas que corresponden a la frecuencia de la señal del generador (10 kHz). Esto es congruente, ya que la tarjeta de conteo muestrea datos cada 1ms, que equivale a una frecuencia de 1 kHz. En los umbrales ≥ 92 , se entregan cuentas de 0.

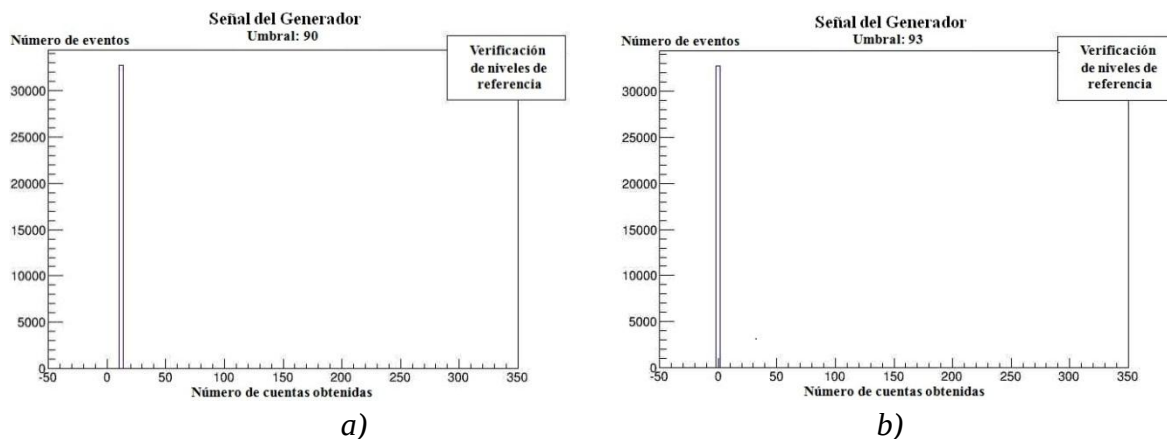


Figura 4.20: Cuentas obtenidas con umbrales de a) 90 y b) 93. Señal de entrada del generador.

En la Figura 4.21 se representan las señales y los respectivos umbrales.

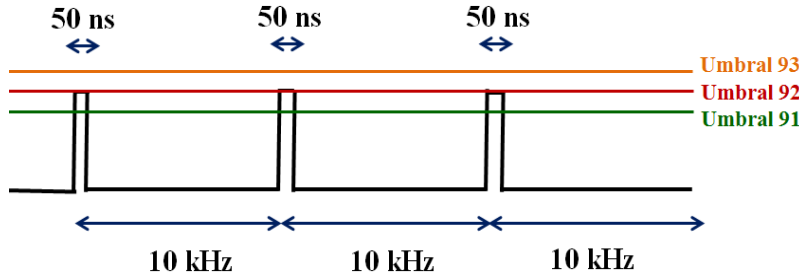


Figura 4.21: Umbrales obtenidos para la prueba de niveles de referencia. Señal de entrada del generador.

b) La señal del Tubo Fotomultiplicador, observando un led azul, colocado frente a él, y controlado por el Generador de funciones. En este caso, se buscó un pulso de detección constante con aproximadamente 200mV de amplitud, esta característica se encontró con los parámetros del generador que se muestran en la Tabla 4.8. Se alimentó al PMT con 1300 V (valor dentro del rango de linealidad del PMT).

Frecuencia de la señal	10 kHz
Amplitud de la señal	4.24 Vpp
Offset	938 mV
Ancho de pulso	50 ns

Tabla 4.8: Configuración del generador para la prueba de niveles de referencia, con señal de entrada del PMT.

Se probaron diferentes umbrales, y se realizaron los correspondientes histogramas, las distribuciones de cuentas se observan en la Figura 4.22.

Para esta configuración, se obtuvieron menos cuentas, conforme el umbral crece, hasta llegar al umbral 85, a partir del cual se tienen valores de cero (Figura 4.23).

4.2.2 Prueba de ruido

Esta prueba se llevó a cabo para conocer qué grado de ruido existe en la tarjeta, dependiendo de los umbrales establecidos, al controlarla. La prueba se realizó con umbrales 1, 2, 10 (valores dentro de los rangos encontrados en la prueba de niveles de referencia).

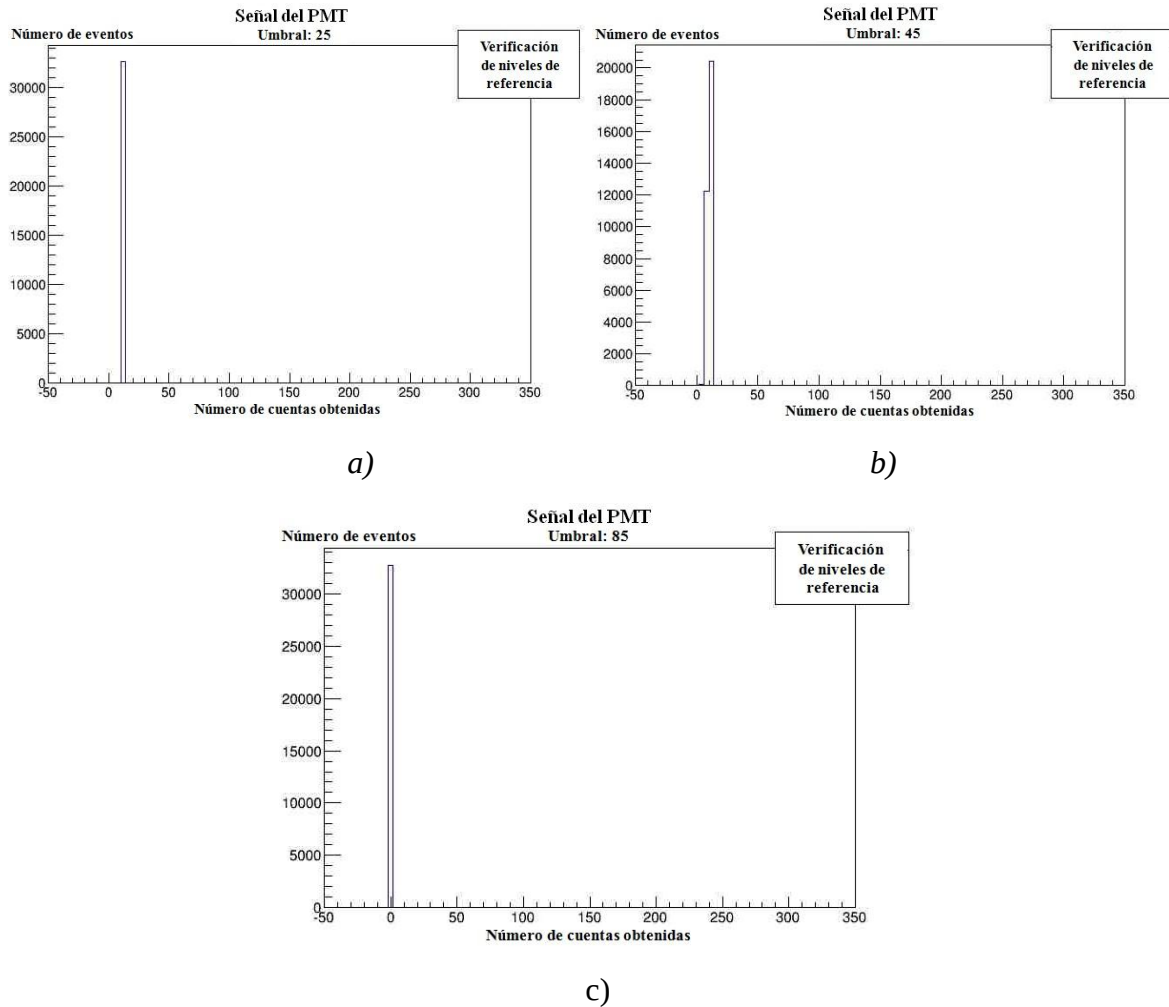


Figura 4.22: Cuentas obtenidas con umbrales de a) 25, b) 45 y c) 85. Señal de entrada del PMT.

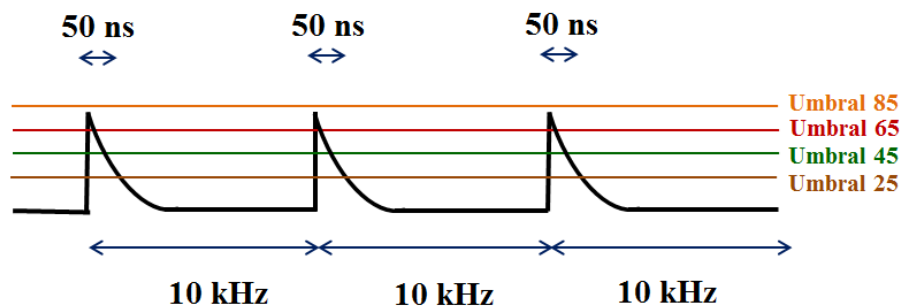


Figura 4.23: Umbrales obtenidos para la prueba de niveles de referencia. Señal de entrada del PMT.

Las 2 fuentes de señal de entrada para esta prueba fueron:

- Señal de un led azul, controlada por el Generador configurado como en la Tabla 4.7.
- Señal del PMT (alimentado con 1300V), sin ninguna fuente de luz.

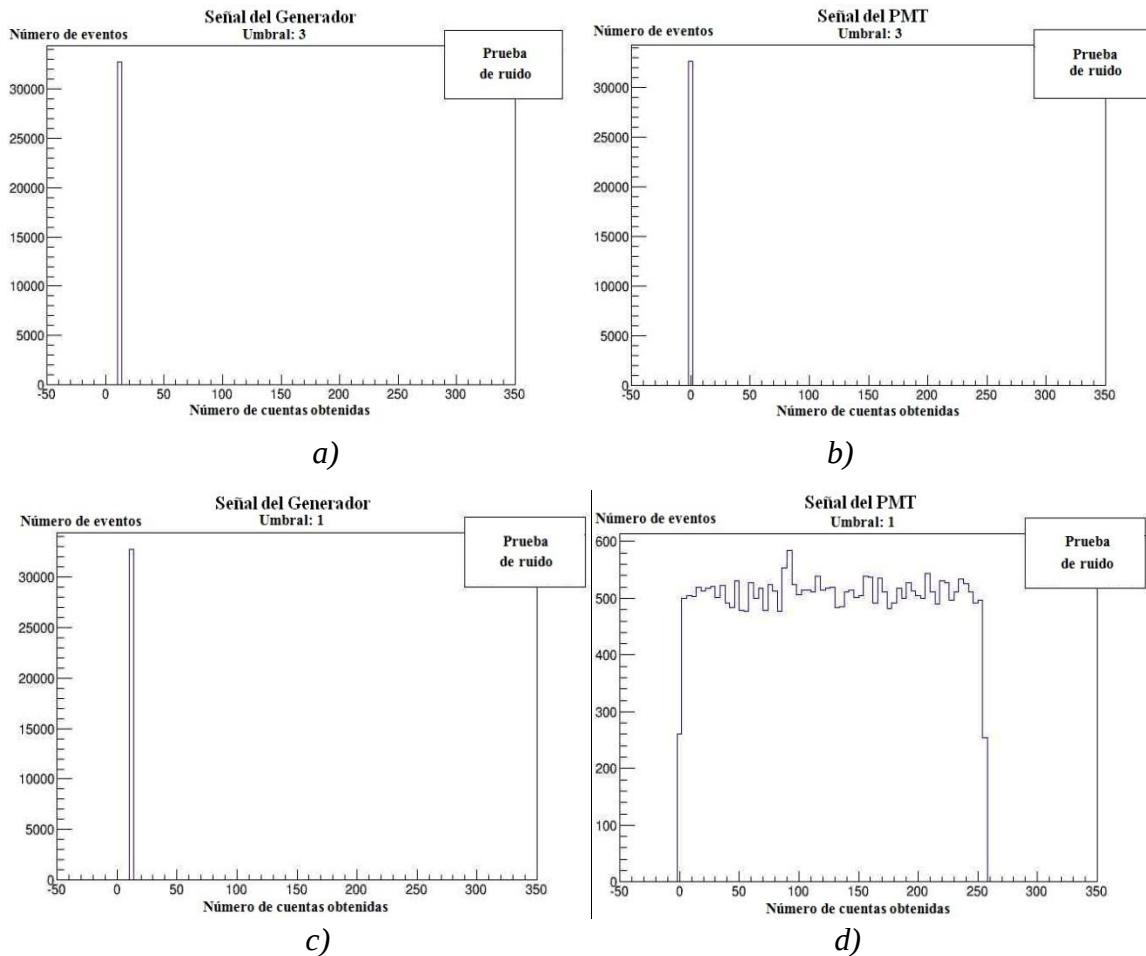


Figura 4.24: Distribuciones obtenidas en la prueba de ruido, para las señales de entrada del Generador y el PMT.

Fueron tomados los datos con los parámetros mencionados, y realizados los histogramas para observar las distribuciones de las cuentas obtenidas. En la Figura 4.24 a) y c), se observa que cuando la señal de entrada proviene del generador de funciones, se pueden introducir hasta umbrales de 1, sin ningún efecto en los resultados, mientras que cuando la entrada es la señal del PMT, el mínimo umbral es de 2, porque con valor de 1 se encuentra una distribución de ruido, que no tiene que ver con la señal, como en la Figura 4.24 b) y d).

4.2.3 Prueba de linealidad

La presente prueba sirvió para analizar la linealidad que muestra la tarjeta de conteo, y las señales de entrada fueron:

a) la señal de un led azul, controlada por el Generador configurado como en la Tabla 4.9. Se hicieron aumentos de 30 kHz, comenzando con 10 kHz. En la Figura se observan las distribuciones de cuentas obtenidas en cada aumento, de las cuales se utiliza el valor promedio para realizar la gráfica de linealidad (Tabla 4.10 y Figura 4.25)

Frecuencia de la señal	10-340 kHz
Amplitud de la señal	200 mVpp
Offset	-95 mV
Ancho de pulso	50 ns

Tabla 4.9: Configuración del generador para la prueba de linealidad

Frecuencia del Generador (kHz)	Número de cuentas obtenidas
10	10
40	40
70	70
100	100
130	130
160	160
190	190
220	220
250	250
280	24
310	54
340	84

Tabla 4.10: Valores de frecuencia de la señal, y de cuentas obtenidos en la prueba de linealidad.

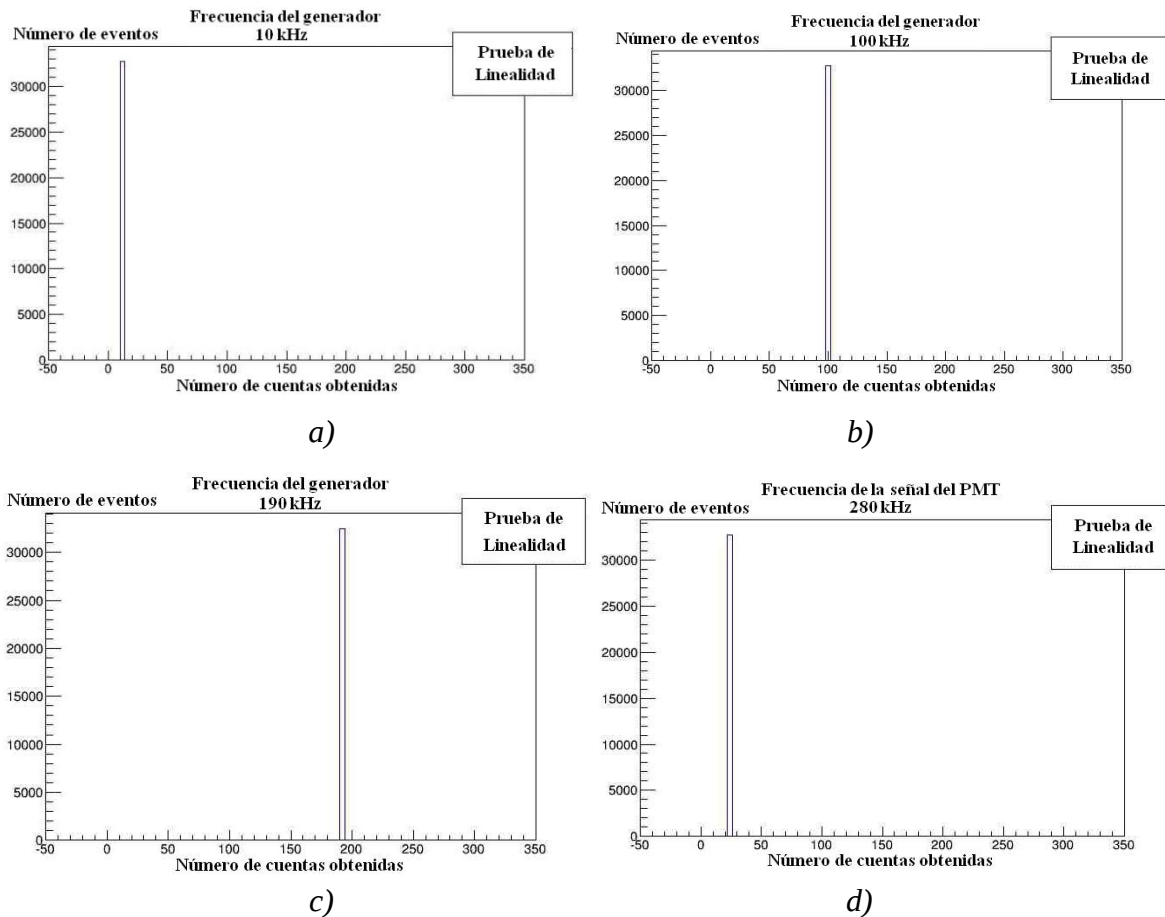


Figura 4.25: Distribuciones obtenidas en la prueba de linealidad, para señales de entrada del Generador, con frecuencias mayores a 1 kHz.

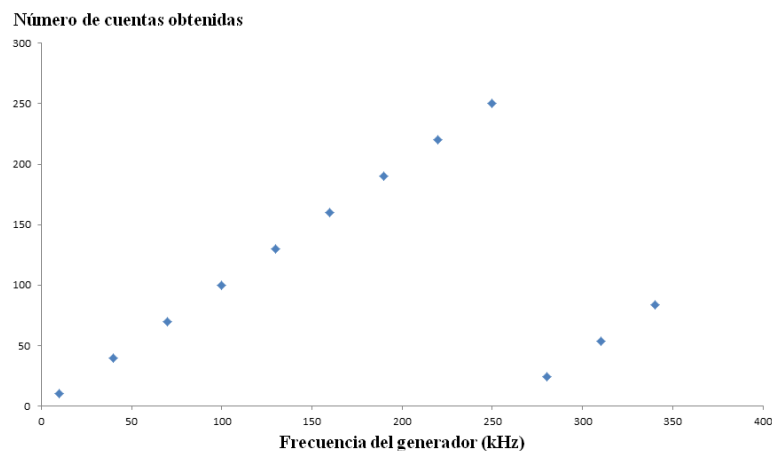


Figura 4.26: Gráfica de linealidad de la tarjeta de conteo.

También se tomaron datos con frecuencias de señales menores a 1kHz, y las distribuciones se muestran en la Figura 4.27. Los resultados muestran que para estas frecuencias, las distribuciones comienzan a tomar valores de 0, por lo que se deben evitar señales de entrada con frecuencias menores al valor mencionado, para no tener valores erróneos.

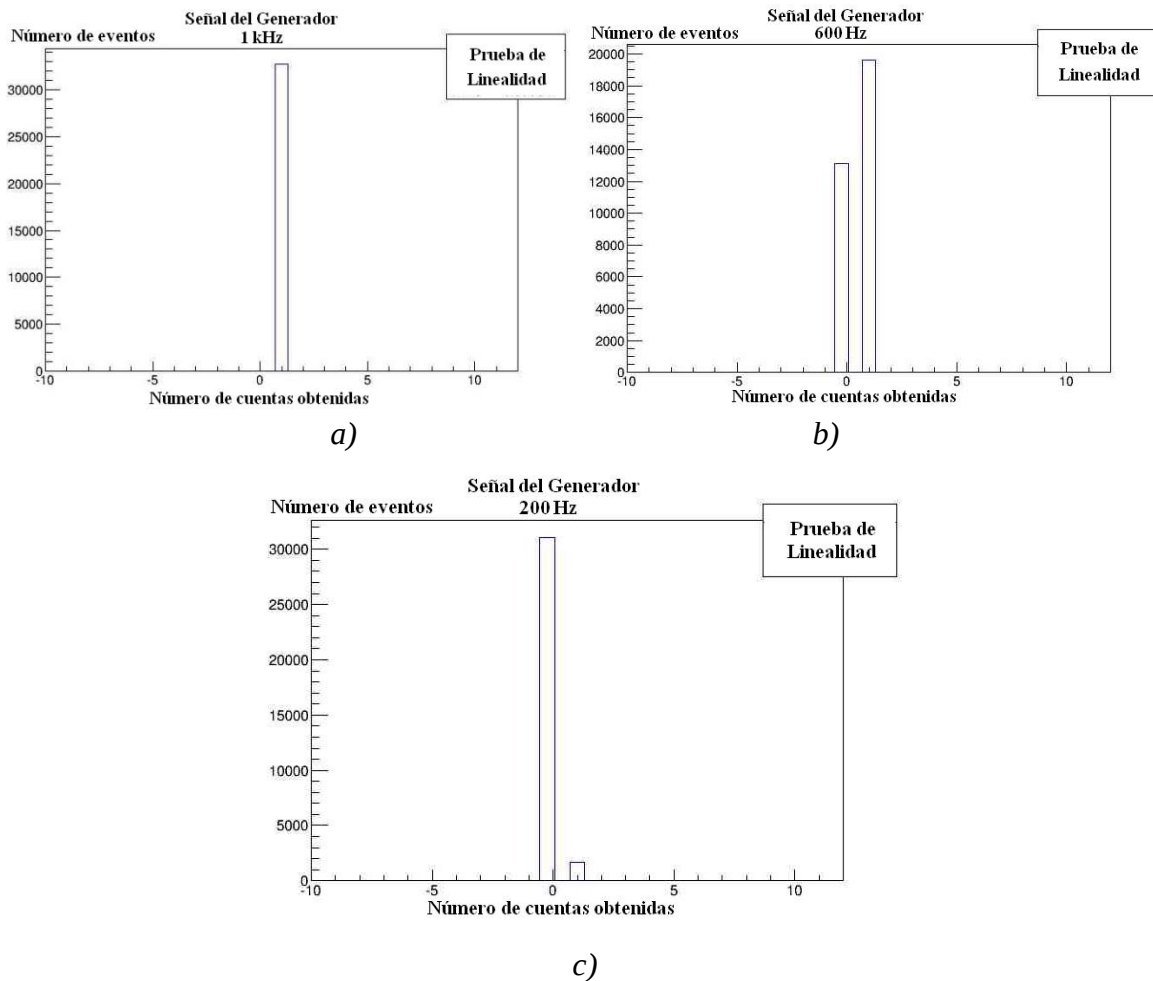


Figura 4.27: Distribuciones obtenidas en la prueba de linealidad, para señales de entrada del Generador, con frecuencias menores a 1 kHz.

b) Señal del PMT (alimentado con 1300V), de 200mV de amplitud. Para observar en el osciloscopio dicha señal, el generador se configuró con los parámetros de la Tabla 4.8, y se hicieron aumentos de 30 kHz en la frecuencia de la señal de entrada, comenzando con 10 kHz. Para esta configuración se obtuvieron los mismos valores de la Tabla 4.10 y la gráfica de la Figura 4.26.

4.3 Pruebas con los sensores de variables atmosféricas

Se realizaron pruebas aisladas con cada sensor para observar su comportamiento. La tarjeta Nexys2 se programó para que se comunicara con los dispositivos, y mandara datos a la PC, cada minuto, durante aproximadamente 12 horas.

Sensor MPL115A1

En las Figuras 4.28 y 4.29 se muestran las curvas de temperatura y presión atmosférica, con respecto al tiempo en formato UTC del GPS, del sensor MPL115A1. Analizando la imagen, se nota que el sensor presenta una dispersión grande de datos, y saltos considerables en su valor entre mediciones consecutivas, las variaciones son de hasta 5.6 mB para la presión atmosférica, y de 0.5 °C para la temperatura. En base a esto, se planteó realizar el manejo y la programación de un nuevo sensor de temperatura y presión atmosférica.

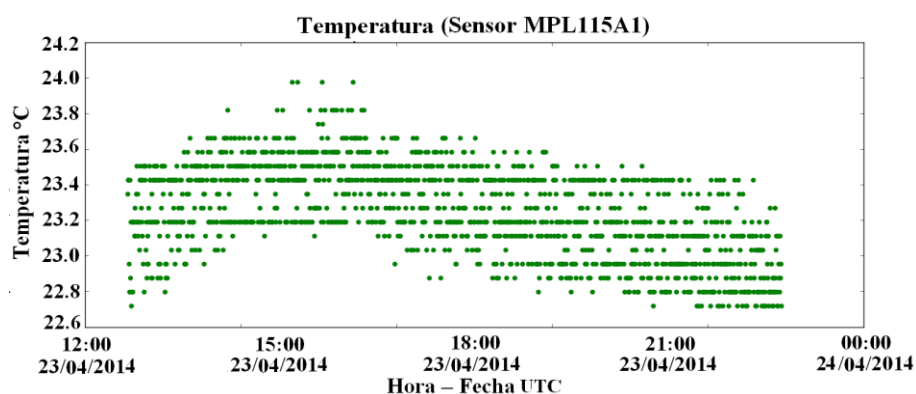


Figura 4.28: Prueba de Temperatura – Sensor MPL115A1.

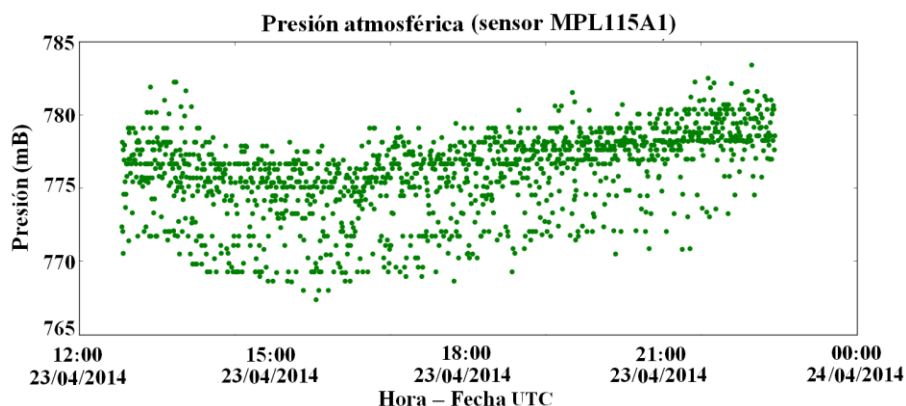


Figura 4.29: Prueba de Presión – Sensor MPL115A1.

Sensor BMP085

A continuación se muestran las gráficas de temperatura (Figura 4.30) y presión (Figura 4.31) del sensor BMP085. Para la temperatura no existieron saltos grandes de valores, y las variaciones máximas entre mediciones consecutivas fueron de 0.2 °C.

Para la presión atmosférica, las variaciones máximas entre mediciones consecutivas fueron de 0.1 mB. En ambos casos se distingue una dispersión de datos menor, que con el sensor MPL115A1. Por lo tanto, se eligió al sensor BMP085, para formar parte del sistema final de caracterización.

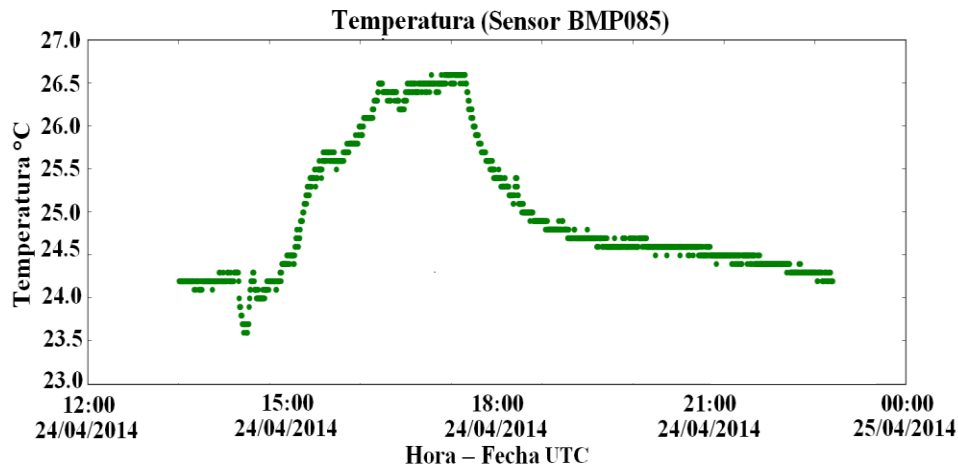


Figura 4.30: Prueba de Temperatura – Sensor BMP085.

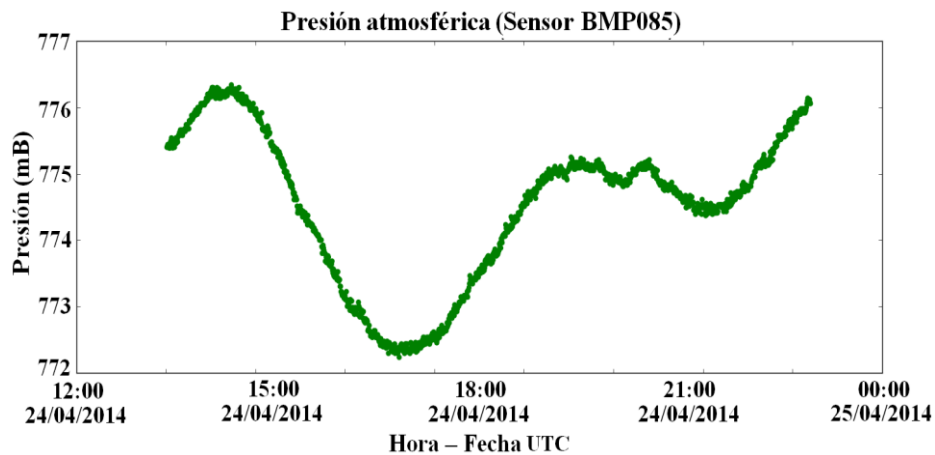


Figura 4.31: Prueba de Presión – Sensor BMP085.

Sensor HHT02D

En la Figura 4.32 se graficaron las mediciones de temperatura del sensor HHT02D, entre las que existieron variaciones de hasta 0.2 °C entre valores consecutivos. El comportamiento de este sensor no muestra una dispersión mayor que afecte los resultados, por lo tanto, se decidió incluirlo en el sistema de caracterización.

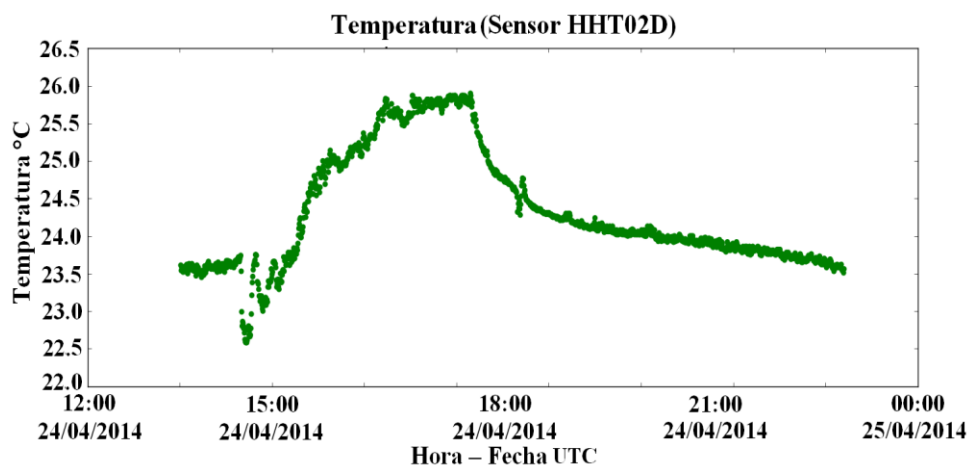


Figura 4.32: Prueba de Temperatura – Sensor HHT02D.

Comparaciones con sensores comerciales

Cuando se eligieron los sensores a utilizar, se comprobó su buen funcionamiento, comparándolos con los sensores comerciales CI-6525 (de temperatura) y CI-6532A (de presión) de PASCO, los cuales cumplen con la norma de calidad ISO 9001 (para conocer más detalles acerca de estos sensores, referirse a [84, 85, 2e]).

Para la comparación de temperatura, se instalaron los dispositivos en un recipiente sellado, con temperatura controlada por un termostato, se realizaron aumentos de esta y se midieron los valores de los sensores.

Para la comparación de presión atmosférica, se introdujeron los sensores en un recipiente sellado, al que se le ejercieron diferentes presiones con una bomba de aire, para ver el cambio en sus valores, y se tomaron mediciones.

Posteriormente se realizaron las gráficas de los datos obtenidos, y se ajustaron a una línea recta, mediante la Ecuación 4.2 [86, 87]:

$$y = a \cdot x + b \quad (\text{Ecuación 4.2})$$

Donde:

$$a = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (\text{Ecuación 4.3})$$

$$b = y_p - a x_p \quad (\text{Ecuación 4.4})$$

x = variable del eje x

y = variable del eje y

x_p = variable del eje x , promedio

y_p = variable del eje y , promedio

n = cantidad de datos

En las Figuras 4.33 - 4.35 se observa que los sensores de temperatura y presión atmosférica utilizados en este trabajo muestran un comportamiento lineal con respecto a los sensores comerciales, por lo que tienen un funcionamiento confiable.

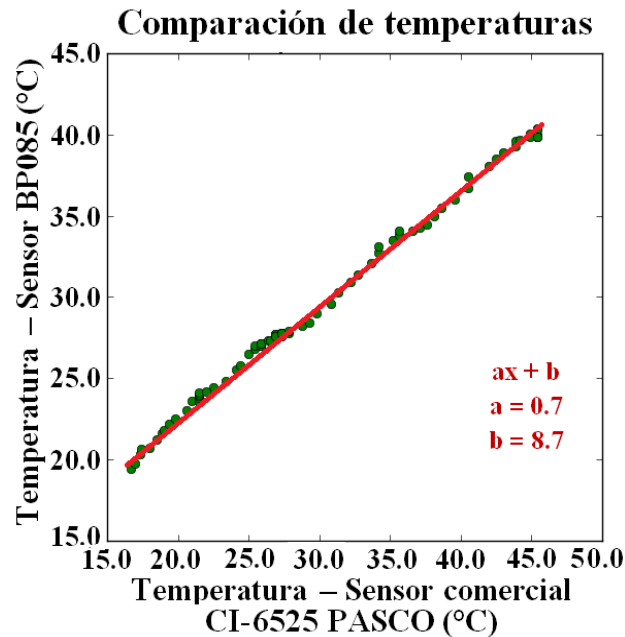


Figura 4.33: Comparación de temperaturas del sensor BMP085 y el sensor comercial CI-6525 PASCO.

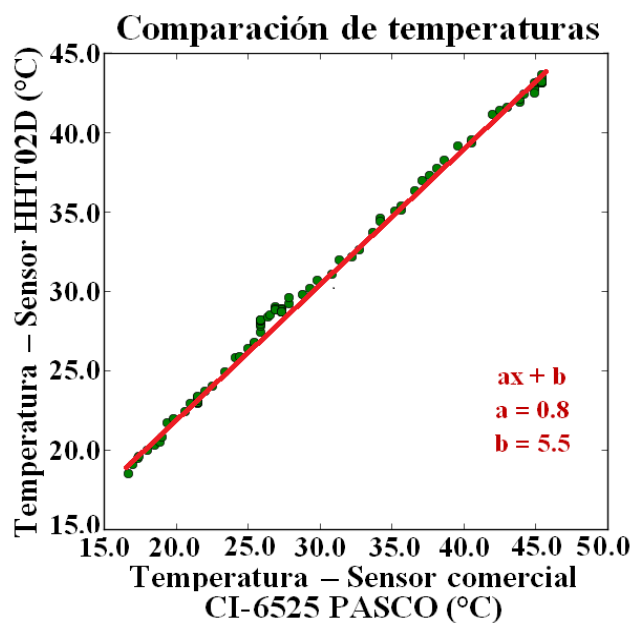


Figura 4.34: Comparación de temperaturas del sensor HHT02D y el sensor comercial CI-6525 PASCO.

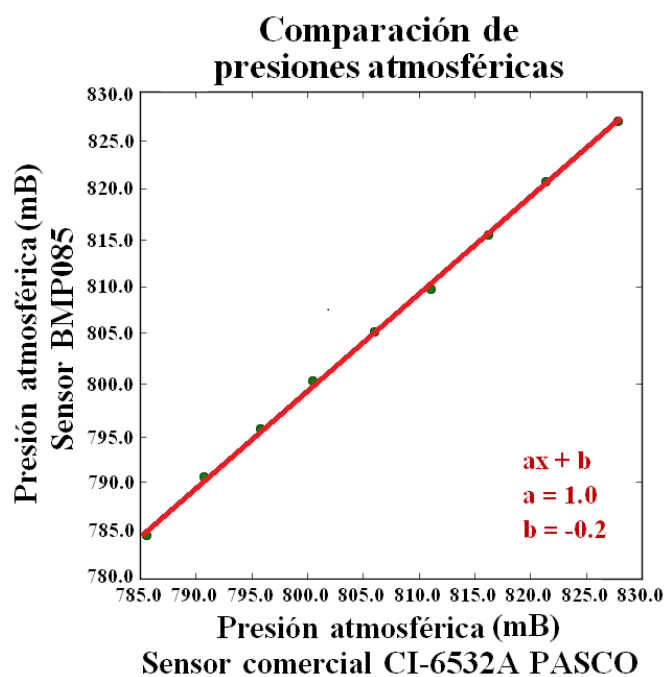


Figura 4.35: Comparación de presiones atmosféricas del sensor HHT02D y el sensor comercial CI-6532A PASCO.

4.4 Prueba con el sistema de caracterización de conteo en Puebla (CU) / 2149 msnm

El sistema tomó datos de frecuencia de señales y variables atmosféricas, en Puebla a 2149 msnm, en las instalaciones de la FCFM de la BUAP, del 14 de Junio a 11 de Julio de 2014. A continuación se presentan las gráficas realizadas para el análisis de los datos.

Correlación de las 2 temperaturas

En este trabajo se tuvieron dos sensores de temperatura, por lo que se analizó la relación entre las mediciones de ambos, tomadas durante un mes en Puebla.

En la Figura 4.36 se puede apreciar la relación lineal positiva entre los valores de las dos temperaturas, y el ajuste a una recta mediante la Ecuación 4.2.

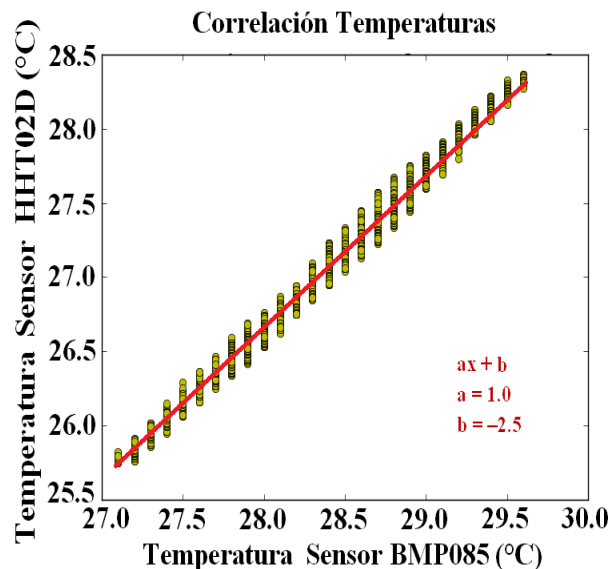


Figura 4.36: Correlación de las mediciones de temperatura de los sensores BMP085 y HHT02D (1 mes / Puebla-CU).

Distribución de valores de temperatura

Se realizó el histograma de los valores de la temperatura promediada, registrados durante un mes a 2149 msnm, en este gráfico se aprecia una distribución simétrica respecto a un valor medio de 28.2 °C, donde la desviación estándar $\sigma = 0.7$ de las mediciones se toma

como parámetro de error (Figura 4.37). Los cálculos y los histogramas fueron realizados con el software ROOT.

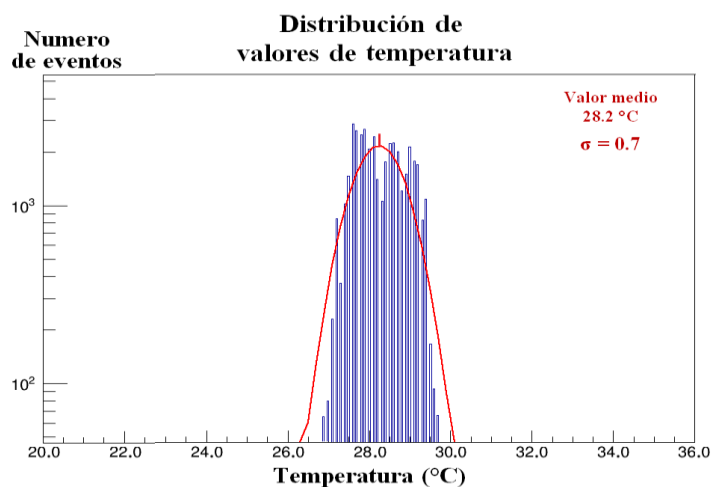


Figura 4.37: Histograma de mediciones de temperatura en Puebla-CU (1 mes).

Gráficas de Conteo – Temperatura

Se graficaron temperatura y frecuencia de conteo de partículas, con respecto a hora/fecha UTC, por un día, una semana y un mes, y los resultados se muestran en las Figuras 4.38, 4.39 y 4.40 respectivamente.

No se encontró ninguna relación entre la temperatura y la frecuencia de conteo de partículas, en la ciudad de Puebla a 2149 msnm.

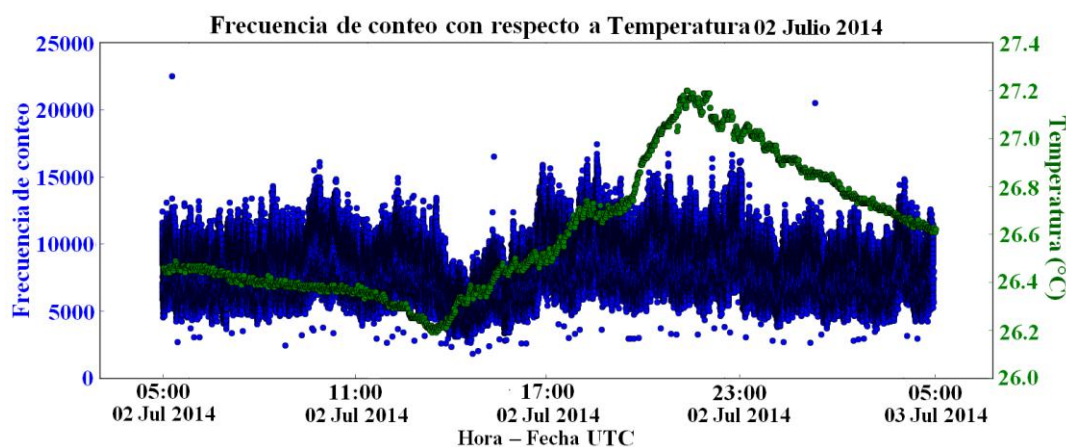


Figura 4.38: Frecuencia de Conteo (azul) - Temperatura (verde) vs Hora-Fecha (1 día / Puebla-CU). Se tomaron como muestra los datos del 02 de Julio del 2014.

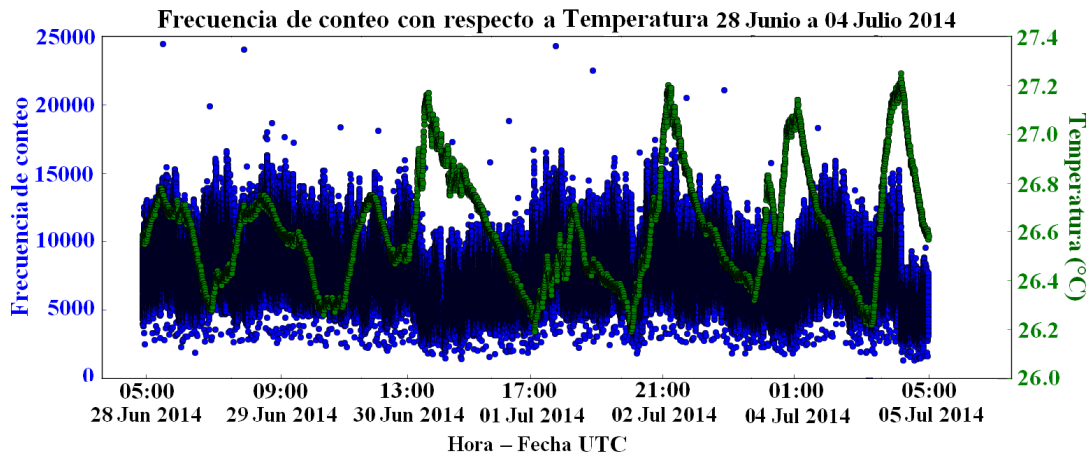


Figura 4.39: Frecuencia de Conteo (azul) - Temperatura (verde) vs Hora-Fecha (1 semana / Puebla-CU). Se tomaron como muestra los datos del 28 de Junio al 04 de Julio del 2014.

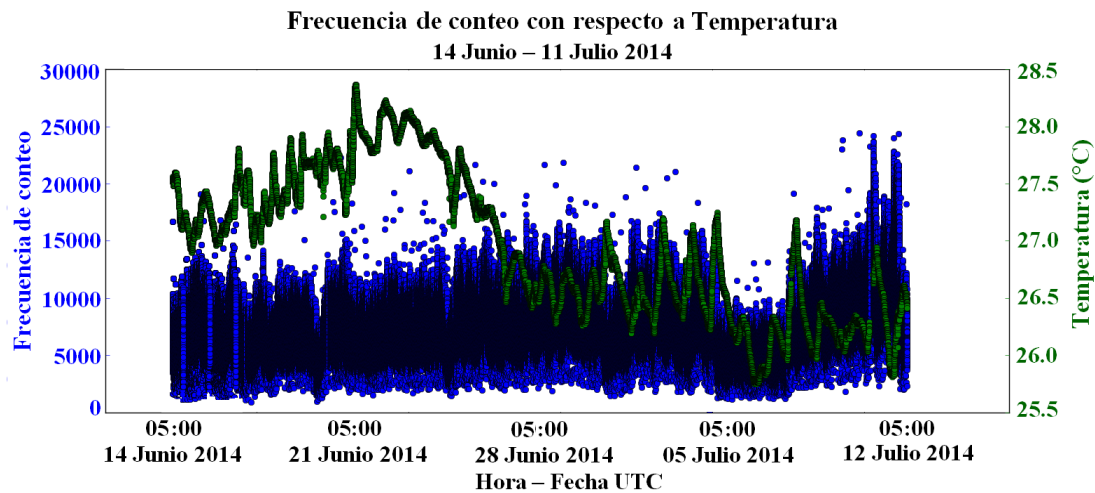


Figura 4.40: Frecuencia de Conteo (azul) - Temperatura (verde) vs Hora-Fecha (1 mes / Puebla-CU). Se tomaron los datos del 14 de Junio al 11 de Julio del 2014.

Distribución de valores de presión atmosférica

Se realizó el histograma de los valores de presión atmosférica, registrados durante un mes en Puebla, en dicho gráfico se observa una distribución acampanada y simétrica respecto a un valor medio de 792.5 mB, con una desviación estándar $\sigma = 1.2$ tomada como parámetro de error (Figura 4.41).

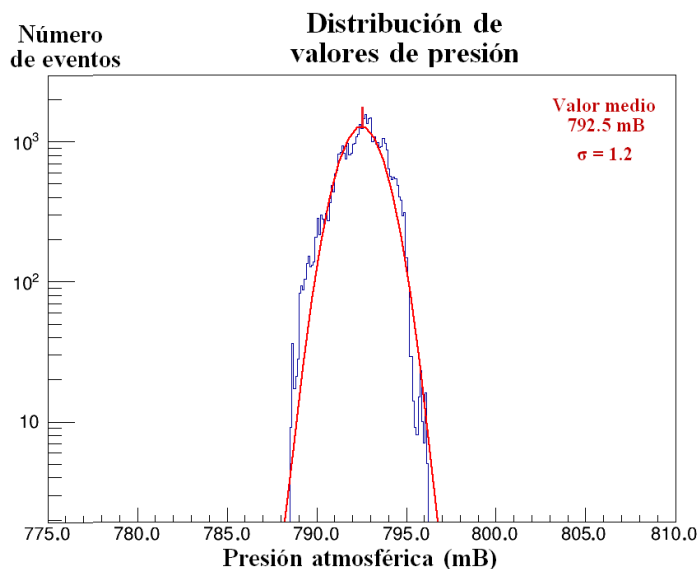


Figura 4.41: Histograma de mediciones de presión atmosférica en Puebla-CU (1 mes).

Gráficas de Conteo - Presión

Se graficaron presión atmosférica y frecuencia de conteo de partículas, con respecto a hora/fecha UTC, por un día, una semana y un mes (Figuras 4.42, 4.43 y 4.44 respectivamente).

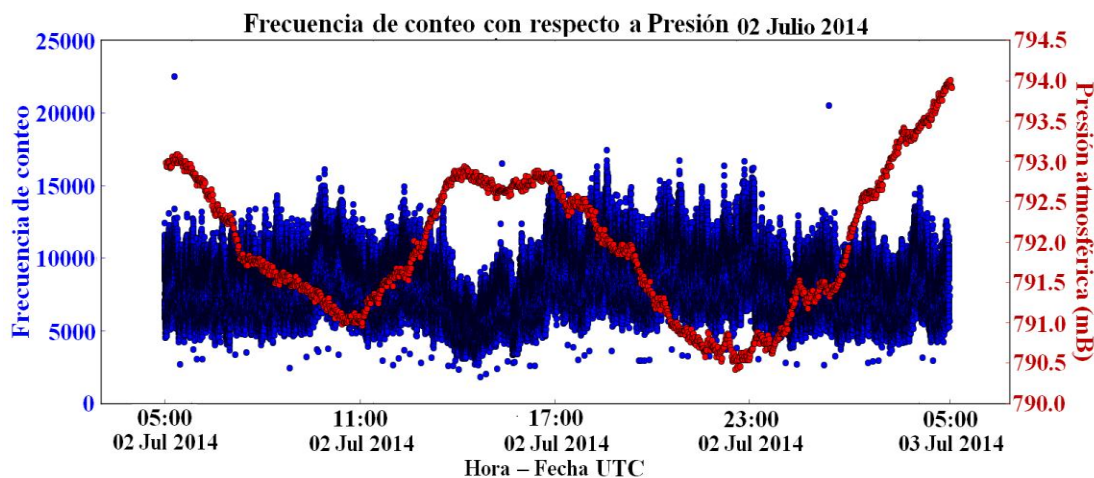


Figura 4.42: Frecuencia de Conteo (azul)-Presión atmosférica (rojo) vs Hora-Fecha (1 día / Puebla-CU). Se tomaron como muestra los datos del 02 de Julio del 2014.

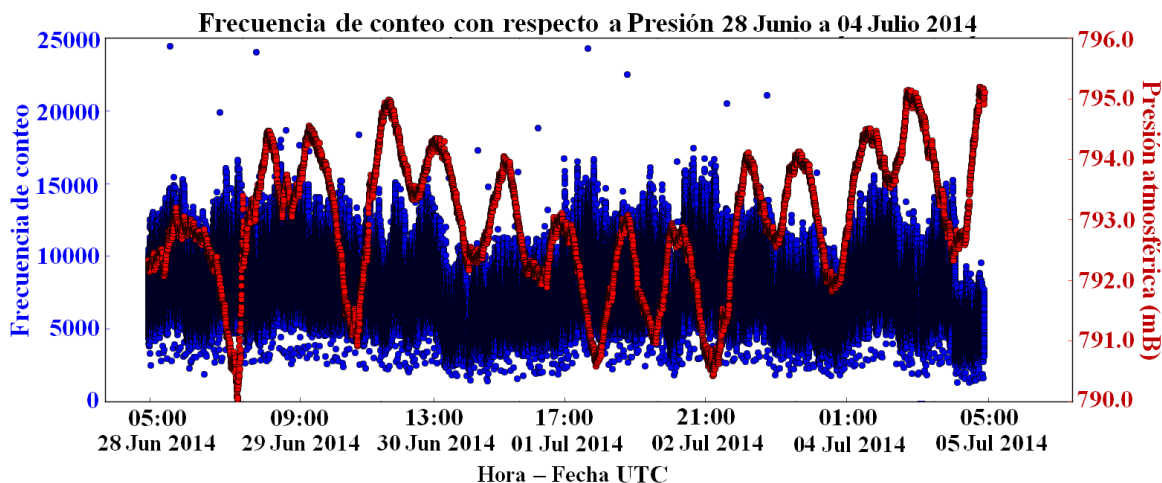


Figura 4.43: Frecuencia de Conteo (azul)-Presión atmosférica (rojo) vs Hora-Fecha (1 semana / Puebla-CU). Se tomaron como muestra los datos del 28 de Junio al 04 de Julio del 2014.

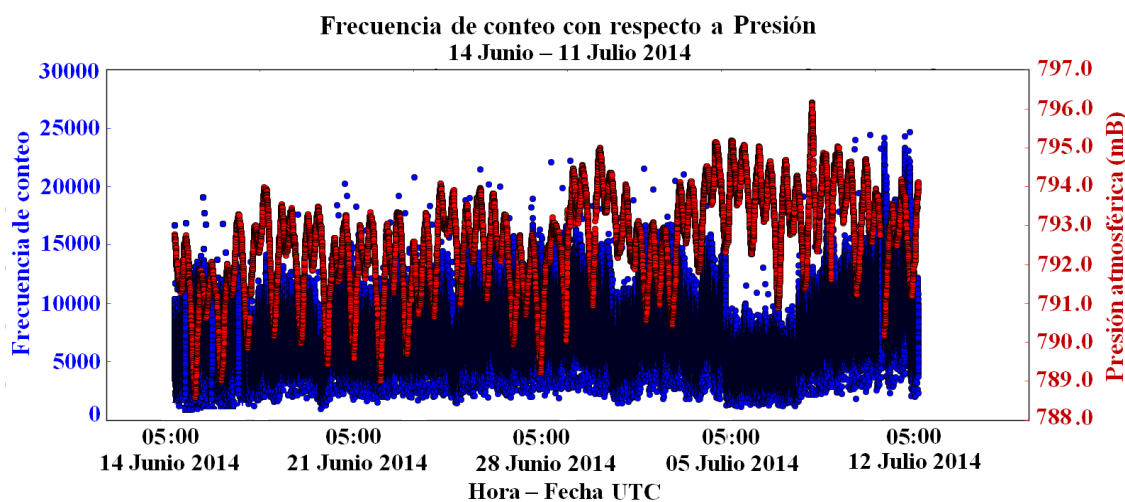


Figura 4.44: Frecuencia de Conteo (azul)-Presión atmosférica (rojo) vs Hora-Fecha (1 mes / Puebla-CU). Se tomaron los datos del 14 de Junio al 11 de Julio del 2014.

En la Figura 4.43 (de una semana) se puede observar, que por cada día existe un armónico de presión atmosférica, formado por 2 subarmónicos, y en la Figura 4.44 (de un mes) se observa que los armónicos por día forman un armónico más grande por semana. Además, en las Figuras 4.42-4.44 se distingue un comportamiento inversamente proporcional entre presión atmosférica y frecuencia de conteo, para verificar esto, se analizó la relación entre estas 2 variables, en el siguiente apartado.

Gráfica de Dispersión: Conteo por minuto vs Presión atmosférica

Se realizó una gráfica de dispersión para relacionar la presión atmosférica con el conteo, y se ajustó a una línea recta (Figura 4.45), mediante la *Ecuación 4.2* [86, 88, 89, 90].

Para este caso, la variable en el eje x es la presión medida cada minuto, y la variable en el eje y es el conteo por minuto. Se tomaron los datos de un día de prueba, dentro del mes en el que se hicieron las mediciones. Al hacer los cálculos, se obtuvo:

$$a = -40768.2$$

$$b = 32941302.6$$

También se calculó el coeficiente de correlación lineal, utilizando la siguiente expresión:

$$r = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{n(\sum x^2 - (\sum x)^2)} \sqrt{n(\sum y^2 - (\sum y)^2)}} \quad (\text{Ecuación 4.5})$$

Este coeficiente indica el grado de correlación entre 2 variables, y toma valores entre -1 y 1. Mientras r es más próximo a 0, menor es la relación entre los datos, y mientras más próximo es a 1 (en valor absoluto) mayor es la relación; su signo indica si se da una relación positiva o negativa entre las variables x e y [86, 88, 89].

El valor obtenido fue ≈ -0.6 .

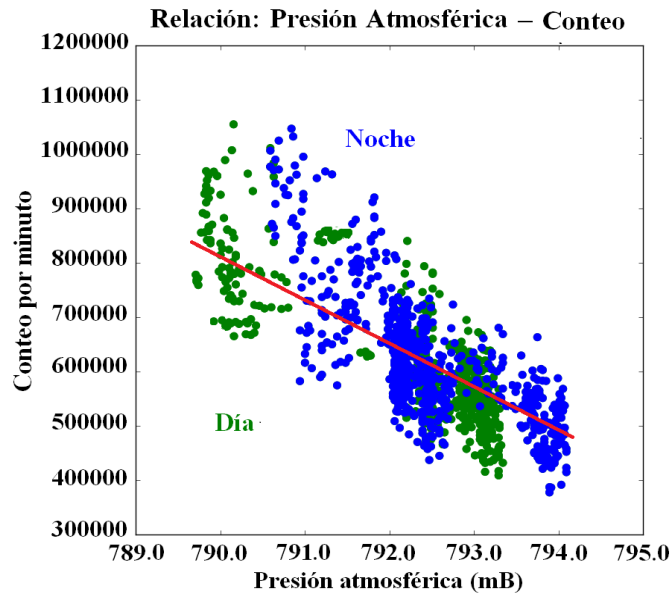


Figura 4.45: Correlación negativa entre presión atmosférica y conteo por minuto (Puebla/2149 msnm).

Distribución de frecuencias de señales

Se realizó el histograma de las frecuencias de conteo, registrados durante un mes en Puebla con el Detector Cherenkov construido en este trabajo (de área $\approx 4 \text{ m}^2$), obteniendo una distribución simétrica respecto a un valor medio aproximado de 7399 partículas/seg (Figura 4.46), lo que equivale a ≈ 1850 partículas / (m^2seg).

Gracias a otros experimentos realizados, se conoce que para la altitud de Puebla (2149 msnm), la tasa de conteo de fondo de partículas esperada es ≈ 1800 partículas / (m^2seg). Por lo que se obtuvo una medición confiable con el sistema desarrollado en esta Tesis, con respecto a los datos de los detectores con funcionamiento comprobado [91, 92, 93].

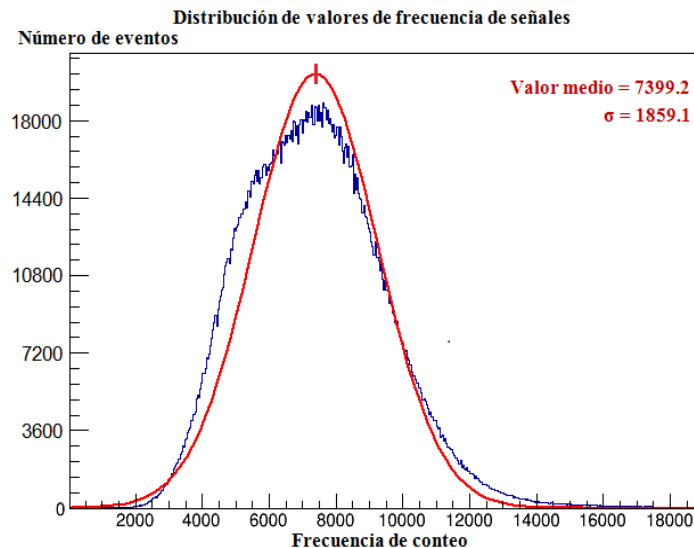


Figura 4.46: Histograma de valores de frecuencia de conteo en Sierra Negra (1 mes), tomando la desviación estándar como parámetro de error.

4.5 Prueba con el sistema de caracterización de conteo en Sierra Negra / 4600 msnm

El sistema de tomó datos de frecuencia de señales y variables atmosféricas, en instalaciones del Consorcio Sierra Negra a 4600 msnm, del 16 de Octubre al 12 de Noviembre de 2014. A continuación se presentan las gráficas realizadas para el análisis de los datos.

Correlación de las 2 temperaturas

Se analizó la relación entre las mediciones de los dos sensores de temperatura, tomadas durante un mes en el Consorcio Sierra Negra. Se realizó la gráfica de las dos temperaturas, en la que se puede apreciar la correlación lineal positiva entre los valores de las dos temperaturas, y se ajustó a una línea recta mediante la Ecuación. 4.2 (Figura 4.47) [86, 87].

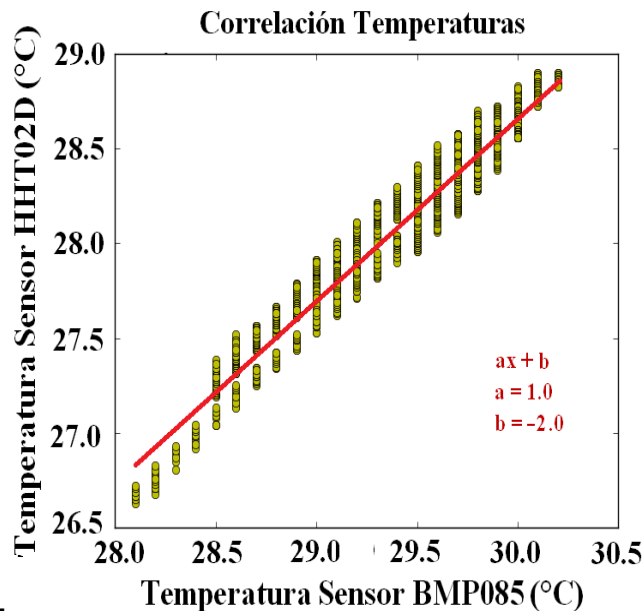


Figura 4.47 Correlación de las mediciones de temperatura de los sensores BMP085 y HHT02D (1 mes / Sierra Negra).

Distribución de valores de temperatura

Se realizó el histograma de los valores de la temperatura promediada, registrados durante un mes a 4600 msnm, en este gráfico se aprecia una distribución simétrica respecto a un valor medio de 28.3 °C, donde la desviación estándar $\sigma = 0.4$ de las mediciones se toma como parámetro de error (Figura 4.48).

Graficas de Conteo - Temperatura

Se graficaron temperatura y frecuencia de conteo de partículas, con respecto a hora/fecha UTC, por un día, una semana y un mes, y los resultados se muestran en las Figuras 4.49, 4.50 y 4.51 respectivamente.

No se encontró ninguna relación entre la temperatura y la frecuencia de conteo de partículas, en el CSN a 4600 msnm.

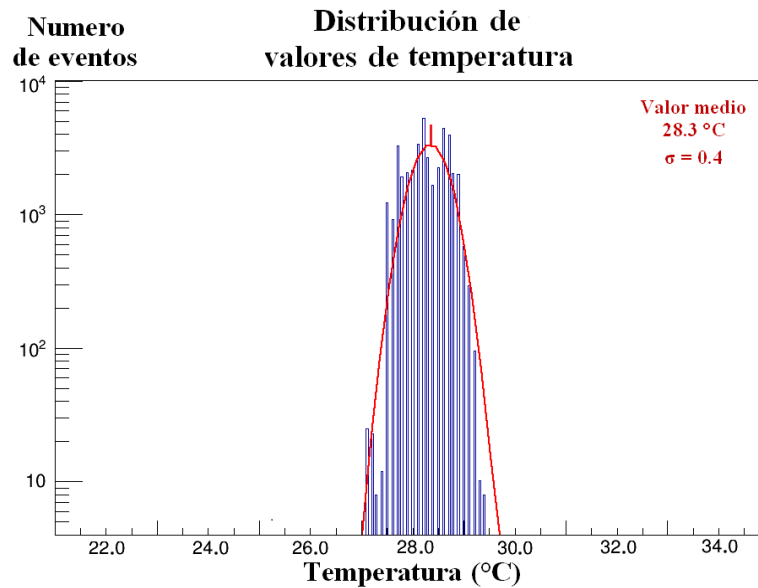


Figura 4.48: Histograma de mediciones de temperatura en Sierra Negra (1 mes).

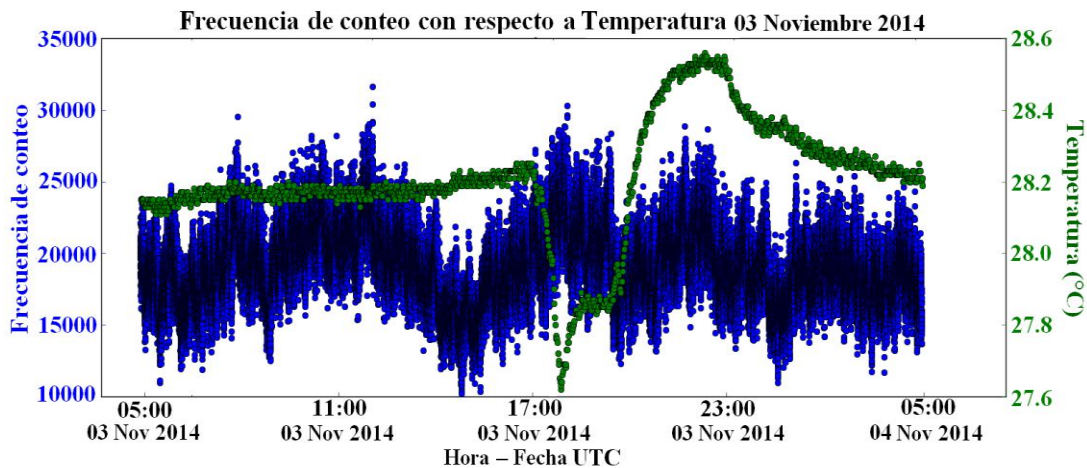


Figura 4.49: Frecuencia de Conteo (azul) – Temperatura (verde) vs Hora-Fecha (1 día / Sierra Negra). Se tomaron como muestra los datos del 03 de Noviembre del 2014.

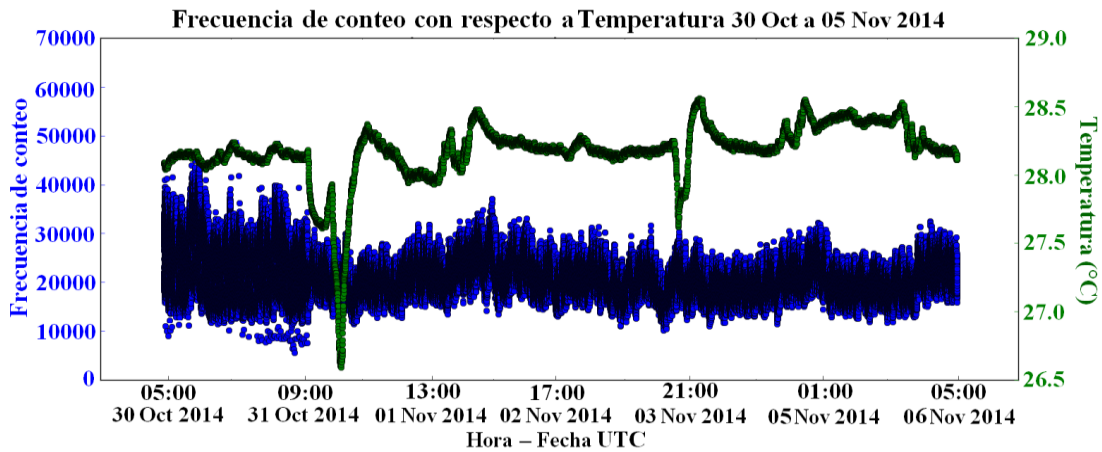


Figura 4.50: Frecuencia de Conteo (azul) – Temperatura (verde) vs Hora-Fecha (1 semana / Sierra Negra). Se tomaron como muestra los datos del 30 de Octubre al 05 de Noviembre del 2014.

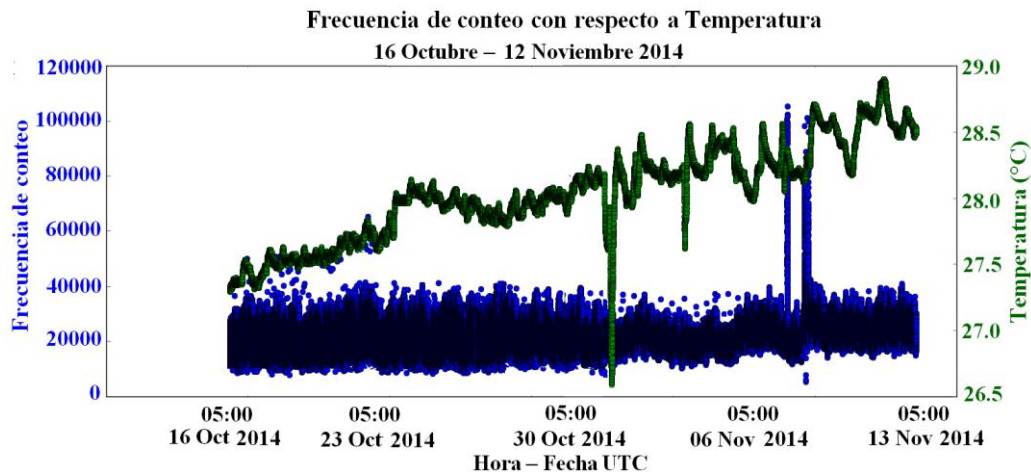


Figura 4.51: Frecuencia de Conteo (azul) - Temperatura (verde) vs Hora-Fecha (1 mes / Sierra Negra). Se muestran los datos del 16 de Octubre al 12 de Noviembre del 2014.

Distribución de valores de presión atmosférica

Se realizó el histograma de los valores de presión atmosférica, registrados durante un mes en la Sierra Negra, en dicho gráfico se observa una distribución acampanada y simétrica respecto a un valor medio de 625.6 mB, con una desviación estándar $\sigma = 1.1$ tomada como parámetro de error (Figura 4.52).

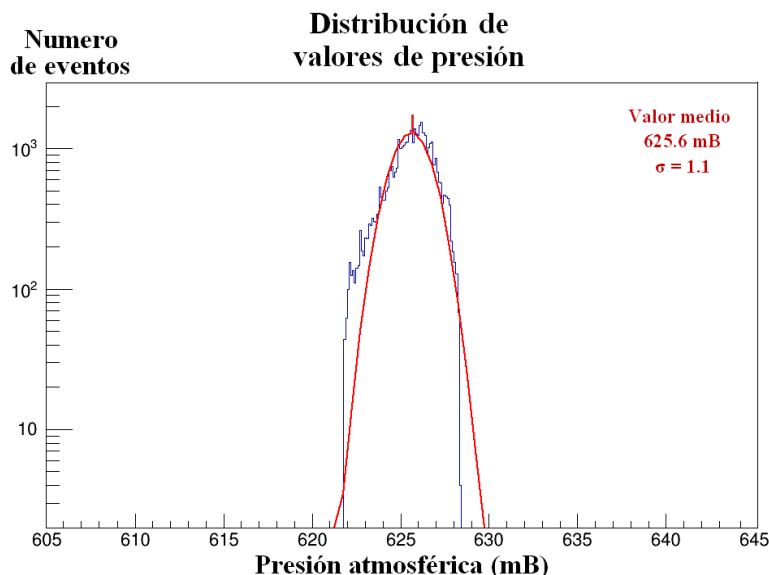


Figura 4.52: Histograma de mediciones de presión atmosférica en Sierra Negra (1 mes).

Gráficas de Conteo - Presión

Se graficaron presión atmosférica y frecuencia de conteo de partículas, con respecto a hora/fecha UTC, por un día, una semana y un mes (Figuras 4.53, 4.54 y 4.55 respectivamente).

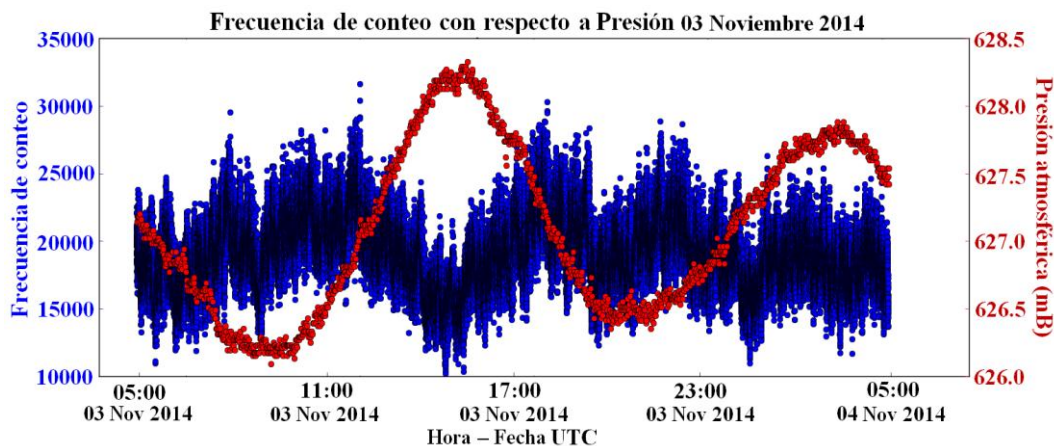


Figura 4.53: Frecuencia de Conteo (azul) - Presión atmosférica (rojo) vs Hora-Fecha (1 día / Sierra Negra). Se tomaron como muestra los datos del 03 de Noviembre del 2014.

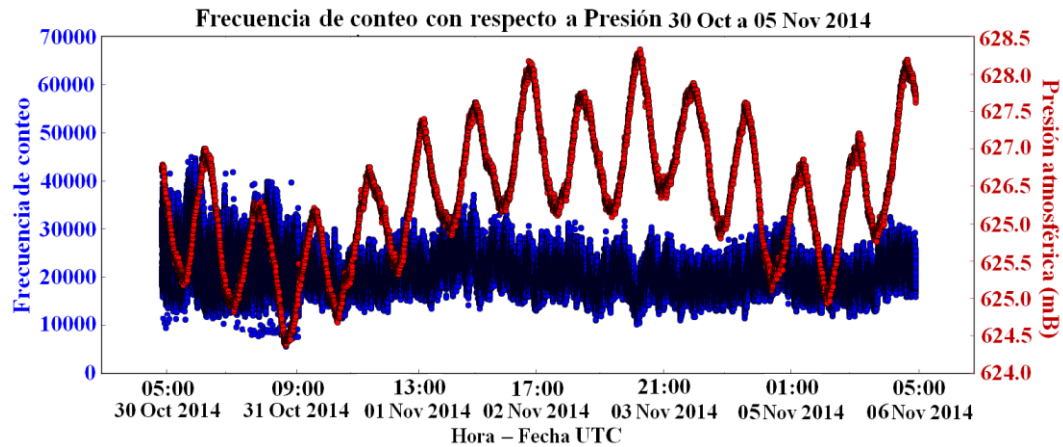


Figura 4.54: Frecuencia de Conteo (azul) - Presión atmosférica (rojo) vs Hora-Fecha (1 semana / Sierra Negra). Se tomaron como muestra los datos del 30 de Octubre al 05 de Noviembre del 2014.

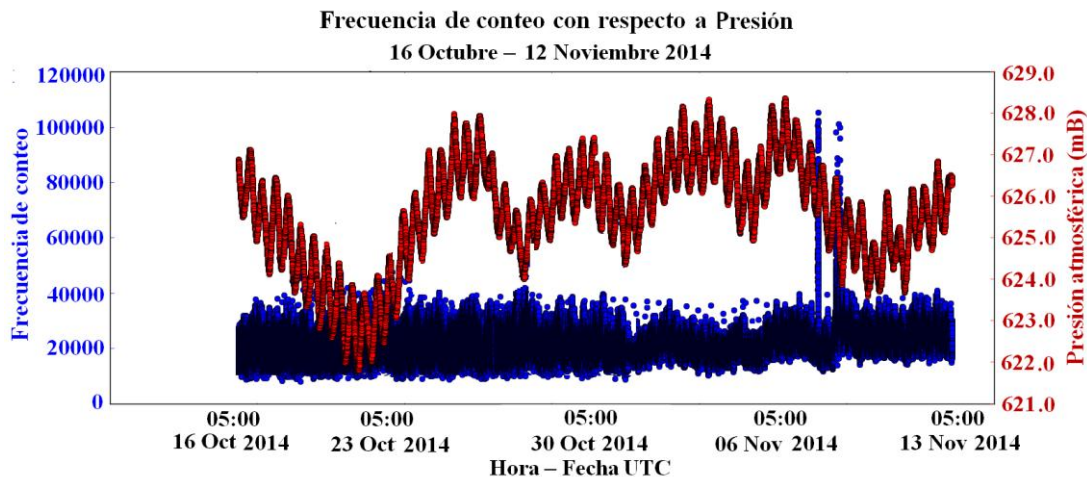


Figura 4.55: Frecuencia de Conteo (azul) - Presión atmosférica (rojo) vs Hora-Fecha (1 mes / Sierra Negra). Se muestran los datos del 16 de Octubre al 12 de Noviembre del 2014.

En las Figuras 4.53 (de un día) y 4.54 (de una semana) se puede observar, que por cada día existen dos armónicos de presión atmosférica, y se ve un comportamiento inversamente proporcional entre presión atmosférica y frecuencia de conteo; para verificar esto, se analizó la relación entre estas 2 variables, en el siguiente apartado.

En la Figura 4.55 (de un mes), se observa que los armónicos por día forman un armónico más grande por semana. Además se observa en la curva de conteo que existió un aumento en la frecuencia de conteo (detallado en la sección 4.6).

Gráfica de Dispersión: Conteo por minuto vs Presión atmosférica

Se realizó una gráfica de dispersión para relacionar la presión atmosférica con el conteo, y se ajustó a una línea recta (Figura 4.56) [86, 88, 89, 90].

La variable en el eje x es la presión medida cada minuto, y la variable en el eje y es el conteo por minuto. Se tomaron los datos de un día de prueba, dentro del mes en el que se hicieron las mediciones. Por la Ecuación 4.2 se obtuvo:

$$a = -96305.3$$

$$b = 61548159.3$$

También se calculó el coeficiente de correlación lineal r . Con el uso de la Ecuación 4.5, se obtuvo el valor de ≈ -0.6 .

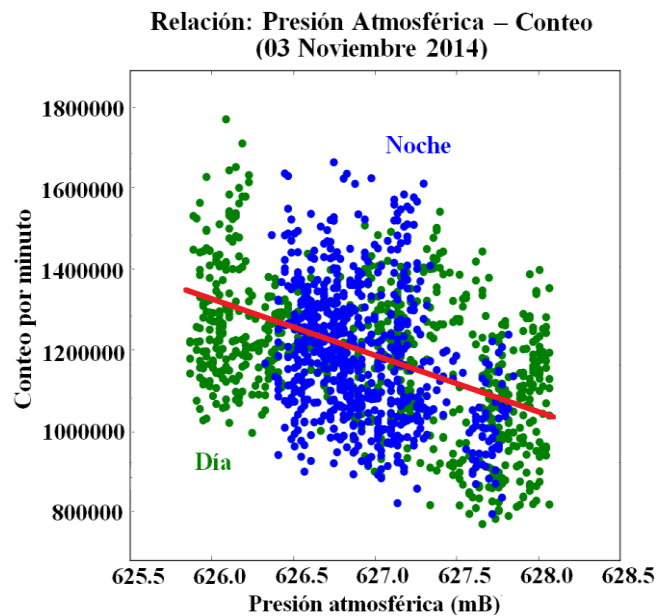


Figura 4.56: Correlación negativa entre presión atmosférica y conteo por minuto (Sierra Negra).

Distribución de frecuencias de señales

Se realizó el histograma de las frecuencias de conteo, registradas durante un mes en Sierra Negra con el Detector Cherenkov construido en este trabajo (de área $\approx 4 \text{ m}^2$), obteniendo una distribución simétrica respecto a un valor medio aproximado de 22623 partículas/seg (Figura 4.57), lo que equivale a ≈ 5656 partículas / (m^2seg).

Gracias a otros experimentos realizados, se conoce que para la altitud de Sierra Negra (4600 msnm), el fondo esperado de conteo de partículas es ≈ 5600 partículas / (m²seg). Por lo que se obtuvo una medición confiable con el sistema desarrollado en esta Tesis, con respecto a los datos de detectores con funcionamiento comprobado.

A partir del nivel esperado de conteo de fondo en cada altura, si existe un evento energético que produzca un exceso de partículas secundarias se puede registrar un aumento sobre el conteo de fondo [91, 92, 93].

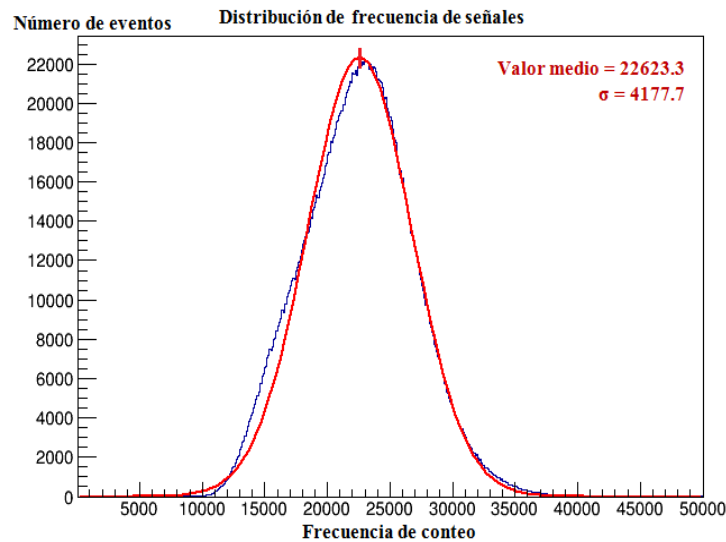


Figura 4.57: Histograma de valores de frecuencia de conteo en Sierra Negra (1 mes), tomando la desviación estándar como parámetro de error.

4.6 Llamarada solar (7 de Noviembre del 2014)

El viernes 7 de Noviembre de 2014 la región 2205 del Sol estalló produciendo una potente llamarada solar con desprendimiento de masa coronal, la explosión se observa en la Figura 4.58.

En la Figura 4.59 se observa la gráfica (de la página www.solarham.net), donde se monitorea la actividad solar, utilizando la escala GOES⁶, y en la que el flujo de rayos X alcanza el nivel de clase X1.6. El evento comenzó a las 16:53 UTC, alcanzó su punto máximo a las 17:26 UTC y terminó a las 17:34 UTC, durando 41 minutos [3e, 4e, 5e].

⁶ El sistema de clasificación GOES (Geostationary Operational Environment Satellites) clasifica las llamaradas solares basado en su flujo de rayos X, en Watts/m² [94].

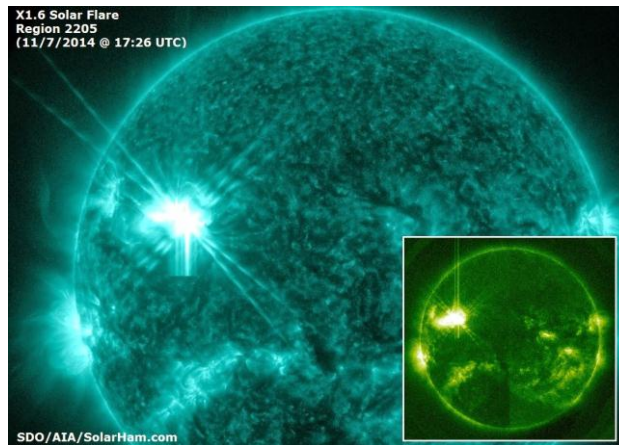


Figura 4.58: Imagen de la llamarada solar del 7 de Nov, tomada con la sonda SDO (Solar Dynamics Observatory) [3e].

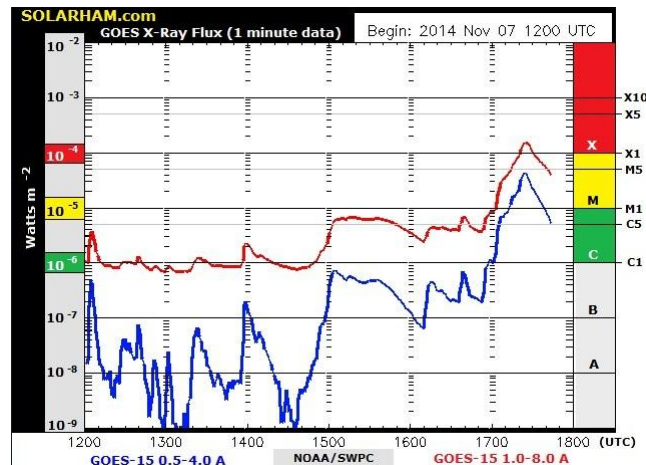


Figura 4.59: Flujo de rayos X que excedió la categoría X en la escala GOES [3e].

Las llamaradas solares arriban a la Tierra en aproximadamente 8 minutos, por medio de explosiones en forma de ondas de radio, hasta rayos X y gamma (dependiendo de la energía del evento), y sus efectos duran de 1 a 2 horas. Cuando existen rayos X, como en el caso de la llamarada mencionada, estos despojan electrones de los átomos en la ionósfera produciendo un repentino incremento en el contenido total de electrones.

Las eyecciones de masa coronal llegan a la Tierra de 2 a 4 días después del evento, y su efecto dura horas o días. Las eyecciones de masa coronal consisten en plasma cargado de partículas de baja a media energía con un campo magnético.

La radiación de la llamarada X1.6 ionizó las capas superiores de la atmósfera terrestre, y se esperaba que el impacto de la bengala produjera una degradación de corta duración en las

comunicaciones de radio, y en el funcionamiento de satélites y radares. Se esperaba que los impactos duraran menos de una hora desde el inicio del evento [95, 4e].

En la Figura 4.60 se observa la región del planeta que fue afectada por la radiación de la llamarada, notando que México estuvo incluido. Para conocer más efectos de las llamaradas solares y eyecciones de masa coronal sobre la Tierra, ver [95].

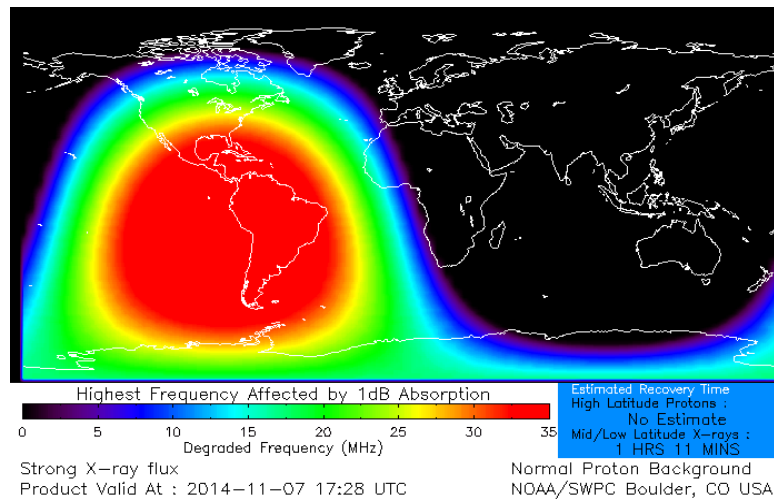


Figura 4.60: Máximas frecuencias de radio afectadas por la absorción de la radiación de la llamarada X1.6 en el lado diurno de la Tierra [3e].

4.7 Evento detectado (7 - 8 de Noviembre del 2014)

El mismo día 7 de Noviembre, con el sistema construido en esta Tesis y con el Detector Cherenkov de Agua instalado en Sierra Negra a 4600 msnm, se tenía una tasa de conteo de señales estable de ~ 20000 , y se registró un aumento repentino que alcanzó una tasa de hasta ~ 110000 (Figura 4.61), y que comenzó a las 17:17/UTC (alrededor de 24 minutos después del inicio de la llamarada), y finalizó a las 17:55/UTC, con tiempo de duración de 38 minutos, similar al de la llamarada.

En la Figura 4.62 se observa que el día 8 de Noviembre se detectó un aumento de una tasa de conteo entre 20000 a 40000 hasta una tasa mayor a 100000, con duración de 4 horas 20 minutos, que inició a las 16:00 UTC y finalizó a las 20:20 UTC. No se han encontrado referencias a un evento espacial específico en esa fecha, quizá se debió a una continuación del evento del día anterior, ya que la región 2205 continuó produciendo llamaradas clase M, y todavía tuvo aproximadamente 10 días en el disco visible [3e, 4e].

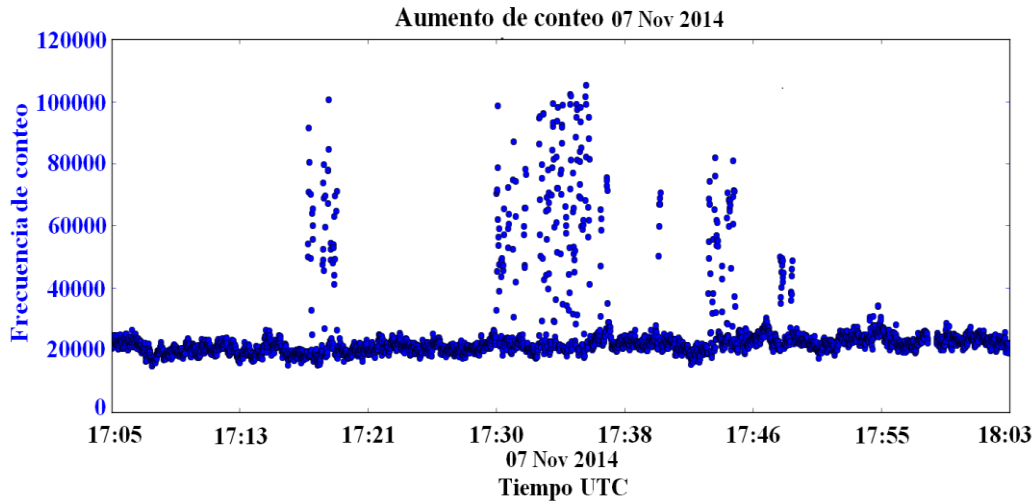


Figura 4.61: Aumento de conteo de partículas / siete de Noviembre del 2014.

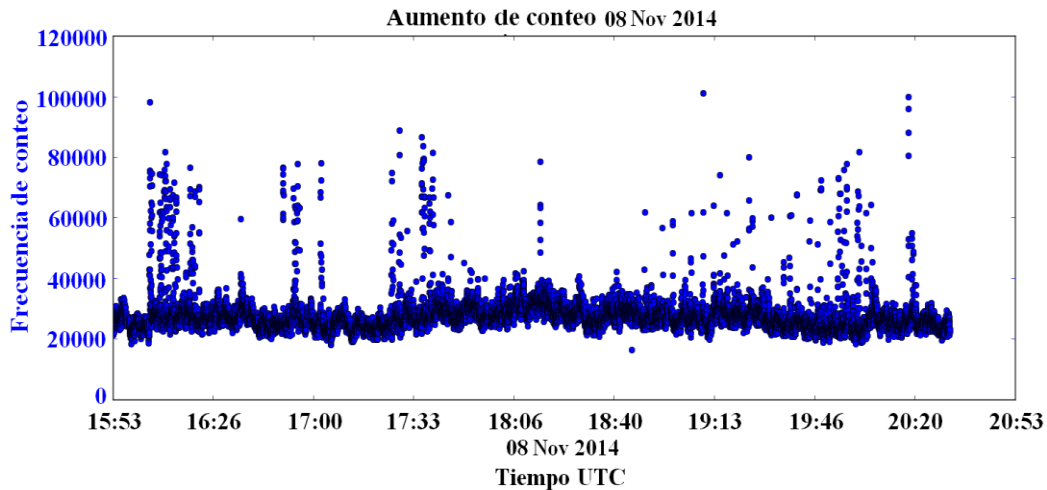


Figura 4.62: Aumento de conteo de partículas / ocho de Noviembre del 2014.

Es prudente aclarar que no se está afirmando que las detecciones realizadas con el detector construido en este trabajo correspondan a los eventos de la llamarada solar X1.6, solo se presenta la información de los dos sucesos y las coincidencias en fecha y duración. Todavía se deben realizar más comparaciones con otros detectores de partículas, y más tiempo de observación con el presente sistema, para poder analizar más datos y posibles eventos, y entonces llegar a una conclusión.

Conclusiones

Se desarrolló el hardware y software para el funcionamiento de los sistemas utilizados. Se programó el procesamiento y visualización de datos. Fueron realizadas correctamente las pruebas de caracterización de Tubos. Fotomultiplicadores y el sistema de conteo de partículas. Se realizaron pruebas con los sensores de variables atmosféricas, comparando los resultados con los de sensores comerciales, y se eligieron los 2 sensores programados con menor dispersión. Se instrumentó y puso en funcionamiento el Detector Cherenkov de Agua a 2149 msnm y a 4600 msnm, laborando en condiciones ambientales y de altura extremas. Se realizó el monitoreo y transferencia de los datos obtenidos en las 2 locaciones. Se analizaron los datos de frecuencia de señales de partículas y variables atmosféricas.

Se concluye que el detector y los sistemas trabajan adecuadamente, ya que se corroboró que: la presión atmosférica disminuye con el aumento de la altura; mientras más altura se tiene, existe una mayor tasa de conteo de partículas; a mayor presión, menor tasa de conteo, y a menor presión, mayor tasa de conteo; y se registraron 2 aumentos en la tasa de conteo de partículas.

Todavía se puede obtener más estadística de datos con este experimento, para comparar posibles detecciones, tasas de conteo, variaciones con respecto a variables atmosféricas, y seguir actualizando y complementando los sistemas electrónicos desarrollados en esta Tesis.

Apéndices

A. Programas de Software utilizados

A.1 LabView

LabVIEW es un lenguaje y entorno intuitivo de programación gráfica en el que se pueden crear aplicaciones. Dispone de funciones para controlar tarjetas de adquisición de datos y multitud de instrumentos de test y medida [66, 96].

En este trabajo las funciones de LabVIEW se utilizaron para desarrollar el sistema de adquisición y procesamiento de datos, provenientes de la pantalla del osciloscopio, al realizar las pruebas de caracterización de los Tubos Fotomultiplicadores.

A.2 VHDL

El lenguaje de descripción de hardware VHDL se utilizó en esta tesis, para elaborar el sistema de medición de variables atmosféricas, sincronizarlo con fecha/hora del GPS, y enviar los datos serialmente hacia una PC.

VHDL se utiliza para el diseño de sistemas electrónicos digitales. Cuando se escribe un código, se debe compilar, para esto el programa analiza el código y determina los errores de sintaxis y chequea la compatibilidad entre módulos. Al terminar el paso anterior, se pueden crear bancos de prueba para verificar que el circuito trabaja como se desea. Finalmente se sintetizan las descripciones y se obtiene una salida apta para su posterior implementación en dispositivos como los FPGA. En la siguiente lista se observan algunas características de este lenguaje de programación:

- Es un lenguaje portable.
- Es posible la reutilización de los proyectos.
- Permite el diseño modular y jerárquico.
- Sus sentencias se ejecutan en forma concurrente salvo aquellas que se incluyan dentro de un Proceso o Función donde se ejecutan en forma secuencial [70, 71, 72].

A.3 Python

Python se utilizó para programar la recepción, procesamiento y almacenamiento de los datos enviados serialmente. Algunas características de este lenguaje de programación son:

- No se necesita declarar el tipo de dato de una variable, este puede cambiar si se le asigna un valor de otro tipo.
- Tiene gran cantidad de librerías.
- Las instrucciones secuenciales se escriben de forma indentada [80].

A.4 ROOT

ROOT es un software dirigido al análisis de datos en Física de Altas Energías. En este trabajo, ROOT se utilizó como herramienta para graficar las distribuciones de carga, de las pruebas con los Tubos Fotomultiplicadores. Tiene características como:

- Proporciona una estructura para el acceso rápido de grandes cantidades de datos.
- Cuenta con potentes herramientas de matemáticas y estadística para el análisis.
- Los datos se pueden visualizar como histogramas, funciones de ajuste, etc. [52, 97].

A.5 Matplotlib

Matplotlib es una librería escrita en Python, para hacer gráficas en 2D, con esta herramienta se realizaron las gráficas de correlación entre conteo, las variables atmosféricas y fecha/hora. Algunas de sus características se muestran a continuación.

- Todos los aspectos de la gráfica pueden ser controlados a través del código.
- Se puede trabajar en su propia interfaz o mediante scripts.
- Da un aspecto profesional a las gráficas [82].

A.6 Altium Designer

Altium Designer es un conjunto de programas para diseño electrónico, se utilizó para diseñar diversos circuitos, en el presente trabajo. Algunas de sus características son:

- Captura de diagrama esquemático de un circuito

- Simulación de circuitos electrónicos.
- Contiene miles de librerías de componentes electrónicos.
- Diseño de circuitos impresos.

B. Instrucciones y Protocolos de software utilizados

En Electrónica e Informática, un protocolo es una convención o estándar entre partes que regulan la conexión, sincronización y transferencia de datos entre dos sistemas. Los protocolos pueden ser implementados en hardware, software o combinación de ambos. Si un sistema no tiene sistema de comunicación, se le puede implementar uno [98, 99, 100].

B.1 Instrucciones GPIB

El protocolo GPIB fue diseñado para conectar dispositivos de prueba y medida (por ejemplo multímetros, osciloscopios, etc.) con dispositivos que los controlen, como un ordenador. En el protocolo se definen códigos, formatos, y comandos comunes para todos los instrumentos. La información se transfiere como mensajes ASCII o bloques de datos binarios. La comunicación se realiza enviando dos tipos de mensajes: *Mensajes de dispositivo o de datos*.- contienen información de un dispositivo, como instrucciones de programación, resultados de mediciones, estatus del instrumento y archivos de datos. *Mensajes de Gestión o de comandos*.- algunas de sus funciones son, habilitar y deshabilitar dispositivos, o ajustarlos en modo de programación [63, 64, 65, 96, 100].

B.2 Instrucciones VISA

El estándar VISA es un conjunto de funciones de alto nivel para comunicación In/Out con dispositivos. El software LabVIEW contiene documentación de NI-VISA, la implementación de National Instruments del estándar VISA In/Out. Para una lectura o escritura a un instrumento desde LabVIEW, se requieren 4 funciones principales. *VISA Open*: abre una sesión VISA, haciendo disponibles los recursos del estándar al instrumento. *VISA Write*: envía al instrumento cadenas de comandos (GPIB, en este trabajo). *VISA Read*: recibe los mensajes de datos provenientes del instrumento, con el que se tiene

comunicación. *VISA Close*: cierra la sesión VISA, después de completar la última lectura o escritura. Si un VI es abortado, la sesión VISA no es cerrada automáticamente [63, 64, 96].

B.3 Protocolo SPI

SPI (Serial Peripheral Interface) es un sistema de comunicación serial. A continuación se presentan sus principales características.

- Utiliza una relación de comunicación Maestro-Esclavo entre dos dispositivos.
- La comunicación es full dúplex (bidireccional simultáneamente).
- Transfiere datos en bloques de ocho bits.
- No tiene característica de dar acuse de recibido en la recepción de datos.
- Interconecta cuatro líneas unidireccionales. *SCLK (Serial Clock)*: En esta línea se configura un reloj que sincroniza la comunicación entre el dispositivo maestro y el esclavo. *MOSI (Master-On Slave-In)*: Pin para transferir datos del maestro al esclavo. *MISO (Master-In Slave-On)*: Pin para transferir datos del esclavo al maestro. *Enable o CS (Chip Select)*: Habilita o deshabilita al dispositivo esclavo.

En la Figura B.1 se observa el esquema de una comunicación SPI [98, 99, 101].

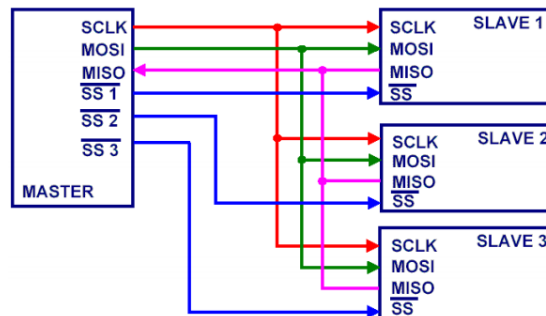


Figura B.1: Esquema de conexión típica de un Bus Serie SPI [98].

B.4 Protocolo I²C

I²C es un sistema de comunicación serial. Ahora se enlistan sus características.

- Utiliza un sistema de comunicación Maestro – Esclavo.
- Es half duplex, es bidireccional pero no simultáneo.
- El maestro inicia la transmisión y genera la señal de reloj.
- Los datos se transmiten en paquetes de 8 bits, con el bit más significativo primero.
- Emite un bit de acuse de recibido, después de transferir un dato de 8 bits, sirve para que el receptor indique que el último byte ha llegado correctamente.
- Los datos se transfieren después de una condición de Start.

- Cuenta con 2 líneas que transportan información entre los dispositivos. *SCL (Serial Clock)*: Línea de reloj que sincroniza la comunicación maestro-esclavo. *SDA (Serial Data)*: Línea para intercambiar información entre maestro y esclavo. Se puede observar el esquema de una comunicación SPI en la Figura B.2 [98, 99, 101].

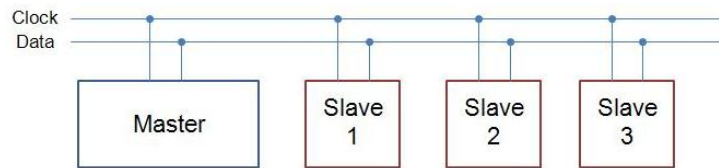


Figura B.2: Esquema de conexión del protocolo I²C.

B.5 Mensajes NMEA

El formato de datos NMEA-0183 permite a los receptores GPS comunicarse con otros equipos electrónicos. Los mensajes de salida NMEA 0183 del GPS pueden proporcionar datos de coordenadas, velocidad, profundidad en el mar, fecha y hora, localización (latitud y longitud), etc. Los mensajes de entrada hacia el GPS se utilizan para configurar la forma en la que se desea recibir información del dispositivo, esto puede ser, descartar mensajes no requeridos, pedir datos específicos cada determinado tiempo, etc [78, 79].

B.6 Comandos Oncore

Estos comandos son utilizables para los primeros receptores Oncore, tal como el GPS R5122U1155 Motorola. Las instrucciones de entrada pueden habilitar, deshabilitar o configurar la salida de datos del GPS (posición, velocidad, tiempo, etc.) [67, 68].

Dichos mensajes tienen la forma: @@Xy# Dato_a_configurar

Ejemplo para establecer la fecha 04/07/2014: @@Ac# 04072014

B.7 Protocolo RS-232

RS232 es un estándar de comunicación para transmitir datos en serie entre equipos. Sus principales características son:

- Enlace full-duplex (intercambio de información, bidireccional y simultáneo).

- Cada caracter transmitido es precedido de un bit de inicio y finaliza con 1 ó 2 bits de parada, esto permite reconocer el comienzo y el final del caracter, al receptor.
- Su distancia máxima de enlace está sobre los 15 metros [96, 98, 101].

C. Características de dispositivos

C.1 Tarjeta Nexys2

- Plataforma basada en una FPGA Spartan 3E.
- 16 Mbytes de RAM y ROM.
- 500,000 compuertas.
- SRAM asíncrona de alta velocidad.
- Conector de alimentación de 5V.
- Opciones de voltaje de salida (3.3V, 5V).
- LED indicador de encendido.
- Puerto mini USB2 para alimentación y programación desde la PC
- Configuración de la FPGA mediante Adept Suite Software.
- Programación con PC. Si se apaga y enciende la tarjeta, la configuración se pierde.
- Programación con Plataforma ROM Flash. Si se apaga y enciende la tarjeta, mantiene la última configuración.
- Led indicador de programación exitosa del dispositivo.
- Cristal oscilador que proporciona un pulso de reloj de 50MHz.
- Conector para la conexión de un cristal oscilador auxiliar.
- Puerto de conexión VGA.
- Puerto de conexión serie RS232 (conector hembra DB9 modo DCE).
- Convertidor de niveles de voltaje en transmisión/recepción RS232.
- Puerto de conexión PS/2 para teclado y ratón.
- Cuatro conectores de expansión Pmod (JA, JB, CJ Y JD).
- Cuatro desplegados de siete segmentos led.
- Cuatro interruptores de contacto momentáneo.
- Ocho interruptores de deslizamiento.
- Ocho salidas led.

Para mayor información dirigirse al manual técnico del dispositivo [73].

C.2 Sensor MPL115A1

- Sensor de presión MEMS con un Circuito Integrado.
- Interfaz de comunicación serial SPI.
- Rango de voltaje de alimentación: +2.375 V a +5.5 V
- Rango de voltaje de trabajo: -0.3 V a +5.5 V.
- Consumo de corriente de 5 μ A durante modo activo y 1 μ A en modo inactivo.
- Convertidor Analógico-Digital integrado.
- Frecuencia máxima de trabajo de 8 Mhz.
- Rango de Temperatura de trabajo: -40°C a +105°C.
- Rango de Presión atmosférica de trabajo: 50 a 115kPa (500 a 1150 mB).
- Exactitud de ± 1 kPa
- Resolución de 0.15kPa en lecturas de presión atmosférica.
- Coeficientes de calibración de datos almacenados en una ROM interna.
- Resolución digital de 10 bits.
- El encapsulado cuenta con 8 pines:

VDD. Conexión a fuente de alimentación.

GND. Conexión a tierra.

CAP. Capacitor externo. Conecta un capacitor cerámico de 1 μ F a tierra.

SHDN (activo bajo). Shutdown. Se conecta a tierra para deshabilitar el dispositivo, o se conecta a VDD para operación normal.

CS (activo bajo). Línea de selección de chip.

SCLK. Reloj serial para la comunicación.

DOUT. Salida serial de datos (llamado MISO, en este trabajo).

DIN. Entrada serial de datos (llamado MOSI en este trabajo).

En la Figura C.1 se observa el esquema del sensor.

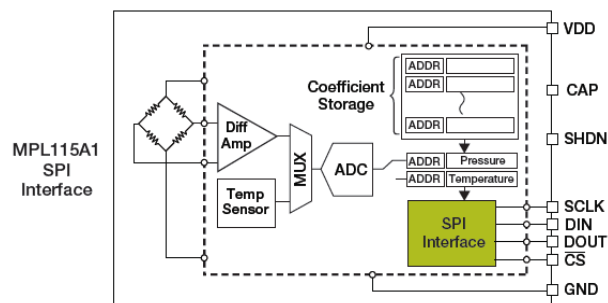


Figura C.1: Esquema del MPL115A1.

Para más detalles del dispositivo, referirse a su hoja de datos [74].

C.3 Sensor BMP085

- Sensor piezo-resistivo.
- Unidad de control con E²PROM.
- Interfaz de comunicación serial I2C.
- Rango de voltaje de alimentación: +1.8 a +3.6 V.
- Consumo de corriente de 5 μ A en modo normal.
- Convertidor Analógico – Digital integrado.
- Frecuencia máxima de trabajo: 3.4 Mhz.
- Rango de presión de trabajo: 300 a 1100 hPa.
- Rango de temperatura de trabajo: -40 a +85 °C.
- Exactitud de ± 1 hP (presión) y ± 0.5 °C (temperatura).
- Resolución de datos de salida: 0.01 hPa (presión) y 0.1 °C (temperatura).
- Valores de presión y temperatura descompensados.
- 176 bits (divididos en 11 bytes) de datos de calibración individual, almacenados en la E²PROM (utilizados para compensar las mediciones digitales).
- Resolución digital de 16 a 19 bits para presión, y 16 bits para temperatura.
- Descripción de pines:

VDD: En este pin se proporciona un voltaje de alimentación.

GND: conexión a tierra.

SDA: Este pin es bidireccional, y a través de él, se manda la secuencia necesaria desde el programador, hacia el sensor, para indicar una acción al sensor. Y también se pueden recibir datos provenientes del sensor.

SCL: Es la línea de reloj que controla la frecuencia de trabajo del sensor.

XCLR: Este pin sirve para resetear el sensor, es activo bajo.

EOC: La línea EOC anuncia el final de la conversión analógico – digital del dato requerido (presión o temperatura), mandando un '1' lógico hacia el programador.

En la Figura C.2 se muestra el diagrama eléctrico del BMP085.

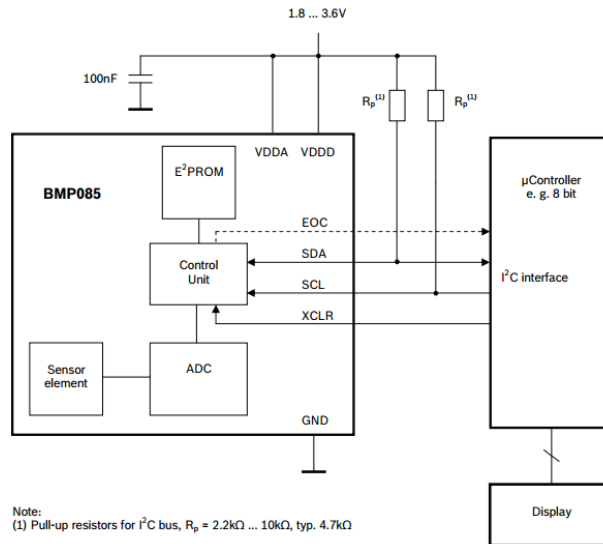


Figura C.2: Esquema del sensor BMP085.

Para mayor información referirse al manual técnico del dispositivo [75].

C.4 Sensor HHT02D

- Chip con sensores, de humedad relativa y temperatura con salida digital.
- Interfaz serial de 2 cables.
- Rango de voltaje de alimentación: 2.4 V a 5.5 V.
- Regulación de tensión interna.
- Convertidor digital de 14bits.
- Rango de temperatura de trabajo: $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $123.8\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Rango de humedad relativa de trabajo: 0 a 100%.
- Exactitud en humedad de $\pm 4.5\text{ \%RH}$, y $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en temperatura.
- Resolución de datos de salida: 0.01 para temperatura y 0.5/0.03/0.03 para humedad relativa.
- Resolución digital de 12 bits para temperatura, y 8/12/14 bits para humedad.
- Pines del sensor.

VDD. Voltaje de alimentación de entrada

GND. Conexión a tierra.

Entrada de reloj serie (SCK). Se utiliza para sincronizar la comunicación entre un dispositivo controlador y el sensor.

Línea de datos (DATA). El pin de datos se utiliza para transferir datos dentro y fuera del dispositivo. Los datos se cambian después del flanco de bajada y se validan en el flanco ascendente de la serie SCK reloj. Este pin se debe conectar con una resistencia de 10 Kohms a Vdd.

- La interfaz del HHT02D no es compatible con las interfaces I2C.

A continuación se muestra el diagrama del sensor (Figura C.3).

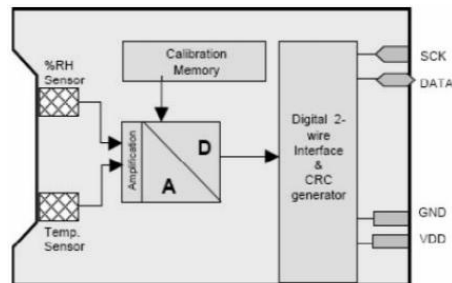


Figura C.3: Esquema del sensor HHT02D.

Para mayor información del sensor revisar su hoja de especificaciones [76].

C.5 GPS EM-408

- Chip SiRF Star III.
- Voltaje de entrada de 3.3 V.
- Consumo de corriente en modo continuo: 75 mA.
- Niveles eléctricos TTL.
- Rango de voltaje de salida: 0 V a 2.85 V.
- Temperatura de operación: -40 °C a +85 °C.
- Conexión para antena externa (opcional).
- 20 canales para rastreo paralelo de satélites.
- Frecuencia: L1, 1575.42 Mhz.
- Tasa de buadíos: 4800 a 57600 bps (ajustable).
- Formato de tiempo de salida: UTC.
- Protocolo de mensajes entrada/salida: SiRF binary ó NMEA 0183.
- Descripción de pines.

VIN. Conexión a fuente de 3.3 V.

GND. Conexión de tierra para la placa.

GPS-TX. Por este canal se transmite información desde el GPS hacia el programa controlador.

GPS-RX. Este es el canal por el que se reciben instrucciones desde el controlador hacia el GPS.

Enable/Disable. Habilita o deshabilita al dispositivo.

Más información el dispositivo en su hoja de descripción [77].

C.6 GPS R5122U1155 Motorola

- Entrada/salida serial usando Comandos Oncore (comandos binarios Motorola).
- 8 canales para rastreo paralelo de satélites.
- Conexión para antena externa.
- Voltaje de alimentación: 4.75 a 5.25 V
- Consumo de corriente típico: 155 mA (sin antena).
- Interfaz de programación mediante la aplicación: GPS display.
- Formato de tiempo de salida: UTC.
- Descripción de pines.

BATT. Alimentación de respaldo aplicada externamente.

PWR. Alimentación principal

GND. Tierra

VPP. Reprogramando voltaje.

N/A. No usado

1PPS. Pulso para confirmar correcta comunicación.

1PPS RTN. Retorno de pulso de correcta comunicación

TTL TXD1. Salida de datos primaria.

TTL RXD1. Entrada de datos primaria.

TTL RTN. Retorno

Más información el dispositivo en su hoja de descripción [67].

C.7 Tarjeta de conteo

- Diseño realizado para funcionar en conjunto a una tarjeta Nexys 2.
- 4 canales de señal de entrada (conectores lemo).

- 4 Convertidores Analógico – Digital AD9216 (uno por canal).
- Rango dinámico de conversión de -1 V a +1 V (Tabla C.1).
- Razón de conversión de hasta 100MS/s.
- 4 amplificadores diferenciales AD8138 (uno por canal).
- Resolución digital de 10 bits.

Valor binario de salida	(V _{in+}) - (V _{in-})	Salida con desplazamiento binario
1023	$\geq + 0.998 \text{ V}$	11 1111 1111
1022	+ 0.996	11 1111 1110
:	:	:
513	+ 0.002 V	10 0000 0001
512	0.0 V	10 0000 0000
511	- 0.002 V	01 1111 1111
:	:	:
1	- 0.998 V	00 0000 0001
0	$\leq - 1.0 \text{ V}$	00 0000 0000

Tabla C.1: Equivalencia de conversión de salida de la tarjeta de conteo.

C.8 Tubo Fotomultiplicador 9453KFLB

- Máximo voltaje de alimentación: 2350 V.
- Máxima corriente de cátodo: 1500 nA.
- Máxima corriente de ánodo: 100 μA .
- Ganancia típica: 7×10^6 .
- Ganancia máxima: 30×10^6 .
- Rango de sensibilidad de luz: azul-verde.
- Espectro de respuesta: 275-630 nm.
- Eficiencia cuántica: 30%
- Dinodos de SbCs de enfoque lineal.
- Número de dinodos: 12.
- Diseño resistente al agua.

C.9 Tubo Fotomultiplicador R1463

- Máximo voltaje de alimentación: 1250 V.
- Corriente de ánodo: 0.03 mA
- Corriente de cátodo: 100 nA.
- Ganancia: 1×10^6 .
- Espectro de respuesta: 185 a 850 nm.
- Eficiencia cuántica: 19%.
- Número de dinodos: 10

D Cálculos de valores de variables atmosféricas

Cuando se recibieron los coeficientes de compensación y los datos de las mediciones en el equipo de cómputo, se realizaron los cálculos correspondientes, extraídos de las hojas de especificaciones de los sensores.

Sensor MPL115A1

Se presentan las operaciones para obtener la presión atmosférica y la temperatura [74].

$$c12x2 = c12 * Tadc$$

$$a1 = b1 + c12x2$$

$$a1x1 = a1 * Padc$$

$$y1 = a0 + a1x1$$

$$a2x2 = b2 * Tadc$$

$$Pcomp = y1 + a2x2$$

$$\text{Presión (kPa)} = P_{\text{comp}} * \left(\frac{115 - 50}{1023} \right) + 50$$

Donde

Tadc es la salida (del registro ADC interno del sensor) de temperatura de 10 bits

Padc es la salida (del registro ADC interno del sensor) de presión de 10 bits

a0 es el coeficiente de offset de presión.

b1 es el coeficiente de sensibilidad de presión.

b2 es el coeficiente de offset de temperatura.

c12 es el coeficiente de sensibilidad de temperatura.

Los coeficientes *a0*, *b1*, *b2* tienen una longitud de 16 bits, en cada uno de ellos su primer bit es de signo. Si el primer bit es cero, los números binarios solo se deben convertir a decimal, tomando en cuenta cuales bits son enteros y cuales son fraccionales; pero si el primer bit es 1, los bits restantes se deben convertir a decimal con notación de complemento a 2.

El caso del coeficiente *c12* es similar, pero solo cuenta con 14 bits (el primero es de signo), y los otros 13 bits son fraccionales.

Los valores *Padc* y *Tadc* solo tienen 10 bits enteros, y no tienen bit de signo. A continuación, se presenta un ejemplo de cálculo de presión atmosférica compensada, con los datos de una medición. Los valores leídos fueron los siguientes:

$$a0 = 0100001111110101$$

$$b1 = 1010110101101110$$

$$b2 = 1011110011011110$$

$$c12 = 00111101010001$$

$$Padc = 1000101110 = 558$$

$$Tadc = 1000000101 = 517$$

Gracias a las especificaciones de conversión se obtienen los siguientes valores:

$$a0 = 2174.625$$

$$b1 = -10.1001010010010 = -2.580322265$$

$$b2 = -1.00001100100010 = -1.048950195$$

$$c12 = 0.000934836$$

P_{comp} se calcula como sigue:

$$P_{comp} = a_0 + [(b_1 + c_{12} * T_{adc}) * P_{adc}] + (b_2 * T_{adc})$$

$$c_{12} * T_{adc} = (0.000934836) * (517) = 0.48331021$$

$$a_1 = b_1 + c_2 * T_{adc} = -2.09701205$$

$$a_1 * P_{adc} = (-2.09701205) * (558) = -1170.13273$$

$$y_1 = a_0 + (a_1 * P_{adc}) = 2174.625 - 1170.13273 = 1004.49227$$

$$b_2 * T_{adc} = (-1.048950195) * (517) = -542.307251$$

$$P_{comp} = y_1 + (b_2 * T_{adc}) = 1004.49227 - 542.307251 = 462.185024$$

P_{comp} produce un valor de 0 con una presión de 50 kPa de entrada, y produce un valor de escala completa de 1023 con una presión de 115 kPa. Finalmente:

$$\textbf{Presión} = (462.185024) * (0.063538611) + 50 = 79.366594 \text{ kPa} = 793.66594 \text{ mB}$$

Para la temperatura, se considera el rango de Temperatura de trabajo del sensor:

$$RangoT = 105^\circ\text{C} - (-40^\circ\text{C}) = 105^\circ\text{C} + 40^\circ\text{C} = 145^\circ\text{C}$$

El rango anterior se divide entre 1024, ya que al tener resolución digital de 10 bits el sensor, las posibles combinaciones de valores que tome son: $2^{10} = 1024$.

Este resultado se multiplica por T_{adc} :

$$\left(\frac{145}{1024}\right) * T_{adc} = 0.1416 * (517) = 73^\circ\text{F}$$

$$\textbf{Temperatura} = [73 - 32] * \frac{5}{9} = 22.77^\circ\text{C}$$

Sensor BMP085

Primero los coeficientes leídos del sensor se convierten a valores decimales (Tabla D.1):

Coefficiente	Formato binario	Tipo	Valor decimal
AC1	0010000000011001	Short	8217
AC2	111101100100011	Short	-1244
AC3	1100011101001011	Short	-14516
AC4	1000001111111001	Unsigned short	33785
AC5	0110000000111001	Unsigned short	24633
AC6	0101001011101000	Unsigned short	21224
B1	000101001011101000	Short	5498
B2	0000000001000100	Short	68
MB	1000000000000000	Short	-32767
MC	1101010010111101	Short	-11074
MD	0000100110000000	Short	2432
Mediciones obtenidas			
UT	0111011010000100		30340
UP	1000011111111011		34808

Tabla D.1: Coeficientes y mediciones obtenidas, del sensor BMP085.

Ahora se presenta un ejemplo del cálculo de presión atmosférica y temperatura [69].

Para la temperatura:

$$X1 = \frac{[(UT - AC6) * AC5]}{32768} = 6974.639$$

$$X2 = \frac{(MC * 2048)}{(X1 + MD)} = -2411.0154$$

$$B5 = X1 + X2 = 4563.6235$$

$$\text{Temperatura} = \frac{(B5 + 8)}{16} = 285.7264 * (0.1^{\circ}\text{C}) = 28.5726^{\circ}\text{C}$$

Y el cálculo de la presión:

$$B6 = B5 - 4000 = 563.6235$$

$$X1 = \frac{\left[B2 * \left(\frac{B6 * B6}{4096} \right) \right]}{2048} = 2.5751$$

$$X2 = \frac{AC2 * B6}{2048} = -342.3572$$

$$X3 = X1 + X2 = -339.7821$$

$$B3 = \frac{[(AC1 * 4) + X3 + 2]}{4} = 8132.5544$$

$$X1' = \frac{AC3 * B6}{8192} = -998.7254$$

$$X2' = \frac{\left[B1 * \left(\frac{B6 * B6}{4096} \right) \right]}{65536} = 6.5064$$

$$X3' = \frac{[X1' + X2' + 2]}{4} = -247.5547$$

$$B4 = \frac{AC4 * (\text{unsigned long}) * (X3' + 32768)}{32768} = 33529.7621$$

$$B7 = [(\text{unsigned long})UP - B3] * 50000 = 1333772280$$

$$p = \frac{B7 * 2}{B4} = \frac{1333772280 * 2}{33529.7621} = 79557.5152$$

$$X1'' = \left(\frac{p}{256} \right)^2 = 96578.9525$$

$$Y = \frac{(X1'') * 3038}{65536} = 4477.0333$$

$$Y2 = \frac{-7357 * P}{65536} = -8931.04$$

$$\text{Presión} = \frac{p + Y1 + Y2 + 3791}{16} = 79516.0772 \text{ Pa} = 79.516 \text{ kPa} = 795.16 \text{ mB}$$

Sensor HHT02D

A diferencia, de los sensores anteriores, en este caso, los coeficientes de compensación son constantes para todos los encapsulados HHT02D (Tabla D.2):

Temperatura	Humedad
d1 = -39.65	c1 = -2.0468
d2 = 0.01	c2 = 0.0367
d3 = -0.00000002	c3 = 0.0000015955
g = 7000	

Tabla D.2: Coeficientes de compensación del sensor HHT02D.

Se muestran las operaciones, para obtener la humedad y temperatura finales, con valores obtenidos en una medición de prueba [76, 81].

$$Temperatura = d1 + (d2 * T_{dig}) + d3 * (T_{dig} - g)^2$$

T_{dig} es la temperatura digital medida por el sensor:

$$T_{dig} = 011001\ 01010001 = 6481$$

$$\begin{aligned} Temperatura &= -39.65 + (0.01 * 6481) + (-0.00000002) * (6481 - 7000)^2 \\ &= 25.1546\ ^\circ C \end{aligned}$$

y

$$RH\ lineal\ (Humedad\ Relativa\ lineal) = c1 + (c2 * H_{dig}) + c3 * (T_{dig})^2$$

H_{dig} es la humedad digital medida por el sensor:

$$H_{dig} = 0100\ 00010101 = 1045$$

$$\begin{aligned} RH\ lineal &= -2.0468 + (0.0367 * 1045) + (-0.0000015955) * (1045)^2 \\ &= 34.5623\ \%RH \end{aligned}$$



E Acrónimos

ASCII: American Standard Code for Information Interchange.

CAE: Cascadas Atmosféricas Extendidas, en inglés EAS (Extensive Air Shower).

CSN: Consorcio Sierra Negra

FPGA: Field Programmable Gate Array.

GOES: Geostationary Operational Environment Satellites.

GPIO: General Purpose Interface Bus.

GRB: Gamma Rays Burst.

HAWC: High Altitude Water Cherenkov.

I²C: Inter Integrated Circuit

LabVIEW: Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench.

LAGO: Large Aperture GRB Observatory.

MILAGRO: Multi Institutional Los Alamos Gamma Ray Observatory

MSB: More Significant Byte.

NMEA: National Marine Electronics Association.

RS232: Recommended Standard 232C.

SPI: Serial Peripheral Interface.

UTC: adaptación entre el inglés Coordinated Universal Time y el francés Temps Universel Coordonné.

VHDL: VHSIC (Very High Speed Integrated Circuit) Hardware Description Language.

VISA: Virtual Instrument Software Architecture.



Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] Yunior F. Pérez, *Caracterización de Detectores Cherenkov en el Proyecto LAGO (Large Aperture GRB Observatory)*, Universidad de Los Andes (Mérida, Venezuela), 2009.
- [2] Julián Ascolani, César Clauser, *Caracterización del detector Cherenkov del Centro Atómico Bariloche, determinación del tiempo de vida media del muón en agua y espectro de Mitchell*, Instituto Balseiro CNEA, 1 de octubre de 2010.
- [3] L. I. Dorman, *Cosmic Rays – Variations and space explorations*, North Holland Publishing Company, 1974.
- [4] Flavia Alejandra Gómez Albarracín, *Estudio de la composición de rayos cósmicos de ultra alta energía en el Observatorio Pierre Auger*, Universidad Nacional de la Plata, Facultad de Ciencias Exactas, La Plata 2011.
- [5] Thomas O'Halloram et al, *The Highest-Energy Cosmic Rays*, January 1998, Physics Today.
- [6] A. R. Morales, *Characterization through simulation of air and water Cerenkov detectors to hybrid arrays*, 33RD International Cosmic Ray Conference, Rio de Janeiro, 2013.
- [7] Juan Cruz Moreno, *Estudio de rayos cósmicos ultraenergéticos en el Observatorio Pierre Auger: Nuevo modelo de profundidad atmosférica y su influencia en observables*, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Exactas – Departamento de Física, Abril de 2012.
- [8] Yupeng Xu, *Search for TeV-Antiprotons in Space from the Shadow of Cosmic Rays by the Moon with the L3+C Detector*, 2005.
- [9] Xavier Bertou et al, *Physics of extremely high energy cosmic rays*, Laboratoire de Physique Nucléaire et des Hautes Energies, 29 Jan 2000.
- [10] Carlo Morello, *Cosmic Ray Detectors*, Instituto di Fisica dello Spazio Interplanetario, 4th School on Cosmic Rays and Astrophysics, Sao Paulo, Brazil, 2010.
- [11] Karl-Heinz Kampert, *Cosmic Rays and Particle Physics*, Symposium on Fundamental Issues in Elementary Matter, 18 Jan 2001.
- [12] D. Allard, *The Large Aperture GRB Observatory*, Comunicación de trabajo-Contributed Paper, Asociación Argentina de Astronomía, 2006.
- [13] A. Velarde, R. Ticona, P. Miranda, H. Rivera, J. Quispe, *Proyecto LAGO Bolivia*, Revista Boliviana de Física v.15 n.15 La Paz 2009, Instituto de Investigaciones Físicas Universidad Mayor de San Andrés.



- [14] Hernán Asorey, *Los Detectores Cherenkov del Observatorio Pierre Auger y su aplicación al estudio de fondos de radiación*, Partículas y Campos – Centro Atómico Bariloche, 2012.
- [15] M. Y. Liu et al, *Using the single particle technique search for GRBs in Tibet at altitude Higher than 5000m*, 33rd International Cosmic Ray Conference, Rio de Janeiro 2013.
- [16] Peter K.F. Grieder, *Cosmic Rays at Earth - Researcher's Reference Manual and Data Book*, Elseiver, First edition, 2001.
- [17] R. Atkins, *TeV Gamma-Ray Survey of the Northern Hemisphere sky using the MILAGRO Observatory*, The Astrophysical Journal, The American Astronomical Society, 2004 June 20.
- [18] M. M. Gonzalez for the HAWC Collaboration, *Observing the universe at TeV energies with the HAWC observatory*, 30TH International Cosmic Ray Conference, Mérida, México, 2007.
- [19] ET Enterprise – electron tubes, *The effect of exposure to helium on photomultiplier performance and lifetime*, technical reprint, 2012.
- [20] *Photomultiplier Tubes, principles & applications*, Re-edited September 2002vby S-O Flyckt and Carole Marmonier, Photonis, Brive, France.
- [21] Y. I. Stozhkov et al, *Cosmic Ray Measurements in the atmosphere*, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.
- [22] N. C. Lindy et al, *The Cosmic-Ray Extensive Air Shower Environment of Thunderstorms*, Radiation Physics Laboratory, Oklahoma State University. School of Meteorology, University of Oklahoma.
- [23] MK Daniel for the CTA Consortium, *The Atmospheric Monitoring Strategy for the Cherenkov Telescope Array*, Department of Physics, University of Liverpool, L69 7ZE, UK, 15 January 2015.
- [24] A. De Castro for the LAGO Collaboration, *Water Cherenkov Detectors response to a Gamma Ray Burst in the Large Aperture GRB Observatory*, Laboratorio de Física Nuclear, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela, 2009.
- [25] Antonio Marinelli et al, *Scientific verification of High Altitude Water Cherenkov observatory*, paper on Roma International Conference on AstroParticle Physics, 2013.
- [26] M. M. González for the HAWC Collaboration, *The High Altitude Water Cherenkov observatory, HAWC. Design and Performance*, Proceedings of the 31st ICRC, ŁÓDZ 2009.
- [27] Xavier Bertou for the LAGO Collaboration, *The Large Aperture GRB Observatory*, Centro Atómico Bariloche, CNEA-CONICET, Argentina, Proceedings of the 31st International Cosmic Ray Conference, Łódz 2009.
- [28] D. Allard et al, *Use of Water Cherenkov Detectors to detect Gamma Ray Burst at the Large Aperture GRB Observatory*, LAGO Collaboration, 9 March 2008.



- [29] J. Abraham et al., *Properties and Performance of the Prototype Instruments for the Pierre Auger Observatory*, Nuclear Instruments & Methods in Physics Research - Section A, Ed. Elsevier, 2003.
- [30] J. Cotzomi et al., *The water Cherenkov detector array for studies of cosmic rays at the University of Puebla*, Nuclear Instruments & Methods in Physics Research - Section A, Ed. Elsevier, 2005.
- [31] O. Martínez et al, *Hybrid Extensive Air Shower Detector Array at the University of Puebla to Study Cosmic Rays*, 29th International Cosmic Ray Conference Pune, 2005.
- [32] E. Pérez et al, *Electronics and data acquisition system of the extensive air shower detector array at the University of Puebla*, 30th International Cosmic Ray Conference, Mérida México.
- [33] H. Salazar^a, L. Villaseñor^b, *Astroparticle Physics: Detectors for Cosmic Rays*, ^aFacultad de Ciencias Físico-Matemáticas, BUAP, ^bInstitute of Physics and Mathematics, Universidad Michoacana.
- [34] MIT Department of Physics, *The Speed and Decay of Cosmic-Ray Muons: Experiments in the Relativistic Kinematics of the Universal Speed Limit and Time Dilation*, October 17, 2014.
- [35] Mauricio Suárez Durán, *Manual para el montaje de un detector cherenkov para partículas atómicas*, Universidad de los Andes, Mérida Venezuela, 2010.
- [36] Gilbert Vedrenne and Jean-Luc Atteia, *Gamma-Ray Burst: The Bridgest Explosions in the Universe*, Ed. Springer, UK, 2009.
- [37] Shawqi Al Dallal and Waild J. Azzam, *On the Origin of the Gamma-Ray Burst Redshift Distribution in the Early Universe*, Scientific Research Publishing, Journal of Applied Mathematics and Physics, 2015.
- [38] Tsvi Piran, *Gamma-Ray Burst, the Strongest Explosions in the Universe*, Racah Institute for Physics. The Hebrew University, Jerusalem.
- [39] I. Horváth, *A further study of the BATSE Gamma-Ray Burst duration distribution*, Dept. of Physics, Bolyai Military University, Budapest, Hungary, 2002.
- [40] Sonali Bhatnagar, *Extensive Air Shower High Energy Cosmic Rays (II)*, Department of Physics & Computer Science Dayalbagh Educational Institute, Agra., October-December 2009.
- [41] Peter K. F. Grieder, *Extensive Air Showers: High Energy Phenomena and Astrophysical Aspects – A Tutorial, Reference Manual and Data Book*, Volume I, Ed. Springer, 2010.
- [42] Claus Grupen and Boris Shwartz, *Particle Detectors*, Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology, Second Edition, 2008.

- [43] A. Castellina et al, *Search for GeV gamma ray bursts at Mount Chacaltaya*, Istituto di Cosmo Geofisica del CNR, Torino, Italy; Proceedings of International Cosmic Ray Conference, 2011.
- [44] D. Allard for the Pierre Auger Collaboration, *Detecting GRBs with the Pierre Auger Observatory using the single particle technique*, Kavli Institute of Cosmological Physics and Department of Astronomy and Astrophysics, University of Chicago, USA.
- [45] X. Bertou for the Pierre Auger Collaboration, *Search for Gamma Ray Burst using the single particle technique at the Pierre Auger Observatory*, 2007.
- [46] O. Saavedra et al, *Cosmic Ray Observations at Chacaltaya and Cerro la Negra Combined with the Pierre Auger and Milagro Observatories: GRBs and Search for Cosmic Ray Correlations*, Departamento de Física General and IFN, Torino, Italy, etc.
- [47] G. Aielli et al, *The Status of the ARGO Experiment at YBJ*, Nuclear Physics B, Elsevier, 2006.
- [48] Josie Herman, *Construction and Use of a Cosmic Ray Detector*, McGill University, July 23, 2002.
- [49] José Uvaldo Reyes Serrano, *Instrumentación y caracterización de un sistema de adquisición de datos para una mini gammacámara*, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, Diciembre 2010.
- [50] José Ignacio Crespo Anadón, *Estudio de la emisión de luz en los tubos fotomultiplicadores del experimento Double Chooz*, Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear – Facultad de Ciencias Físicas – Universidad Complutense de Madrid, Trabajo Fin de Master, Curso: 2010-2011.
- [51] David Gómez González, *Contadores de centelleo*, Técnicas instrumentales en química, CC. Ambientales, 2008-09.
- [52] Heberto Pérez González, *Caracterización de Plásticos Centelladores Acoplados a Fibras Ópticas de Corrimiento de Longitud de Onda*, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, Octubre 2010.
- [53] Hamamatsu, *Photomultiplier Tubes – Basics and Applications*, Third Edition.
- [54] Glenn F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, Third Edition, University of Michigan.
- [55] Javier Pérez Pérez, *Caracterización de los Fotomultiplicadores R8520-06SEL para NEXT*, 25/06/2010.
- [56] Hamamatsu, *Photon Counting Using Photomultiplier Tubes*, May. 1998.
- [57] Christian Walck, *Hand-book on Statistical Distributions for experimentalists*, Particle Physics Group, Fysikum University of Stockholm, 10 September 2007.



- [58] Matthias Vraeghe, *Muon Counting with the IceTop Detector as a Probe of Cosmic Ray Composition*, Faculty of Science - Department of Physics and Astronomy – Universiteit Gent, 2011 – 2012.
- [59] ET Enterprise – electron tubes, *Photomultipliers*, 2011.
- [60] Hamamatsu, *Photomultipliers Tubes R1463, R1463P*, 1998 Hamamatsu Photonics K.K.
- [61] ET Enterprise - electron tubes, *200 mm (8) photomultiplier 9354KB series data sheet*, 2007.
- [62] Tektronix, *Programmer Manual TDS200, TDS1000/TDS2000, TDS1000B/TDS2000B, and TPS2000 Series Digital Oscilloscopes*, Tektronics Inc.
- [63] National Instruments Corporation, *NI-VISA User Manual*, Austin Texas, 1996, 2001.
- [64] National Instruments, *LabVIEW User Manual*, January 1998 Edition,
- [65] Nucleus4, *Communications Guide*, Cascade Microtech, Revision D, Revised 07/26/11
- [66] José Rafael Lajara Vizcaíno, José Pelegrí Sebastián, *LabVIEW Entorno Gráfico de programación*, Alfaomega marcombo, 2007.
- [67] DigitalDNA from Motorola, *Oncore Engineering Note*, UT Plus Oncore, Revision 1.0 3/24/00.
- [68] Synergy Systems, LLC, *VP Oncore Commands Reference*, October 2, 2001.
- [69] Antenna Factor, *ANT-GPS-UC-xxx Data Sheet*, Rev. 2-9-11.
- [70] David G. Maxinez, Jessica A. Jara, *VHDL El arte de programar sistemas digitales*, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Compañía Editorial Continental, Primera Edición, México, 2002.
- [71] Pong P. Chu, *RTL Hardware Design using VHDL*, Cleveland State University, Wiley-Interscience.
- [72] Pong P. Chu, *FPGA Prototyping by VHDL Examples Xilinx Spartan-3 Version*, Cleveland State University, Wiley-Interscience.
- [73] Digilent, *Digilent Nexys2 Board Reference Manual*, July 11, 2011.
- [74] Freescale Semiconductor-Data Sheet: Technical Data, *Miniature SPI Digital Barometer – Document Number: MPL115A1*, 10/2011.
- [75] Bosch Sensortec - Data sheet, *BMP085 Digital pressure sensor*, 15 Oct. 2009.
- [76] HOPE RF Electronic, Data Sheet–*HHT02D/HHT02S Relative Humidity & Temperature Sensor System*, 9/29/2008.
- [77] GlobalSat – Produc User Manual, GPS Engine Board EM-408.
- [78] Leadtek – *GPS Protocol Reference Manual*.
- [79] SiRF, *NMEA Reference Manual*, January 2005, Revision 1.3



- [80] Raúl González Duque, *Python para todos*, Creative Commons Reoconocimiento 2.5, España.
- [81] Sensirion – The Sensor Company, *Application Note Non-Linearity compensation*, SHTxx Humidity & Temperature Sensmitter.
- [82] Darren Dale et al, *Matplotlib*, Release 1.0.0, August 25, 2010.
- [83] Shell Scripting Primer, Apple Inc., 2013-08-08.
- [84] PASCO, *Instruction Sheet, High-Accuracy Temperature Sensor CI-6525*.
- [85] PASCO, *Instruction Sheet for the Model CI-6532A Pressure Sensor - Absolute*.
- [86] Moore et al, *Introduction to the Practice of Statistics*, Sixth Edition, W. H. Freeman and Company, New York, 2009.
- [87] Ronald E. Walpole et al, *Probabilidad y Estadística para ingenieros*, Prentice Hall, Sexta edición.
- [88] M. A. Castillo et al, *Observation of a Forbush decrease on March 8th, 2012*, with the VAMOS array, HAWC-TN-2012-021, September 20th, 2012.
- [89] Gert Maibaum, *Teoría de probabilidades y estadística matemática*, Editorial Pueblo y educación, primera reimpresión 1988.
- [90] Eduardo de la Fuente et al, *Correcting the Count Rate in Water Cerenkov Detectors for the Effects of Barometric Pressure and Local Temperature*, 32ND International Cosmic Ray Conference, Beijing 2011.
- [91] Silvia Vernetto, *Detection of Gamma-Ray Bursts in the 1 GeV-1 TeV energy range by ground based experiments*, Instituto di Cosmogeofisica del C.N.R., Corso Fiume 4, 10133 Torino, Italy, 29 Sep 1999.
- [92] H. Salazar et al, *Search for Gamma Ray Bursts at Sierra Negra, Mexico*, Facultad de Ciencias Fisico-Matematicas, BUAP, Puebla Pue; Institute of Physics and Mathematics, University of Michoacan.
- [93] A. Carramiñana et al, *Solar, Stellar and Galactic Connections between Particle Physics and Astrophysics*, Springer, 2007.
- [94] Kevin Beach, *The Correlation between GOES Flare Classification and the Impact of Solar Flaring on Geomagnetic Field Strength*, Chippewa Hills High School, December 29, 2011.
- [95] James A. Marusek, *Solar Storm Threat Analysis*, Impact, Bloomfield, Indiana, 2007.
- [96] Eduardo Amores Rubio, *Control de instrumentos mediante el bus GPIB programado con Matlab*, Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra, 8 de julio de 2010.
- [97] ROOT User's Guide, *An Object-Oriented Data Analysis Framework*, May 2013.
- [98] Jordi Mayné, *Sistemas de Comunicaciones*, Silica An Avnet Division, Rev 3.5.



[99] José Bosch et al, *Instrumentación Electrónica Avanzada*, Departament d'Electrónica, University de Barcelona, 13/07/2012.

[100] Magaly Sierra Vite, *Aplicaciones didácticas del GPIB a nivel licenciatura y posgrado para la UAEH*, Unversidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Pachuca de Soto Hidalgo, Marzo de 2007.

[101] Humberto Hernández Arias, *Diseño e implementación de una interfaz de registro de datos para la unidad sísmica SR04*, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., 2010.

Referencias electrónicas

[1e] <http://www.inaoep.mx/~hawc/>

[2e] www.pasco.com

[3e] http://www.solarham.net/data/events/nov7_2014_x1.6/index.htm

[4e] <https://radioaltafrecuencia.wordpress.com/2014/11/>

[5e] <http://2012ultimasnoticias.blogspot.mx/2014/11/llamarada-solar-x16-mancha-solar-2205.html>