

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA



TESIS

**NUEVA ESTRATEGIA EN LA CONFIGURACIÓN DE LOS
DETECTORES CHERENKOV PARA UNA MEJOR SEPARACIÓN DE
RAYOS CÓSMICOS CARGADOS Y RAYOS GAMMA A PARTIR DE
LA DETECCIÓN DE MUONES EN LOS TANQUES DEL
OBSERVATORIO HAWC-2024**

PRESENTADO POR:

BR. LUZ MEDALY CUSIHUATA MERCADO

BR. ANA CRISTINA JARA RODRIGUEZ

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE FÍSICO**

ASESOR:

MGT. SAYRI TUPAC GARCIA ROCA

CO-ASESOR:

DR. ANDRES SANDOVAL ESPINOSA

CUSCO – PERÚ

2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro. CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada: NUEVA ESTRATEGIA EN LA CONFIGURACIÓN DE LOS DETECTORES CHERENKOV PARA UNA MEJOR SEPARACIÓN DE RAYOS CÓSMICOS CARGADOS Y RAYOS GAMMA A PARTIR DE LA DETECCIÓN DE MUONES EN LOS TANQUES DEL OBSERVATORIO HAWC-2024

Presentado por: Luz Medaly Cusi huata Mercado DNI N° 75776242

presentado por: Ana Cristina Jara Rodriguez DNI N° 72017400

Para optar el título profesional/grado académico de FÍSICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 3 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 5 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** las primeras páginas del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 07 de Abril de 2025



Firma

Post firma SAYRI TUPAC GARCIA ROCA

Nro. de DNI 40402436

ORCID del Asesor 0000-0002-0211-0049

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: **oid:** 27259:446799212

Luz Medaly Cusihuata Mercado - Ana Cristina Jara ...

NUEVA ESTRATEGIA EN LA CONFIGURACIÓN DE LOS DETECTORES CHERENKOV PARA UNA M EJOR SEPARACIÓN ...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:446799212

Fecha de entrega

7 abr 2025, 3:42 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

7 abr 2025, 3:46 p.m. GMT-5

Nombre de archivo

NUEVA ESTRATEGIA EN LA CONFIGURACIÓN DE LOS DETECTORES CHERENKOV PARA UNA M EJOR....pdf

Tamaño de archivo

7.4 MB

141 Páginas

25.174 Palabras

145.560 Caracteres




5% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Filtered from the Report


- ▶ Bibliography
- ▶ Cited Text
- ▶ Small Matches (less than 10 words)

Top Sources

- 5%  Internet sources
- 1%  Publications
- 4%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

1 Integrity Flag for Review

-  **Replaced Characters**
35 suspect characters on 10 pages
Letters are swapped with similar characters from another alphabet.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

Agradecimientos

En primer lugar, agradecemos a Dios, nuestra guía y fortaleza en cada paso de este camino, por brindarnos la oportunidad de aprender, crecer y superar los desafíos con fe y determinación.

A nuestras familias, por su amor incondicional y apoyo constante. A nuestros padres, por enseñarnos el valor del esfuerzo y la perseverancia, y por confiar en nosotros en cada desafío. A nuestros hermanos y hermanas por su compañía, por recordarnos que el aprendizaje es un camino sin fin.

Expresamos nuestro más profundo agradecimiento al Dr. Andrés Sandoval Espinoza por su respaldo inquebrantable y por brindarnos la oportunidad de desarrollar esta investigación.

Junto al Mgt. Sayri Tupac, fueron una guía esencial y un apoyo invaluable, cuyo compromiso, orientación y valiosas observaciones fueron fundamentales para nuestro crecimiento académico. Asimismo, nuestro reconocimiento al Lic. Olintho y al Dr. Walter, cuyas sugerencias enriquecieron nuestro trabajo y fortalecieron nuestros resultados.

A nuestros docentes, por compartir su conocimiento con pasión y por guiarnos con paciencia y exigencia, y por ser pilares importantes en nuestra formación.

A nuestros amigos, por su apoyo incondicional, por ser un refugio en los momentos más exigentes y por compartir con nosotros cada alegría y desafío a lo largo de este recorrido. A todos aquellos que, con su conocimiento, palabras de aliento e inspiración, contribuyeron a hacer posible este trabajo.

A la UNSAAC, nuestra casa de estudios, donde forjamos nuestro conocimiento, enfrentamos desafíos y cultivamos nuestra pasión por la investigación y la ciencia. Al Instituto de Física de la UNAM y a la colaboración de HAWC, así como a cada uno de sus integrantes, nuestro más sincero agradecimiento por acogernos y brindarnos la oportunidad para el desarrollo de esta investigación e inspiración para seguir explorando y contribuyendo al conocimiento.

Finalmente, a la ciencia, por recordarnos que la curiosidad es la chispa del conocimiento y que cada pregunta nos acerca un poco más a la verdad.

Dedicatoria

Dedico esta tesis a mi padre, quien, con su amor incondicional, apoyo y confianza ha sido el pilar de fortaleza en mi vida. Gracias por estar presente en cada etapa, por creer en mí y en mis sueños, y por enseñarme con tu ejemplo que la perseverancia y el esfuerzo nos llevan siempre más lejos.

A mis hermanos, por su cariño y estar a mi lado en los momentos más desafiantes. Gracias por recordarme que siempre debo aspirar a más y nunca dejar de aprender. A mis hermanas, por su guía y compañía inquebrantable, por caminar a mi lado y darme la certeza de que nunca estoy sola en este viaje.

Finalmente, a todos aquellos que, de una u otra manera, han estado presentes apoyándome y motivándome, les agradezco profundamente.

-Luz Medaly Cusihuata Mercado

A mi madre, Paola, cuya perseverancia y amor han sido faros en mi vida. Gracias por ser mi confidente, por escucharme incluso cuando las palabras sobran y por demostrarme, con tu propia fuerza, que siempre se puede seguir adelante. Estoy orgullosa de ti.

A mis hermanos, Gonzalo, Sebastiana e Hildaaura, mis compañeros de vida y de sueños, por su apoyo incondicional y por recordarme que la familia es lo más valioso.

A la memoria de mi padre, sin él no sería quien soy hoy. Aunque no esté físicamente, tu presencia vive en mis logros y en mi corazón.

A la señora Yudy y su familia, por su cariño y apoyo sincero, por ser una guía en los momentos complicados y por su compañía, que han significado más de lo que las palabras pueden expresar.

A Medaly, mi compañera de tesis, por recorrer conmigo este desafío con paciencia, compromiso y esfuerzo."

Y por último, a mis amigos y a todas aquellas personas que, de una u otra manera, me tendieron su mano, alentaron y creyeron en mí. Su confianza y palabras de aliento fueron un gran apoyo en este camino

-Ana Cristina Jara Rodriguez

Resumen

La astrofísica de rayos gamma de muy alta energía se desarrolla gracias a grandes arreglos de detectores instalados en la superficie, diseñados para estudiar fenómenos astrofísicos, sin embargo, estos sistemas son susceptibles de detectar partículas adicionales generadas por las cascadas atmosféricas, lo que puede afectar la reconstrucción precisa de la fuente de rayos gamma. Este trabajo tiene como objetivo establecer una nueva geometría en la distribución espacial de los detectores Cherenkov dentro de los tanques del observatorio HAWC, con el objetivo de poder diferenciar las cascadas de origen hadrónico de aquellas de origen electromagnético a partir de la detección de muones verticales que son los de mayor incidencia. Se observó una discriminación más eficiente entre eventos de origen hadrónico y electromagnético, las señales de muones fueron identificadas con mayor precisión gracias a la configuración implementada, además se registró una mejora en la sensibilidad del sistema para identificar muones en cascadas atmosféricas, reduciendo el ruido generado por partículas adicionales. La correlación entre las señales del tanque O8 y las paletas centelladoras mostró consistencia en las coincidencias temporales, lo que permitió confirmar la presencia de muones verticales.

Los resultados obtenidos muestran una mejora significativa en la separación de cascadas hadrónicas y electromagnéticas, lo que incrementa la capacidad de identificación de muones, estas conclusiones plantean la posibilidad de implementar configuraciones similares en futuros observatorios de rayos cósmicos, lo que tendría un impacto directo en la optimización del tiempo de procesamiento y en la precisión de la detección de rayos gamma.

Palabras clave: Fotomultiplicadores, muones, cascadas de rayos gamma, rayos cósmicos, HAWC, optimización de detectores.

Abstract

High-energy gamma-ray astrophysics is driven by large arrays of detectors installed on the surface to study astrophysical phenomena. However, these systems are susceptible to detecting additional particles generated by atmospheric cascades, which can affect the precise reconstruction of gamma-ray sources. This work aims to establish a new geometry in the spatial distribution of Cherenkov detectors within the tanks of the HAWC observatory to differentiate hadronic-origin cascades from electromagnetic-origin cascades through the detection of vertical muons, which are the most prevalent. A more efficient discrimination between hadronic and electromagnetic events was observed, and muon signals were identified with greater precision due to the implemented configuration. Additionally, an improvement in the system's sensitivity to identify muons in atmospheric cascades was recorded, reducing noise caused by additional particles. The correlation between the signals from tank O8 and the scintillator paddles showed consistency in temporal coincidences, confirming the presence of vertical muons.

The results obtained demonstrate a significant improvement in the separation of hadronic and electromagnetic cascades, increasing the system's ability to identify muons. These findings suggest the potential implementation of similar configurations in future cosmic-ray observatories, which would have a direct impact on optimizing processing times and improving the precision of gamma-ray detection.

Keywords: Photomultipliers, muons, gamma-ray cascades, cosmic rays, HAWC, detector optimization.

Índice

Agradecimientos	ii
Dedicatoria	iii
Resumen.....	iv
Abstract	v
Índice.....	vi
Índice de tablas	ix
Índice de figuras.....	x
GLOSARIO DE TERMINOS.....	xiv
INTRODUCCIÓN	xvii
CAPÍTULO I	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1. REALIDAD PROBLEMÁTICA.....	1
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	2
1.2.1. Problema general	2
1.2.2. Problemas específicos	2
1.3. FORMULACIÓN DE OBJETIVOS	3
1.3.1. Objetivo general.....	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.4. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS.....	3
1.4.1. Hipótesis general.....	3
1.4.2. Hipótesis específicas	3
1.5. VARIABLES DE ESTUDIO	4
1.5.1. Identificación de variables	4
1.6. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.6.1. Justificación Técnica.....	4
1.6.2. Justificación Metodológica	4
1.6.3. Justificación Social	5
CAPÍTULO II.....	6
MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	6
2.1.1. A nivel internacional.....	6
2.1.2. A nivel nacional	7
2.2. BASES TEÓRICAS	7

2.2.1. Rayos cósmicos.....	7
2.2.2. Espectro de energía de los rayos cósmicos	8
2.2.3. Origen de los rayos cósmicos	10
2.2.4. Clasificación de los rayos cósmicos según los procesos de interacción.....	10
2.2.5. Rayos gamma	11
2.2.6. Lluvias atmosféricas extendidas (EAS).....	12
2.2.7. Componentes de las cascadas atmosféricas.....	14
2.2.8. Muones atmosféricos.....	18
2.2.9. Mecanismo de pérdida energética de los muones	20
2.2.10. Efecto Cherenkov en la atmósfera y en el agua.....	22
2.2.11. Principios físicos de detección de fotones.....	25
2.2.12. Fotomultiplicadores	26
2.2.13. Detectores de centelleo.....	34
2.2.14. Observatorio HAWC (High Altitude Water Cherenkov).....	37
2.2.15. Electrónica asociada a la detección de fotones.....	39
2.2.16. Procesamiento de señales	41
2.2.17. ROOT	46
CAPÍTULO III.....	47
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	47
3.1. Tipo de investigación.....	47
3.2. Enfoque de investigación.....	47
3.3. Nivel de investigación	48
3.4. Diseño de investigación.....	48
3.5. Método de investigación.....	48
3.6. Población y muestra.....	48
3.6.1. Población.....	48
3.6.2. Muestra	49
3.7. Técnicas de Recolección de la Información.....	49
3.8. Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos	49
3.9. Matriz de operacionalización de las variables.....	50
3.10. Desarrollo experimental	51
3.10.1. Arreglo de coincidencias	52
3.10.2. Arreglo de dos capas de detectores.....	54
CAPÍTULO IV.....	61
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61

4.2. Análisis de datos	61
4.2.1. Visualización y Evaluación de las señales obtenidas de los dos arreglos.....	61
4.2.2. Cortes para depuración y selección de datos.....	62
4.2.3. Análisis general de configuración con la macro Scan14ChFADC.c	63
4.2.4. Análisis para las paletas centelladores con la macro Procesa14ChFADC.c	72
4.2.5. Análisis del ancho de la señal de los PMTs con la macro Procesa14ChFADC.c	77
4.2.6. Correlación arreglo de dos capas y centelladores	82
4.2.7. Análisis para los fotomultiplicadores del tanque O8 con la macro Procesa14ChFADC.c	84
4.2.8. Análisis de Carga depositada con la macro Procesa14ChFADC.c	88
4.2.9. Correlación de Voltajes de PMT centrales y Periféricos	93
4.3. Discusión.....	96
CONCLUSIONES	99
RECOMENDACIONES.....	100
Bibliografía	102
ANEXOS	108
Anexo 1: Matriz de consistencia	109
Anexo 2: Matriz de operacionalización de variables	111
Anexo 3. Evidencias fotográficas-Instalación de Nueva Configuración en HAWC	112
Anexo 4. Línea de código de cortes obtenidas por el análisis de datos	114
Anexo 5. Líneas de código modificadas de las Macros para nuestro análisis de datos	115
Anexo 6. Manual de los fotomultiplicadores	116
Anexo 7: Detalles de las paletas centelladoras.....	121
Anexo 8: Detalles técnicos del FADC (Flash Analog-to-Digital Converter)	123

Índice de tablas

Tabla 1 Distribución de canales FADC.	57
Tabla 2 Características del evento seleccionado.....	63
Tabla 3 Parámetros del ajuste	76
Tabla 4 Cortes aplicados en cada canal correspondiente a cada PMT.....	78

Índice de figuras

Figura 1 Espectro de energía de rayos cósmicos	9
Figura 2 Cascada atmosférica	12
Figura 3 Desarrollo Longitudinal de las cascadas atmosféricas	13
Figura 4 Desarrollo de cascada electromagnética.....	15
Figura 5 Cascada de partículas desarrollada en la atmosfera iniciada por un rayo gamma ...	16
Figura 6 Cascada de partículas iniciada por hadrones	18
Figura 7 Flujo de muones en función del ángulo cenital, ajustado según la distribución teórica de $\cos^2\theta$ representada por la línea roja punteada.	20
Figura 8 Diagrama de cono de la radiación Cherenkov.....	22
Figura 9 Diagrama del efecto Cherenkov y sus componentes.....	24
Figura 10 Telescopio MAGIC	25
Figura 11 Fotografía del Observatorio HAWC-Puebla-Detector Cherenkov de Agua	26
Figura 12 Emisión secundaria en un dinodo.....	27
Figura 13 Trayectorias que siguen los fotoelectrones hacia el primer dinodo, generados por el campo eléctrico.....	28
Figura 14 Tubo Fotomultiplicador de tipo de enfoque lineal	29
Figura 15 Circuito divisor del Tubo Fotomultiplicador Hamamatsu de 5 etapas.....	30
Figura 16 Eficiencia cuántica en función de la longitud de onda del fotón incidente sobre el fotocátodo.....	31
Figura 17 Diagrama dimensional del tubo fotomultiplicador R5912/-20/-100	33
Figura 18 Diagrama dimensional del tubo fotomultiplicador R7081/-20/-100.	33
Figura 19. Tubo Fotomultiplicador usado en los tanques de HAWC.....	34
Figura 20 Componentes de un detector de centelleo	35
Figura 21 Configuración actual de los detectores en los tanques del observatorio HAWC ...	38
Figura 22 Particularidades de un pulso no ideal de corriente o voltaje en función al tiempo	39
Figura 23 Señales de pulsos de tipo unipolar y bipolar	40
Figura 24 Diagrama de bloques de la electrónica del Observatorio HAWC y sus conexiones en los sistemas-Counting House o casa de conteo.	44
Figura 25 Esquema comparativo de señales de los PMTs y la señal de salida discriminador FEB asociado.....	45
Figura 26 Esquema de investigación	47
Figura 27 Tanque por fuera	51

Figura 28. Diseño de la nueva configuración.	52
Figura 29 Fotografía del arreglo de coincidencias.....	53
Figura 30 Interacción del muon en las paletas centelladoras.....	54
Figura 31 Vista aérea de la colocación de los Tubos fotomultiplicadores correspondientes al arreglo de dos capas.	55
Figura 32 Señal de muon y electrón	56
Figura 33 Distribución espacial de los tanques de HAWC	58
Figura 34 Diagrama de bloques de la adquisición de datos.....	60
Figura 35 Señales brindadas por la macro Scan14ChFACD: PMTs	65
Figura 36 Señales brindadas por la macro Scan14ChFACD: PMTs	66
Figura 37 Señales brindadas por la macro Scan14ChFACD: Tanques y trigger.....	67
Figura 38 Señales brindadas por la macro Scan14ChFACD: Tanque y paletas.....	68
Figura 39 Señales brindadas por la macro Scan14ChFACD: Multiplicidad de los tanques O y P.....	69
Figura 40 <i>Datos del evento 144 Scan14ChFACD</i>	70
Figura 41 Macro Scan14ChFADC.c abierta desde ROOT	70
Figura 42 Datos de la macro Scan14FADC.c.....	71
Figura 43 Espectro de la paleta centelladora canal 10 sin cortes.....	72
Figura 44 Espectro de la paleta centelladora canal 10 con cortes.	73
Figura 45 Espectro de la paleta centelladora canal 11 sin cortes.....	73
Figura 46 Espectro de la paleta centelladora canal 11 con cortes.	74
Figura 47 Pico más alto de la diferencia de tiempos del canal 11 y 10.	74
Figura 48 Ajuste Gaussiano en el pico formado de la diferencia de tiempo canal 11 y 10. ...	75
Figura 49 Valores del ajuste gaussiano.....	76
Figura 50 Tiempo medio de pico de muones: paletas juntas	77
Figura 51 Espectro de la señal para el PMT-E0 primera capa.....	79
Figura 52 Espectro de la señal para el PMT-G primera capa	79
Figura 53 Espectro de la señal para el PMT-H primera capa	80
Figura 54 Espectro de la señal para el PMT-A segunda capa	80
Figura 55 Espectro de la señal para el PMT-B segunda capa.....	81
Figura 56 Espectro de la señal para el PMT-C segunda capa.....	81
Figura 57 Espectro de la señal para el PMT-D segunda capa	82
Figura 58 Suma de voltajes sin saturación donde se muestra la isla de muones	83
Figura 59 Isla de Muones.....	83

Figura 60 Histograma de voltajes de los PMTs vs señal de muones, capa de arriba – canal V[0]	85
Figura 61 Histograma de voltajes de los PMTs vs señal de muones, capa de arriba – canal V[2]	85
Figura 62 Histograma de voltajes de los PMTs vs señal de muones, capa de arriba – canal V[3]	86
Figura 63 Histograma de voltajes de los PMTs con señal de muones, capa de abajo - canal V[4]	86
Figura 64 Histograma de voltajes de los PMTs con señal de muones, capa de abajo - canal V[5]	87
Figura 65 Histograma de voltajes de los PMTs con señal de muones, capa de abajo - canal V[6]	87
Figura 66 Histograma de voltajes de los PMTs con señal de muones, capa de abajo - canal V[9]	88
Figura 67 Comparación de carga de los PMTs y carga depositada por muones en los PMTs dentro del tanque, capa de arriba – canal Q[0]	89
Figura 68 Comparación de carga de los PMTs y carga depositada por muones en los PMTs dentro del tanque, capa de arriba – canal Q[2]	89
Figura 69 <i>Comparación de carga de los PMTs y carga depositada por muones en los PMTs dentro del tanque, capa de arriba – canal Q[3]</i>	90
Figura 70 Comparación de carga de los PMTs y carga depositada por muones en los PMTs dentro del tanque, capa de abajo – canal Q[4]	90
Figura 71 Comparación de carga de los PMTs y carga depositada por muones en los PMTs dentro del tanque, capa de abajo – canal Q[5]	91
Figura 72 Comparación de carga de los PMTs y carga depositada por muones en los PMTs dentro del tanque, capa de abajo– canal Q[6]	91
Figura 73 <i>Comparación de carga de los PMTs y carga depositada por muones en los PMTs dentro del tanque, capa de abajo– canal Q [9]</i>	92
Figura 74 Señales de multiplicidad de los tanques O	92
Figura 75 Señal de Multiplicidad de los tanques P	93
Figura 76 Espectro de correlación entre los PMTs periférico bajo las paletas: V[0] y central V[2]	93
Figura 77 Espectro de correlación entre los PMTs periférico bajo las paletas: V[0] y periférico V[3]	94

Figura 78 Espectro de correlación entre los PMTs periférico bajo las paletas: V[4] y PMT periférico lejos de la paleta V[5]	94
Figura 79 Espectro de correlación entre los PMTs periférico bajo las paletas: V[4] y el PMT central V[6].....	95
Figura 80 Espectro de correlación entre los PMTs periférico bajo las paletas: V[4] y periférico lejano V[9]	96

GLOSARIO DE TERMINOS

- a. **Arreglo:** Distribución específica de múltiples detectores en una configuración geométrica determinada, diseñada para optimizar la cobertura y sensibilidad en la detección de eventos astrofísicos.
- b. **Bin de tiempo:** Es la digitalización del pulso en un intervalo de tiempo que indica que altura tiene el pulso
- c. **Canales Digitales:** También denominada **BIN de amplitud**, representa un rango específico de amplitud como voltaje, intensidad. Está relacionada con el número de bits que presenta un convertidor analógico-digital.
- d. **Canales FADC (*Flash Analog-to-Digital Converter*):** Son entradas físicas e independientes de señales analógicas que permiten que permite convertir a señales digitales.
- e. **Centellador:** Material que, al ser atravesado por partículas ionizantes, emite luz visible o ultravioleta. Esta propiedad es esencial en la detección de diversas radiaciones, incluyendo partículas alfa, beta y gamma.
- f. **Coincidencias:** Eventos en los que múltiples detectores registran señales simultáneamente, indicando la ocurrencia de un fenómeno físico que afecta a varios detectores al mismo tiempo, como el paso de una partícula a través del arreglo.
- g. **Configuración:** Conjunto de parámetros y disposiciones técnicas que determinan el modo de operación de los detectores y sistemas asociados, incluyendo aspectos como la sensibilidad, resolución temporal y umbrales de detección.
- h. **Cortes:** Filtros o umbrales aplicados durante el análisis de datos para eliminar señales no deseadas o ruido, mejorando así la precisión en la detección de eventos relevantes en experimentos como los realizados en el HAWC.

- i. **Counting House:** Instalación central en observatorios como el HAWC donde se recopilan, procesan y almacenan los datos obtenidos de los detectores, permitiendo su análisis en tiempo real o posterior.
- j. **Discriminación:** Proceso mediante el cual se diferencian distintos tipos de señales o partículas, como separar muones de electrones, utilizando criterios basados en características específicas de las señales detectadas.
- k. **Estrella:** Es una enorme esfera de plasma (formada por núcleos ionizados y electrones desligados de hidrogeno) que se encuentra en equilibrio entre la presión generada por la fusión nuclear en su núcleo que la expande y la gravedad que la comprime e impulsa su colapso.
- l. **Efecto Compton:** Es cuando un fotón interactúa con un electrón débilmente unido al átomo transfiriéndole parte de su energía. En consecuencia, el electrón es liberado con un ángulo ϕ y el fotón también modifica su trayectoria con un ángulo θ respecto de la dirección original de incidencia lo que conlleva a la reducción de energía y aumento de longitud de onda del fotón
- m. **Muones:** Partículas subatómicas similares a los electrones, pero con mayor masa, se producen en la atmósfera terrestre como resultado de la interacción de los rayos cósmicos y son detectables en la superficie debido a su capacidad para penetrar materiales densos.
- n. **PMT (*Photomultiplier Tube*):** Dispositivo extremadamente sensible que detecta y amplifica señales luminosas muy débiles, convirtiéndolas en señales eléctricas que pueden ser analizadas.
- o. **Señal:** Respuesta eléctrica generada por un detector al interactuar con una partícula o radiación, cuya amplitud y forma proporcionan información sobre las características del evento detectado.

- p. Trigger:** Mecanismo que activa la adquisición de datos cuando se cumplen ciertas condiciones predefinidas, asegurando que solo se registren eventos de interés y optimizando el uso de recursos de almacenamiento y procesamiento.
- q. WCD (*Water Cherenkov Detector*):** Detectores que utilizan grandes volúmenes de agua pura para identificar partículas cargadas. Estas partículas, al moverse más rápido que la luz en el agua, producen luz Cherenkov, la cual es detectada por sensores especializados.
- r. Profundidad atmosférica vertical:** Hace referencia a la cantidad de masa de aire que una partícula con trayectoria vertical atraviesa por área recorrida, desde la altitud de interés hasta la parte superior de la atmósfera, su unidad es gramo/centímetro cuadrado (g/cm^2).

INTRODUCCIÓN

El estudio de los rayos gamma con energías mayores a 100GeV permite explorar fuentes galácticas como extragalácticas, galaxias activas, destellos de rayos gamma (GRB's), potenciales evidencias de materia oscura y otros objetos capaces de emitir radiación electromagnética (Abeysekara et al, 2023). Una propiedad distintiva de los rayos gamma a esas energías es su capacidad para atravesar grandes distancias sin alterar su trayectoria frente a los campos electromagnéticos galácticos y extragalácticos, lo que facilita la reconstrucción directa de la fuente primaria y el análisis detallado de los fenómenos astrofísicos (Kanbach, 2019).

Actualmente el estudio de los rayos gamma se realiza mediante observatorios terrestres los cuales emplean arreglos de detectores diseñados para capturar las partículas secundarias originadas tras la interacción del rayo gamma primario con la atmosfera. Ejemplos destacados de estos observatorios son: HEGRA, MAGIC, H.E.S.S, VERITAS, ARGO-YBJ, LHAASO-WCDA y HAWC. Sin embargo, uno de los desafíos más relevante en este campo de investigación es la distinción entre eventos iniciados por rayos gamma de aquellos iniciados por rayos cósmicos cargados ya que ambos producen señales en los detectores (Alfaro et al., 2022).

En el presente, específicamente en el observatorio HAWC (High Altitude Water Cherenkov) diseñado para detectar rayos gamma de altas energías, el método empleado para diferenciar estas dos contribuciones se basan en algoritmo de reconstrucción, corte rectangular a los datos y análisis de propiedades globales que no refleja de manera precisa la distribución real de los dos tipos de eventos. Aunque esta técnica ha proporcionado grandes avances en la detección de nuevas fuentes, presenta limitaciones significativas en términos de eficiencia, especialmente en regiones muy energéticas donde eventos de rayos cósmicos son dominantes (Alfaro et al., 2022).

En este contexto, la presente investigación plantea una nueva configuración espacial de detectores basada, en la medición precisa de muones para mejorar la discriminación entre rayos gamma y rayos cósmicos. Los muones, generados principalmente de la componente hadrónica la cual es originada por la interacción de los rayos cósmicos primarios con la atmosfera, poseen características específicas que los convierten en un indicador clave para eliminar eventos no deseados. El presente trabajo se enfoca en el diseño y desarrollo experimental de una configuración que emplea una capa adicional de fotomultiplicadores y detectores centelladores instalados en el tanque O8 del observatorio de HAWC, estructurados para medir señales asociadas a los muones.

Este diseño tiene como objetivo reducir el ruido en los datos y mejorar la sensibilidad hacia señales de rayos gamma, lo que resulta esencial para seguir con los avances de estudio de los fenómenos astrofísicos. Con ello, no solo se busca superar las limitaciones de los métodos actuales, sino también sentar las bases para futuras mejoras en la tecnología de detección utilizada en la astrofísica de altas energías.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. REALIDAD PROBLEMÁTICA

En los observatorios terrestres como HAWC, VERITAS y LHAASO, se registran millones de eventos diarios de lluvias de rayos gamma como de rayos cósmicos de alta energía (Sandoval, 2015). En el observatorio HAWC se registran 25 000 eventos por segundo, del cual más el 99.9% son hadrones generados por rayo cósmicos primarios y el 0.1% representan rayos gamma de interés astrofísico (Alfaro et al., 2022). Esta desproporción resalta la dificultad intrínseca en la separación de estos eventos, ya que los rayos cósmicos representan el fondo de detección más amplio.

La técnica estándar que emplea HAWC a partir de su configuración que consta de 4 fotomultiplicadores puestos a 4 metros de profundidad se basa principalmente en un simple corte rectangular que involucra solo dos parámetros, pero estratégicamente no es óptima ya que la frontera entre los rayos gamma y rayos cósmicos no está bien definida y solo se establece su sensibilidad para eventos grandes (Alfaro et al., 2022).

Diversos trabajos han intentado abordar este tema como desafíos prácticos. El trabajo realizado por Alfaro et al. (2022) establece dos nuevos métodos para la separación gamma/hadrón utilizando técnicas de aprendizaje automático (MLT) basado en árboles de decisión aumentados (BDT) y otro utilizando redes neuronales (NN) cuya interpolación original se realizó sobre datos teóricos asiendo que el fondo sea forzado a seguir una distribución, sin embargo usando valores medidos fue complicado forzar su distribución y restringir los valores de energía a la interpolación.

El artículo científico más reciente de Albert et al. (2024) presenta la actualización de algoritmo (Pass5) para la reconstrucción de datos que también involucra la separación gamma/hadrón que se basa en el uso de características de las huellas de carga generadas por

estas partículas; las cascadas hadrónicas originadas por rayos cósmicos producen huellas irregulares y asimétricas debido a la presencia de muones con momentos transversales altos, mientras que las huellas de la cascada electromagnética inducidas por rayos gamma son axialmente simétricas. Además, hacen uso del parámetro *compactness* que mide la relación entre los PMTs (Fotomultiplicadores) activados por la lluvia y la carga máxima fuera de un radio de 40 m, lo cual es bajo en hadrones debido a los muones y del parámetro χ^2 reducido donde se le asocia un valor mínimo a las cascadas electromagnéticas y valores altos a las cascadas hadrónicas, sin embargo, hay señales producidas por electrones de rayos cósmicos que hace difícil diferenciar de las lluvias de rayos gamma.

Los trabajos más recientes se han centrado principalmente en el uso de simulaciones, desarrollo de algoritmos de reconstrucción, métodos avanzados árboles para la separación entre rayos gamma y hadrones. Sin embargo, muchas de estas aproximaciones no toman en cuenta detalladamente efectos experimentales asociados ambos eventos. En este contexto, este presente trabajo propone una nueva configuración de los detectores Cherenkov del Observatorio HAWC, mediante integración de análisis experimental antes de la reconstrucción total de las señales que generan las cascadas, este enfoque busca la eficiencia del análisis, además permitir el óptimo uso del almacenamiento de datos, facilitando una detección más temprana y precisa de las señales.

1.2.FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema general

¿Cómo optimizar la diferencia entre los rayos cósmicos y rayos gamma de los tanques del Observatorio HAWC a partir de la detección de muones?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿De qué manera se realiza la caracterización de las señales muones para diferenciar la componente electromagnética de la componente hadrónica?

- ¿Cómo se puede determinar si la nueva configuración en el tanque O8 junto con la electrónica asociada es adecuada para la identificación de muones?
- ¿De qué manera se relacionan las señales del tanque O8 con los centelladores?

1.3.FORMULACIÓN DE OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Establecer una nueva estrategia de configuración para la separación de rayos cósmicos y rayos gamma en los tanques del Observatorio HAWC identificando los muones.

1.3.2. Objetivos específicos

- Establecer una caracterización de las señales para identificar los muones de las cascadas hadrónicas.
- Establecer un arreglo de coincidencias en el tanque O8 usando 2 paletas centelladoras para la detección de muones y doble capa de detectores.
- Determinar la relación de las señales con la configuración del tanque O8 y los centelladores.

1.4.FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS

1.4.1. Hipótesis general

La nueva estrategia de configuración permite una mejor separación de rayos cósmicos cargados y rayos gamma en los tanques del observatorio HAWC a partir de la detección de muones.

1.4.2. Hipótesis específicas

- Existe una caracterización óptima de las señales para diferenciar los muones de los rayos gamma
- La incorporación del arreglo de coincidentes a la nueva configuración del tanque O8 garantiza el funcionamiento adecuado para la separación muones y rayos gamma
- Existe relación directa entre las señales del tanque O8 con los centelladores

1.5.VARIABLES DE ESTUDIO

1.5.1. Identificación de variables

V1: Configuración de los detectores de Cherenkov

Indicadores:

- Amplitud de la señal detectada por cada PMT
- Correlación de la suma de las señales de la primera capa contra las de la segunda
- Multiplicidad

V2: Separación de rayos cósmicos de los rayos gamma a partir de la identificación de muones

Indicadores:

- Resolución temporal
- Criterios de diferenciación de la componente electromagnética y la componente muonica.

1.6. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.6.1. Justificación Técnica

El presente estudio aportará significativamente al desarrollo de nuevas configuraciones para los tanques Cherenkov implementados en el observatorio *High Altitude Water Cherenkov* (HAWC), el objetivo principal es optimizar la capacidad de identificación de muones en los detectores Cherenkov en agua, a través de una nueva configuración de detectores, lo que permitirá diferenciar de manera eficiente los rayos gamma de los rayos cósmicos, este avance representará un hito crucial en la mejora de la calidad y precisión de los datos astronómicos recopilados, facilitando así progresos significativos en la comprensión de fenómenos cósmicos y en el campo de la astrofísica de partículas.

1.6.2. Justificación Metodológica

Este estudio adoptará una metodología de tipo aplicada, de nivel exploratorio - explicativo, utilizando un diseño experimental para investigar de manera rigurosa y sistemática,

además se seguirá un método hipotético-deductivo con un corte longitudinal, lo que permitirá no solo establecer relaciones causales entre las variables de interés, sino también observar su evolución y comportamiento a lo largo del tiempo. Este enfoque metodológico garantiza una investigación detallada, contribuyendo a la robustez y aplicabilidad de los resultados en el contexto de la detección de rayos gamma, y la separación de estos y otros componentes extra galácticos.

1.6.3. *Justificación Social*

La región de Cusco, la histórica ciudad de los Incas no solo es un epicentro cultural y turístico, sino que su privilegiada ubicación geográfica la convierte en un candidato idóneo para el desarrollo de la astrofísica de altas energías. Situada a altitudes que alcanzan hasta los 5000 msnm, ofrece condiciones únicas para la instalación de tecnología avanzada para la medición de rayos gamma y cósmicos. A estas altitudes, se está más próximo al máximo desarrollo de la cascada atmosférica secundaria por ende permite la detección de mayor número de partículas. Al tener mayor cantidad de datos nos proporciona información más detallada sobre la fuente de la partícula primaria facilitando así una detección más eficiente de partículas de alta energía.

Este trabajo de investigación se presenta como pionero en la región, al proponer el desarrollo de capacidades científicas y tecnológicas que se puedan aplicar directamente en observatorios de rayos gamma y cósmicos, como el observatorio SWGO (*Southern Wide-field Gamma-ray Observatory*) en el hemisferio sur, que nos permite estudiar el centro de la galaxia y que además es un complemento para los observatorios HAWC y LHASSO ubicados en el hemisferio norte. La implementación de una nueva configuración experimental en este contexto no solo permitirá diferenciar de mejor manera la detección de cascadas atmosféricas, sino que también abrirá nuevas posibilidades para el estudio de fenómenos astrofísicos, dotando a la región de un papel central en la investigación científica internacional.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. *A nivel internacional*

Salazar (2020) en su tesis *“Reconstrucción del espectro de rayos cósmicos con el observatorio HAWC”* tuvo como meta estudiar a los rayos cósmicos y reconstruirlas en base a su energía, todo ello considerando las características del detector, apoyándose del proceso de *unfolding*, un término ubicado en la física experimental que busca la obtención de métodos mayormente confiables de manera la cual se llevó a cabo a través del algoritmo *Tunfold*.

Conceição et al. (2021) en su artículo *“Identificación de muones en un detector compacto de Cherenkov de una sola capa de agua y discriminación gamma/hadrón utilizando técnicas de aprendizaje automático”* cuyo objetivo fue demostrar que un diseño optimizado de un detector de Cherenkov de agua, en combinación con técnicas avanzadas de aprendizaje automático, puede ser eficaz para la identificación de muones y, por ende, para la discriminación entre cascadas de partículas generadas por rayos gamma y hadrones, las señales temporales capturadas por los fotomultiplicadores se analizan mediante una red neuronal convolucional con el fin de distinguir entre muones y partículas secundarias de cascadas electromagnéticas. Se llevaron a cabo simulaciones de las cascadas de partículas utilizando el programa CORSIKA, mientras que la respuesta del detector fue simulada con la herramienta Geant4. El rendimiento del método fue evaluado tanto en configuraciones de cascadas verticales como inclinadas, se concluyó que el detector de Cherenkov de agua propuesto, junto con la técnica de análisis basada en aprendizaje automático, es eficaz para la identificación de muones y la discriminación entre eventos inducidos por rayos gamma y hadrones.

2.1.2. A nivel nacional

Luzquiños (2024), en su investigación “*Gamma-Hadron separation using the temporal distribution of particle cascades at TeV energies in the SWGO experiment*” propuso una variable que separe los rayos gamma con los hadronicos para distinguir cascadas atmosféricas para usando una distribución de tiempo de llegada de distintas partículas, todo ello se llevó a cabo mediante simulaciones en CORSIKA, este análisis se realizó en las condiciones atmosféricas de Imata en Arequipa – Perú la cual se encuentra a 4500 m.s.n.m., tras la simulación y los respectivos cálculos se logró identificar que de la muestra de simulación, la señal reconocida es $\geq 88\%$ en promedio y el rechazo de fondo es ($\geq 90\%$).

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Rayos cósmicos

Los rayos cósmicos son partículas altamente energéticas que impactan en la atmósfera terrestre, aproximadamente el 90% son protones, alrededor del 9% son partículas alfa, y el resto son núcleos más pesados (Gaisser, 1990, pág. 1). El rango de energía en los rayos cósmicos es denominada alta, desde MeV a TeV, muy altas de 50 GeV a 100 TeV y ultra altas de 100 TeV a 100 PeV (Alfaro et al., 2022).

Principalmente, estas partículas son núcleos atómicos que van desde el hidrógeno hasta elementos pesados como el hierro, aunque también se encuentran electrones, positrones, fotones (rayos gamma) y otras partículas. Desde su descubrimiento a principios del siglo XX, el estudio de los rayos cósmicos ha sido esencial para el desarrollo de la física, ya que poseen energías extremadamente altas que no pueden generarse en la Tierra. El análisis de estas partículas y los fenómenos que originan al colisionar con la materia ha permitido el descubrimiento de nuevas partículas, como el muon, el pión, el kaón (1948), el kaón neutro (1953), y lambda (1951), entre otras. Estos hallazgos fueron algunos de los primeros logros del

estudio de los rayos cósmicos y han sido una notable contribución a la física (Portocarrero, 2003)

Estudio de rayos cósmicos

El estudio de la radiación cósmica ultra energética ($<10^{18} eV$) permite entender los procesos más energéticos que tienen lugar en nuestra galaxia o en el cosmos en general. Dentro de este estudio se presentan dificultades teóricas y prácticas, en cuanto a la cuestión práctica se tiene que el flujo de partículas cósmicas que llegan a la tierra a esas energías siendo extremadamente bajas (una partícula por Kilómetro cuadrado por año) lo que implica disponer de grandes áreas para su detección. Por el lado teórico encontramos que no se conocen con precisión los procesos dentro de la galaxia que puedan producir partículas con tan altas energías, además los diferentes caminos que siguen los rayos cósmicos a través del espacio donde se encuentran rodeados de una gran variedad de campos, ya sean magnéticos, fotónicos y/o de materia, los cuales interactúan con las partículas haciéndolas perder energía y desviándolas por presentar carga sean un desafío para interpretar eventos astrofísicos (Gaisser, 1990).

2.2.2. Espectro de energía de los rayos cósmicos

Los rayos cósmicos abarcan un amplio espectro de energías, que va desde 10^6 eV hasta 10^{21} eV. Existen varios mecanismos que contribuyen al incremento de la energía de esas partículas, como la aceleración mediante choques de Fermi de primer orden. Este proceso establece que la fuente emite ondas cuyos frentes hacen que las partículas se aceleren, por ende, ganen altas energía debido a que no hay colisión (Abe, 2016).

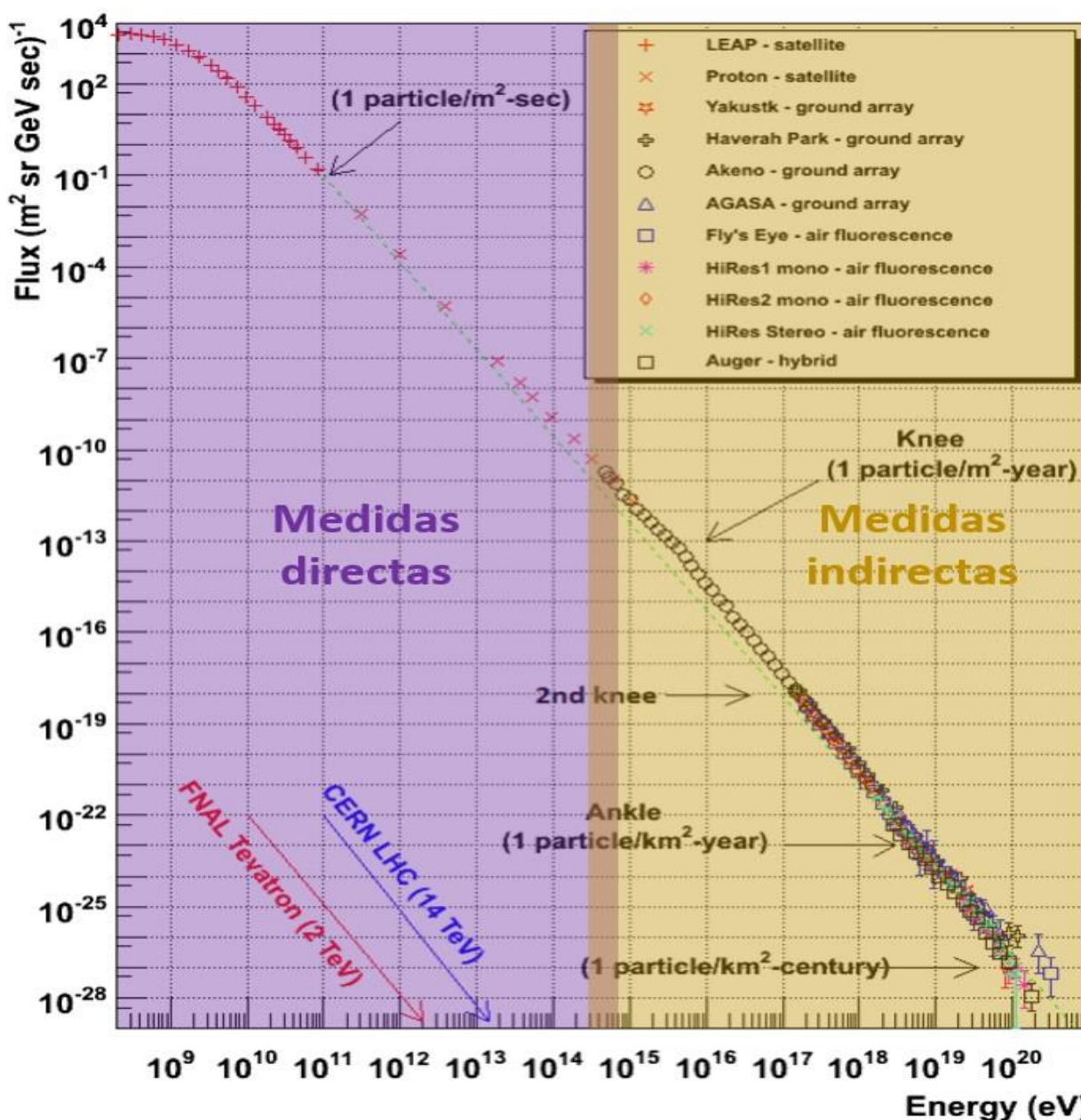
El espectro de energía E de los rayos cósmicos obedece la ley de potencia de la forma.

$$dN(E)/dE \approx kE^{-\gamma} \quad (1)$$

Donde γ es el índice espectral que cambia en intervalos de energía denominadas regiones y E expresa la energía cinética por nucleón. El primer cambio sucede en el punto

denominado *knee* (rodilla) donde el índice $\gamma \approx 3.0$ con energías alrededor de 4×10^{15} eV. El segundo cambio ocurre en el punto denominado *second Knee* (segunda rodilla) con el índice $\gamma \approx 3.3$ y energías de aproximadamente 1×10^{17} eV. El tercer cambio se produce en el punto designado como *ankle* (tobillo) con índice $\gamma \approx 2.6$ con la energía de 5×10^{18} eV (Mollerach & Roulet, 2018).

Figura 1
Espectro de energía de rayos cósmicos



Nota. Espectro de energía de rayos cósmicos por unidad de área, tiempo y ángulo sólido en unidades logarítmicas. También se muestra el tipo de medición de acuerdo a la energía. Extraído de Casaus & Gascón (2023).

2.2.3. Origen de los rayos cósmicos

Las posibles fuentes potenciales de los rayos cósmicos, en consecuencia, de los rayos gamma, abarcan supernovas (explosiones de estrellas masivas al final de su vida que aceleran partículas a enormes energías) y sus remanentes compuestos por gas y polvo, estrellas de neutrones o púlsares, núcleos galácticos activos (AGN, por sus siglas en inglés) y agujeros negros con discos de acreción de materia. Los rayos cósmicos se clasifican en solares, galácticos y extra galácticos según su origen y energía; los de menor energía (por debajo de $10^{15} eV$) que llegan a la tierra provienen de los vientos solares y las emisiones de masa coronal. Aquellos con energías algo más elevadas ($10^{18} eV$) se generan en explosiones de supernovas dentro de nuestra galaxia, en contraste, los rayos cósmicos de alta energía (mayores a $10^{19} eV$), estos tienen su origen en otras galaxias, cuásares, agujeros negros supermasivos y estallidos de rayos gamma también conocidos como GRBs (Reyes, 2017).

2.2.4. Clasificación de los rayos cósmicos según los procesos de interacción

Rayos cósmicos Primarios

Son aquellas partículas que fueron aceleradas de fuentes astrofísicas, con energías mayores a $10^{15} eV$ que a través del espacio siguen diferentes caminos ya que se encuentran rodeados de grandes campos magnéticos, fondo microondas y de materia que interactúan con las partículas haciéndolas perder energía y curvar su trayectoria. Estas partículas primarias llegan a la parte alta de la atmosfera (sin interactuar) por lo que pueden ser medidos directamente por detectores colocados en satélites (Abe, 2016).

Rayos cósmicos Secundarios

Es resultado de la interacción de los rayos cósmicos primarios con la atmosfera donde se producen colisiones de dos maneras: con la estructura electrónica del átomo o directamente con el núcleo. Las colisiones del primer tipo se producen por el mecanismo de la ionización donde la energía transferida en cada colisión está relacionada con la energía de enlace de los

electrones en el átomo, que con la energía de la partícula primaria. Las colisiones del segundo tipo (colisiones nucleares) son cuando el rayo cósmico primario (normalmente un protón) choca directamente con el núcleo de un átomo atmosférico incrementando el número de partículas en función a la trayectoria recorrida (García, 2017).

2.2.5. Rayos gamma

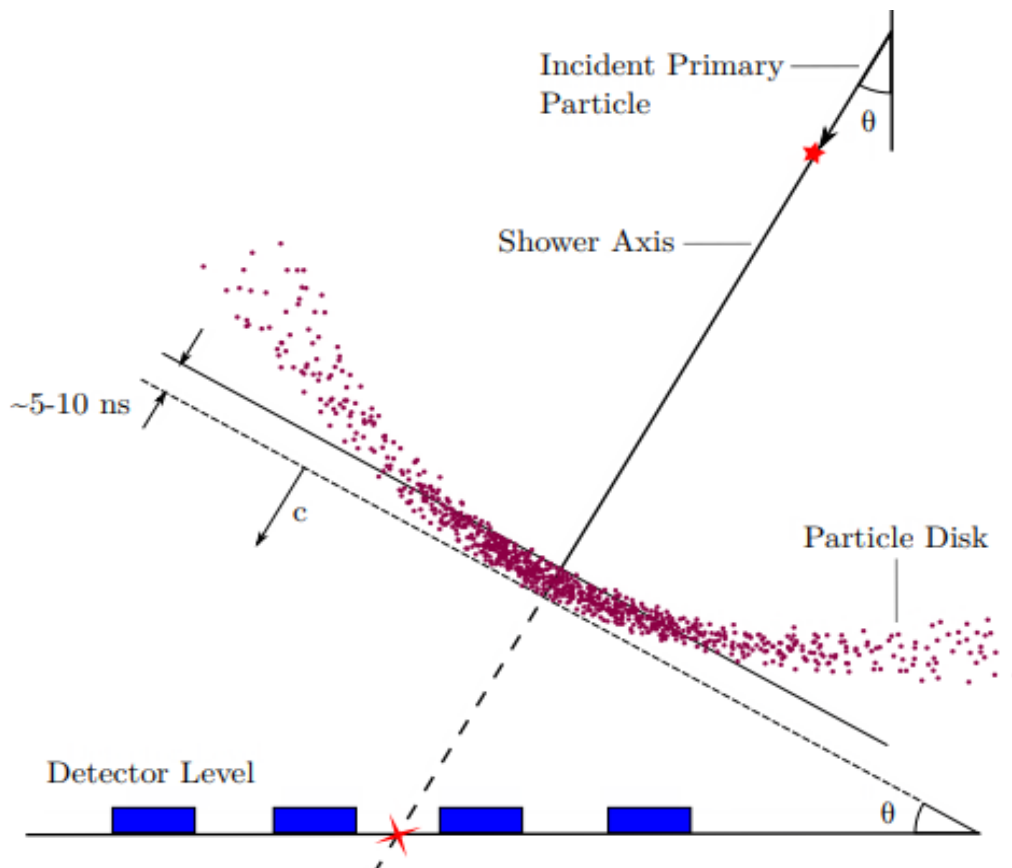
Los rayos cósmicos al ser acelerados por escenarios astrofísicos violentos liberan grandes cantidades de energía del cual una parte es emitida en forma de ondas electromagnéticas, es decir los rayos gamma. Se producen por medio de mecanismos más importantes como la dispersión Compton inverso que a diferencia del efecto Compton son los electrones que presentan energías de TeV que colisionan con fotones de bajas energías y generan rayos gamma con energía de TeV, Bremsstrahlung (electrones con energías de TeV pasan muy cerca al núcleo son frenados por el campo eléctrico emitiendo rayos gamma), radiación de sincrotrón (en presencia de campo magnético los electrones con energías de TeV son acelerados en movimiento circular emitiendo rayos gamma) y decaimiento de π^0 cuando los rayos cósmicos chocan con el medio interestelar. (Portocarrero, 2003).

Como parte característica de los rayos gamma, representan la sección más energética del espectro electromagnético ($E_0 > 1 \text{ MeV}$), con una longitud de onda (λ) inferior a 10^{-11} m , tienen propiedades tanto de partícula como de onda, pero cuando se habla de rayos gamma muy energéticos ya no presentan un comportamiento ondulatorio por lo que su detección se basa en técnicas aplicadas en física de partículas en aceleradores. Los rayos gamma de muy altas energías es la forma de radiación más penetrante, por lo que no se ven afectados por el campo magnético cósmico lo que permite la búsqueda de fuentes galácticas y extra galácticas (Kanbach, 2019).

2.2.6. Lluvias atmosféricas extendidas (EAS)

Las EAS (*Extensive Air Shower*) son cascada iniciadas por partículas primaria de altas energías o fotones que colisionan con un núcleo de oxígeno o nitrógeno en la parte superior de la atmósfera terrestre. Este evento genera partículas secundarias con el 50% de energía de la partícula primaria a través de procesos de interacción o decaimiento las cuales dependen de la energía de la partícula, vida media, densidad de la atmosfera, altitud y ángulo cenital. Al principio, el número de partículas crece rápidamente, alcanza un pico y luego disminuye a medida que las partículas pierden energía y caen por debajo del umbral necesario para generar más partículas. Estas cascadas son muy breves, llegan a durar alrededor de nanosegundos, y se extienden sobre una vasta área, cubriendo varios kilómetros cuadrados, según la energía de la partícula primaria (Greisen , 1960).

Figura 2
Cascada atmosférica



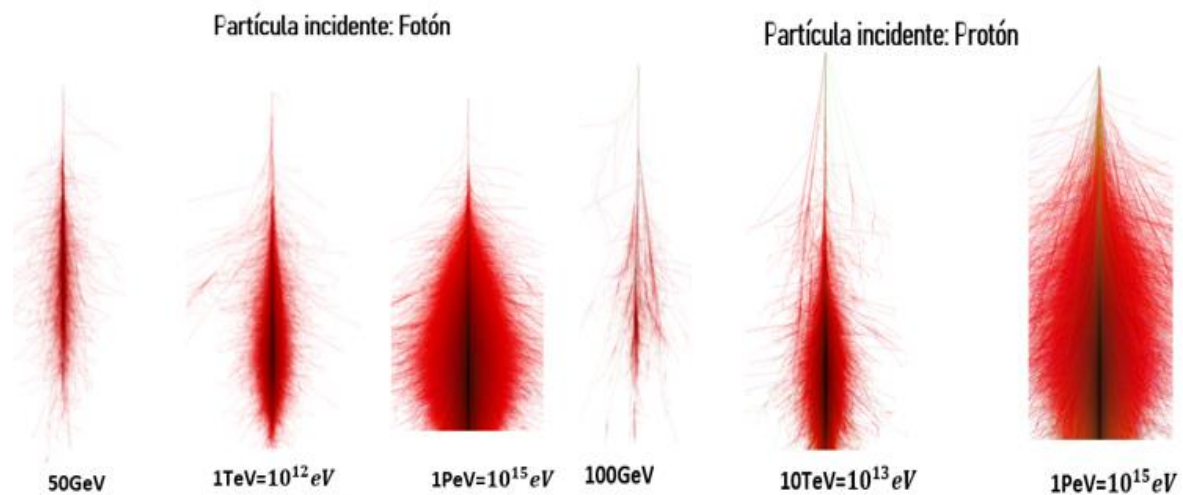
Nota Esquema de una cascada atmosférica, donde el punto rojo representa la primera interacción de la partícula mientras que la estrella roja nos representa el núcleo de la cascada, donde la densidad mayor de partículas está en la zona cercana al eje y decrece en los lados, extraído de Vallejo (2010)

Desarrollo Longitudinal de la EAS

El desarrollo longitudinal de la cascada sigue la trayectoria de la primera partícula incidente en dirección hacia el suelo y está determinado por la profundidad atmosférica. A medida que la cascada se expande, el número de partículas aumenta hasta alcanzar un máximo, para luego disminuir conforme las partículas pierden energía, el perfil longitudinal de la cascada está determinado principalmente por la masa y la energía de la partícula primaria (Grupen, 2020).

Figura 3

Desarrollo Longitudinal de las cascadas atmosféricas



Nota. Cascadas iniciadas por un fotón y protón con diferentes energías. Extraído y adaptado de Tim Huege

Desarrollo Lateral de las EAS

La expansión lateral de una cascada aérea extensa está determinada por los momentos transversales transferidos en las interacciones hadrónicas y por la dispersión múltiple de partículas de la cascada de baja energía, esta característica varía según la componente de la cascada; por ejemplo, la distribución lateral de los muones es relativamente plana en comparación con la distribución lateral de electrones y hadrones, que tienden a dispersarse más (Grupen, 2020).

2.2.7. Componentes de las cascadas atmosféricas

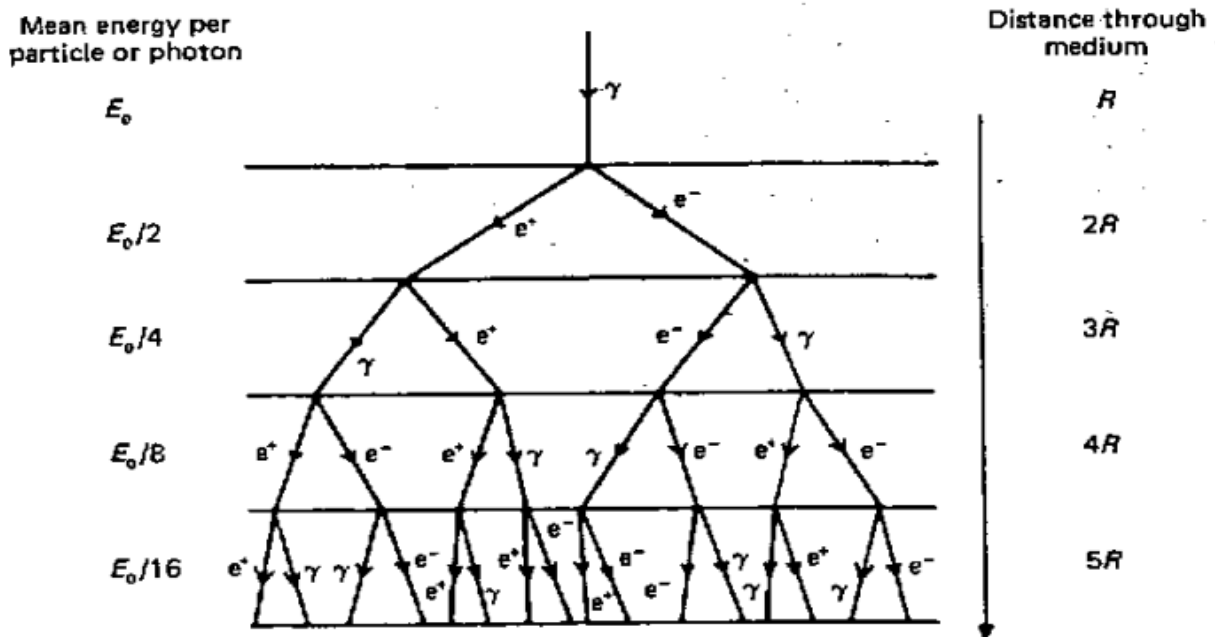
Las lluvias atmosféricas extensas (EAS) tienen componentes que dependen del tipo de partícula secundaria que inicia la interacción con la atmósfera (Gaisser, 1990) .

2.2.7.1. Componentes Electromagnéticas

La partícula primaria es usualmente un fotón de alta energía (rayo gamma), que inicia la componente electromagnética que es el proceso de creación de pares electrón-positrón y la aniquilación subsecuente, lo que resulta en la emisión de nuevos fotones gamma pero también es subproducto de la interacción de partículas secundarias (Grieder, 2001).

El desarrollo de las cascadas electromagnéticas se describe utilizando el modelo de Heitler (Figura 4), en este modelo el rayo gamma primario con una energía inicial E_0 recorre una distancia promedio R antes de interactuar con los núcleos atómicos de la atmósfera, consecuentemente produciendo un par electrón-positrón, donde cada una de estas partículas tendrá la mitad de la energía del fotón inicial, es decir $E_0/2$; a medida que las partículas avanzan, en la siguiente distancia de $2R$, el electrón y el positrón pierden la mitad de su energía mediante el proceso de Bremsstrahlung, emitiendo nuevos fotones con una energía de $E_0/4$, al seguirse produciendo este proceso, se generan 2^n partículas con energías de $E_0/2^n$ hasta que cada partícula alcanza una energía crítica E_c , que por debajo de este umbral ya no es posible generar nuevas partículas secundarias. En este punto, la cascada electromagnética alcanza su máximo desarrollo, y el número total partículas (fotones y electrones) está dado por la relación E_0/E_c (Longair, 1994).

Figura 4
Desarrollo de cascada electromagnética



Nota. Representación gráfica del desarrollo de una cascada electromagnética. Extraído de Longair (1994)

Las interacciones más importantes en el desarrollo de la cascada electromagnética son:

- Producción de pares: Este fenómeno ocurre cuando un fotón con una energía superior a 1.052 MeV interactúa con un átomo en la atmósfera, generando un par electrón-positrón (Galindo, 2017). La reacción se expresa como



- *Bremsstrahlung*: Este proceso se presenta cuando una partícula cargada (como un electrón o positrón) es desviada de su trayectoria original por el campo eléctrico de un núcleo atómico o de otro electrón, emitiendo radiación de frenado; es un fenómeno significativo para partículas de baja masa, como electrones y positrones, aunque tiene menor relevancia para muones, piones y protones. Es importante destacar que los fotones emitidos tienden a ser de baja energía debido a la mayor probabilidad de interacción en este rango (Gruppen, 2020) .



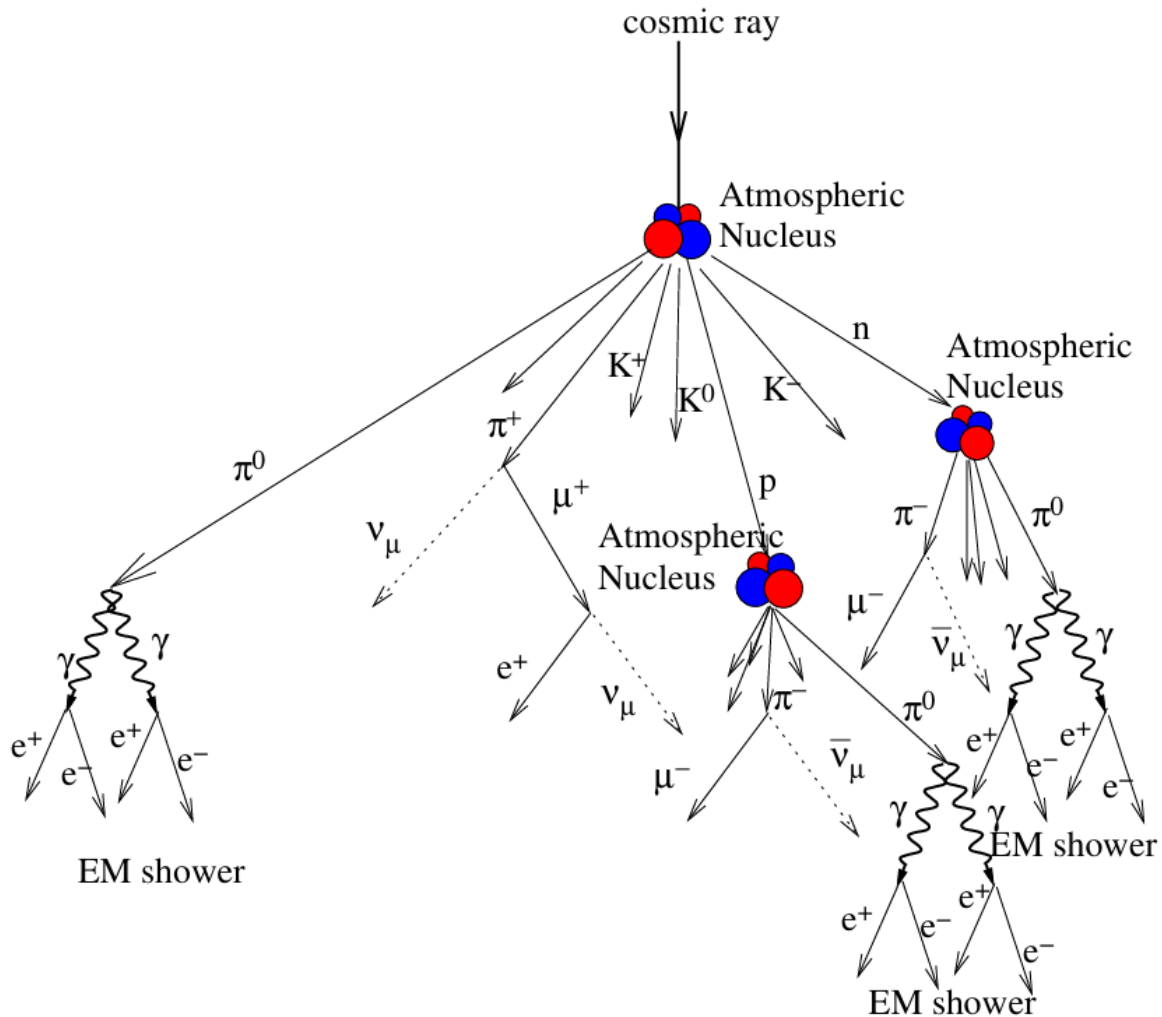
Los productos más comunes de estas interacciones son piones en sus tres formas de carga eléctrica (90%) y kaones (10%), junto con otros bariones ligeros como protones, neutrones y sus antipartículas; los piones cargados y kaones tienden a interactuar nuevamente antes de desintegrarse debido a su vida media relativamente alta ($2.6 \times 10^{-8} s$) en comparación a la distancia promedio al siguiente núcleo (Vallejo, 2010).

Los piones neutros (π^0) se desintegran rápidamente en dos fotones casi inmediatamente después de su generación, ya que su vida media es extremadamente corta ($8.4 \times 10^{-17} s$), siendo poco probable su interacción con núcleos atmosféricos. La desintegración de los piones neutros produce pares electrón-positrón, los cuales posteriormente emiten radiación de Bremsstrahlung, generando así una subcascada electromagnética (Grieder, 2001):



La desintegración de los kaones neutros (K_0) es más compleja, ya que poseen carga de extrañeza (describe la presencia de quarks extraños en hadrones) y no pueden ser sus propias antipartículas. Existen dos tipos K_0 conocidos como k_L^0 (K-long) y k_S^0 (K-short) que se diferencian por sus tiempos de vida media, ambas finalmente decaen en piones cargados (Vallejo, 2010).

Figura 6
Cascada de partículas iniciada por hadrones



Nota. Cascada de partículas iniciada por hadrones con energías superiores a 10^{15} eV, donde cada línea describe varias partículas secundarias. Extraído de Vallejo (2010)

2.2.8. Muones atmosféricos

Los muones son partículas con características similares al electrón, como la carga eléctrica, pero con una masa en reposo de $105.65 \text{ MeV}/c^2$ lo que los hace más pesados que los electrones. Debido a su alta velocidad relativista y su vida media en reposo de $2.19 \times 10^{-6} \text{ s}$ los muones son particularmente adecuados para ser detectados a nivel de superficie terrestre. Además, su pequeña sección eficaz de interacción con la materia les permite atravesar grandes distancias sin perder mucha energía (Grieder, 2010).

Los muones se generan como subproductos de las desintegraciones de mesones cargados (piones y kaones) a través de interacciones débiles, proceso en el cual también se producen neutrinos que atraviesan la atmósfera con facilidad.

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (5)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (6)$$

$$K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu) \quad (7)$$

A pesar de que la vida media de los muones en reposo es breve, la dilatación temporal y la baja probabilidad de interacción con la materia permiten que la mayoría de los muones alcancen la superficie terrestre. El resto, sin embargo, decaen en electrones, positrones y neutrinos, con una probabilidad de desintegración dependiente de su energía (Grieder, 2001):

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e \quad (8)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e \quad (9)$$

Los núcleos pesados como núcleos de hierro tienden a producir una cantidad mayor de muones y exhiben variaciones bajas en comparación con los núcleos más ligeros. Por lo tanto, el recuento de muones es crucial para realizar comparaciones sobre la composición de masa y detectar la emisión de rayos gamma primarios, electrones cósmicos y núcleos de rayos cósmicos (Cao & Aharonian , 2023)

Para estimar el flujo de muones que llega a la superficie terrestre, se utiliza la ecuación definida por Nuñez y Molina (2011):

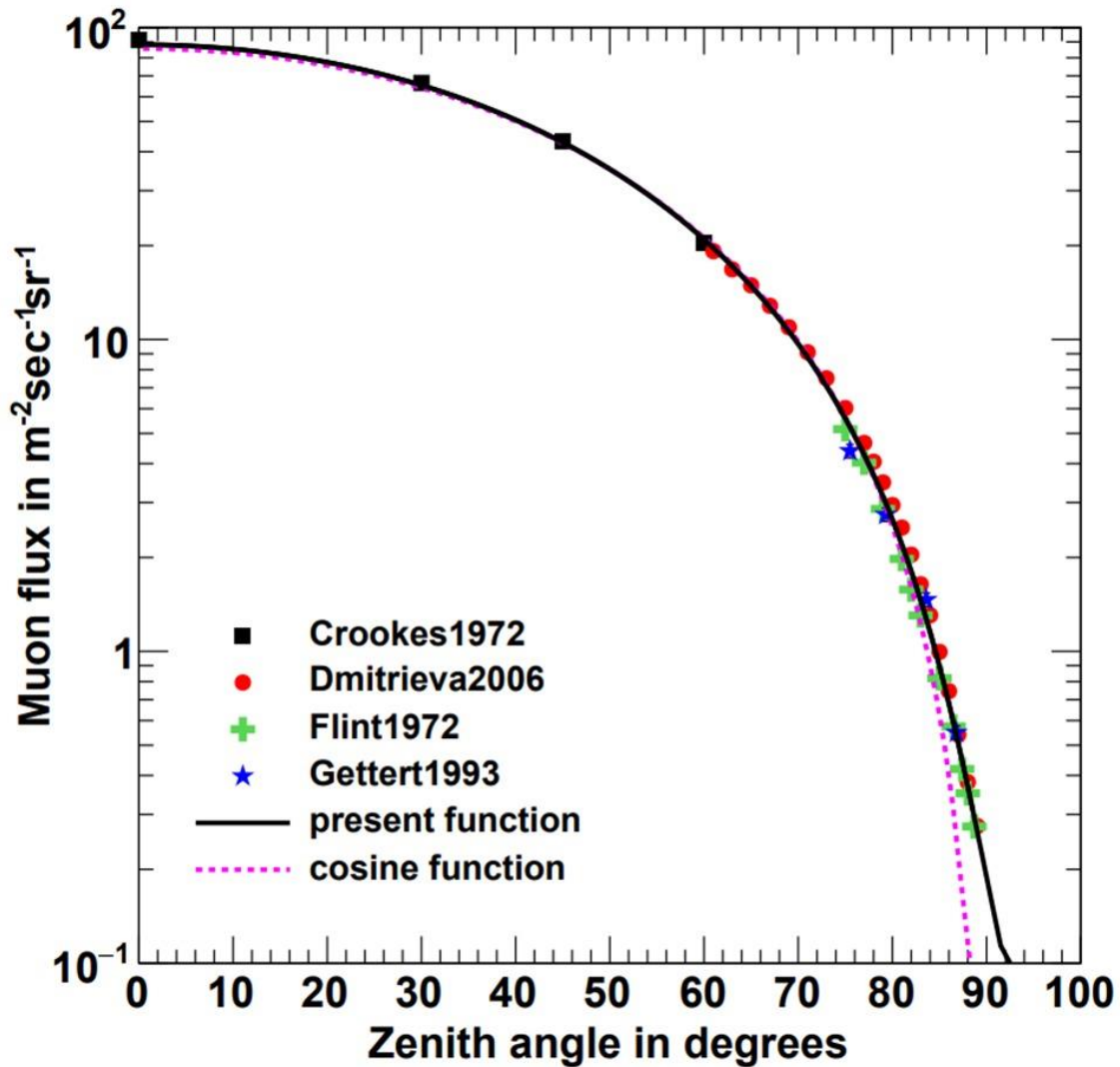
$$I(\theta, h, E) = I_0 \cos^{n(E,h)}(\theta) \quad (10)$$

Dentro del marco de las mediciones experimentales del flujo de muones al nivel del mar muestra que $n \sim 2$, lo que permite describir la ecuación de la siguiente forma:

$$I(\theta) = I_0 \cos^2(\theta) \quad (11)$$

Figura 7

Flujo de muones en función del ángulo cenital, ajustado según la distribución teórica de $\cos\theta^2$ representada por la línea roja punteada.



Nota. El gráfico muestra la escala logarítmica lo que indica que el flujo de muones disminuye rápidamente con el incremento del ángulo cenital. Extraído Shukla y Sankrith (2018)

2.2.9. Mecanismo de pérdida energética de los muones

Los muones alcanzan el nivel del mar con una energía promedio de 4 GeV. Al ser partículas cargadas, interactúan con la materia principalmente a través de ionización y, en menor medida, mediante procesos de radiación de frenado. Durante estas interacciones, los muones pierden energía debido a la dispersión electromagnética, la cual ocurre cuando colisionan con los electrones de las moléculas presentes en el aire, la pérdida de energía es proporcional a la cantidad de materia que atraviesan y está descrita por la fórmula de Bethe-

Bloch para partículas cargadas relativistas, que consideran procesos de ionización y excitación atómica (Reyes, 2017) .

$$\frac{-dE}{dx} = 4\pi n_e r_e^2 m_e c^2 \frac{z^2}{\beta^2} \left(\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 Q_{max}}{I^2} \right) - \beta^2 \right) + \delta(E) \quad (12)$$

Donde:

E: Energía del muon incidente

I: Energía promedio de excitación del material atravesado

Z: Número atómico del promedio de los elementos químicos presentes en el material atravesado, A: número másico y ρ densidad del material atravesado

N_A : Número de Avogadro

$n_e = Z \frac{N_A \rho}{A}$: Número de electrones por m^3 del material atravesado

m_e : Masa del electrón

$r_e = e^2 / 4\pi e_0 m c^2$: Radio del electrón

$z=1$: Carga del muon (expresado en coulomb)

$M= m_\mu$: Masa del muon

$\beta = \frac{v}{c}$: Velocidad relativa del muon

$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$: Factor de Lorentz del muon

$Q_{max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + \frac{2m\gamma m_e}{M} + (m_e/M)^2}$: Máxima energía cinética de retroceso del electrón

$\delta(E)$: Factor de corrección a la fórmula de Bethe en dependencia de la energía

Al tomar en cuenta aproximaciones como $\gamma \frac{m_e}{m_\mu} \ll 1$, $Q_{max} = 2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2$, y despreciar

$\delta(E)$ para energías $E_\mu > 1TeV$, la ecuación (10) se reduce a (Reyes, 2017) :

$$\frac{-dE}{dx} = 4\pi n_e r_e^2 m_e c^2 \frac{z^2}{\beta^2} \left(\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I} \right) - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right) \quad (13)$$

Es importante destacar que cuando una partícula entra en la atmósfera con un ángulo inclinado en lugar de una trayectoria vertical, la distancia que recorre es mayor. Como consecuencia, las partículas en trayectorias inclinadas atraviesan más atmósfera y pierden más energía debido a la mayor interacción con las moléculas presentes (Shukla & Sankrith, 2018).

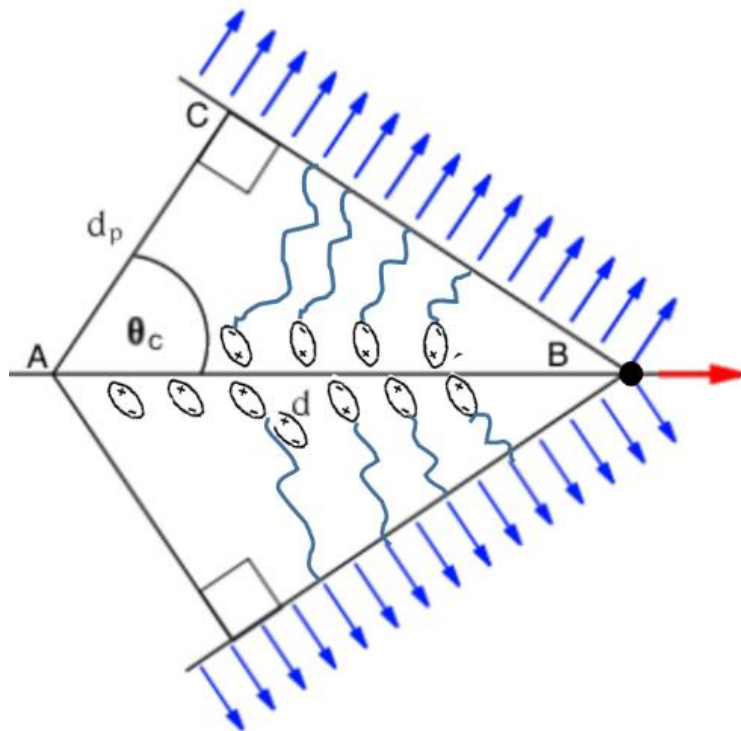
El poder de frenado que experimenta el muon tanto en aire como agua calculada para las condiciones del observatorio HAWC asume un valor constante de $\approx 2.5\text{MeV}$ por g/cm^2 (Ruiz Velasco, 2021).

2.2.10. Efecto Cherenkov en la atmósfera y en el agua

La luz Cherenkov se genera cuando una partícula cargada se desplaza a una velocidad constante superior a la velocidad de la luz en un medio dieléctrico; la partícula cargada induce la polarización de los átomos del material, lo que genera pequeños dipolos temporales a lo largo de su trayectoria. La formación y desaparición rápida de estos dipolos produce la radiación coherente conocida como luz Cherenkov (Portocarrero, 2003).

Figura 8

Diagrama de cono de la radiación Cherenkov



Nota. Figura adaptada

Para que se manifieste la radiación Cherenkov, la partícula cargada debe tener una velocidad umbral que depende del índice de refracción del medio (Ferrer & Ros, 2014).

$$\beta_u = \frac{1}{n} \quad (14)$$

Donde $\beta_u = V/c$ siendo V la velocidad de la partícula cargada, c la velocidad de la luz en el vacío y n el índice de refracción del medio.

Y para que la partícula cargada supere la velocidad de la luz en el medio debe tener una energía mínima que se obtiene a partir de la relación relativista:

$$E_u = \gamma_u mc^2 = mc^2 \sqrt{\frac{n^2}{n^2 - 1}} \quad (15)$$

Donde m es la masa de la partícula y n corresponde al índice de refracción del medio, γ_u es el factor de Lorentz.

La luz Cherenkov es emitida en forma de cono que rodea la trayectoria de la partícula, con un ángulo de apertura determinado por:

$$\cos\theta_c = \frac{1}{n\beta} \quad (16)$$

El ángulo de emisión de la luz Cherenkov varía con la energía, en el caso del agua con un índice de refracción $n = 1.33$ alcanza un valor máximo de:

$$\theta_c = 41^\circ 31' \quad (17)$$

La emisión de la radiación de Cherenkov implica que la partícula pierde parte de su energía cinética que se convertirá en luz cercana al ultravioleta.

Se expresa como energía disipada por recorrido (Ferrer & Ros, 2014).

$$\frac{dE}{dx} = Z_1^2 \alpha \frac{\hbar}{c} \int w \sin^2 \theta_c dw \quad (\text{eV/cm}) \quad (18)$$

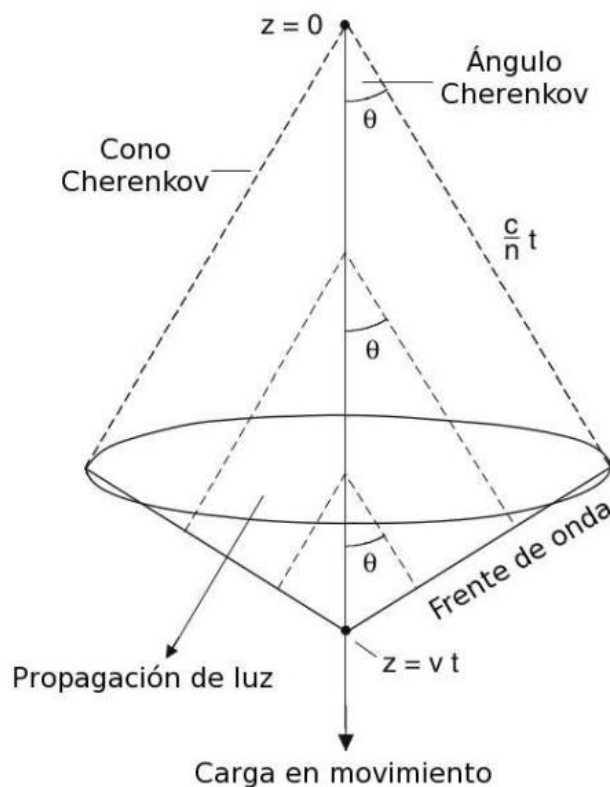
Donde Z_1^2 es el número atómico de la partícula, w es la frecuencia angular de fotones. A partir de esta ecuación podemos deducir el número de fotones producidos por unidad de recorrido de la partícula (Galindo, 2017).

$$\frac{dN}{dx} = 475 \cdot Z_1^2 \text{sen}^2 \theta_c \quad (\text{fotones/cm}) \quad (19)$$

La velocidad que adquiere la luz depende del índice de refracción del medio que en el agua es $n=1.33$ y en el aire $n=1.0003$, el efecto Cherenkov se genera siempre y cuando la partícula cargada tenga una energía que sea mayor a la energía umbral.

La investigación se enfoca en la generación de luz Cherenkov en agua, por lo que resulta crucial analizar la relación entre la intensidad de la luz y la profundidad del medio, esto permitirá comprender la parte experimental del arreglo del observatorio, como se muestra en la Figura 9, donde se esquematizan las características y componentes del efecto Cherenkov.

Figura 9
Diagrama del efecto Cherenkov y sus componentes.



Nota. Extraído de Grieder (2010)

2.2.11. Principios físicos de detección de fotones

Al analizar los rayos cósmicos y gamma, surgen preguntas esenciales: ¿Cómo se detectan? ¿Cómo rastreamos su origen y determinamos sus energías? ¿Cuál fue su fuente? La detección de estas partículas y radiaciones de alta energía requiere el uso de tecnologías avanzadas y equipos sofisticados.

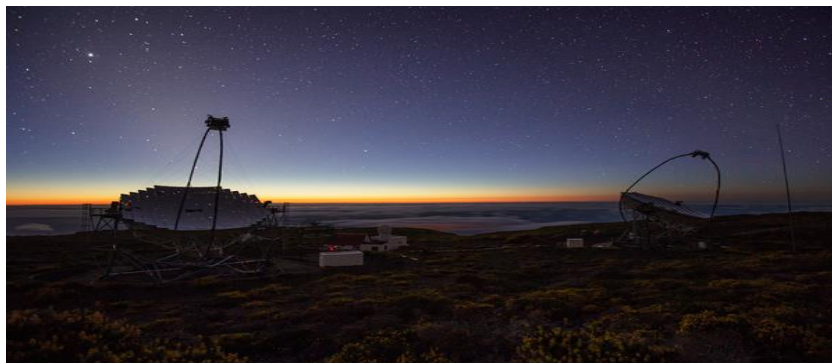
A continuación, se detallarán los principios físicos y métodos para detectar rayos gamma de muy alta energía, el eje central de esta investigación, se describirán los equipos tecnológicos actuales, como los telescopios espaciales y los telescopios terrestres basados en el efecto Cherenkov, que se utilizan para capturar y analizar estos fotones de alta energía.

Telescopios Cherenkov Atmosféricos (IACT)

Los IACTs (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes) están diseñados para detectar fuentes de rayos gamma de energía TeV. Captan la radiación Cherenkov emitida por las cascadas de partículas generadas cuando un rayo gamma impacta la atmósfera terrestre. La reconstrucción de la estructura y dirección de la cascada se facilita mediante la técnica de imagen estereoscópica. Estos telescopios están formados por arreglos de múltiples espejos con grandes áreas colectoras de aproximadamente ($\sim 100 \text{ m}^2$), Ejemplos destacados de IACTs incluyen los observatorios HESS, VERITAS, MAGIC, CANGAROO, HEGRA y el telescopio de 10 metros del Observatorio Whipple (Lacki, 2011).

Figura 10

Telescopio MAGIC



Nota. Extraído de Comunicación y Cultura Científica (2019), Telescopio MAGIC (Major Atmospheric Gamma ray Imaging Cherenkov Telescope), con 17 metros de diámetro junto a su gemelo MAGIC-II, Islas Canarias La Palma

Detectores Cherenkov de Agua (WCD)

Los detectores de agua Cherenkov (WCD) funcionan a nivel del suelo, detectando las partículas secundarias que resultan de las cascadas atmosféricas, cuando estas partículas se desplazan a una velocidad superior a la velocidad de la luz en el agua, generan luz Cherenkov. Este sistema de detección, además de contener agua ultrapura que funciona como medio radiador para producir luz Cherenkov está conformado por fotomultiplicadores que funcionan en el rango azul-ultravioleta y por lo general, está organizado en arreglos (Galindo, 2017).

Actualmente, dentro de este sistema se encuentra el observatorio HAWC.

Figura 11

Fotografía del Observatorio HAWC-Puebla-Detector Cherenkov de Agua



Nota. Primera visita al observatorio HAWC para la recopilación preliminar de datos – Imagen propia

2.2.12. Fotomultiplicadores

Todos estos sistemas de detección operan con tubos fotomultiplicadores (PMTs), que son dispositivos sensibles que se encuentran al vacío y que convierte la luz recibida en una señal eléctrica medible, mediante la emisión de electrones que son acelerados y multiplicados en una cadena de dinodos formando una corriente eléctrica que se colecta en el ánodo, la cual es medida para determinar la intensidad y el tiempo de llegada de la luz (Tanarro Sanz, 1970).

Principios Físicos de los PMTs

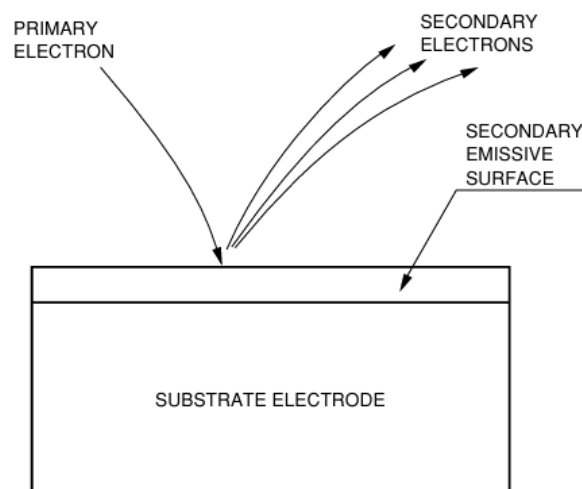
Efecto Fotoeléctrico. Ocurre cuando un fotón al interactuar transfiere toda su energía a un electrón atómico del material haciendo que salga disparado un fotoelectrón con

una velocidad que depende de la energía del fotón incidente. Este proceso ocurre cuando la energía del fotón incidente es igual o mayor a la energía de ligadura del electrón, que puede variar entre unos pocos eV hasta unos MeV. Sin embargo, no todos los fotones que inciden al material provocan la emisión de fotoelectrones a esta relación entre el número de electrones emitidos y números de fotones incidentes se le denomina eficiencia cuántica. (Monedero et al., 2016).

Emisión Secundaria. Es el proceso durante el cual los electrones primarios impactan sobre la superficie del primer dinodo transfiriendo su energía a los electrones de este material excitándolos y emitiendo varios electrones secundarios. La relación entre la cantidad de electrones secundarios generados por electrón primario es denominada coeficiente de emisión secundaria δ que contribuye a la amplificación de la señal (Hamamatsu Photonics K.K., 2019).

Figura 12

Emisión secundaria en un dinodo



Nota. Esta emisión secundaria se repite para cada dinodo posterior. Extraído de Hamamatsu Photonics K.K (2017).

Componentes de los PMTs

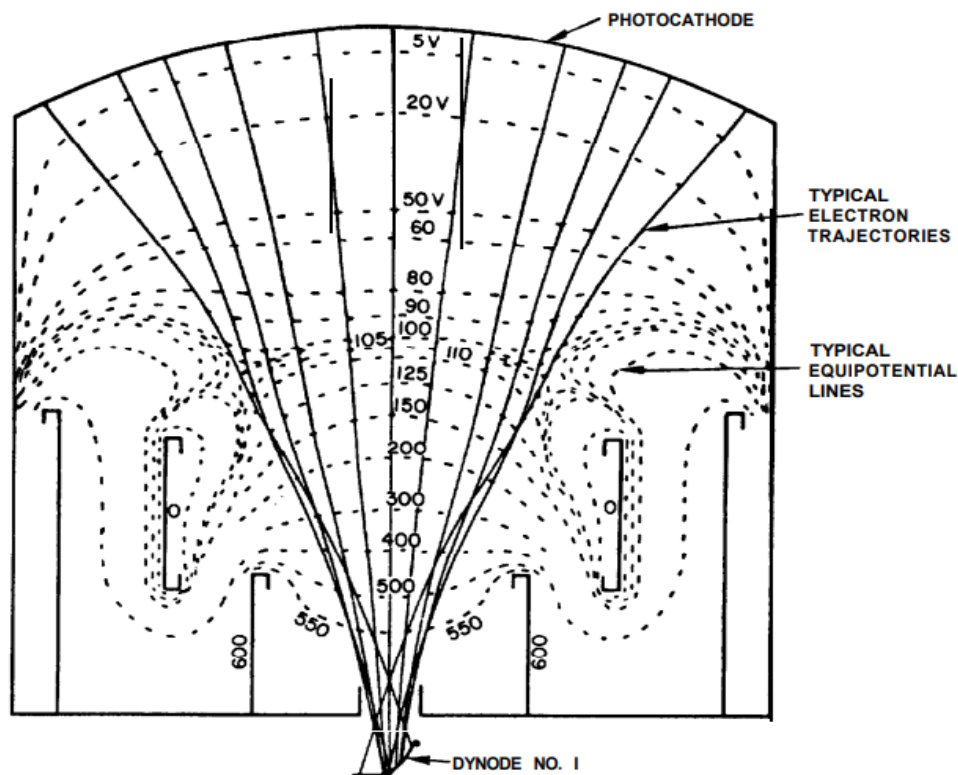
- **Fotocátodo:** Es el material donde los fotones colisionan y generan fotoelectrones. Los fotocátodos, que se emplean en dispositivos como los fotomultiplicadores, están fabricados a partir de semiconductores Bialkali (Antimonio Sb y Cesio-Cs) que están compuestos por metales alcalinos, como el antimonio (Sb) y el cesio (Cs), que tienen una función de trabajo

más baja, lo que facilita la emisión de electrones al ser impactados por los fotones. (Hamamatsu Photonics K.K., 2017).

- **Electrodos de enfoque:** Se encuentran ubicados entre el fotocátodo y el primer dinodo, tiene el propósito de enfocar el número máximo de fotoelectrones hacia el dinodo independientemente de la velocidad y la ubicación de donde son emitidos a través del campo eléctrico (Flyckt & Marmonier, 2002) . La eficiencia de colección está relacionada entre el número de electrones que aterrizan en el área efectiva del primer dinodo y el número de fotoelectrones emitidos y por lo general comprende entre el 60 al 90 por ciento (Hamamatsu Photonics K.K., 2017).

Figura 13

Trayectorias que siguen los fotoelectrones hacia el primer dinodo, generados por el campo eléctrico



Nota. Dentro de la variedad de PMTs hay algunos que pueden incorporar uno o más electrodos de enfoque. Extraído de Picosecond Timing Project-University of Chicago.

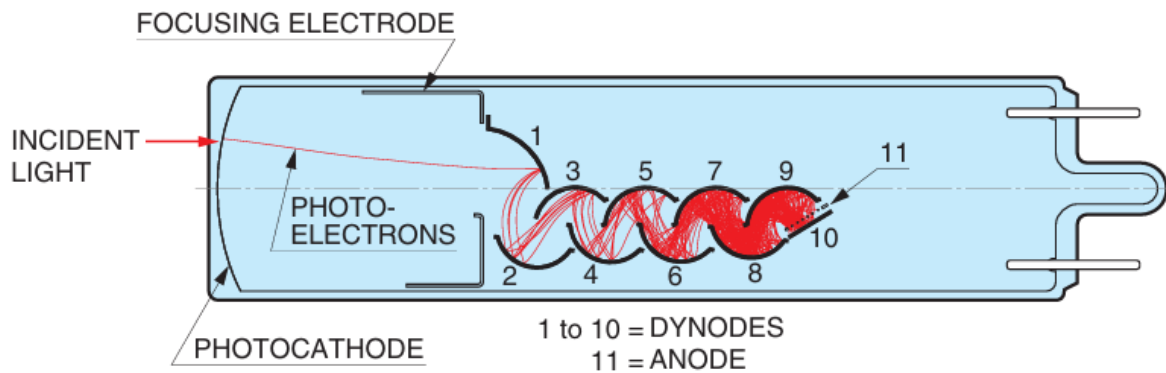
- **Dinodos:** Es el sistema de multiplicación de los fotoelectrones los cuales son acelerados por la diferencia de voltaje, entre el fotocátodo y el primer dinodo. Por lo general consiste

en más de 10 capas curvas de electrodos, donde cada capa presenta un voltaje superior al anterior.

Los principales materiales usados para desarrollar los dinodos son de antimonio de alcalino (Sb), óxido de berilio (BeO) y óxido de magnesio (MgO). Estos materiales se recubren sobre un electrodo de sustrato hecho de níquel, acero inoxidable o aleación de cobre-berilio (Hamamatsu Photonics K.K., 2017).

Figura 14

Tubo Fotomultiplicador de tipo de enfoque lineal

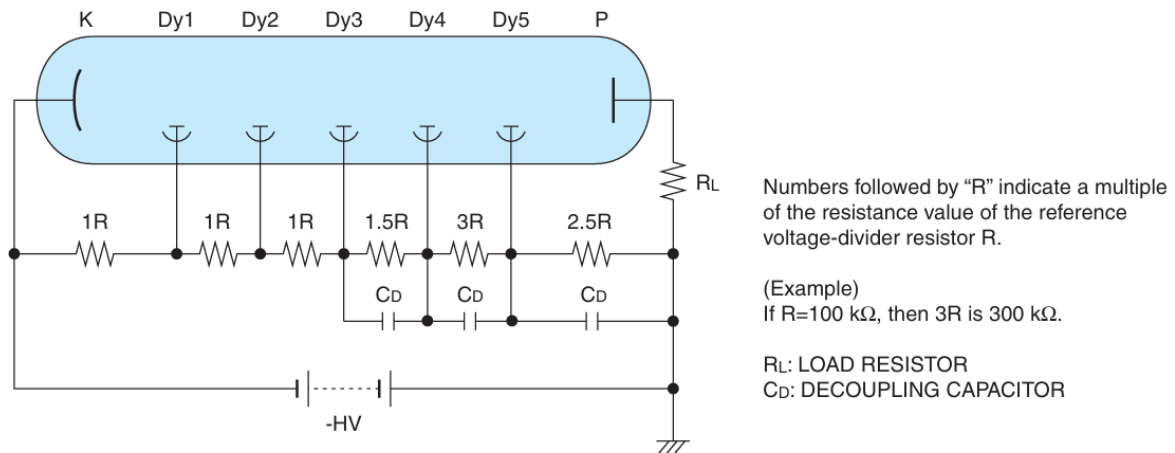


Nota. Extraído de Hamamatsu Photonics K.K (2017).

- **Ánodo:** Es el electrodo responsable de recoger los electrones secundarios multiplicados de la última capa y enviar la corriente de electrones a un circuito externo (Hamamatsu Photonics K.K., 2017).
- **Divisor de Voltaje:** Un tubo fotomultiplicador opera con una fuente de alimentación de alto voltaje que proporcione de 500 a 3000 voltios gradualmente entre los dinodos a un potencial negativo o positivo. El divisor de voltaje consiste en una cadena de resistencias de 100 kilohmios a 1 megaohmio que justamente distribuye el alto voltaje entre el cátodo, los electrodos de enfoque, los dinodos y el ánodo. Dentro del circuito se emplean capacitores porque en los dinodos finales hay corrientes mayores (Hamamatsu Photonics K.K., 2017).

Figura 15

Circuito divisor del Tubo Fotomultiplicador Hamamatsu de 5 etapas



Nota. El voltaje entre Dy5-P (ánodo) se establece ligeramente más bajo que el voltaje Dy4-Dy5 para que el ánodo recoja los electrones secundarios liberados con un voltaje relativamente bajo debido a la separación corta entre ellos, extraído de Hamamatsu Photonics K.K. (2017).

Características de los PMTs

En un sistema de multiplicación de electrones es ideal tener una ganancia constante para una energía fija del electrón incidente, sin embargo, en la práctica electrones con misma energía producen diferentes números de electrones secundarios lo que producen variaciones en la ganancia que se debe a factores que componen el sistema. Los PMTs pueden llegar a ser tan sensibles que pueden detectar un fotoelectrón único, dicho espectro del electrón único es una medida de fluctuaciones en una cadena de amplificación, este criterio es clave para elegir el uso de una de las variedades de los PMTs según el tipo de experimento ya que implicar cambios en sus características específicas (Hamamatsu Photonics K.K., 2019).

Seguidamente, se detallarán características importantes de los PMTs necesarias para nuestra investigación:

Eficiencia Cuántica

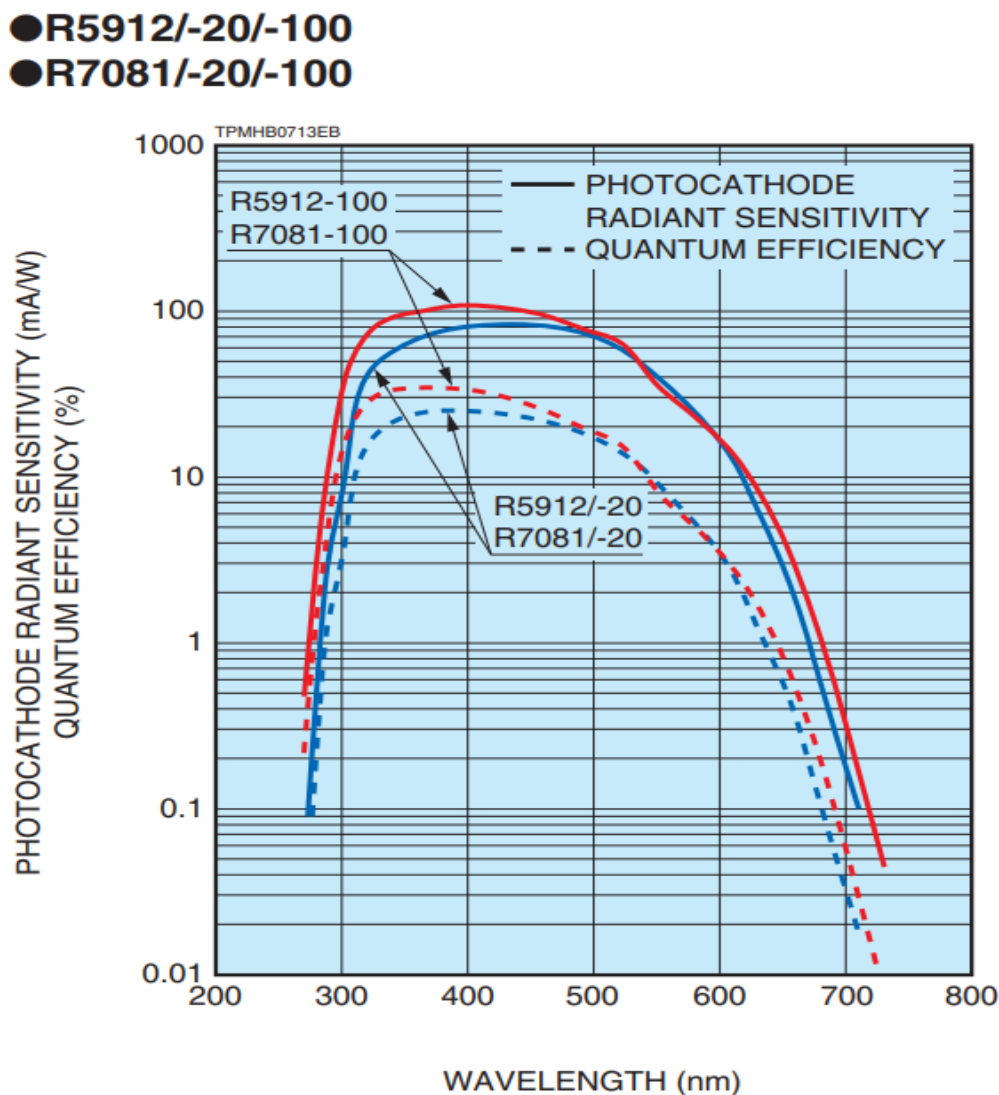
Es la relación entre el número de fotoelectrones emitidos entre el número de fotones incidentes al cátodo. Es una relación probabilística que depende de la longitud de onda del fotón incidente (λ) para producir fotoemisión y la estructura del material (fotocátodo), se expresa como:

$$n(\lambda) = \frac{\text{fotoelectrones emitidos}}{\text{fotones incidentes}} \quad (7)$$

En la figura 15 se presenta la gráfica que relaciona la longitud de onda del fotón incidente con la eficiencia cuántica. En la gráfica, se observa que la eficiencia cuántica de los PMTs R5912/-20/-100, R7081-20/-100 son inferiores al 30% a lo largo del espectro analizado (Hamamatsu Photonics K.K., 2019).

Figura 16

Eficiencia cuántica en función de la longitud de onda del fotón incidente sobre el fotocátodo



Nota. Extraído de Photomultiplier tube R7081 | Hamamatsu Photonics K.K.. (2019).

Ganancia

Nos indica el factor de amplificación total a partir de la energía del electrón primario la cual depende del número de dinodos en el PMT y del factor de emisión secundaria δ que a su

vez depende de la diferencial de voltaje aplicado entre las etapas de los dinodos V_d , a partir de lo mencionado la ganancia queda determinada por (Hamamatsu Photonics K.K., 2019):

$$G = \delta^n = (KV_d)^n \quad (8)$$

Donde n es el número de dinodos y K es una constante de proporcionalidad.

Corriente Oscura

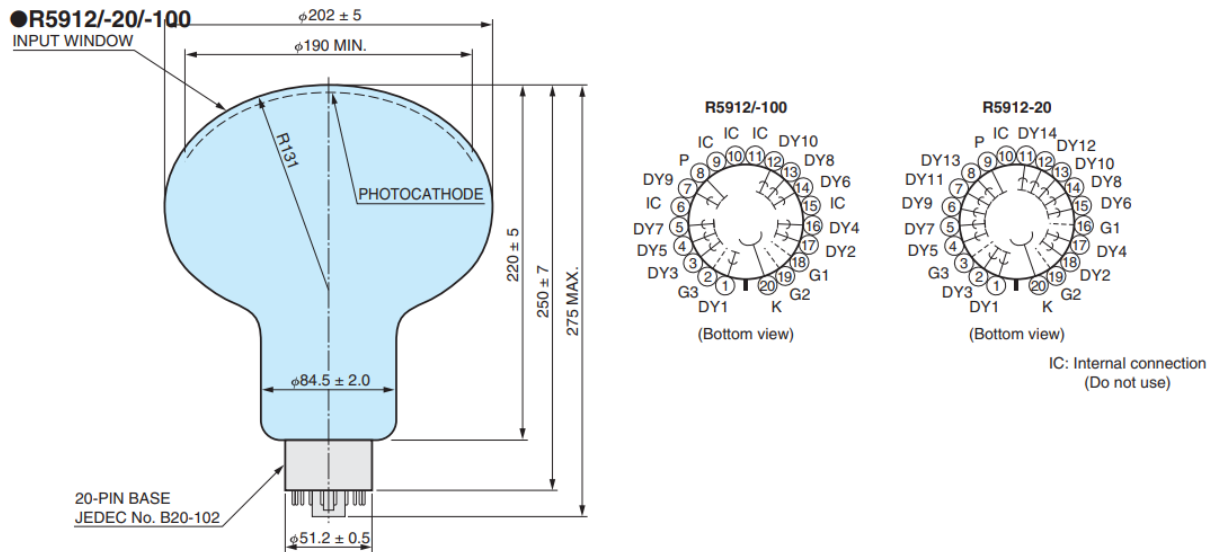
Los tubos fotomultiplicadores (PMTs) son muy sensibles a la luz que incluso cuando opera en completa oscuridad fluye una pequeña corriente denominada corriente oscura una de las contribuciones importantes es la emisión térmica de electrones del cátodo y dinodos por tener funciones de trabajo mínimos a temperatura ambiente (Hamamatsu Photonics K.K., 2019).

Tipos de PMTs en HAWC

Especificaciones técnicas de los dos equipos que se emplean en los tanques de HAWC, fabricados por Hamamatsu Photonics.

1. El PMT-R5912 (340cm^2) es un tubo fotomultiplicador con un diámetro de 202 mm (8 pulgadas). Este detector utiliza un fotocátodo de Bialkali con una ventana de vidrio de borosilicato. La estructura del dinodo es lineal que consta de 10 etapas. La parte efectiva del PMT es de 190mm de diámetro, respuesta espectral abarca desde 300 nm hasta 650 nm, con una eficiencia cuántica de 25%. En términos de voltaje: un voltaje de 2000 V se aplica desde el ánodo hasta el cátodo y entre el ánodo y el último dinodo, se aplica un voltaje de 300 V (Abeysekara et al., 2023).

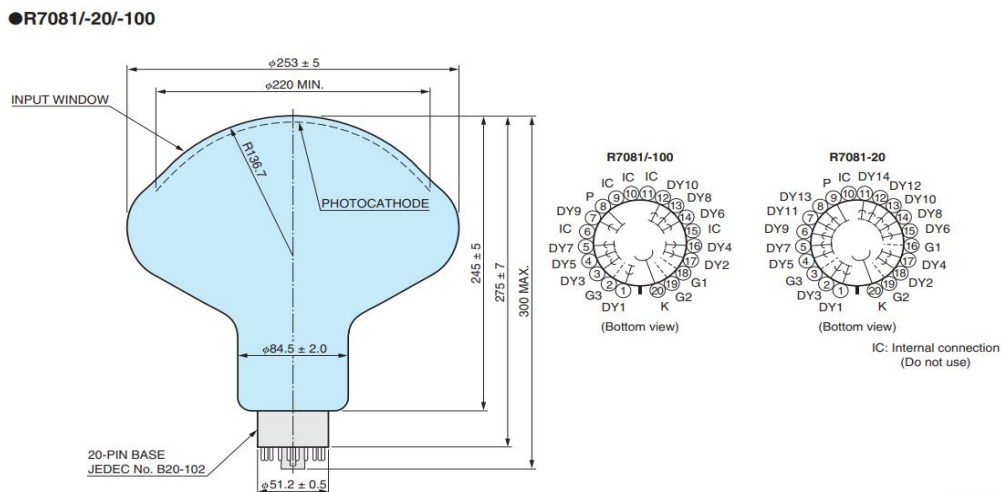
Figura 17
 Diagrama dimensional del tubo fotomultiplicador R5912/-20/-100



Nota. Extraído Photomultiplier tube R7081 | Hamamatsu Photonics. K.K. (2019)

2. El PMT-R7081-02 (530cm^2), tubo fotomultiplicador de 254mm de diámetro (10 pulgadas), este dispositivo utiliza un fotocátodo de Hialkali con una ventana de vidrio de borosilicato. La estructura del dinodo es lineal que consta de 10 etapas. La parte efectiva del PMT es de 220mm de diámetro, respuesta espectral abarca desde 300 nm hasta 650nm con un pico de respuesta a 420nm de longitud de onda y eficiencia cuántica de 30%. En términos de voltaje también se le aplica un voltaje de 2000 V desde el ánodo hasta el cátodo y entre el ánodo y el último dinodo, se aplica un voltaje de 300 V (Abeysekara et al., 2023).

Figura 18
 Diagrama dimensional del tubo fotomultiplicador R7081/-20/-100.



Nota. Extraído de Photomultiplier tube R7081 / Hamamatsu Photonics. K.K. (2019) agrandar las figuras

Ambos PMTs presentan una corriente oscura de ánodo de 100nA hasta 1000 nA, tiempo de subida de 3.6ns, tiempo de tránsito de 62 ns con dispersión de 2.4 ns para el PMT-R5912 y 3.4 ns para el PMT-R7081. La base de los PMTs está constituida por una serie de resistencias pasivas y un condensador de alto voltaje en los últimos dos dinodos para evitar caídas de voltaje originadas por pulsos de gran amplitud (Abeysekara et al., 2023). En observatorio HAWC al colocar los PMTs sumergidos en los tanques es necesario aislar el circuito asociado y no dañarla, por ende, se le agrega una base de PVC y un circuito divisor.

Figura 19.

Tubo Fotomultiplicador usado en los tanques de HAWC



Nota. Presenta una base de PVC y pequeños orificios donde se ponen pernos para anclarla en la profundidad del tanque, elaboración propia

2.2.13. Detectores de centelleo

Se basa en el proceso de excitación de una gran cantidad de partículas constituyentes del material centellador a partir de la interacción de la radiación con la materia. Cuando una partícula cargada pierde parte de su energía en excitar los electrones de una sustancia luminiscente al atravesarla, esto genera transiciones de estado y cuando regresan a su estado

fundamental emiten fotones que después son detectados y transformados en pulsos eléctricos (señal). El tipo de material luminiscente clasifica a los centelladores orgánicos e inorgánicos cuyas propiedades y aplicaciones difieren (Tavernier, 2010)

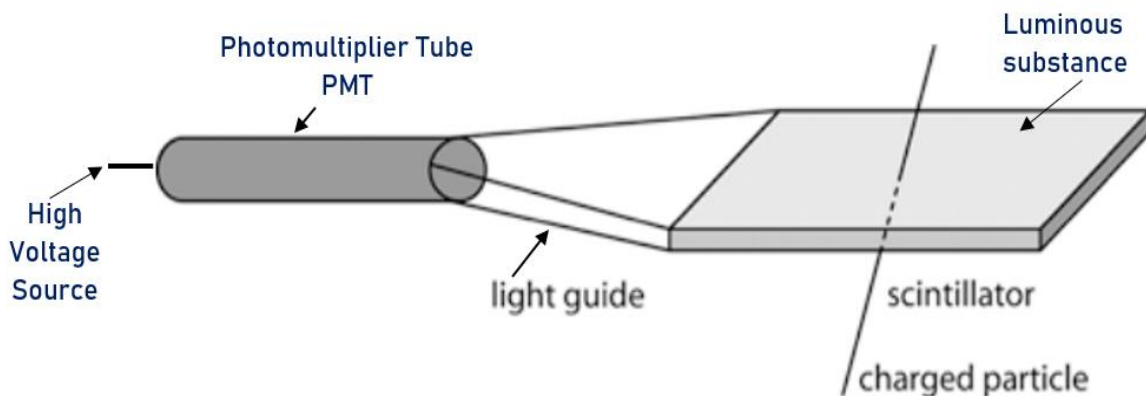
El proceso de fluorescencia un tipo particular de luminiscencia es una característica común de todos los materiales de centelleo de adsorber energía y emitir radiación visible inmediatamente después de la excitación aproximadamente unos 10^{-8} s. Para ser un buen centellador, un material debe convertir la mayor parte posible de la energía de radiación incidente en fluorescencia rápida para minimizar las contribuciones, generalmente indeseables de la fosforescencia y la fluorescencia retardada (Knoll, 2000) .

Componentes de un detector de centelleo

Los componentes del centellador son: centellador, colector o guía de luz y el Tubo Fotomultiplicador.

Figura 20

Componentes de un detector de centelleo



Nota. Extraído y adaptado de Tavernier (2010)

Características principales del detector de centelleo

Existe una variedad de detectores de centelleo que presentan diferentes características una más relevante que otra dependiendo del uso y del tipo de experimento que se emplea. Sin embargo, las características más comunes de acuerdo con Knoll (2000) son:

- Mantiene un comportamiento lineal es decir el rendimiento de luz es proporcional a la energía depositada en un rango amplio.

- Presenta un tiempo de decaimiento de la luminiscencia inducida corto (2 a 3ns) para generar pulsos de señal rápidos.
- Su índice de refracción suele ser cercano al del vidrio (≈ 1.5) ya que permite un acoplamiento eficiente de la luz de centelleo a un tubo fotomultiplicador.
- Estos detectores también son capaces de operar de manera eficiente en un amplio rango de temperaturas, que abarca desde los -60°C hasta 20°C
- Presentan un tiempo de recuperación reducido, lo que les permite manejar altas tasas de datos.

Centellador de plástico

Es uno de los tipos de centelladores orgánicos cuya fluorescencia proviene de transiciones en la estructura de los niveles de energía sin considerar su estado físico, particularidad que diferencia de los centelladores inorgánicos que requieren una red cristalina para producir centelleo. En el centellador de plástico se disuelve un escintilador orgánico como el p-terfenil o el bifenilo en un solvente que después se polimeriza en un plástico sólido. El solvente más usado es el monómero de estireno, sin embargo, hay otras matrices plásticas que pueden incluir polivinil-tolueno (PVT) o polimetilmetacrilato (Knoll, 2000).

El proceso de emisión de luz se rige por la ecuación propuesta por Bengston y Moszynski mejorada, donde se determina el número de fotones emitidos.

$$N = N_0 f(\sigma, t) e^{-t/\tau_d} \quad (9)$$

Donde:

N: Número de fotones emitidos en el tiempo t

N_0 : Número total de fotones emitidos

τ_d : Constante de decaimiento

$f(\sigma, t)$ es una gaussiana con desviación estándar σ

2.2.14. Observatorio HAWC (*High Altitude Water Cherenkov*)

El Observatorio HAWC es una matriz terrestre de detectores de Cherenkov en agua (WCD) con la capacidad de distinguir rayos gamma de 100 GeV a 100 TeV del fondo de rayos cósmicos hadrónicos (Pretz, 2015), que señalan los fenómenos más violentos del universo, como las explosiones de supernovas, los núcleos activos de galaxias y los estallidos de rayos gamma, conocidos como Gamma Ray Bursts (GRB's) (Westerhof, 2013). Actualmente, las mediciones del observatorio HAWC están siendo también utilizados para detectar materia oscura. HAWC está ubicado a 4100 msnm, a las faldas del volcán Sierra Negra (dentro del Parque Nacional Pico de Orizaba) y cerca de las instalaciones del Gran Telescopio Milimétrico Alfonso Serrano (GTM) localizado en el municipio de Atzitzintla del estado de Puebla en México (Salesa Greus & Colaboración HAWC, 2013).

El observatorio HAWC se basa en la experiencia y tecnología mejorada del observatorio Milagros el cual se encontraba en Nuevo México, Estados Unidos a una altura de 2630msnm. HAWC es más sensible que Milagros debido a que cuenta con tres factores una mayor altitud, una mayor área de detección y un nuevo diseño de detectores (aislamiento óptico de los tubos fotomultiplicadores) (Salesa Greus & Colaboración HAWC, 2013).

HAWC consta de 300 tanques detectores de radiación Cherenkov de agua (WCD) de acero galvanizado y corrugado que cubren un área de 22.000 m², cada uno de 5 m de alto y 7,3 m de diámetro, en el interior presentan una membrana de plástico negro, material que no permite reflexiones difusas y es hermético a la luz, contienen 200.000 litros de agua purificada (hasta 4,3 metros). El tanque de agua contiene cuatro detectores de tubos fotomultiplicadores (PMT) orientados hacia arriba y ubicados en la parte inferior del tanque de agua dispuesto en forma triangular. Tres de ellos (8 pulgadas de diámetro, código R5912, marca Hamamatsu) están ubicados lateralmente a 1,83 m del centro del tanque de agua y separadas a 120° entre sí. En el centro del tanque de agua, está el ubicado el cuarto PMT (10 pulgadas de diámetro, código

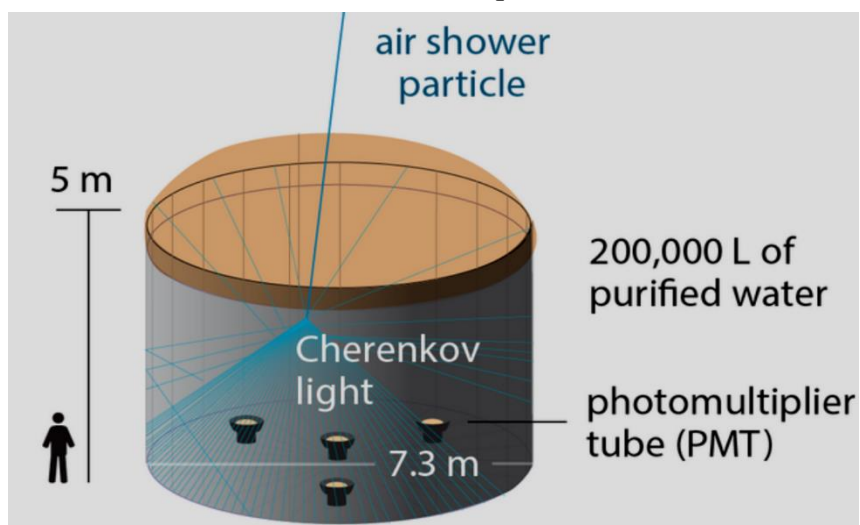
R7081, marca Hamamatsu). Los tanques están dispuestos con una separación de 60cm, cuenta con pasillos de 2.6m de ancho y una vía de acceso principal de 4.3m donde se colocan cajas de conexión (Abeysekara et al., 2023).

Las dimensiones de los tanques de agua en HAWC fueron cuidadosamente diseñadas para cumplir dos principales propósitos: Para la detección calorimétrica de la componente electromagnética y la identificación de los muones. Los electrones de la componente electromagnética que interaccionan con el agua en el primer metro de la parte superior del tanque, emitiendo luz Cherenkov la cual es proporcional a la energía depositada. Mientras que los muones atraviesan todo el tanque generando la luz Cherenkov cerca de los fotomultiplicadores lo que produce una señal más grande y rápida (Wisher, 2016).

HAWC se encuentra a una profundidad atmosférica vertical de 637 g/cm^2 . Los valores hacen referencia a la cantidad de masa de aire que una partícula atraviesa en la atmósfera antes de llegar al detector. Lo que significa que a la altitud de HAWC, la atmósfera es menos densa, es decir, recorren una menor cantidad de material atmosférico lo que permite una mejor precisión en la reconstrucción de eventos y en la discriminación entre diferentes tipos de partículas (Abeysekara et al., 2023).

Figura 21

Configuración actual de los detectores en los tanques del observatorio HAWC



Nota. Extraído de HAWC collaboration

2.2.15. Electrónica asociada a la detección de fotones

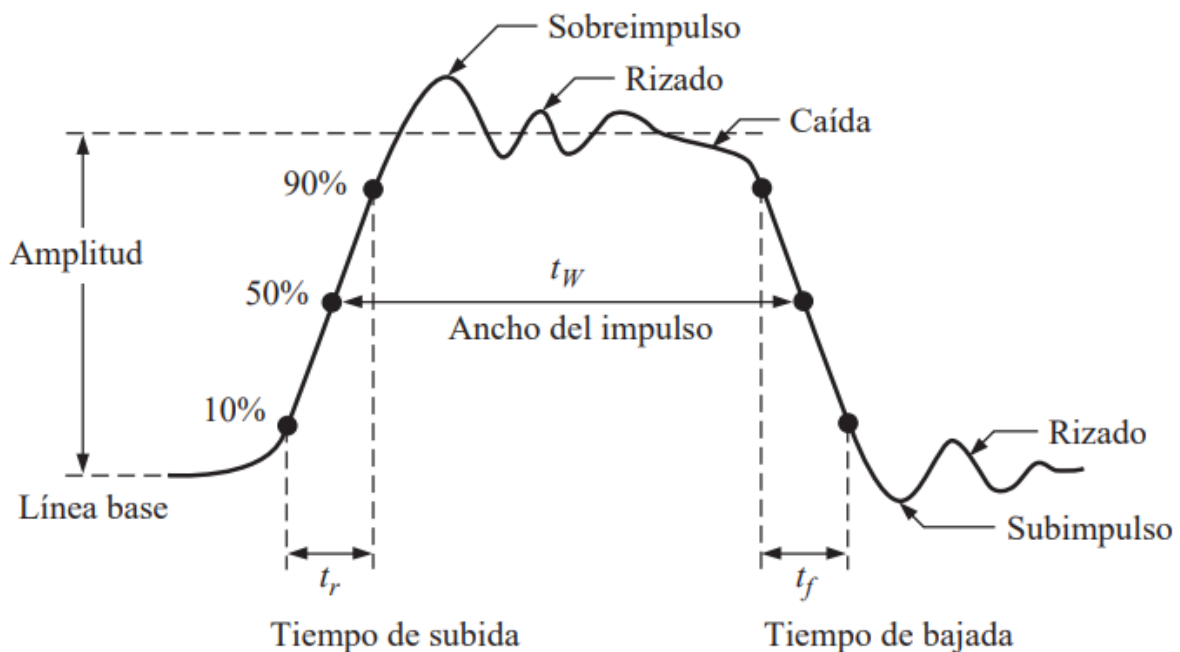
Tal como se describió previamente, los detectores fotomultiplicadores detectan fotones y registra su información convirtiéndola en una señal eléctrica, por ende, para poder extraer la información se hace uso de módulos electrónicos que nos permite analizar la señal registrada, para ello es necesario conocer las características que presentan la señal y el módulo electrónico.

Particularidades de las señales detectadas en física de altas energías

La información se codifica en forma de señal de pulsos en función del tiempo que puede abarcar desde los microsegundos hasta fracciones de nanosegundos, natural en física nuclear y de partículas. En la figura 22, se muestra un pulso no ideal rectangular que son observadas con más frecuencia, de la cual se definirá las siguientes características (Leo, 1994):

Figura 22

Particularidades de un pulso no ideal de corriente o voltaje en función al tiempo



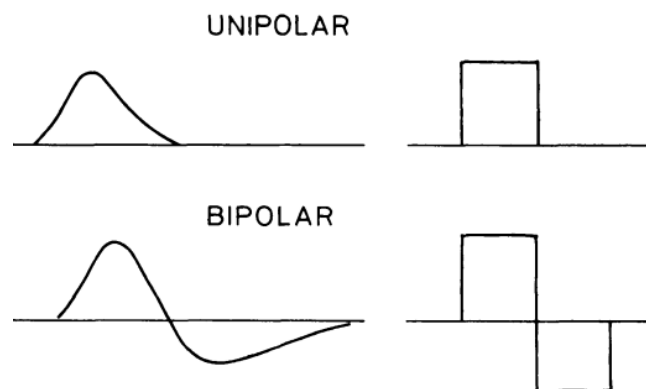
Nota. Extraído de Floyd (2006)

1. Línea Base: Es el nivel de voltaje o corriente al que vuelve el pulso después de que el disparo ha finalizado. Por lo general es cero, pero en algunos casos puede estar en un nivel diferente debido a la presencia de una corriente constante o a cambios en la forma del pulso o la velocidad de los eventos detectados.

2. Amplitud del pulso: Es la altura del pulso desde la línea base hasta su valor máximo.
3. Anchura del pulso: Es el ancho del pulso medida a la mitad del máximo de la señal.
4. Flanco de subida o *Leading Edge*: Es la sección inicial de la señal que ocurre primero en el tiempo, representa el aumento de la amplitud.
5. Flanco de bajada o *Falling Edge*: Es la sección final de la señal aparece último en el tiempo.
6. Tiempo de subida: Se refiere al tiempo en el que el pulso sube del 10% al 90% de su amplitud. Esta característica determina la rapidez de la señal.
7. Tiempo de bajada: Es el tiempo que toma el pulso en bajar del 90% al 10% de su amplitud total.
8. Señales Unipolar y Bipolar: La señal unipolar es el que tiene un solo pico o lóbulo que está completamente por encima o debajo de la línea base sin cambiar su polaridad. La señal bipolar atraviesa la línea base generando un segundo pico de polaridad contraria.

Figura 23

Señales de pulsos de tipo unipolar y bipolar



Nota. Extraído de Leo (1994)

Señales analógicas y digitales

Las señales analógicas presentan variaciones continuas en su amplitud como en su forma de manera proporcional directa al valor de la información que llevan, es decir llega a transmitir infinitos valores diferentes. Las señales digitales solo pueden tener un número

discreto de estados, normalmente dos. En otras palabras, las señales digitales transmiten información cuantificada. Por ejemplo, una cuenta regresiva Geiger-Müller transmite una señal cuando la radiación está presente y no lo hace cuando no se detecta la radiación (Leo, 1994).

Señales rápidas y lentas

Para realizar las configuraciones electrónicas es indispensable distinguir entre señales rápidas y lentas por disposiciones técnicas de los módulos electrónicos.

Las señales rápidas presentan tiempos de subida de unos pocos nanosegundos o menos, y son importantes para aplicaciones de temporización y altas tasas de conteo. Las señales lentas poseen tiempos de subida de cientos de nanosegundos o más, son menos susceptibles al ruido. Por lo tanto, estos pueden ser especialmente importantes para la espectroscopía (Floyd, 2006).

2.2.16. Procesamiento de señales

El procesamiento de señales es el paso en el que las señales físicas, como la luz, son capturadas por un detector y convertidas en una señal eléctrica que puede ser entendida por una computadora. En el caso del observatorio HAWC, el objetivo es detectar partículas cargadas (como los rayos cósmicos o gamma) que emiten luz al pasar por el agua. Esta luz se llama luz Cherenkov y es la señal que se procesa (Abeysekara et al., 2018).

Pasos:

1. Detección de la luz: Cuando una partícula cargada pasa a través del agua, emite un destello de luz que es capturado por los tubos fotomultiplicadores (PMTs), los cuales transforman esa luz en una señal eléctrica.
2. Amplificación de la señal: Las señales eléctricas que producen los PMTs son muy débiles, por lo que primero se amplifican para que puedan ser medidas correctamente.
3. Integración de la señal: Luego, esas señales amplificadas son integradas en un tiempo corto, en HAWC, unos 100 nanosegundos, lo que ayuda a mejorar la precisión de la medición.

Módulos de Electrónica Nuclear

NIM (Nuclear Instrument Module). Es un sistema de módulos que contiene componentes electrónicas tales como el discriminador, amplificador, contador, entre otros que para su funcionamiento debe ser acoplado a un bastidor estandarizado que proporciona voltaje de alimentación (Leo, 1994).

El bastidor estándar NIM tiene conectores de energía que son pines ubicados en la parte de atrás, estos proporcionan al menos cuatro voltajes de corriente continua estándar: -12 V, +12 V, -24 V y +24 V, existen otros bastidores que pueden proporcionar -6 V y +6 V. El bastidor tiene capacidad de albergar hasta doce módulos (Leo, 1994). Los módulos básicos son:

- Discriminador: Este módulo detecta señales de entrada cuya amplitud supera un valor umbral, que puede ajustarse según las necesidades del sistema, una vez que la señal alcanza o supera este nivel, el discriminador genera una señal lógica de salida, permitiendo que solo las señales significativas pasen al procesamiento posterior, su principal función es filtrar el ruido o señales de baja amplitud que podrían interferir en el análisis de la señal principal.
- Amplificador: Cumple dos funciones, amplificar la señal para que pueda ser procesada y ajustar la forma de la señal en términos de duración, pendiente o regularidad, asegurando que se mantenga la información contenida en la señal original.
- Contador: Es un módulo que recibe las señales lógicas y cuenta la cantidad de eventos que llegan a su entrada.
- *Fan in/out*: Los módulos *Fan In/Out* gestionan la capacidad de una señal para dividirse y enviarse a múltiples componentes o, inversamente, combinar múltiples señales de entrada en una sola salida, lo que permite que un sistema distribuya una señal a varias

partes del circuito sin pérdida de intensidad o, en otros casos, combine entradas de diferentes fuentes en una salida unificada.

- Unidad de coincidencias: Determina si dos a más señales de entrada coinciden en tiempo, si las señales coinciden en el tiempo, la unidad genera una señal de salida. Esta función es esencial para detectar eventos simultáneos en un sistema y permitir respuestas basadas en la concurrencia de señales.
- FADC (*Flash Analogic to Digital Converters*): Es un módulo que integra 16 canales y un canal físico para la señal de *trigger*. Su función es transformar una señal analógica en su equivalente digital, permitiendo que la información contenida en una señal analógica (como voltajes continuos) sea convertida a un formato binario procesable por sistemas digitales.
- Analizador multicanal: Su función es clasificar los pulsos de entrada en canales digitales (bits) de memoria según su amplitud, lo que permite visualizar la distribución de la señal en un histograma, lo que facilita la interpretación de la variabilidad de amplitud y la frecuencia de las señales recibidas en distintos rangos.

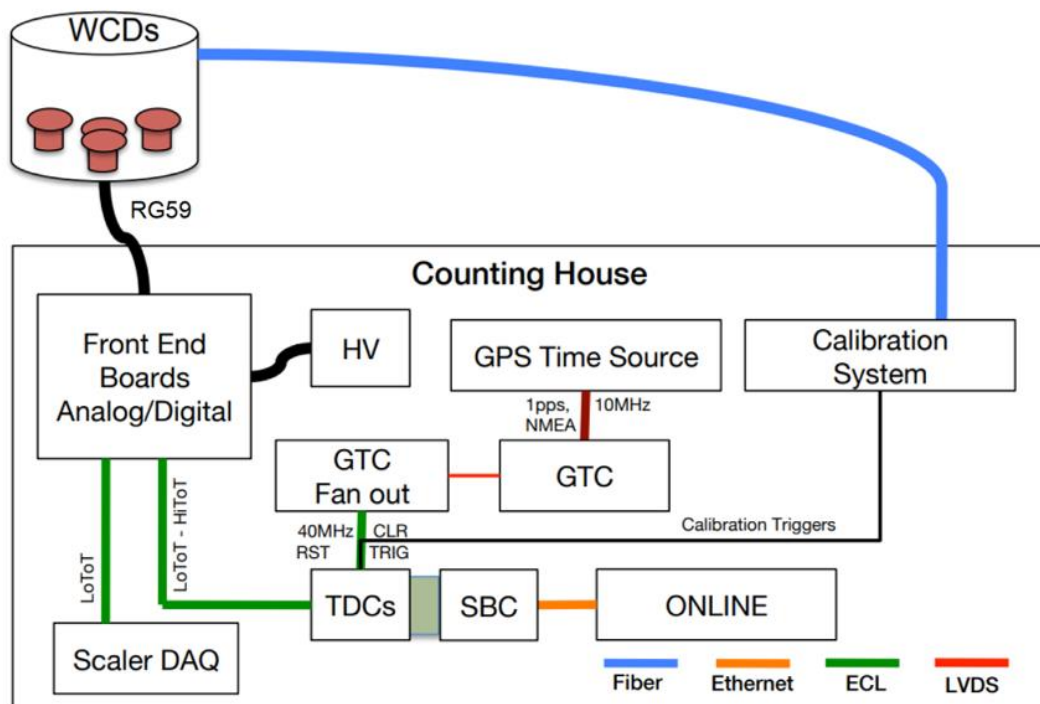
Electrónica del observatorio HAWC- *Counting House*

La detección de las cascadas atmosféricas demanda instrumentar una gran área con sensores que con precisión marque el tiempo de llegada de los fotones. El diseño de la electrónica de HAWC está regida por la electrónica de *front-end* (FEBs), instrumenta 1200 canales del FADC correspondiente a cada PMTs con una precisión de lectura en el tiempo de subnanosegundos. El diagrama de bloques de la electrónica como se muestra en la figura 23, comprende componentes principales en la cadena de señales que incluyen los fotomultiplicadores (PMTs), las tarjetas de *front-end* (FEBs), los convertidores de tiempo a digital (TDCs), las computadoras de placa única (SBCs) y el sistema de reconstrucción en línea, con respecto al flujo de datos, la sincronización y el hardware de temporización desarrollados

por la Universidad Estatal de Michigan (MSU) cuenta con el sistema de control y temporización GPS (GTC), y como sistema final, el disparo se realiza por software y se leen todos los impactos a nivel de los TDCs, proporcionando una gran flexibilidad en la lectura y en los diferentes tipos de análisis físicos que se pueden realizar (Wisher, 2016).

Figura 24

Diagrama de bloques de la electrónica del Observatorio HAWC y sus conexiones en los sistemas-Counting House o casa de conteo.



Nota. Extraído de Wisher (2016)

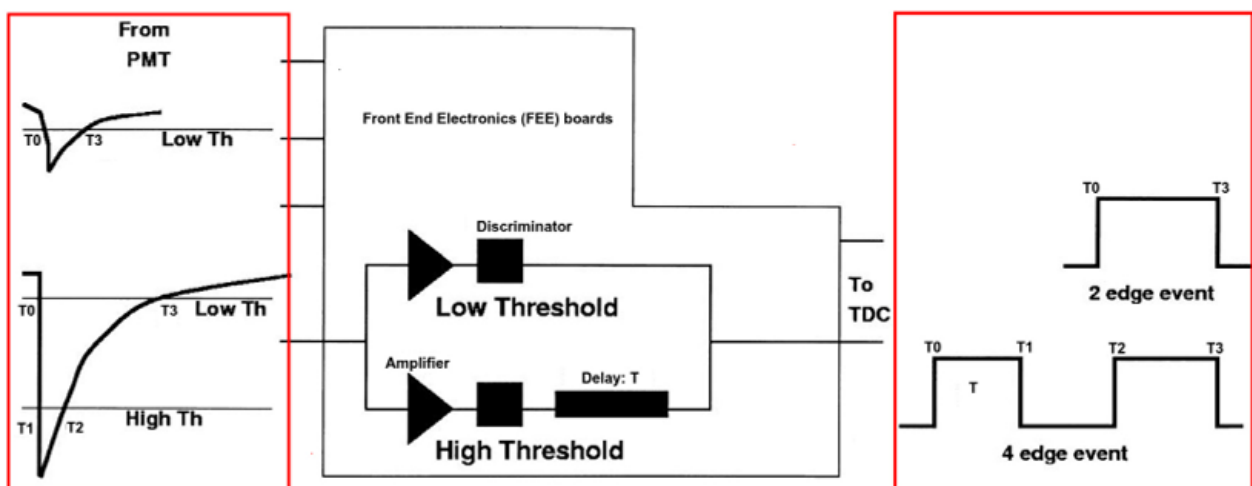
Cada tanque WCD's cuenta con 4 cables RG-59 Belden 8241 (soportan hasta 3100 V en tensión continua) de 200 metros de longitud que corresponde al HV/señal (uno por PMT), una fibra óptica y un cable Ethernet de categoría cinco (CAT5) son los que llegan al *counting house*, para proteger la electrónica frente a estallidos de alta tensión inducidos por rayos son conectados a un *spark GAP* (Pequeña caja de aluminio que contiene dos gaps de chispa Teledyne-Reynolds y conectores SHV para los cables de HV/señal entrantes y salientes) (Abeysekara et al., 2023).

Electrónica FRONT END

Después de conectar los cables de los PMTs al *spark gap*, el cable de señal es conectado a un FEB (*Front-End Board*) que es un sistema de procesamiento de señales, es amplifica y posterior digitalizada a un circuito de umbral doble, donde el tiempo que se toma para superar el umbral proporciona el tiempo utilizado para la reconstrucción angular. En la figura 25, se muestra la comparación entre las señales de los PMT (a la izquierda) y las salidas del discriminador FEB (a la derecha); para una señal pequeña, el FEB produce un único pulso digital con dos bordes en T_0 y T_1 . Estos bordes representan los momentos en que la señal cruza el umbral bajo (Low Th) al aumentar y disminuir. Para señales grandes, el FEB produce dos pulsos digitales con cuatro bordes en T_0 , T_1 , T_2 y T_3 . Estos bordes representan tiempo de cruce ascendente de los umbrales Low Th (T_0) y High Th (T_1), tiempo de cruce descendente del umbral High Th (T_2) y luego del umbral Low Th (T_3). La duración de tiempo donde la señal del PMT excede el umbral bajo (LoToT) es $(T_3 - T_0)$ y el tiempo de duración en el que el PMT excede el umbral alto (HiToT) es $(T_2 - T_1)$ (Abeysekara et al., 2023).

Figura 25

Esquema comparativo de señales de los PMTs y la señal de salida discriminador FEB asociado



Nota. Extraído de Abeysekara et al. (2023)

2.2.17. ROOT

Es un *framework* software (marco de software) que proporciona un conjunto de herramientas, paquetes de software unificado para el almacenamiento de datos, procesamiento (análisis estadístico), visualización (histogramas, diagramas de dispersión y funciones de ajuste) y modelación. Es diseñado para manejar grandes cantidades de datos y es más usado el ámbito de la física de altas energías (Data Analysis Framework, 2024).

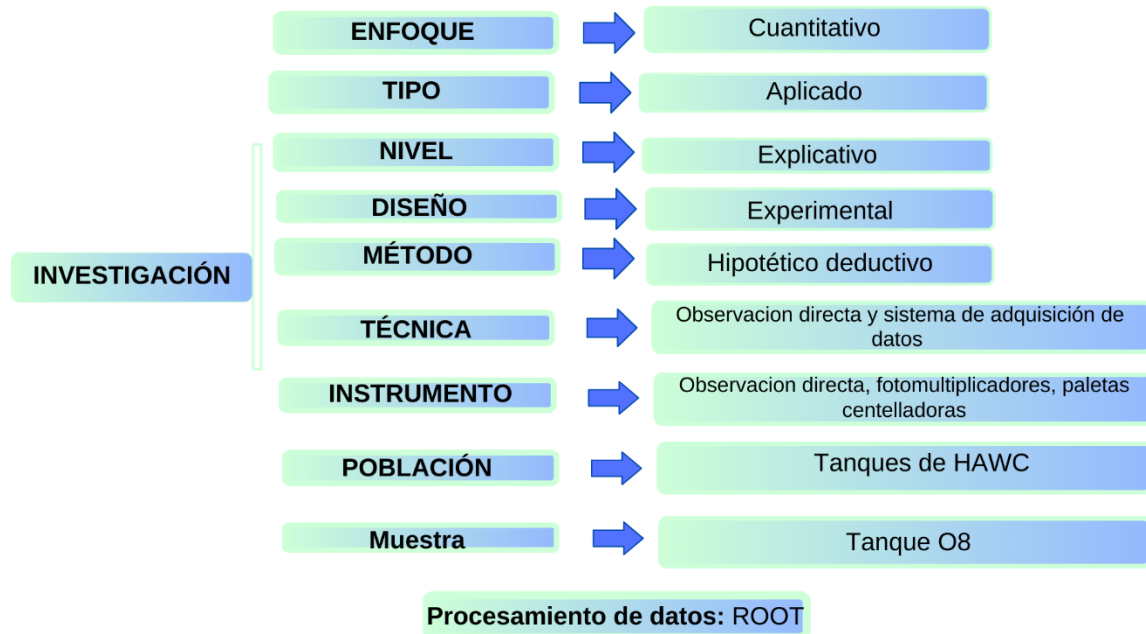
Los datos almacenados en ROOT son estructurados en *TTree* (árbol), lo que indica que la información de cada evento está organizada en filas (*entry*) en el árbol y columnas (*branch*), donde las filas corresponden a cada evento y las columnas contienen varios tipos de información de la señal como el tiempo, carga, voltaje, entre otros (Data Analysis Framework, 2024).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Figura 26

Esquema de investigación



Nota. Elaboración propia

3.1. Tipo de investigación

La investigación fue de tipo aplicado, diseñada para evaluar e implementar nuevas configuraciones en los detectores Cherenkov del observatorio HAWC, permitiendo dar soluciones prácticas que mejoren la capacidad de separar rayos cósmicos cargados de rayos gamma a partir de muones, lo cual es crucial para aumentar la precisión y efectividad de las observaciones astronómicas. Según Hernandez-Sampieri & Mendoz (2023), este tipo de investigación busca establecer soluciones además de fortalecer la teoría ya propuesta.

3.2. Enfoque de investigación

El enfoque de la investigación se fundamentó en uno cuantitativo, caracterizado por la recolección, procesamiento y análisis de datos numéricos para evaluar la interacción entre las configuraciones de los detectores y su eficacia. Este enfoque facilita la obtención de resultados

objetivos y replicables, permitiendo un análisis estadístico riguroso de las variables en estudio (Hernandez-Sampieri & Mendoza, 2023).

3.3. Nivel de investigación

El nivel de esta investigación se caracteriza por ser explicativo, debido a que se examina una nueva posibilidad de configuración de los detectores con un análisis detallado de cómo y por qué esta configuración permite la separación de rayos gamma y rayos cósmicos cargados. Según Carrasco (2019) el nivel explicativo busca identificar las causas que explican por qué ocurre un fenómeno específico, las condiciones bajo las cuales se manifiesta, o las razones detrás de la interacción entre dos o más variables.

3.4. Diseño de investigación

El diseño experimental permite una manipulación sistemática de las variables de interés, que en este caso corresponde a la configuración de los tanques Cherenkov, mediante la implementación de dos arreglos y la observación de los cambios resultantes en la separación de muones y rayos gamma. El diseño experimental ayuda a establecer relaciones causales y a validar las hipótesis propuestas (Ñaupas et al., 2018).

3.5. Método de investigación

Adoptó un método hipotético-deductivo pues la investigación procede a través de un ciclo iterativo de hipótesis, experimentación y verificación. Este método es ideal para abordar problemas complejos donde se requiere ajustar teorías e hipótesis basadas en observaciones empíricas y pruebas controladas (Popper, 1980).

3.6. Población y muestra

3.6.1. Población

La población incluye todos los tanques del observatorio HAWC, con un enfoque particular en aquellos que han mostrado variabilidad en la captura y diferenciación de partículas.

3.6.2. Muestra

La muestra consta del tanque O8, seleccionado a través de un muestreo no probabilístico, el tanque elegido es representativo por su cercanía al módulo de análisis ya que permite la incorporación inmediata a la electrónica de HAWC, permitiendo un estudio concentrado y detallado.

3.7. Técnicas de Recolección de la Información

3.7.1. Técnica

Se empleó la técnica de observación directa y la recolección de datos a través de sistemas de adquisición avanzados e instalados en cada tanque seleccionado. Esta técnica asegura la captura precisa de datos en tiempo real.

Se implementaron detectores de centelleo para la detección de muones en la parte superior del nivel del agua cubierta por el casquete del tanque, además, se colocaron dos capas de detectores fotomultiplicadores para la detección de rayos gamma y rayos cósmicos cargadas.

Todos estos equipos fueron conectados a la electrónica de HAWC para su almacenamiento y procesamiento de las señales.

3.7.2. Instrumentos

Los instrumentos se componen de tubos fotomultiplicadores de marca Hamamatsu, centelladores de plástico, sistema de adquisición de datos y programa especializado para el procesamiento de señales.

3.8. Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos

Los datos recogidos fueron procesados utilizando ROOT, este procesamiento incluye la limpieza de datos, análisis estadístico, modelado y simulación para evaluar las diferentes configuraciones de los detectores. La utilización de estos métodos avanzados permite una interpretación detallada y precisa de los datos recogidos, facilitando así la toma de decisiones informadas sobre la efectividad de la configuración.

3.9. Matriz de operacionalización de las variables

Variable	Definición conceptual	Indicadores	Unidades de medición	Instrumentos
Configuración de los detectores de Cherenkov	Se busca una nueva configuración de los detectores que permita una identificación de eventos en los que un muon atraviese el tanque usando dos capas de PMTs.	Amplitud de la señal detectada por cada PMT	mV	PMTs y la digitalización de sus señales por el sistema de adquisición de datos
		Correlación de la suma de las señales de la primera capa contra las de la segunda	mV	PMTs y la digitalización de sus señales por el sistema de adquisición de datos
		Multiplicidad	adimensional	Tanques O7, O9, O10, P7, P8, P9, P10

Variable	Definición conceptual	Indicadores	Unidades de medición	Instrumentos
Separación de rayos cósmicos cargados y rayos gamma a partir de la detección de muones	Para poder discriminar los rayos gamma y rayos cósmicos se debe caracterizar la señal de los muones en energía, carga y tiempo.	Resolución temporal	Nanosegundos (ns)	PMTs
		Criterios de diferenciación de rayos cósmicos cargados y rayos gamma	Energía (TeV), carga y voltaje	software de análisis de datos

3.10. Desarrollo experimental

En este capítulo se detallaron las especificaciones técnicas de implementación de la nueva configuración que se plantea en los tanques, la instrumentación que posee, la adquisición de datos, la caracterización de señales y su respectivo análisis.

La nueva configuración realizada en el tanque O8 consta de dos arreglos: Primeramente se encuentra el arreglo de coincidencias para la medición de muones y en segundo lugar el arreglo de dos capas de detectores para la detección de luz Cherenkov generadas por muones de origen electromagnético u hadrónico, estos arreglos se pueden visualizar en la figura 27, por ende, la señal de disparo (*trigger*), la cual viene a ser la condición que se debe satisfacer para activar el disparo de los detectores y registrar, es establecida por la unidad de coincidencias.

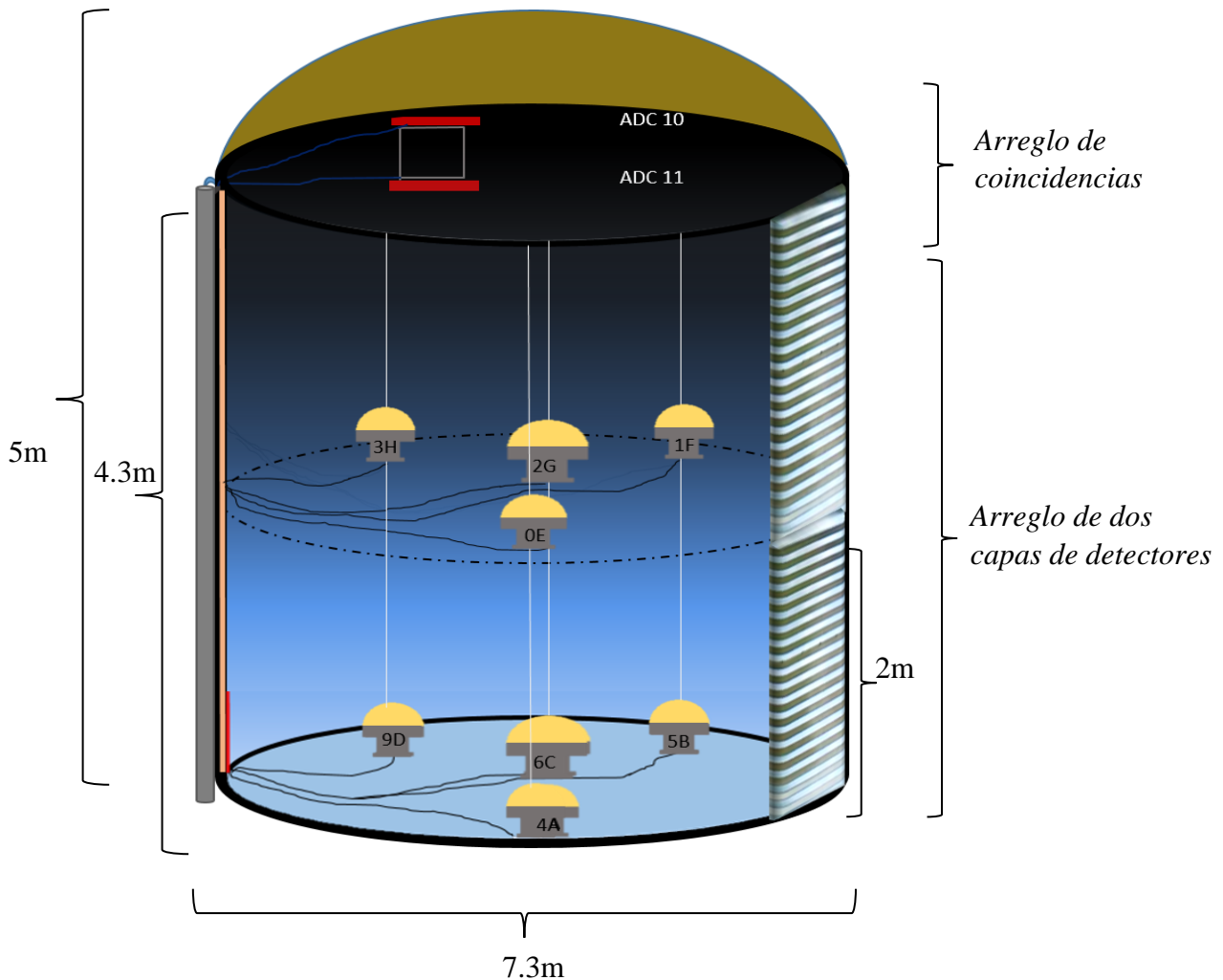
Figura 27

Tanque por fuera



Nota. Foto propia

Figura 28.
Diseño de la nueva configuración.



Nota. Elaboración propia, diseño de la nueva configuración para la discriminación de rayos gamma de rayos cósmicos cargados, donde muestra el arreglo de coincidencias y el arreglo de capas de detectores codificados. El interior del tanque está cubierto por una membrana negra y tanto por dentro y fuera hay un tubo por donde pasa los cables de todos los detectores que serán direccionadas al *Counting House*.

A continuación, se detallarán los arreglos realizados de forma más detallada:

3.10.1. Arreglo de coincidencias

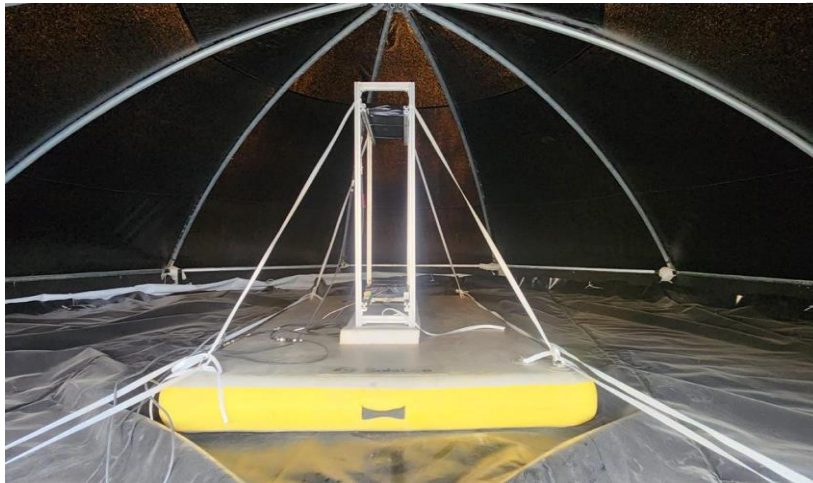
Consta de dos paletas centelladoras de plástico Eljin EJ 200, equipadas con fotomultiplicadores Hamamatsu R6231, las dimensiones de los centelladores son de 20cm x 20 cm y están ubicados en la parte superior del tanque puestas de manera horizontal y paralelas sobre una estructura de aluminio separada 85 cm una de otra con el propósito de que se ilumine un área de 1m de radio en el fondo del tanque y que nos permite detectar únicamente muones

verticales que atraviesan las paletas centelladoras. En dicho arreglo la señal de disparo es tomado con la unidad de coincidencias.

Implicando, que para que se registre un evento en el contador del arreglo, el muon cargado debe atravesar el primer detector centellador (ubicada en la parte superior, correspondiente al canal 11) generando una señal eléctrica que es enviada al discriminador, y si la amplitud es superior al voltaje umbral que en este caso fue de aproximadamente 4 mV para las dos paletas de centelleo, se manda la señal digital a la unidad de coincidencias. Luego el mismo muon atraviesa el segundo detector de centelleo (en la parte inferior) sigue el mismo procedimiento enviado al discriminador para lo cual se establece un segundo umbral de voltaje y la señal digital es enviada a la unidad de coincidencia. Si las dos señales después de haber pasado por el discriminador coinciden en un intervalo de tiempo de 50 ns, se manda la señal al digitalizador para registrar el primer evento. El *trigger* o disparo para este arreglo es activado por la unidad de coincidencias.

Figura 29

Fotografía del arreglo de coincidencias



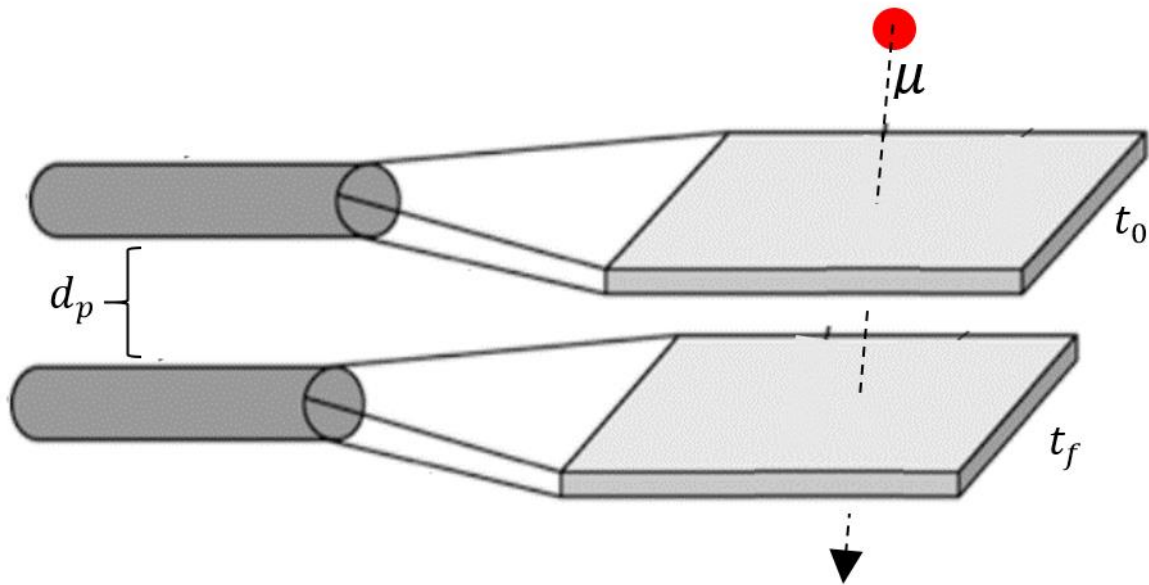
Nota. Elaboración propia. El montaje de los centelladores y de la estructura fueron acoplados a una camilla para facilitar la implementación en el tanque y evitar exposición de los PMTs a la luz del ambiente.

Para la identificación de las señales que dejan los muones, inicialmente en las paletas centelladoras se sigue el criterio de la diferencia temporal en la que los detectores captan la señal. En este proceso consideramos que la velocidad del muon es aproximadamente igual a

$c=3 \times 10^8$ m/s, el tiempo inicial t_0 cuyo valor es arbitrario, tiempo final t_f , distancia entre las paletas $d_p = 85$ cm. Por ende, el muon debe tardar 2.8 nanosegundos (ns) en llegar a la segunda paleta.

Figura 30

Interacción del muon en las paletas centelladoras



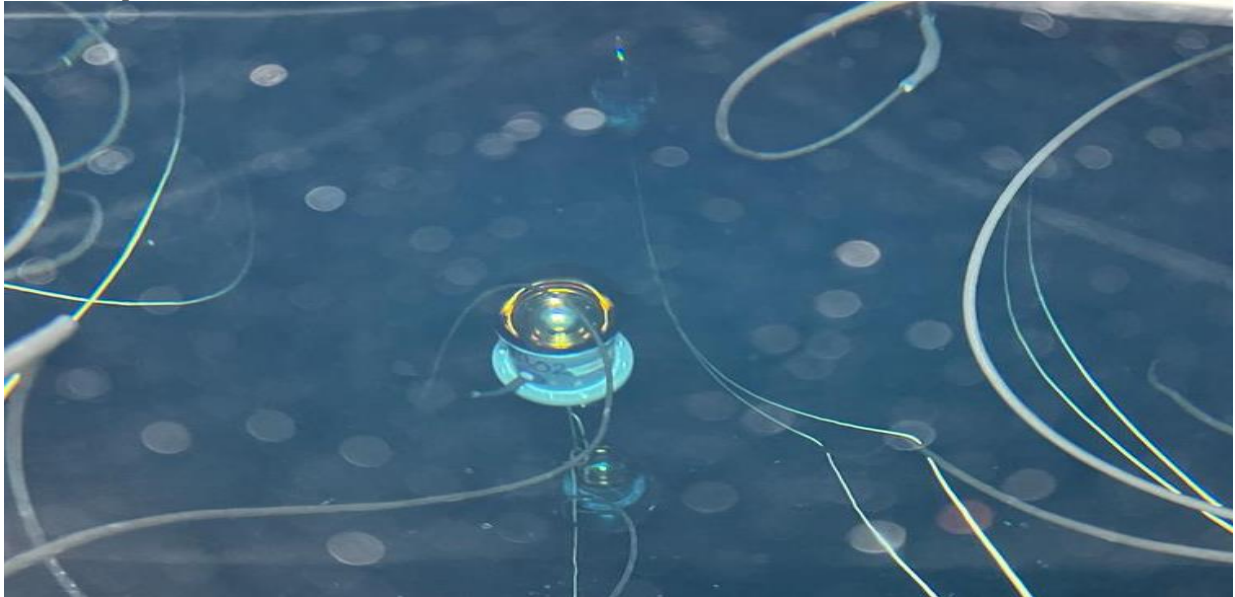
Nota. Elaboración propia. En la señal dicha diferencia de tiempo será identificada cuando se establezcan los cortes o limpieza de datos.

3.10.2. Arreglo de dos capas de detectores

Este arreglo está constituido por una capa adicional de detectores haciendo un total de 8 tubos fotomultiplicadores distribuidos a 4 unidades por cada capa. La primera capa está ubicada a 2 metros de profundidad mientras que la segunda capa está en la base del tanque ubicada a 4 metros como se muestra en la figura 31 (dispuestos para detectar el cono de luz Cherenkov). Las especificaciones de los PMTs empleados están detalladas en la parte teórica del trabajo.

Figura 31

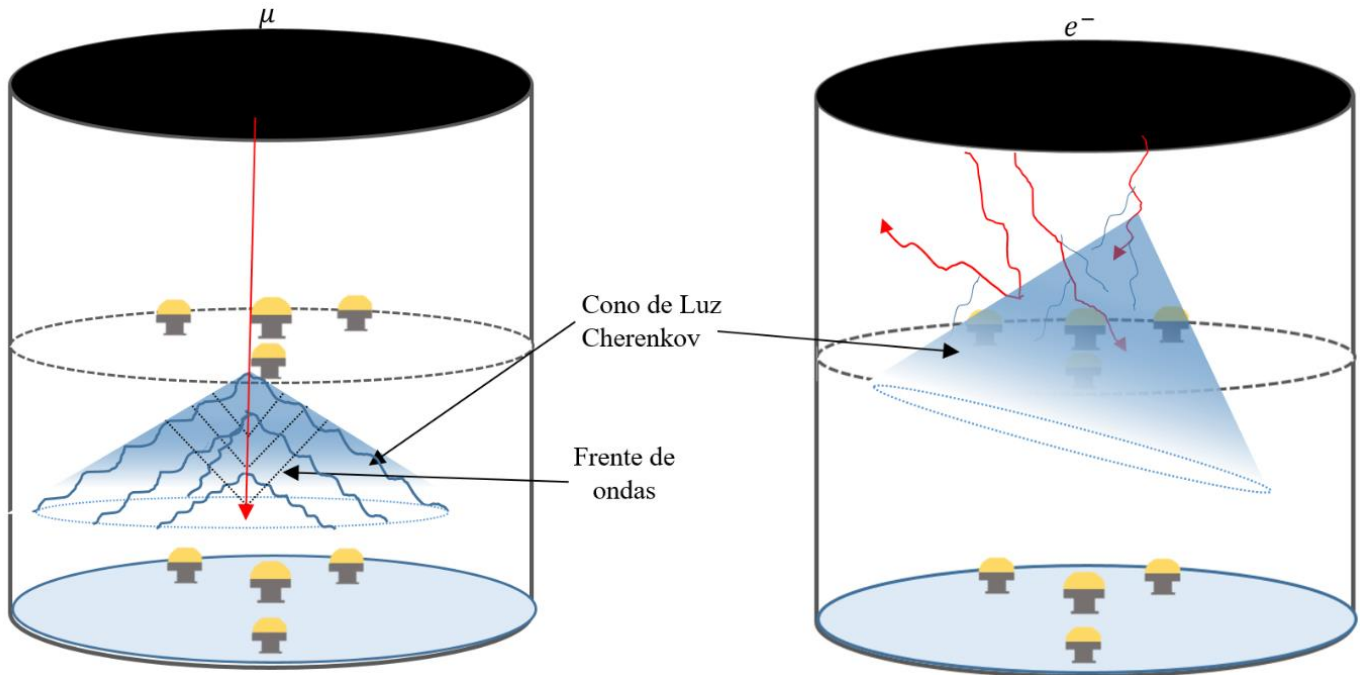
Vista aérea de la colocación de los Tubos fotomultiplicadores correspondientes al arreglo de dos capas.



Nota. Elaboración propia, para llevar a cabo el arreglo de la primera capa (PMTs a dos metros de la base) se acopló un flotador alrededor del PMT todo ello sujetos a unos hilos para mantener la posición permanente.

Este arreglo funciona de la siguiente manera: Cuando la partícula cargada (electrón o muon) atraviesa el tanque 08 generan luz Cherenkov, los PMT centrales de la primera y segunda capa registrarán el paso del muon vertical y la luz serán detectados por los PMTs periféricos.

La diferencia entre una señal producida por un muon o electrón es a partir de las características físicas de la partícula, el muon al ser una partícula con menor sección eficaz y bastante masa, permite que su comportamiento no sufra grandes desviaciones producto de la interacción con núcleos y átomos del agua dentro del tanque por ende produce el efecto Cherenkov después de haber recorrido considerable distancia, mientras que los electrones al ser menos másicos llegan a ser atenuados fácilmente en los primeros metros de profundidad del tanque generando la luz Cherenkov antes que los muones. Es importante resaltar que el electrón pierde energía en el agua de tres maneras, por ionización, radiación de frenado y efecto Cherenkov.

Figura 32*Señal de muon y electrón*

Nota. Elaboración propia, representación de la interacción del muon y electrón con el medio en el tanque O8 y la producción de luz Cherenkov en cada caso.

Esta situación implica que los fotomultiplicadores de la primera capa sean más sensibles a la detección de la luz Cherenkov producto del electrón, es decir que capte más luz arriba (mayor amplitud) que la parte de abajo, mientras que en los muones será más sensible su detección la segunda capa. Este panorama no implica que, en el caso de los electrones, la luz Cherenkov no es detectado por los PMTs de la base, sino que pueden llegar a detectar la señal, pero con menor amplitud debido a que están más lejos y sufren el efecto del ángulo sólido ($1/R^2$).

Tabla 1*Distribución de canales FADC.*

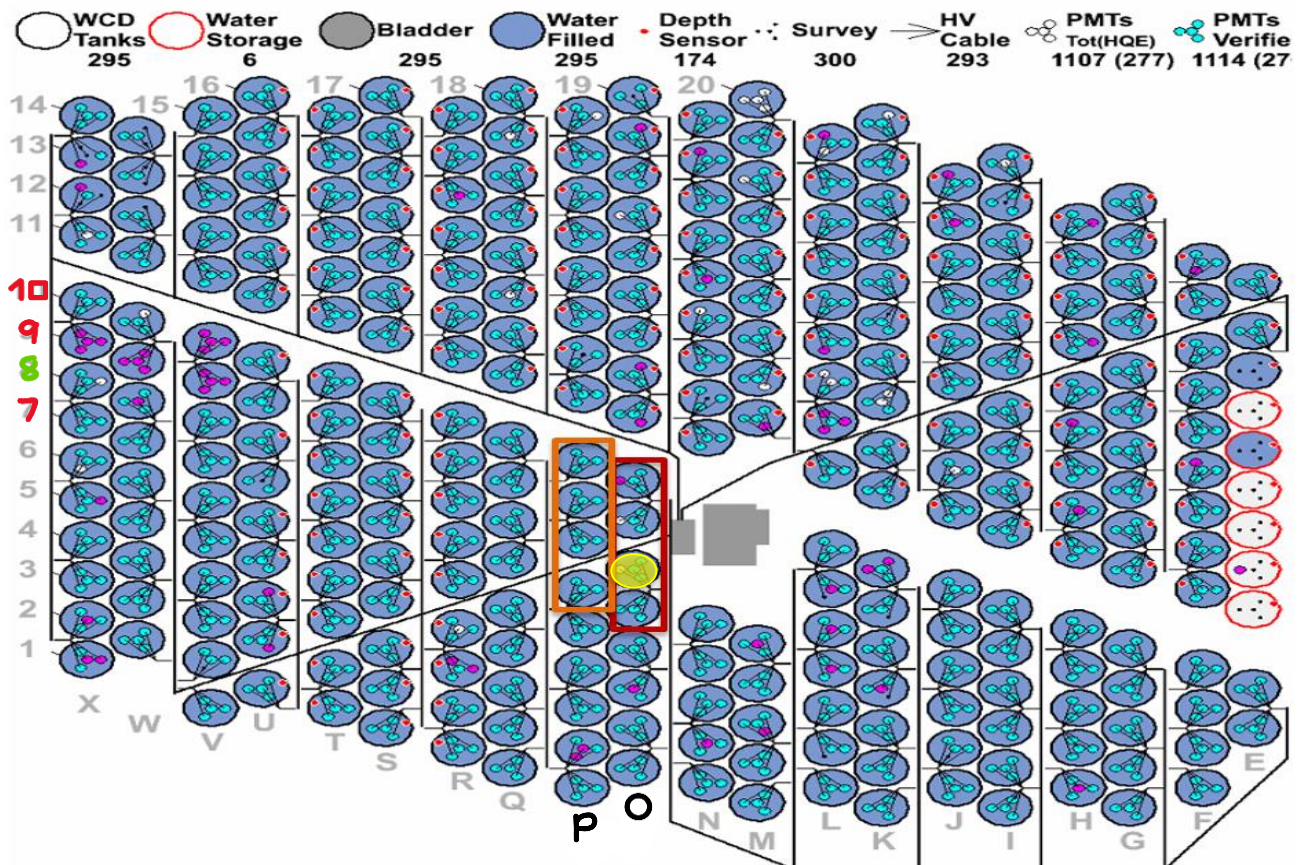
	PMTs	Canales del FADC
Primera capa de detectores	E-PMT R5912	canal 0
	F-PMT R5912	canal 1
	G-PMT R5912-Central	canal 2
	H-PMT R5912	canal 3
Segunda capa de detectores	A-PMT R5912	canal 4
	B-PMT R5912	canal 5
	C-PMT R7081-02 -Central	canal 6
	D-PMT R5912	canal 9
	Detector centelleo(superior)	canal 10
	Detector centelleo(inferior)	canal 11
	Multiplicidad tanques O	canal 12
	Multiplicidad tanques P	canal 13
Trigger	canal 8	

Nota. Códigos de los PMTs, los centelladores y multiplicidades, junto a sus respectivos canales

Multiplicidad

Hace referencia al número de PMTs que registraron eventos de una cascada de partículas de rayos cósmicos o gamma simultáneamente en un corto periodo de tiempo. Dentro de la nueva configuración para los datos de la multiplicidad se dispuso de tanques O10, O9, O7 (12 PMTs), dos del total no funcionaron por lo que constituye solo de 10 PMTs y de los tanques P10, P9, P8, P7, total de 16 PMTs, en este caso se presentaron inconvenientes con uno de los fotomultiplicadores, correspondiente al canal 1, por lo que solo se contó con 15 PMTs. Las multiplicidades corresponden a los tanques P y O, con los canales 12 y 13 del FADC.

Figura 33
Distribución espacial de los tanques de HAWC



Nota. La región contorneada de color naranja corresponde a los tanques P10, P9, P8 y P7. La región naranja corresponde a los tanques O10, O9 y O7 usados para medir la multiplicidad de las señales, elegidos por la cercanía al *counting house*. Extraído de la página oficial de HAWC. La región de rojo correspondiente a los tanques O se omite el tanque O8 (resaltada de amarillo) debido a que este consta del nuevo diseño.

Conexiones y electrónica asociada

Las conexiones de la configuración presenta el siguiente esquema, del tanque O8 salen 10 cables coaxial RG-59 Belden 8241 de alta tensión/señal de misma longitud para evitar desfase de tiempo, correspondientes a cada PMTs y los detectores centelladores, estas son direccionadas al *Spark gaps* que se encuentra en un gabinete con el propósito de proteger la electrónica de sobrecargas de voltaje, desde la caja se conecta a otro cable de alta tensión extendida hacia el *Counting House* (Ambiente en el que se encuentran módulos de procesamiento de señales). Los cables que contienen las señales de los PMTs deben ser separado del alto voltaje por lo que se usa un desacoplador.

Procesamiento de las señales de la configuración (Tanque O8 y Multiplicidad)

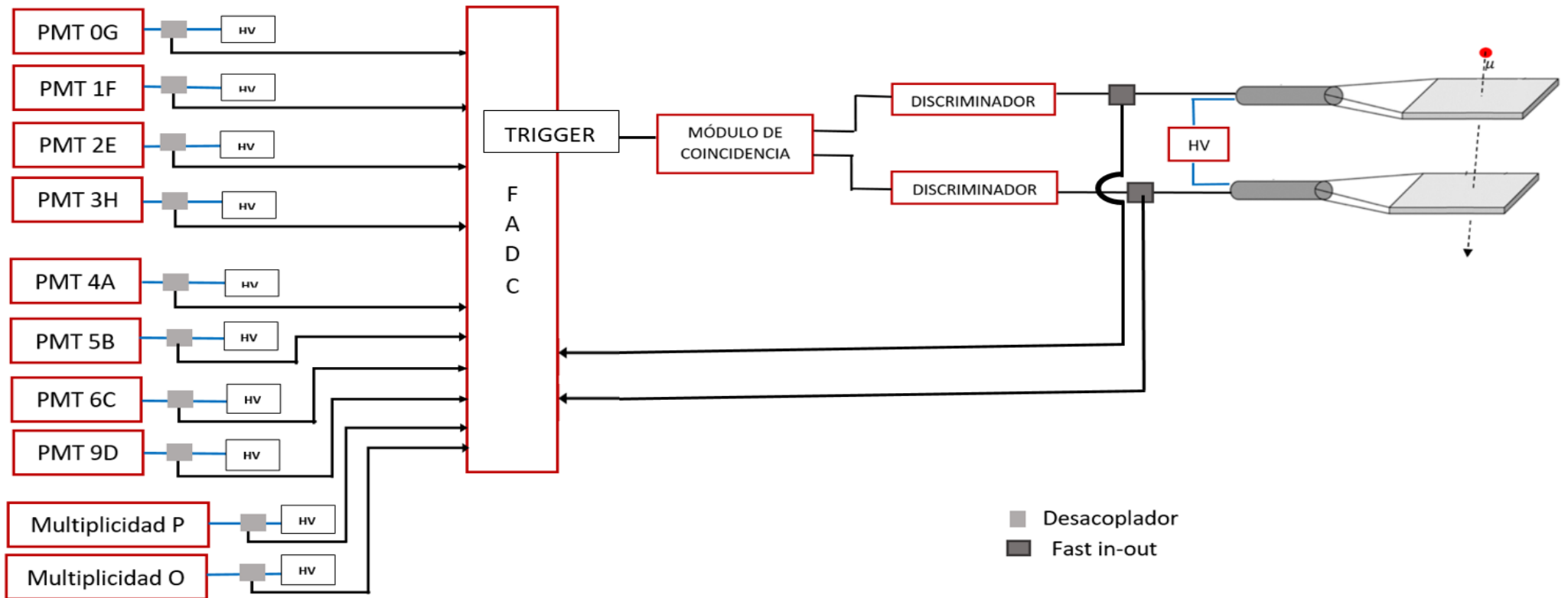
Se utilizó el sistema NIM (*Nuclear Instrument Module*) con módulos de fuente de alto voltaje de marca Camberra, discriminador, osciloscopio, unidad de coincidencias para la visualización y adquisición de las señales del arreglo.

El sistema de adquisición de datos consta de un FADC marca CAEN Mod.N6742 de 16(+1) canales con amplitud máxima de $1V_{PP}$ (pico a pico), 12 bits de resolución equivalente a $1V \sim 4096$ canales o BINs de amplitud como máximo y 5GHz de frecuencia de muestreo por defecto, sin embargo, para este análisis se programó a 1GHz para tener un bin de tiempo de 1 ns y una conversión de 1V a 1024 canales por ende un canal es igual a 0.976 mV. Este cambio se realizó para abordar los datos con mayor detalle.

Por ende, las señales de los PMTs de la 1ra y 2da capa del tanque O8, centelladores y los tanques de las multiplicidades son conectados al módulo FADC. La señal del módulo de coincidencias va a la entrada *trigger* del FADC correspondiente al canal 8, será quien nos indique la presencia de muones.

Figura 34

Diagrama de bloques de la adquisición de datos.



Nota. Elaboración propia, La línea negra representa la señal y la línea azul representa el suministro de alto voltaje a los detectores y paletas centelladoras.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.2. Análisis de datos

Los datos recopilados de la configuración se reciben en una computadora del Counting House de HAWC, cuyo archivo de datos en crudo está denominada como “run1600.dat” el cual se encuentra justamente en formato “.dat”, estas fueron tomadas durante 3 horas el día 26/09/24 registrando un total de 79484 eventos. Para poder analizarlas, se usó dos macros (secuencias de código) las cuales fueron desarrolladas por el equipo principal que trabaja en HAWC. Estas macros son denominadas Scan14ChFADC.c y Procesa14ChFADC.c empleadas para llevar a cabo diferentes etapas de análisis.

4.2.1. Visualización y Evaluación de las señales obtenidas de los dos arreglos

Macro " Scan14ChFADC " para revisión de señales

Con la macro Scan14ChFADC, se revisan los archivos en “crudo”, es decir los archivos en .dat, que son señales de los datos recolectados en los tanques, se observan los picos, amplitud, y otras características de cada señal nanosegundo por nanosegundo dentro del tiempo de digitalización de un microsegundo, logrando identificar patrones y detalles en las señales, mejorando así el análisis y comprensión de los datos. Con esta macro analizamos las señales de todos los PMTs y centelladores en histogramas respecto a los voltajes, a la carga, a los “gates”, además de los tiempos de llegada de partículas para cada canal del FADC anteriormente descrito que proporciona ROOT, los histogramas se generaran en TCanvas mediante el comando *Draw*.

Macro " Procesa14ChFADC" para análisis de voltaje y tiempo de llegada

La macro “Procesa14ChFADC” facilita el análisis de propiedades críticas de las señales recolectadas en los tanques de detección del experimento HAWC, este Macro permite obtener y analizar valores de voltaje (V), tiempo de llegada de la señal al PMT (T), carga integrada (Q)

y ancho de la señal (W) de cada fotomultiplicador (PMT) dentro de los tanques y las paletas, que son fundamentales para reconstruir la trayectoria y origen.

Además, permite analizar y comparar la respuesta de los fotomultiplicadores del tanque O8 y los tanques de multiplicidad (O y P), evaluando cómo la disposición y ajuste de los fotomultiplicadores influyen en los datos capturados; analizando la multiplicidad de los eventos que permite entender patrones de coincidencia y correlación, proporcionando información sobre la distribución de las partículas al momento de la detección.

4.2.2. Cortes para depuración y selección de datos

La aplicación de cortes se realiza con `Procesa14ChFADC.c` de manera manual que permite una mayor flexibilidad en la limpieza y filtrado de eventos y así contar únicamente con datos de interés.

Los cortes permiten eliminar el ruido de fondo no deseado en las señales y las señales saturadas (datos irrelevantes) y por ende la reducción considerable de eventos. Este proceso se realiza tras verificar si una señal corresponde a un “doble fotoelectrón” o a un ruido característico de la señal. Estos cortes fueron ejecutados a todas las señales adquiridas de la configuración.

Determinación de rangos y visualización gráfica del espectro de eventos procesados

Una vez aplicados los cortes y filtrados los datos, se obtienen los resultados que reflejan la actividad y respuesta de las paletas centelladoras y los fotomultiplicadores, ante la llegada de partículas de la cascada hadrónica o cascada electromagnética, estos resultados pueden visualizarse y analizarse en TCanvas, generando gráficos y comparativas entre los diferentes tanques.

Al momento de correr la línea de código, establecemos los rangos que analizaremos, los BIN de amplitud o canales digitales las cuales estarán en el rango de 0 a 1000, considerándose 1001 canales digitales, (el 0 también se va a considerar como un canal digital,

estos si los podemos modificar según creamos conveniente con *drawpanel* o incluso si no ponemos un límite el TCanvas por *default* nos brinda un rango de canales digitales establecidos, pero es mejor definirlos desde un comienzo y trabajar en base a ello.

4.2.3. Análisis general de configuración con la macro Scan14ChFADC.c

Se procedió a analizar los datos en crudo, evento por evento que fue detectado por los 13 canales del FADC que corresponde a los PMTs, centelladores y multiplicidad. Con la finalidad de visualizar e inspeccionar el comportamiento de las señales e identificar alguna variación con respecto al voltaje, tiempo, amplitud, anchura y carga, es así que se seleccionó el evento 144 de manera arbitraria cuyas características se muestran en la tabla 2.

Las gráficas tienen como variables: tiempo (ns) en el eje X y voltaje (mV) en el eje, para cada canal del FADC la macro determino los siguientes parámetros: el pico del canal de la señal, el tiempo en ese pico, t_0 corresponde al momento en el que inicia la señal, la amplitud, la anchura (*Width*) y la carga que es resultado de la integración de la señal.

Tabla 2

Características del evento seleccionado

	Detector/Localización	Canal FADC	Pico del canal digital(mV)	Tpeak (ns)	T0 (ns)	Amp at T0	Width(ns)	Voltaje máximo (mV)	Charge(pC)
De- tecto- res de Pri- mera capa	PMT E- Periférico	0	3165	356	342	11	150	3165.07	1125.92
	PMT G- Central	2	2206	330	317	15	136	2206.63	655.267
	PMT H-Periférico	3	813	364	352	14	110	813.046	254.222
De- tecto- res de Se- gunda capa	PMT A-Periférico	4	1469	407	392	11	137	1469.99	245.756
	PMT B-Periférico	5	688	421	407	15	125	688.99	245.756
	PMT C- central	6	1510	425	408	12	163	1510.98	573.478
	TRIGGER	8	1469	325	315	261	44	1469.68	655.256
	PMT D-Periférico	9	1595	401	388	15	141	1595.36	520.7
	Centellador superior	10	733	300	288	18	139	733.528	276.878

Centellador inferior	11	735	299	278	29	184	735.244	347.078
Multiplicidad O	12	1737	591	410	15	280	1737.45	3665.1
Multiplicidad P	13	805	590	467	23	225	805.015	1686.47

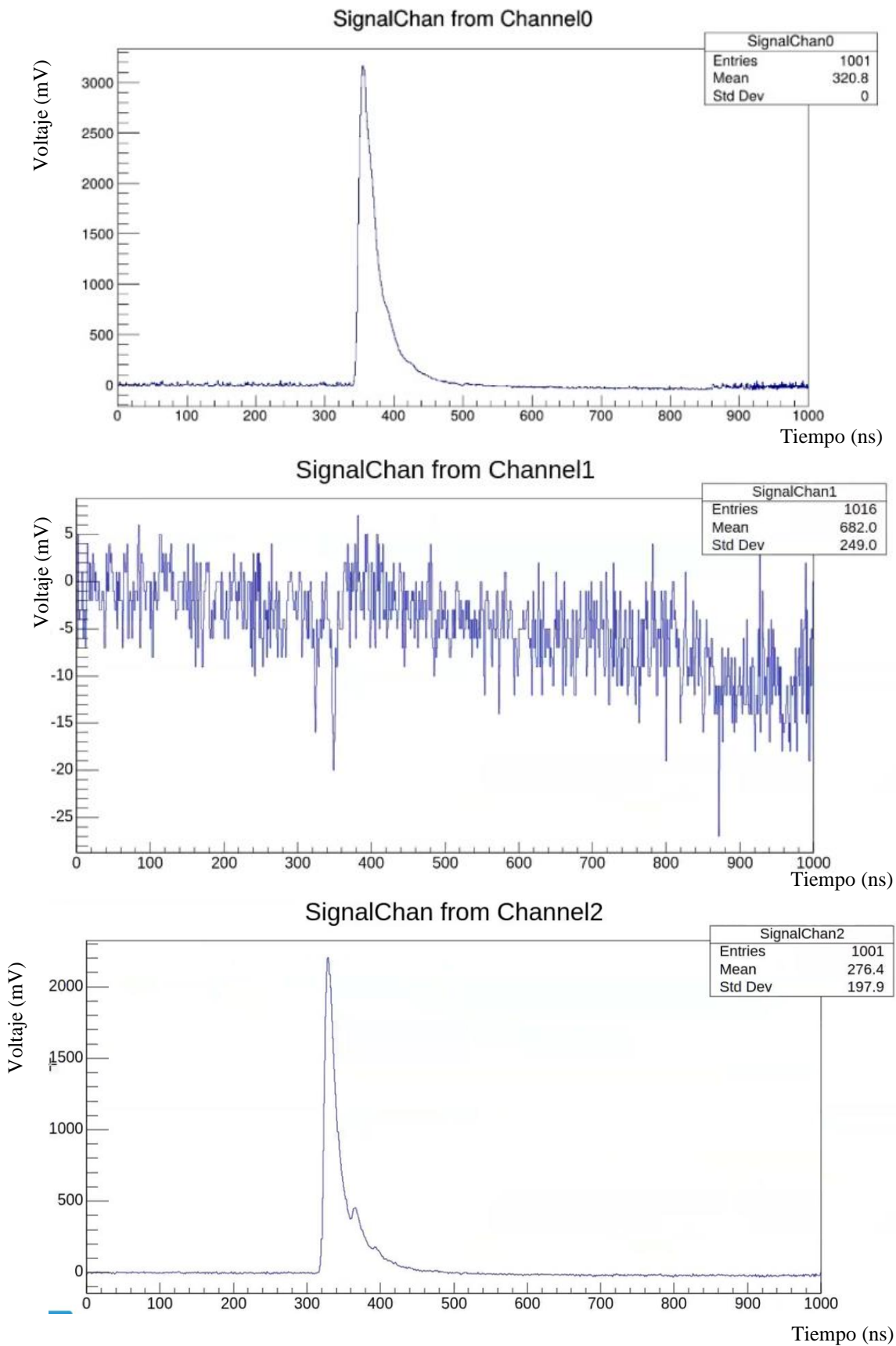
Figura 35*Señales brindadas por la macro Scan14ChFACD: PMTs*

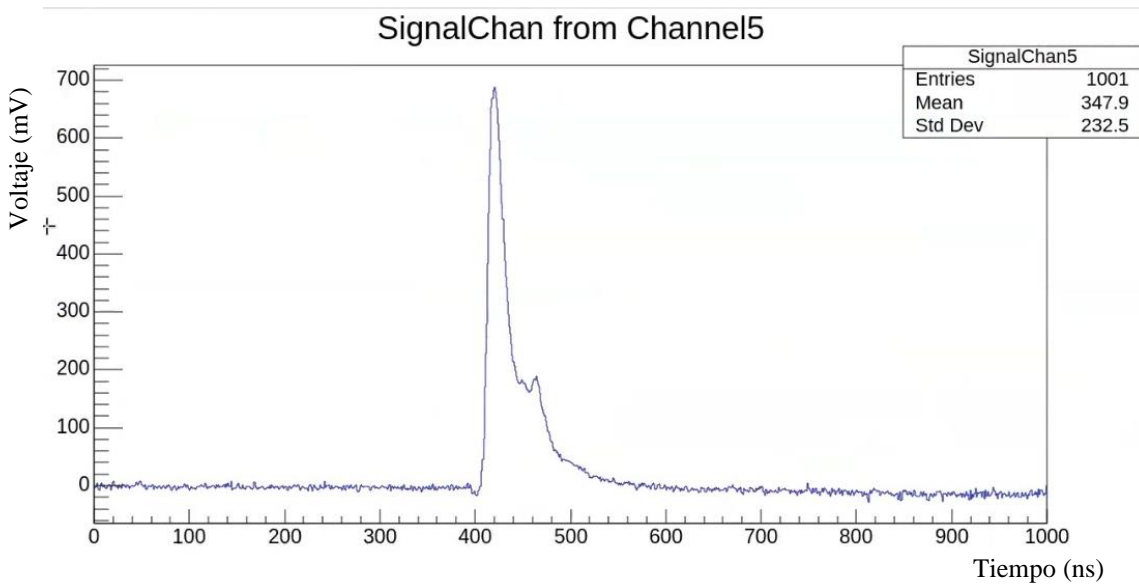
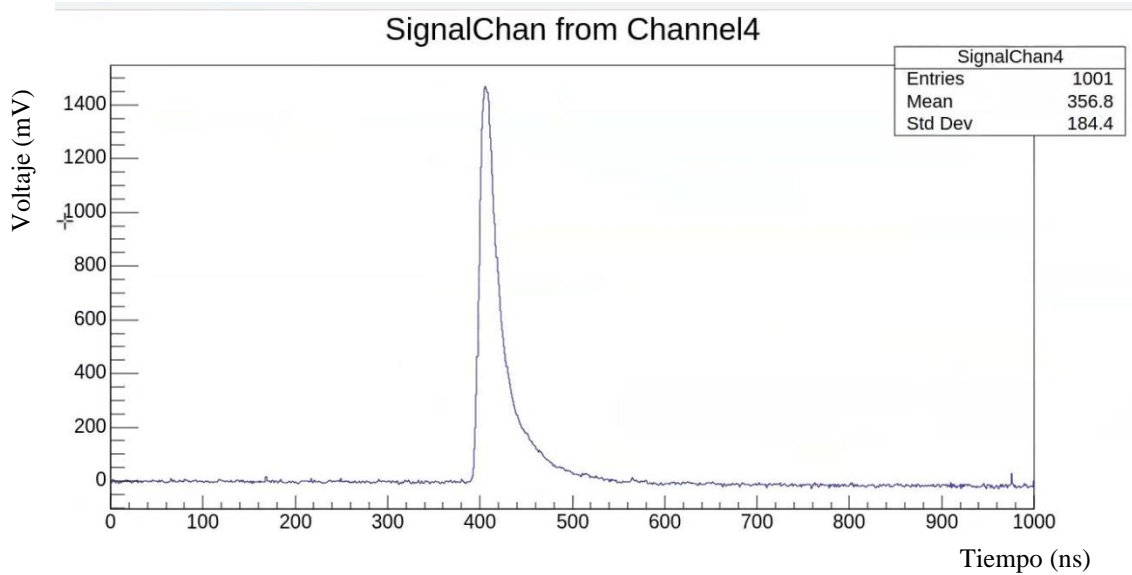
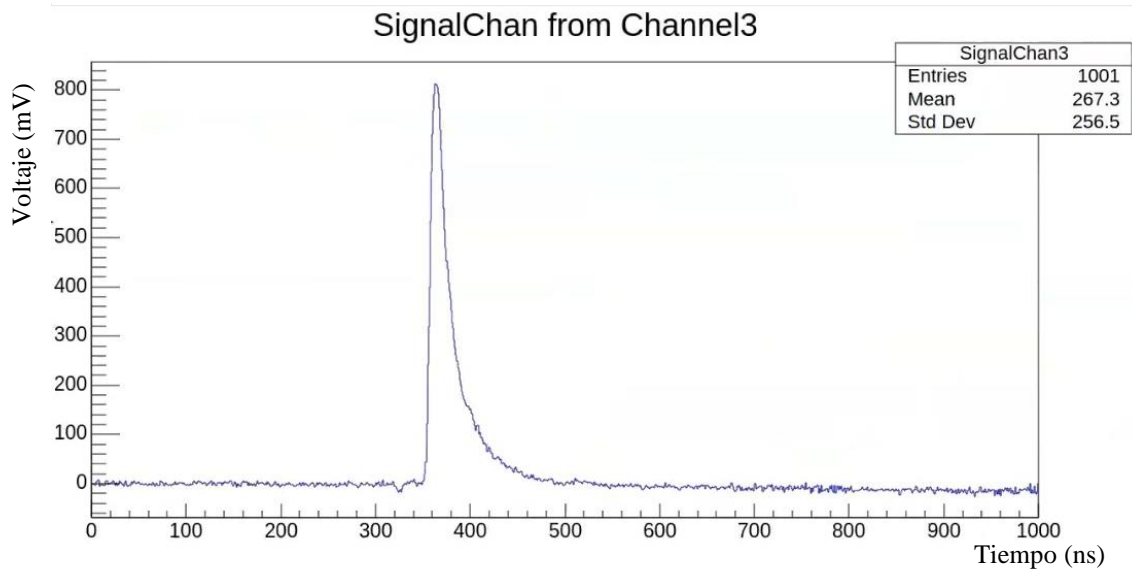
Figura 36*Señales brindadas por la macro Scan14ChFACD: PMTs*

Figura 37

Señales brindadas por la macro Scan14ChFACD: Tanques y trigger

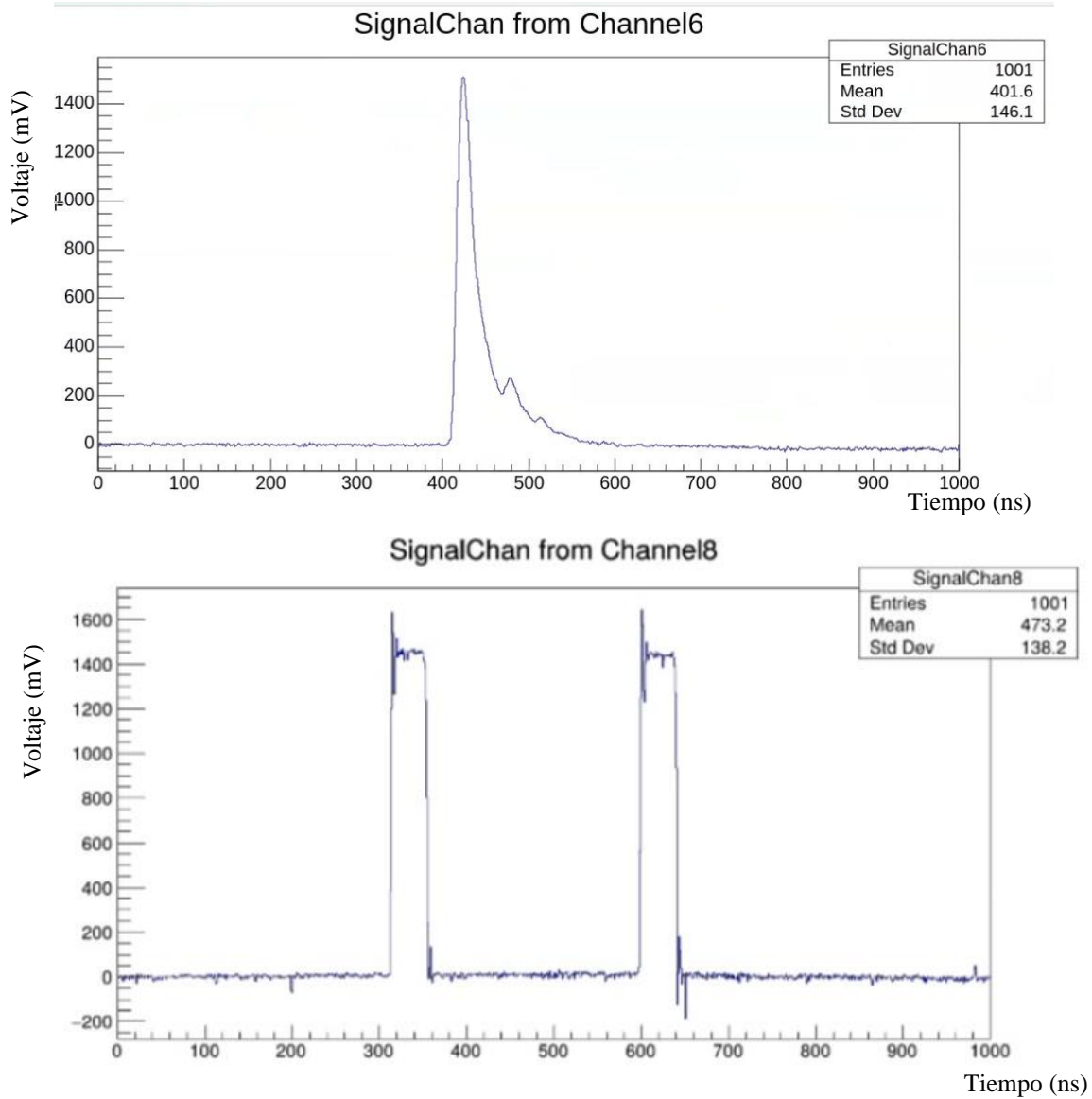


Figura 38

Señales brindadas por la macro Scan14ChFACD: Tanque y paletas

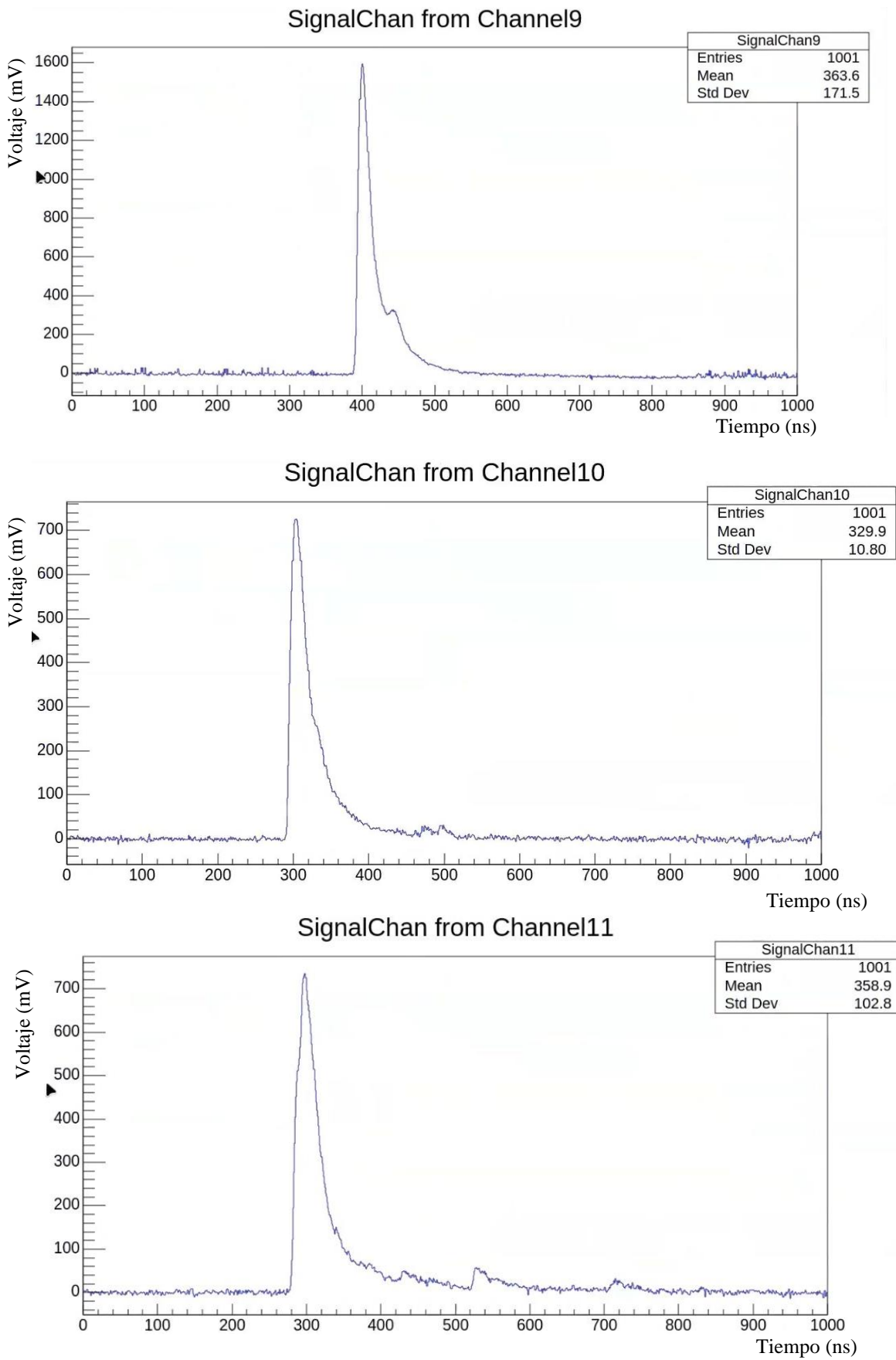


Figura 39

Señales brindadas por la macro Scan14ChFACD: Multiplicidad de los tanques O y P

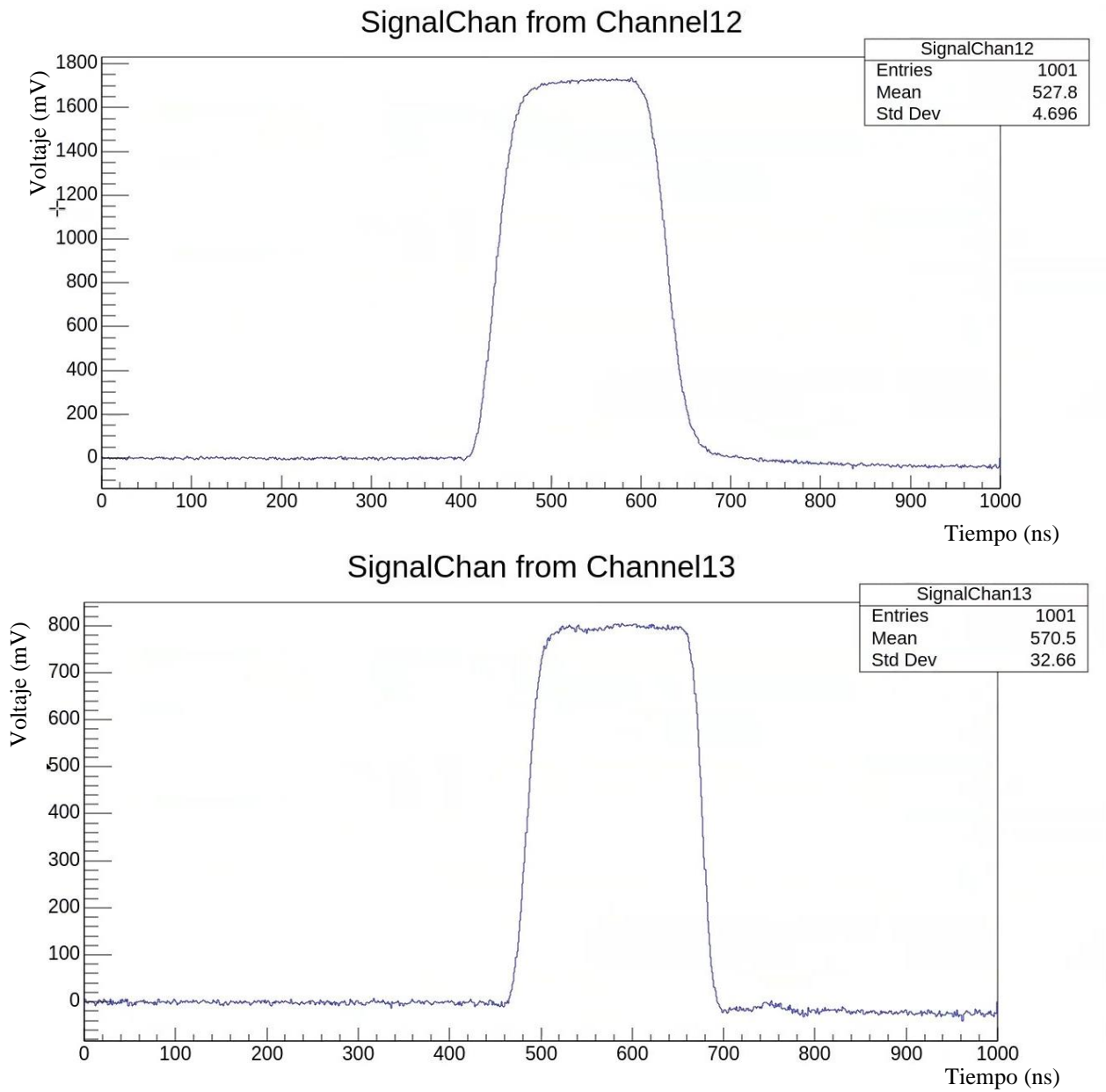


Figura 40*Datos del evento 144 Scan14ChFACD*

```

Dame un caracter para continuar
q
Event 144 Chanel 0 Peak V 3165 Tpeak 356 T0 342 Ampl at T0 11 Width 150 Voltage 3165.07 Charge 1125.92 BaseL 4053
Event 144 Chanel 1 Peak V 0 Tpeak 0 T0 0 Ampl at T0 11 Width 0 Voltage 0 Charge 0 BaseL 3993
Event 144 Chanel 2 Peak V 2206 Tpeak 330 T0 317 Ampl at T0 15 Width 136 Voltage 2206.63 Charge 655.267 BaseL 3957
Event 144 Chanel 3 Peak V 813 Tpeak 364 T0 352 Ampl at T0 14 Width 110 Voltage 813.046 Charge 254.222 BaseL 3970
Event 144 Chanel 4 Peak V 1469 Tpeak 407 T0 392 Ampl at T0 11 Width 137 Voltage 1469.82 Charge 472.156 BaseL 4017
Event 144 Chanel 5 Peak V 688 Tpeak 421 T0 407 Ampl at T0 15 Width 125 Voltage 688.99 Charge 245.756 BaseL 3984
Event 144 Chanel 6 Peak V 1510 Tpeak 425 T0 408 Ampl at T0 12 Width 163 Voltage 1510.98 Charge 573.478 BaseL 3869
Event 144 Chanel 7 Peak V 0 Tpeak 0 T0 0 Ampl at T0 12 Width 0 Voltage 0 Charge 0 BaseL 4077
Event 144 Chanel 8 Peak V 1469 Tpeak 325 T0 315 Ampl at T0 261 Width 44 Voltage 1469.68 Charge 655.256 BaseL 2458
Event 144 Chanel 9 Peak V 1595 Tpeak 401 T0 388 Ampl at T0 15 Width 141 Voltage 1595.36 Charge 520.7 BaseL 4042
Event 144 Chanel 10 Peak V 733 Tpeak 300 T0 288 Ampl at T0 18 Width 139 Voltage 733.528 Charge 276.878 BaseL 3838
Event 144 Chanel 11 Peak V 735 Tpeak 299 T0 278 Ampl at T0 29 Width 184 Voltage 735.244 Charge 347.078 BaseL 3816
Event 144 Chanel 12 Peak V 1737 Tpeak 591 T0 410 Ampl at T0 15 Width 280 Voltage 1737.45 Charge 3665.1 BaseL 3786
Event 144 Chanel 13 Peak V 805 Tpeak 590 T0 467 Ampl at T0 23 Width 225 Voltage 805.015 Charge 1686.47 BaseL 3811
Dame un caracter para continuar

```

Los datos de la tabla 2 fueron extraídos del entorno de Scan14ChFACD correspondiente al evento 144 para tener una mejor visualización e interpretación de los eventos obtenidos de la configuración, para ello primeramente ejecutamos la macro Scan14FACD.c en el programa ROOT.

Figura 41*Macro Scan14ChFADC.c abierta desde ROOT*

```

oem@Ana-Cristina:~/Desktop/datos_sep_24/Septiembre-2024$ root Scan14ChFADC.c
-----
| Welcome to ROOT 6.33.01                               https://root.cern |
| (c) 1995-2024, The ROOT Team; conception: R. Brun, F. Rademakers |
| Built for linuxx8664gcc on Nov 02 2024, 21:48:31 |
| From heads/master@v6-31-01-2997-g9efc2c8bb4 |
| With c++ (Ubuntu 11.4.0-lubuntul-22.04) 11.4.0 |
| Try '.help'/'?', '.demo', '.license', '.credits', '.quit'/'q' |
-----

root [0]
Processing Scan14ChFADC.c...

ROOT comes with a web-based canvas, which is now being started.
Revert to the legacy canvas by setting "Canvas.Name: TRootCanvas" in rootrc file or
by starting "root --web=off".
Find more info on https://root.cern/for_developers/root7/#twebcanvas
Info in <THttpEngine::Create>; Starting HTTP server on port 127.0.0.1:9398
Termine de definir espectros SignalChan%i SignalChan from Channel%i
Termine de definir espectros VoltageChan%i VoltageChan from Channel%i
Termine de definir espectros ChargeChan%i ChargeChan from Channel%i
Termine de definir espectros SignalPos%i SignalPos from Channel%i
Termine de definir espectros SignalNeg%i SignalNeg from Channel%i
Dame el nombre del Archivo

```

Nota. Extraído del software ROOT

A continuación, el programa pide que se analice un archivo, en este caso se analiza el archivo de datos run1600.dat, en donde se encuentran los datos en crudo recopilados previamente:

Figura 42

Datos de la macro *Scan14FADC.c*

```

Dame el nombre del Archivo
run1600.dat
El numero de canales es 14
Event 1 Chanel 0 Peak V 1354 Tpeak 350 T0 341 Ampl at T0 25 Width 89 Voltage 1354.19 Charge
Event 1 Chanel 1 Peak V 0 Tpeak 0 T0 0 Ampl at T0 25 Width 0 Voltage 0 Charge 0 BaseL 3
Event 1 Chanel 2 Peak V 682 Tpeak 327 T0 318 Ampl at T0 13 Width 88 Voltage 682.951 Charge
Event 1 Chanel 3 Peak V 267 Tpeak 367 T0 358 Ampl at T0 15 Width 58 Voltage 267.545 Charge
Event 1 Chanel 4 Peak V 173 Tpeak 401 T0 398 Ampl at T0 20 Width 50 Voltage 173.075 Charge
Event 1 Chanel 5 Peak V 65 Tpeak 415 T0 408 Ampl at T0 12 Width 28 Voltage 65.2292 Charge

```

Nota. Extraído del software ROOT

Y seguidamente, el programa ROOT comienza a leer los datos del primer evento que llegó, a su vez se abre una sub-ventana para la visualización de los histogramas con los eventos que llegaron uno a uno; se eligió el evento 144 por la forma de los eventos y así poder explicar mejor que es lo que se está detectando.

De los 13 canales del FADC, la señal del canal 1 y canal 7 no registraron datos debido a que los dos PMTs se dañaron por eso solo se muestra el ruido de fondo correspondientes al ruido electrónico y señales térmicas del equipo. En el canal 4 se observa que llega una partícula retrasada unos 200 ns después del primer pico, en el canal 5 se aprecia una ligera deformación (pequeño bulto) cuando la señal desciende, es porque hay otra partícula en la señal, se debe a que en una cascada de partículas no todas llegan en un mismo plano, sino que hay unas más retrasadas respecto a otras. El canal 8 representa la señal del *trigger* del arreglo de las paletas centelladoras donde se ven dos señales en coincidencia, mientras que en los canales 10 y 11 tienen de dos a más picos, lo que representaría señales de partículas de una cascada que llegaron una tras otra mas no representa un muon.

De los canales 12 y 13 correspondientes a las multiplicidades, su valor esta codificada en la altura máxima de cada pulso, 1737mV para multiplicidad de tanques O y 805mV para multiplicidad de tanques P, cuya relación del valor y tipo de señal se detallará más adelante, tienen una representación escalonada, donde cada escalón corresponde al número de multiplicidad.

En los posteriores análisis se omitirá el PMT F1 correspondiente a la primera capa de fotomultiplicadores debido a que no presenta señales tal como se muestra en las figuras 35, 36,37, 38 y 39, generada en Scan14ChFACD.

4.2.4. Análisis para las paletas centelladores con la macro `Procesa14ChFADC.c`

Voltaje para la paleta centelladora canal 10:

Se aplicaron cortes a las señales seleccionadas correspondientes al paso de muones en el histograma del centellador, eliminando aquellas señales saturadas y las coincidencias con señales aleatorias. En este caso y en los análisis posteriores, se aplicaron logaritmo de base 10 al eje Y que representan el número de eventos, para facilitar la visualización de señales relevantes.

Se muestran dos histogramas, correspondientes a la señal registrada por la paleta centelladora conectada al canal 10 del FADC. El primer histograma representa la señal en su forma original mientras que el segundo histograma representa la señal con cortes en un intervalo de 70 a 254,94 que corresponden al pico de muones que atraviesan el detector centellador.

Figura 43

Espectro de la paleta centelladora canal 10 sin cortes.

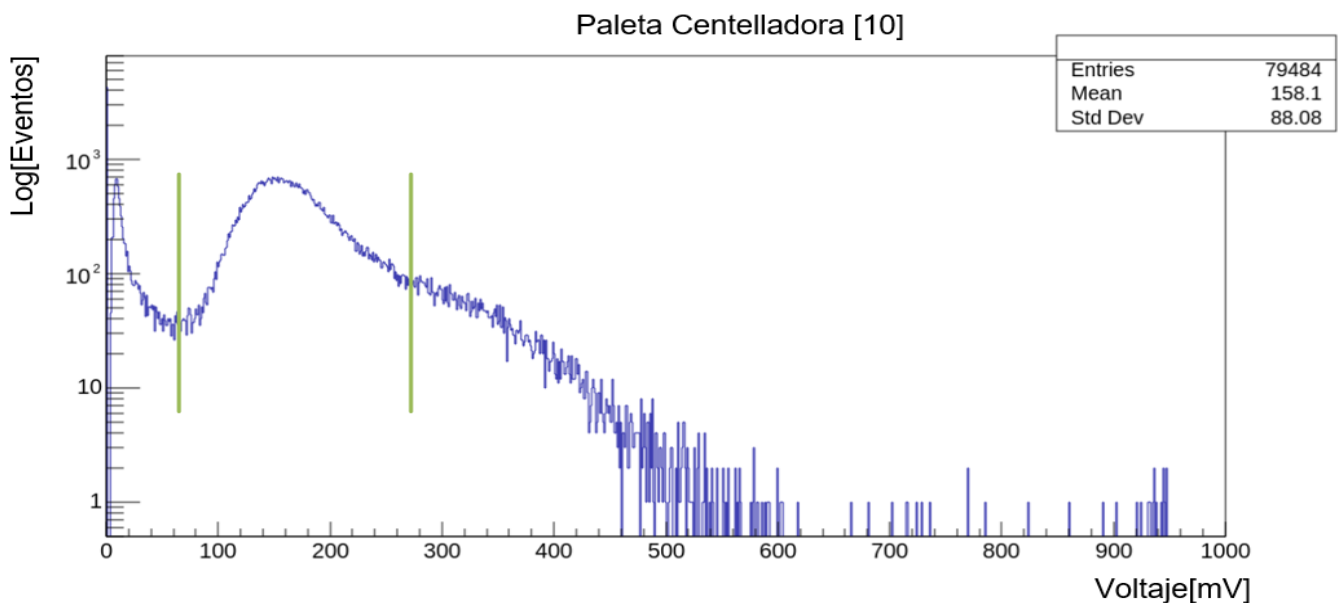
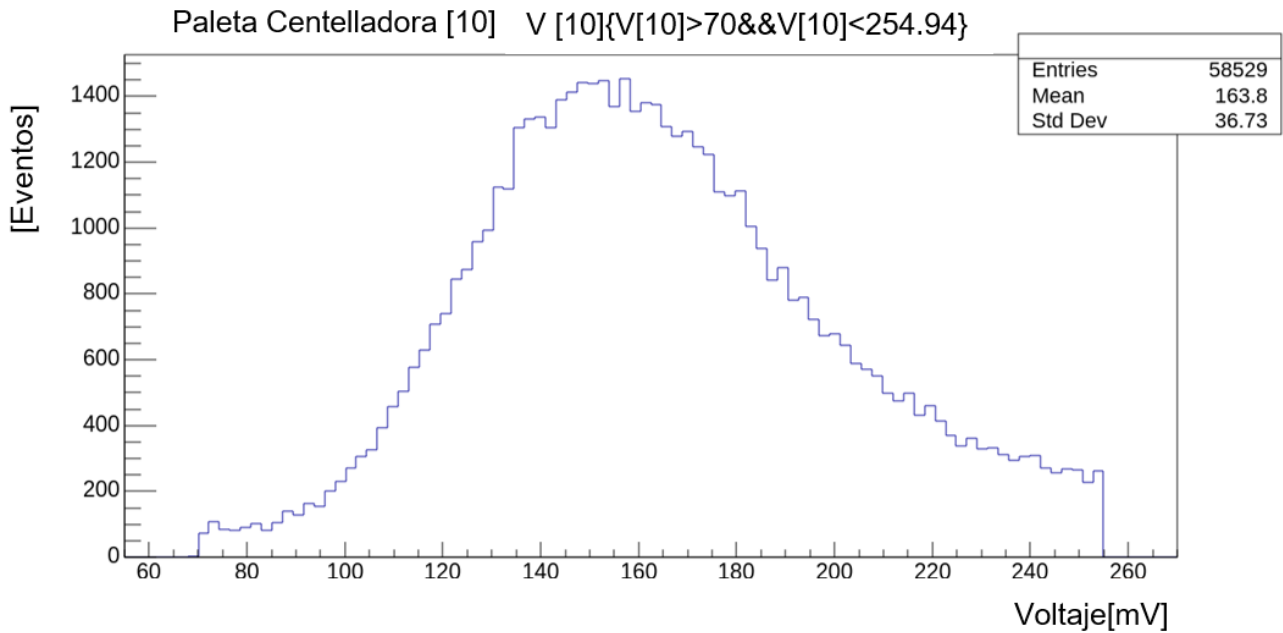


Figura 44

Espectro de la paleta centelladora canal 10 con cortes.



Voltaje para la paleta centelladora canal 11

Siguiendo el mismo procedimiento de la paleta centelladora 10, se ejecutó la línea de análisis que permitió obtener las señales de voltaje de la paleta 11 como se muestra en la figura 45. Se identificaron manualmente los puntos donde la curva de los muones es más visible, esto permitió obtener un análisis más preciso.

Figura 45

Espectro de la paleta centelladora canal 11 sin cortes.

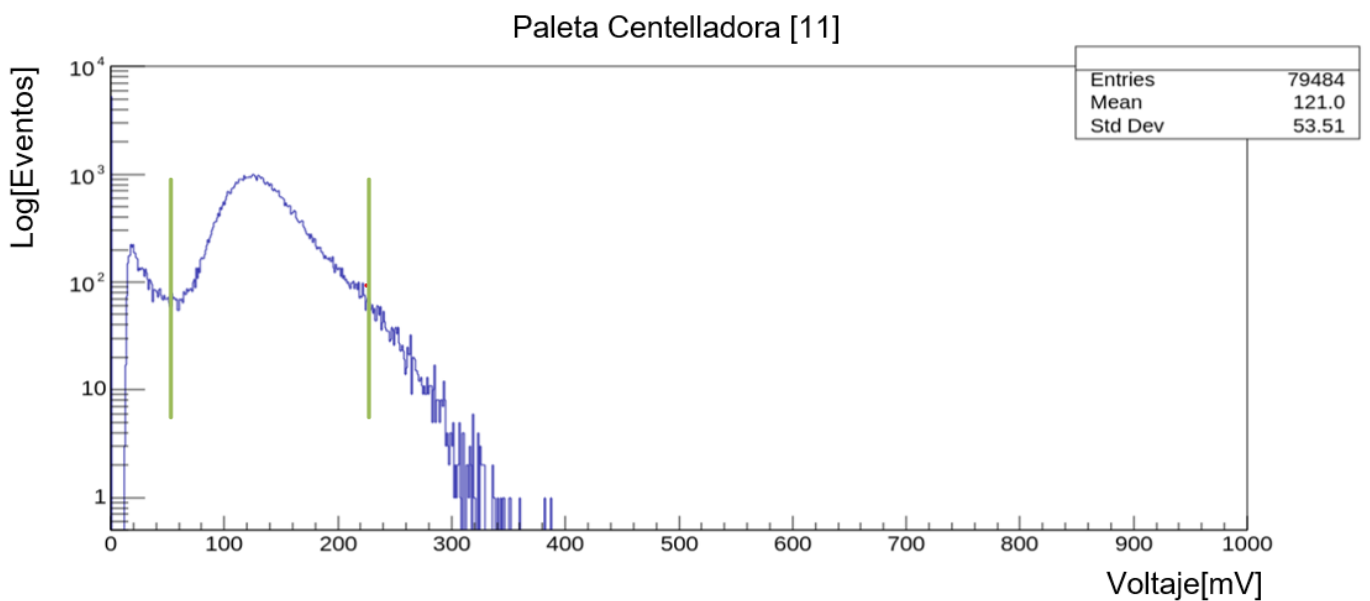
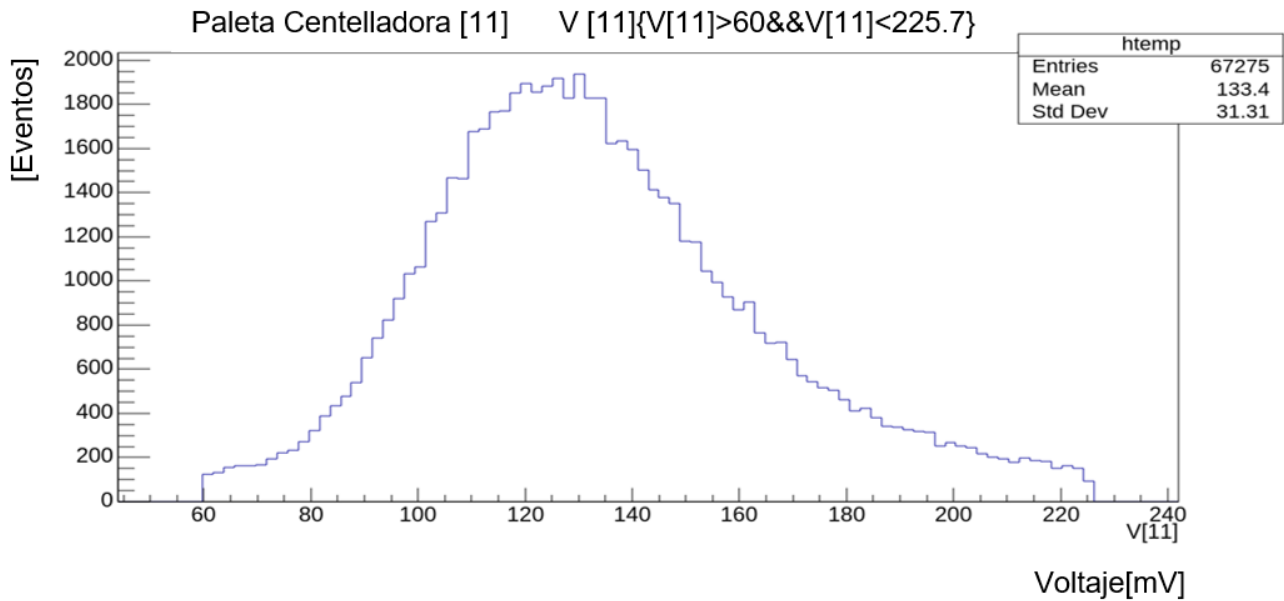


Figura 46

Espectro de la paleta centelladora canal 11 con cortes.

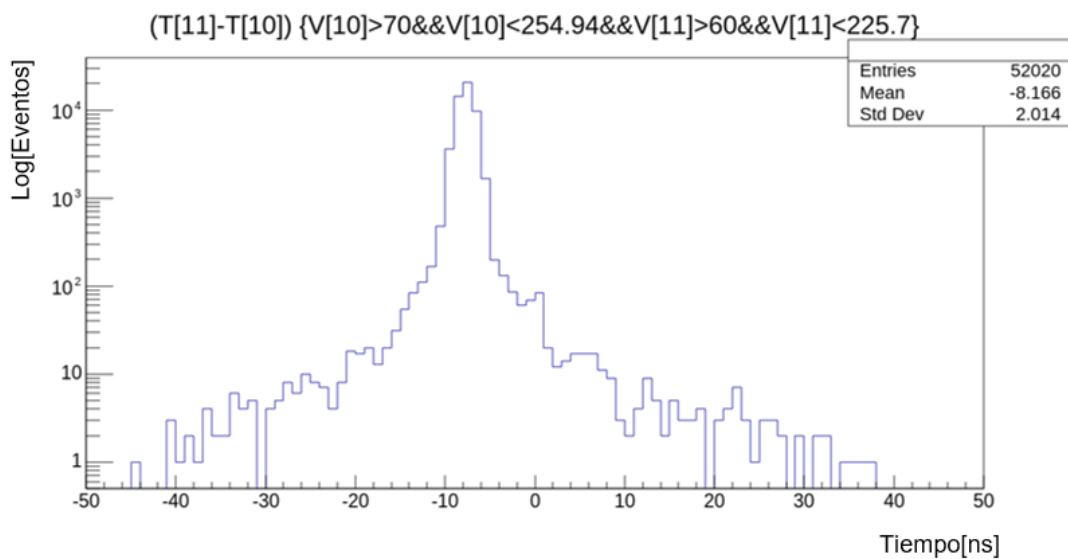


Diferencia de tiempo entre la paleta centelladora canal 11 y canal 10

Seguidamente graficamos la diferencia de tiempo de llegada de la señal de los dos centelladores, T11 y T10 (considerando el código de cortes de sus voltajes V[10] y 11 V[11]), con el fin de obtener la señal de tiempo de los muones que llevan a las paletas centelladoras. Primero se identificó el pico más alto haciendo un ajuste del intervalo de escala que va desde -50 a 50 nanosegundos.

Figura 47

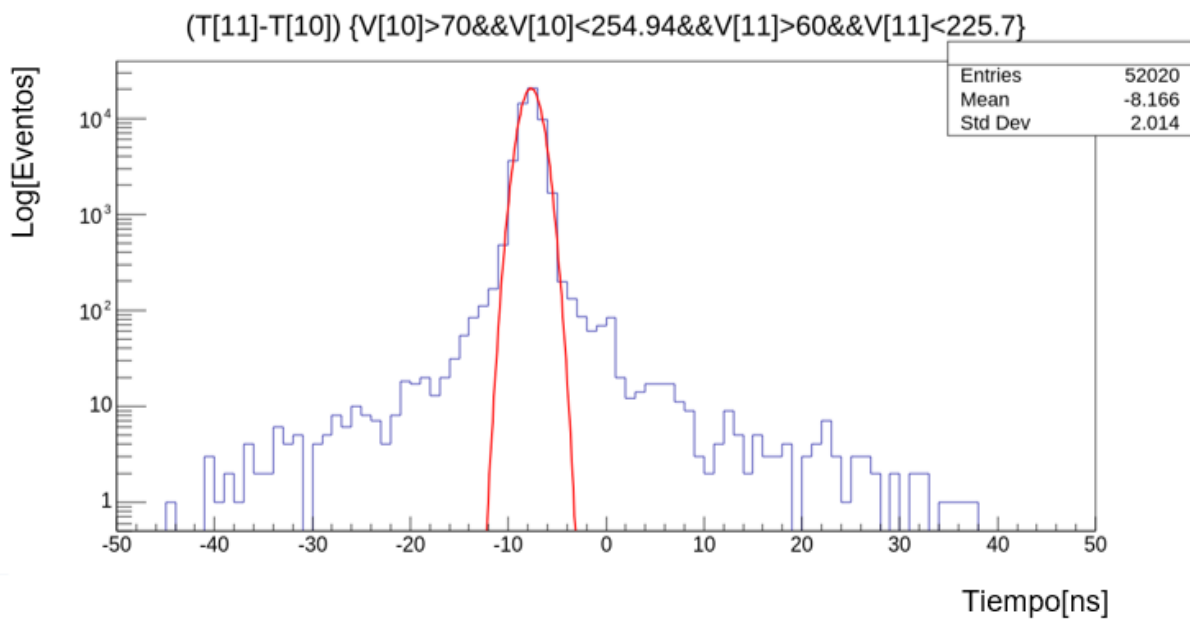
Pico más alto de la diferencia de tiempos del canal 11 y 10.



El pico mostrado en la figura 47 presenta un perfil en forma de campana con unas colas largas y el valor medio es de -8.166 debido a que está tomando todo el rango del espectro lo que implica que no está tomando el máximo del pico, por esta razón se realizó un ajuste gaussiano en un rango de -15 a 0 usando las herramientas del TCanvas, de lo cual se obtuvo lo siguiente:

Figura 48

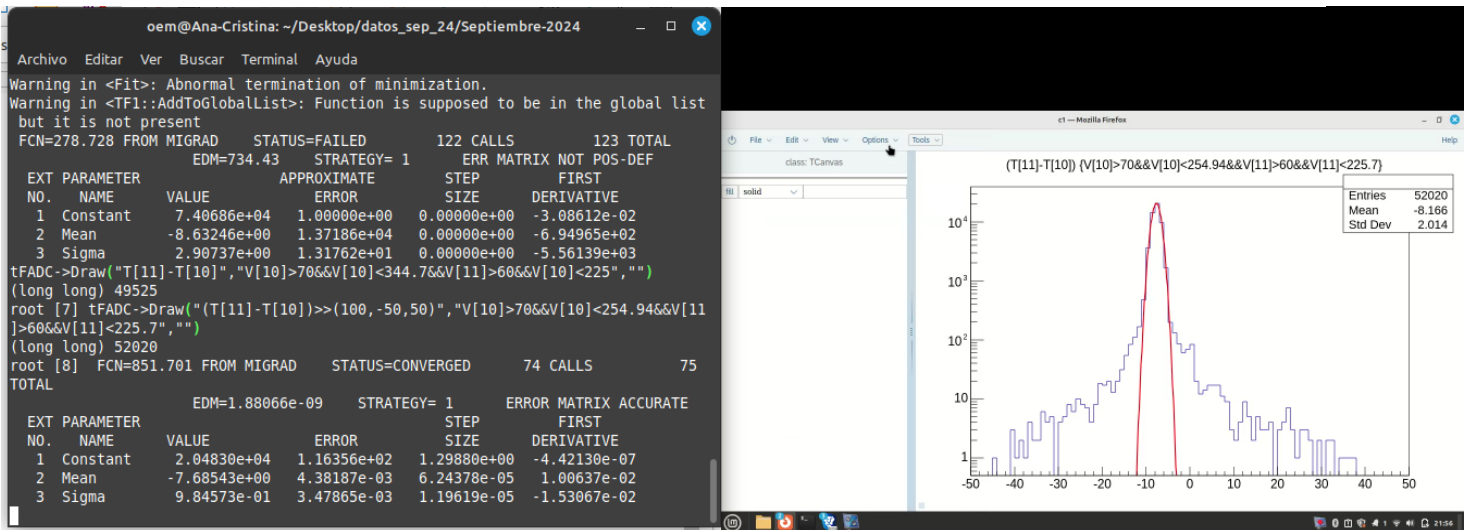
Ajuste Gaussiano en el pico formado de la diferencia de tiempo canal 11 y 10.



En la figura 48 se puede apreciar que la curva del tiempo de llegada de los muones detectados por los centelladores presenta un buen ajuste a una distribución gaussiana. El valor de σ (desviación estándar) de la gaussiana es de 0.984 bastante cercano a 1 nanosegundos.

En la terminal se brinda información de valores relacionados al ajuste efectuado como se muestra en la figura 48.

Figura 49
Valores del ajuste gaussiano



Nota. Las incertidumbres asociadas a cada parámetro son bastantes pequeñas por lo que no llega a tener mucha influencia.

Tabla 3
Parámetros del ajuste

Nº	Nombre	Valor	Incertidumbre	Tamaño	Derivada
1	Constante	$2.04830 \cdot 10^4$	$1.16356 \cdot 10^2$	$1.29880 \cdot 10^0$	$-4.42130 \cdot 10^{-7}$
2	Media	$-7.68543 \cdot 10^0$	$4.38187 \cdot 10^{-3}$	$6.24378 \cdot 10^{-5}$	$1.00637 \cdot 10^{-2}$
3	Sigma	$9.84573 \cdot 10^{-1}$	$3.47865 \cdot 10^{-3}$	$1.19619 \cdot 10^{-5}$	$-1.53067 \cdot 10^{-2}$

Seguidamente para quitar las colas del ajuste en los límites donde la curva y la gaussiana coinciden se ha establecido nuevos cortes que va desde -13 a -3 nanosegundos para la resta de los tiempos, agregando “condición” adicional al código que delimita la señal de los voltajes de los centelladores.

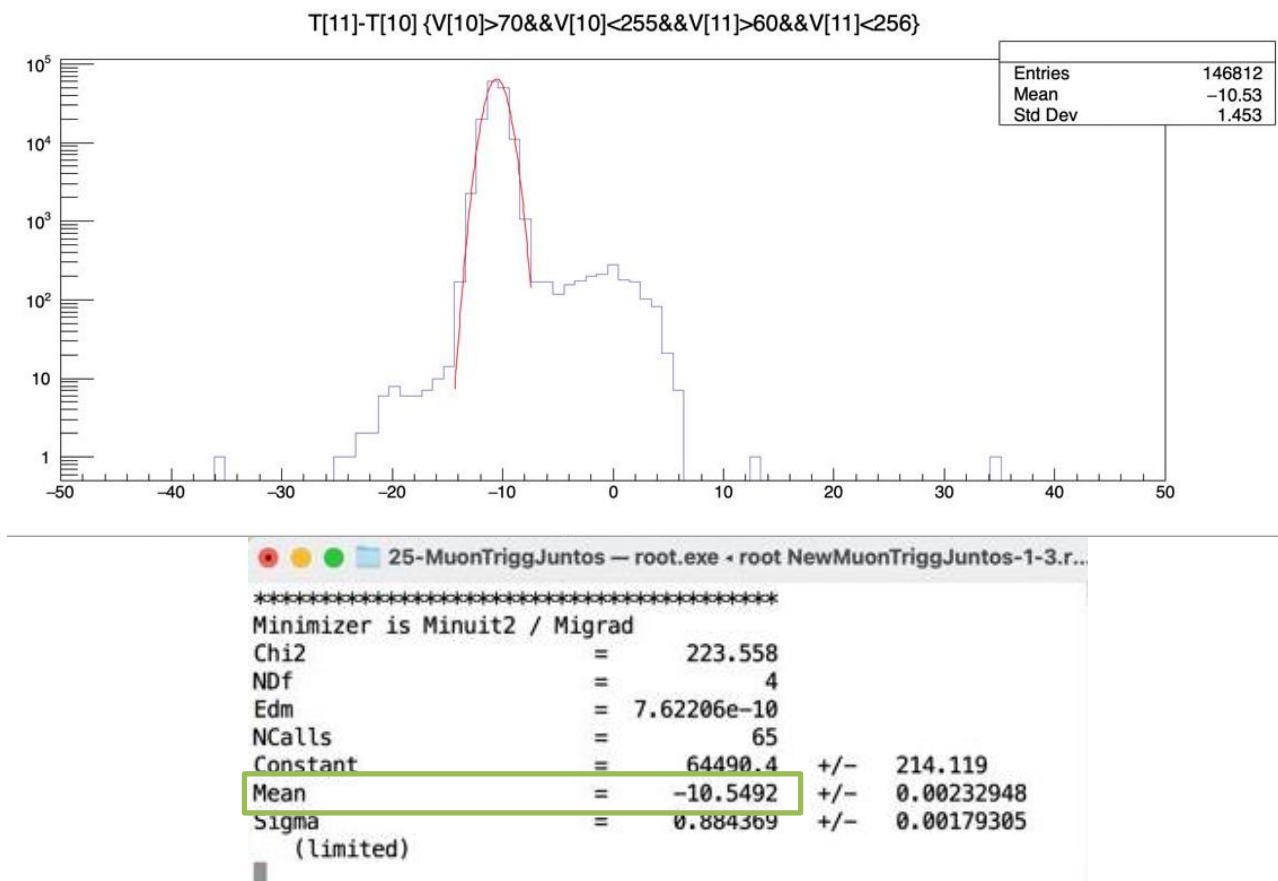
Todo este proceso de análisis de los centelladores genera una línea de código (donde se encuentra los cortes efectuados de voltajes y diferencia de tiempos) que es aplicado para el posterior análisis del ancho, voltaje y carga de la señal en el arreglo de las dos capas de detectores de tanque O8.

La línea de orden generada hasta el momento será aplicada para el análisis de los PMTs dentro del tanque.

Para que los datos obtenidos tengan una mayor veracidad y comprobar que la velocidad de llegada de los muones resulte ser aproximada a la velocidad de la luz [c], se realizó un pre-análisis de las paletas para poder calibrarlas, debido a que existía una diferencia de longitud en los cables. Esta calibración consistió en poner la paleta centelladora superior correspondiente al canal 10, sobre la paleta centelladora inferior asociado al canal 11 de tal manera no exista separación y obtener el tiempo de desfase, el valor obtenido anteriormente (-7.068543ns) será restado con este resultado -10,549 ns cuyo valor se muestra en la figura 50.

Figura 50

Tiempo medio de pico de muones: paletas juntas



Nota. Se realizó un ajuste *Gaussiano* en el pico de la señal de los centelladores puestos juntos uno sobre el otro.

4.2.5. Análisis del ancho de la señal de los PMTs con la macro Procesa14ChFADC.c

Una señal pequeña que llega al PMT sube y baja continuamente en un tiempo corto, pero si la señal es grande tiene que tomar tiempo hasta llegar el máximo para subir y para bajar. En ese sentido la anchura representa que tan grande o pequeña es la señal detectada, un pulso

de un PMT que está entre los 20 0 30 nanosegundos es considerada pequeña y aproximadamente más de 100 nanosegundos son señales grandes.

Por consiguiente, se evaluó el ancho de las señales para estimar la ventana temporal en los PMTs de la primera y segunda capa. Para este propósito, se usó la línea de código del análisis de las paletas, aplicándola a todos los canales del FADC, obteniendo un espectro bidimensional que relaciona el ancho de las señales con su voltaje. Sin embargo, los gráficos resultantes mostraron eventos situados por encima de la curva esperada, lo que sugiere que llegaron simultáneamente dos o más señales, y eso se valida con el incrementando el ancho sin un aumento correspondiente en el voltaje. Por esta situación, se realizaron nuevos límites de corte para los gráficos que contenían estos eventos, como se presenta en la Tabla 4.

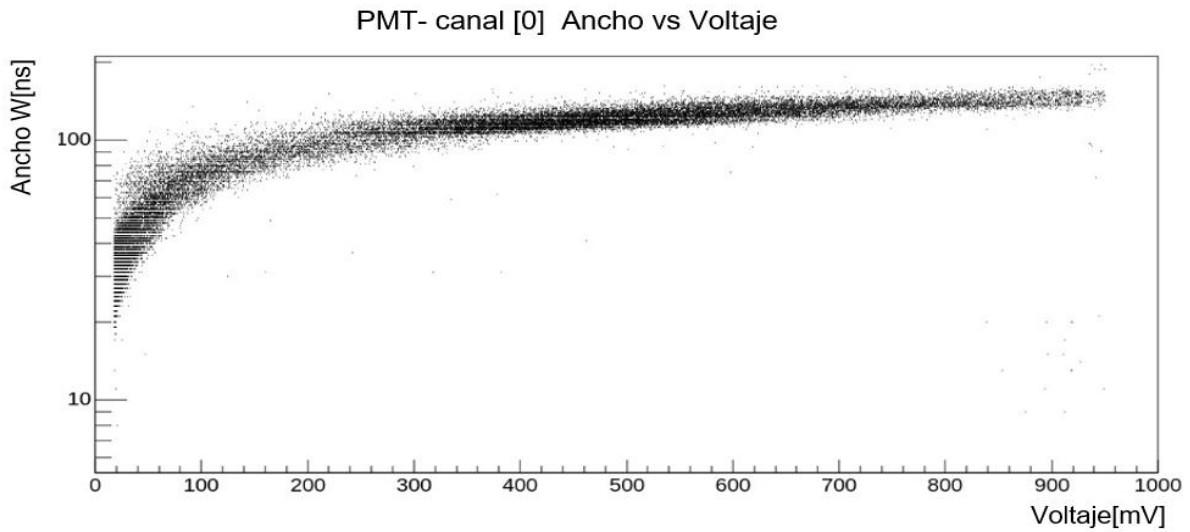
Tabla 4

Cortes aplicados en cada canal correspondiente a cada PMT

PMTs	Canales	Corte en Ancho(W)	Corte en Voltaje (V)
PMT E- Periférico	W[0]	< 156	< 975
PMT G- Central	W[2]	< 159	-
PMT H-Periférico	W[3]	< 155	-
PMT A-Periférico	W[4]	< 177	-
PMT B-Periférico	W[5]	< 200	-
PMT C- central	W[6]	<200	-
PMT D-Periférico	W[9]	< 198	<970

Figura 51

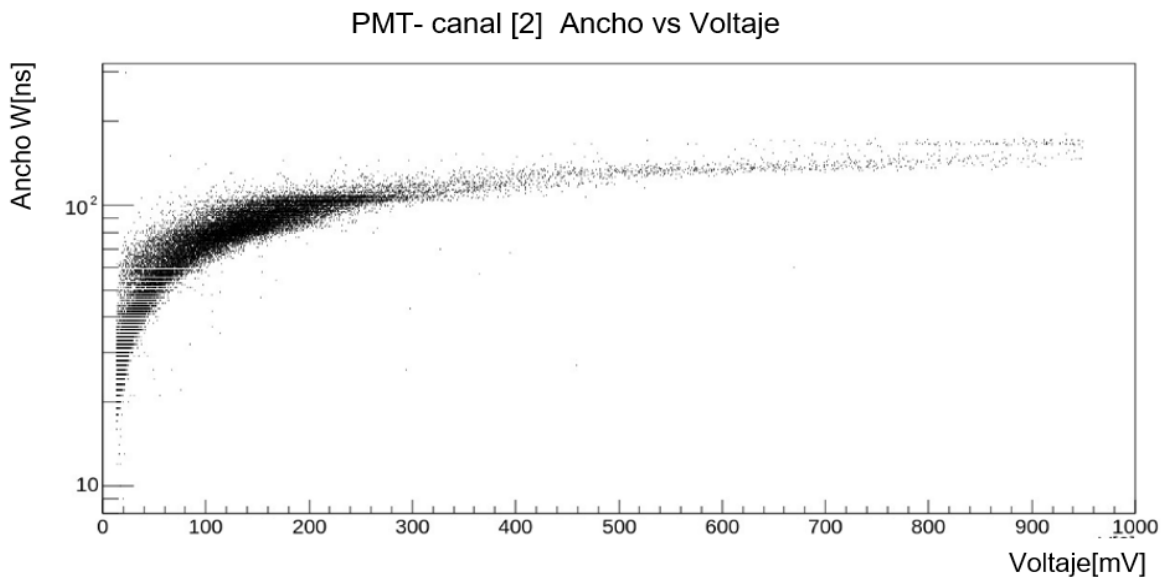
Espectro de la señal para el PMT-E0 primera capa



En este PMT-E0 se aprecian que ha detectado señales pequeñas desde unos 20mV y señales grandes que van hasta 920mV, con señales más predominantes aproximadamente entre 320 mV a 740 mV que se muestra como una región más oscura.

Figura 52

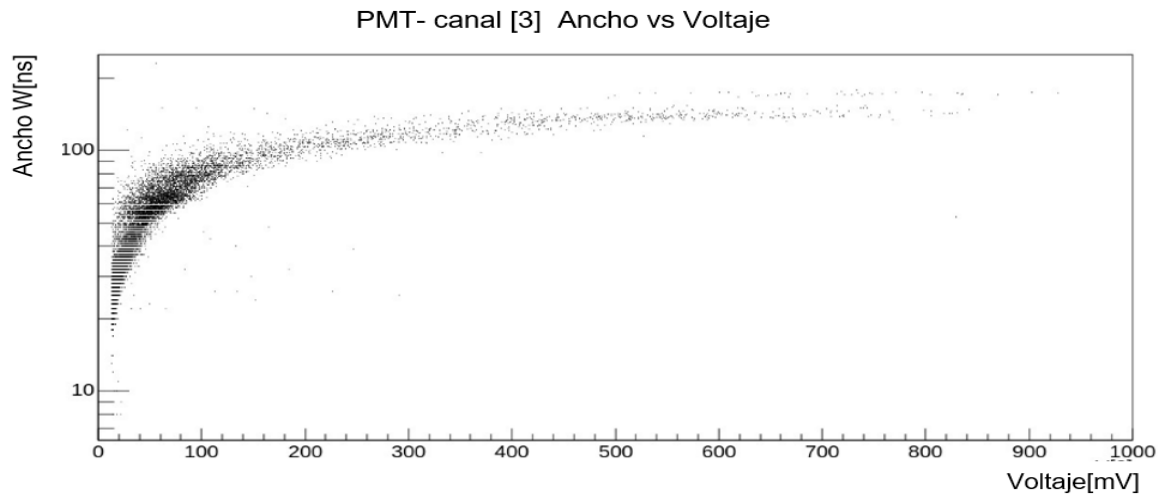
Espectro de la señal para el PMT-G primera capa



En este caso las señales predominantes se encuentran entre 60mV a 220mV aproximadamente (cúmulo negro) es decir que el PMT-G que es la central de la primera capa detectó más señales grandes, se extiende hasta voltajes de 900mV donde el incremento de anchura es bastante pequeño.

Figura 53

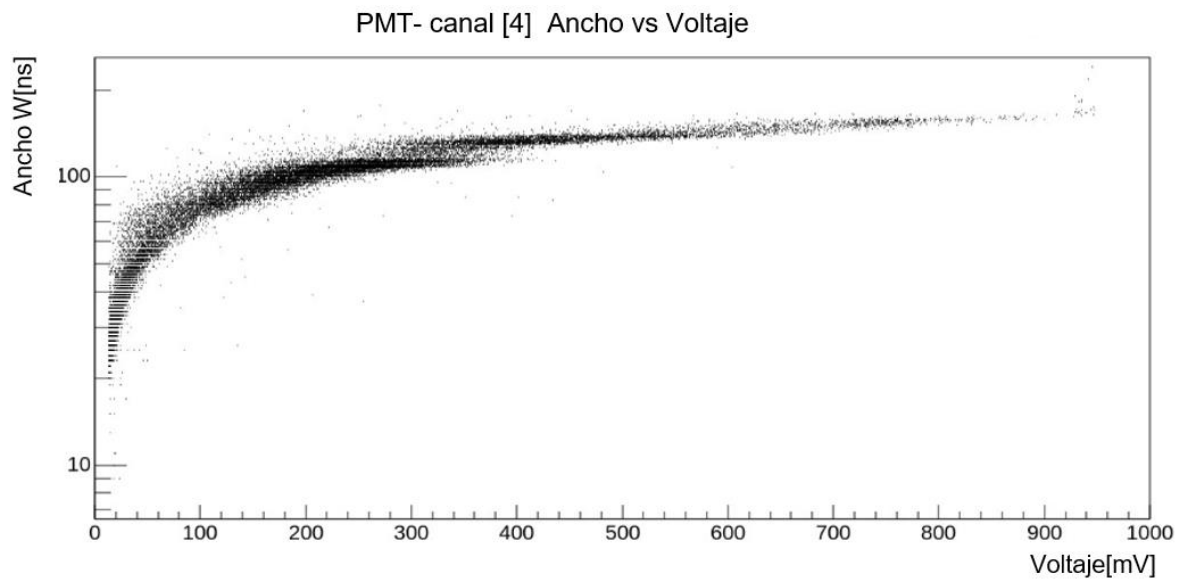
Espectro de la señal para el PMT-H primera capa



En este PMT-H se percibe que detectó más eventos con señales pequeñas

Figura 54

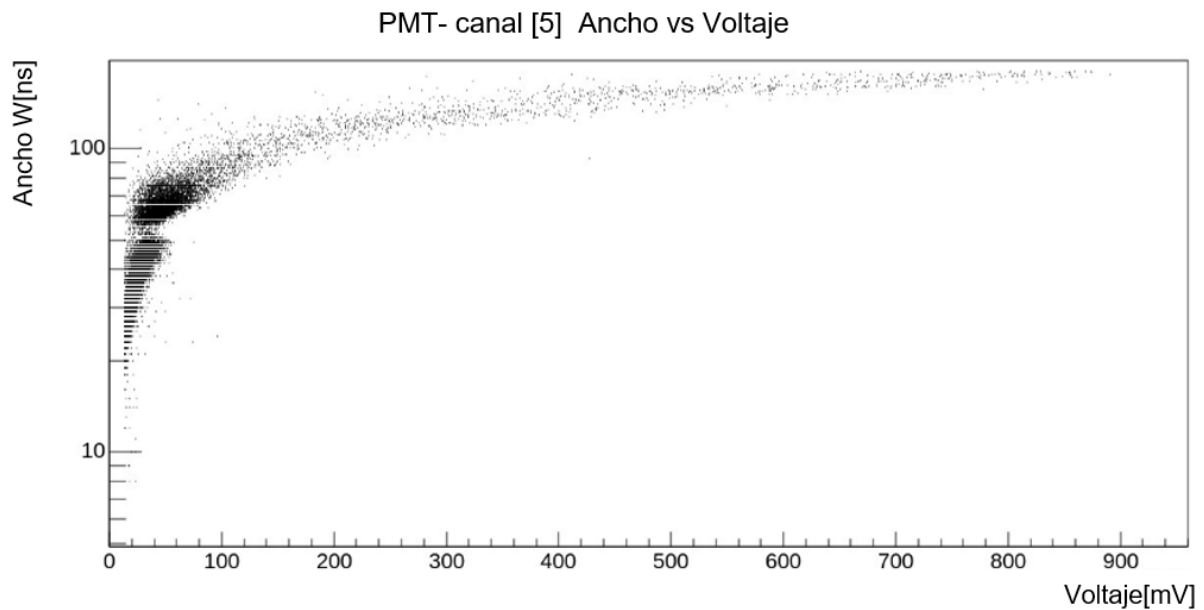
Espectro de la señal para el PMT-A segunda capa



En este grafico existe una pequeña discontinuidad que puede ser por la forma de las señales, pero no se tiene algo concreto.

Figura 55

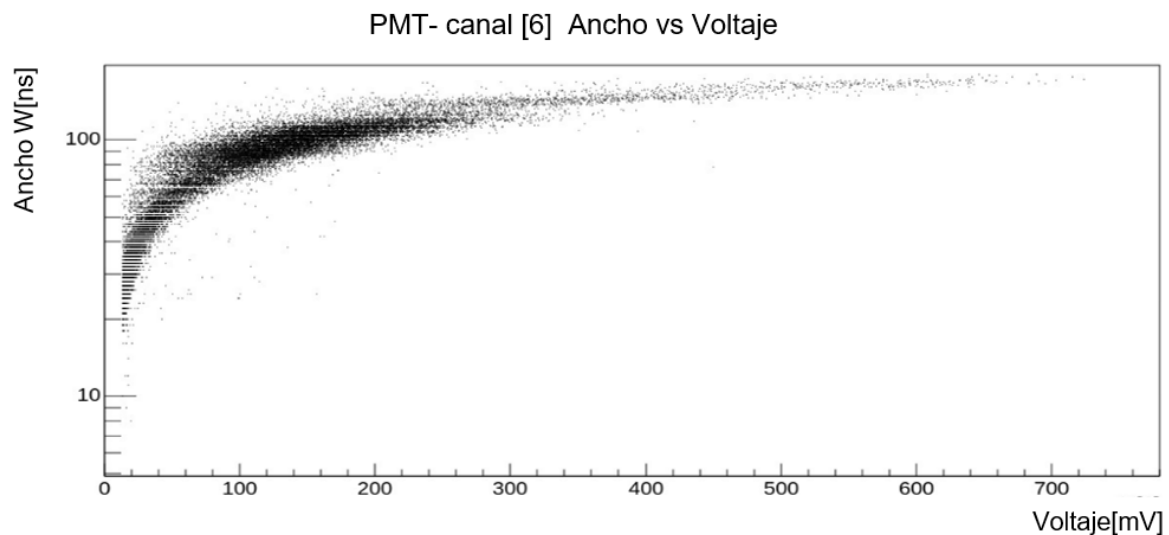
Espectro de la señal para el PMT-B segunda capa



Este PMT detecto más señales pequeñas desde 20mV hasta 80mV debido a que está más alejada, es decir tiene muy poca luz porque el paso del muon está al otro lado del tanque.

Figura 56

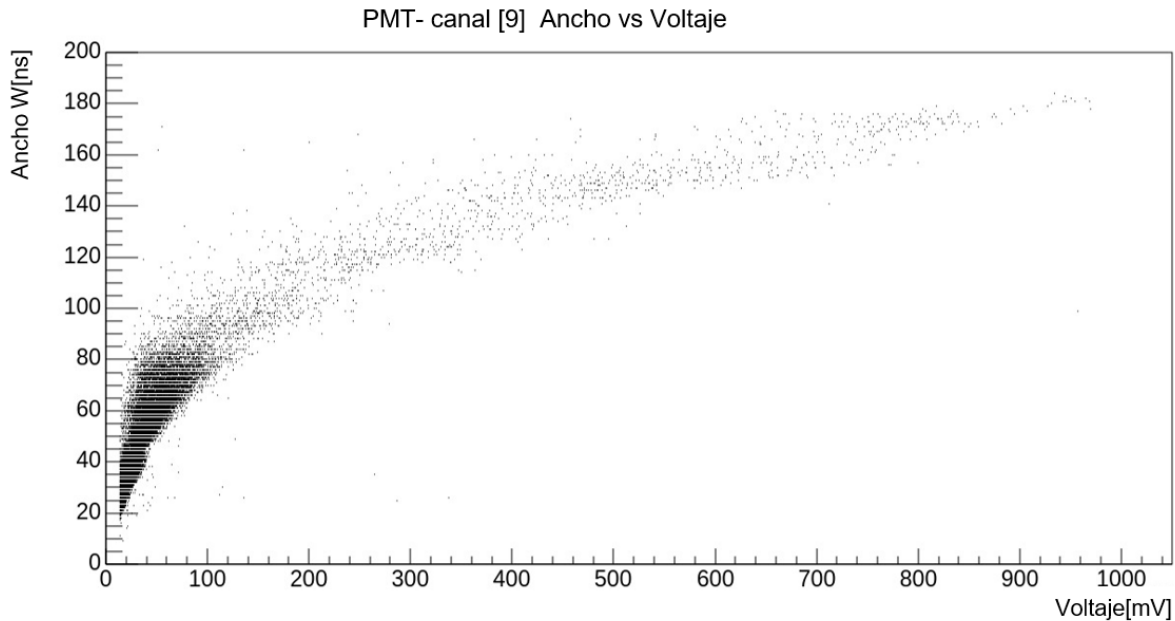
Espectro de la señal para el PMT-C segunda capa



Es el PMT central al igual que el canal 2 detectan mayor cantidad de señales grandes. Sin embargo, este detecta más por su mayor área sensible a comparación de los demás PMTs. Esto conlleva a afirmar que muones pasan verticalmente.

Figura 57

Espectro de la señal para el PMT-D segunda capa



Este PMT detecta mayor cantidad de señales pequeñas debido a que está lejos. Todo este análisis será proyectado con los voltajes para encontrar esos picos de señales.

4.2.6. Correlación arreglo de dos capas y centelladores

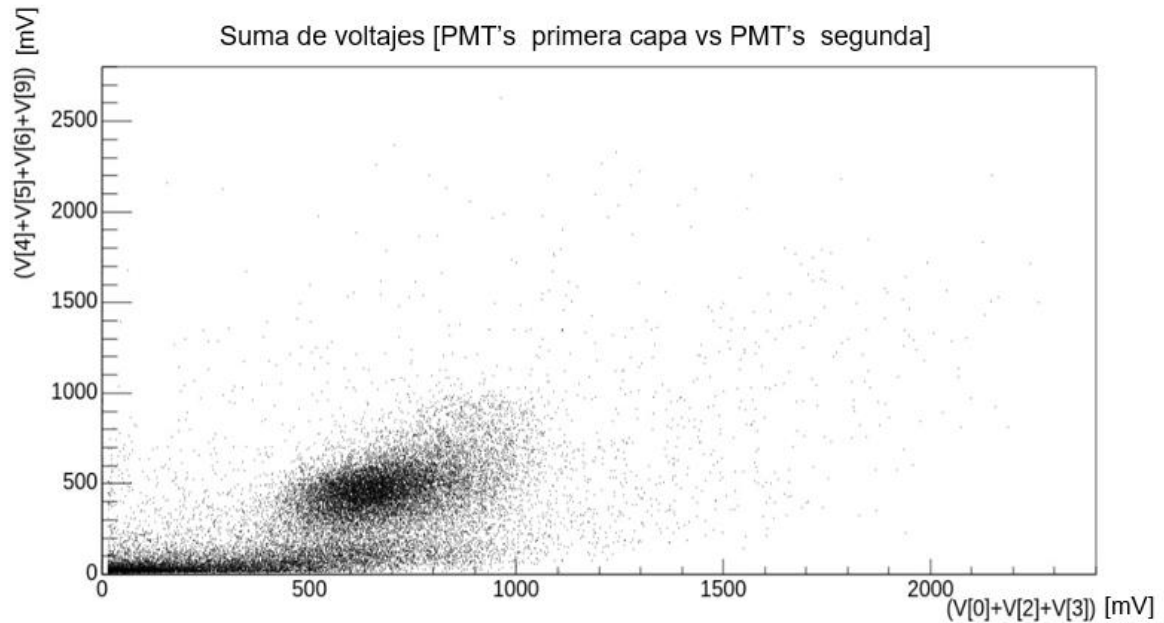
Suma de Voltajes de los PMTs y Paletas centelladoras

A continuación, para realizar las correlaciones bidimensionales y analizar cómo los diferentes PMT detectaron los voltajes generados por los muones, se procedió a sumar los dos arreglos de capa disponibles y compararlos entre sí, el análisis estuvo sujeto a la limitación de las dos paletas centelladoras canales 10 y 11 (cortes de voltajes y diferencia de tiempos) y el corte de los anchos de las señales detectadas por los PMTs, aplicando los cortes en donde se visualiza la curva de los muones,

Como el anterior análisis el espectro de las sumas presento franjas de saturación por ende se aplicó nuevos cortes, quedando solamente la isla de muones como muestra en la siguiente figura.

Figura 58

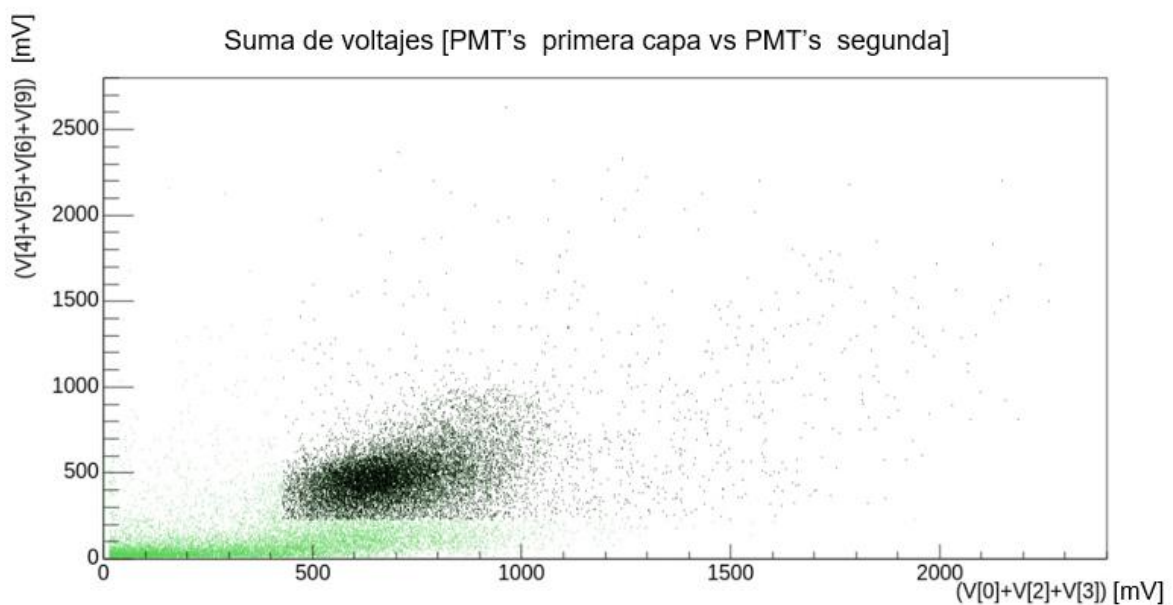
Suma de voltajes sin saturación donde se muestra la isla de muones



Es así como se obtiene la “isla de muones”, para una mejor visualización de los datos, se realizará dos cortes, para eliminar la franja que aparece en la parte inferior izquierda, por lo que se aplicó en la suma de la primera capa un corte en 230, y en la suma de la segunda capa (inferior) un corte de 427:

Figura 59

Isla de Muones



La grafica muestra una parte negra correspondiente a la isla de muones únicamente y eventos de coloración verde son otras partículas.

4.2.7. Análisis para los fotomultiplicadores del tanque O8 con la macro Procesa14ChFADC.c

Voltaje para los PMTs

Para este análisis se ejecutó la línea de código de todos los análisis previos: de los centelladores en voltaje (V11, V10), resta de tiempos (T11-T10), ancho de las señales con los respectivos cortes aplicados para cada PMT y por último el corte para una mejor visualización de la isla de muones.

Espectro de cada PMT con selección de muones

Las cascadas de partículas decaen exponencialmente y los muones se mantienen recorriendo considerables distancias debido a procesos físicos que experimentan a lo largo de su trayectoria hasta ser detectados, esto explica por qué en las gráficas siguientes se observa un pico sujeto a una cola ya que estos representan muones y cascadas de partículas. Por ende, se presenta gráficos comparativos en donde las señales de rojo son solamente muones obtenidos a partir de la identificación con las paletas centelladoras y la de azul comprende muones y cascadas de partículas que activaron a los PMTs a los cual no se realizó cortes, entonces la señal azul es tal cual los eventos registrados. Estos gráficos se relacionan con la suma de los voltajes de la primera contra la segunda capa, donde la señal azul corresponde a la suma de la región negra más la región verde y la región oscura solo los muones.

Para los análisis de los posteriores histogramas correspondientes a los fotomultiplicadores, se empleará la siguiente leyenda para diferenciar los datos registrados en su forma original por los PMTs y aquellos a los que se les han aplicado cortes:



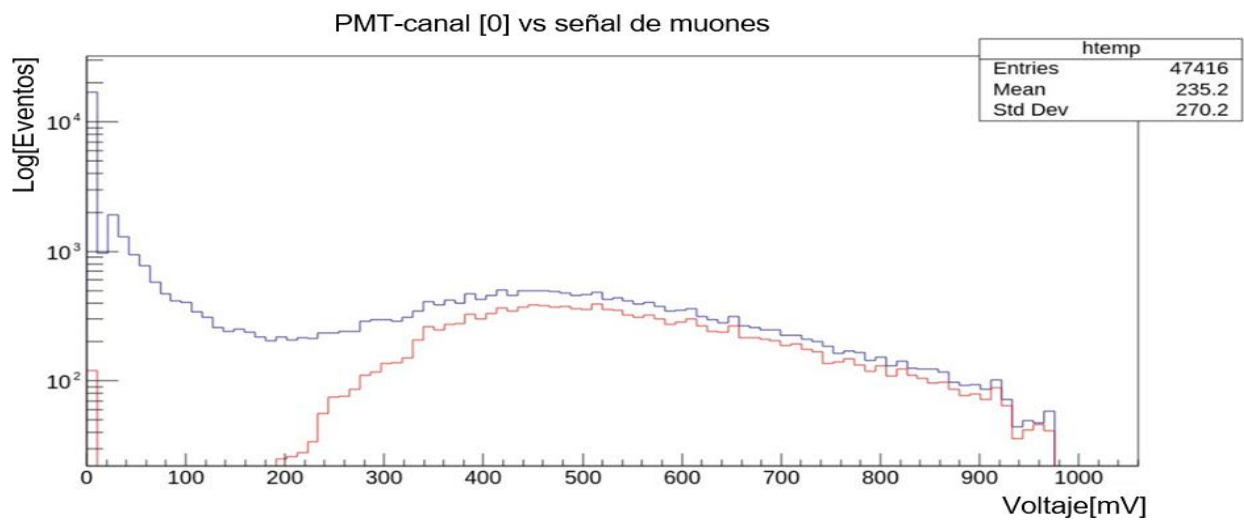
- **Datos en bruto** (Información sin procesar, tal como es recibida por los PMT):

- **Datos con cortes aplicados** (Información depurada tras la aplicación de los cortes):


Figura 60

Histograma de voltajes de los PMTs vs señal de muones, capa de arriba – canal V[0]

**Figura 61**

Histograma de voltajes de los PMTs vs señal de muones, capa de arriba – canal V[2]

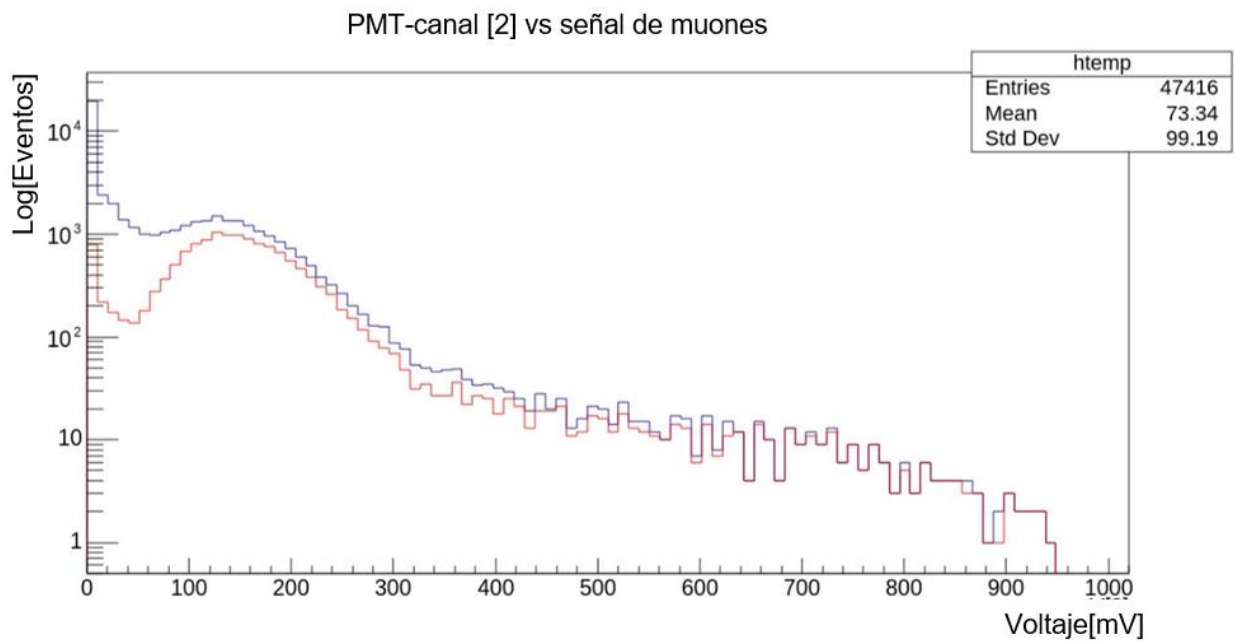
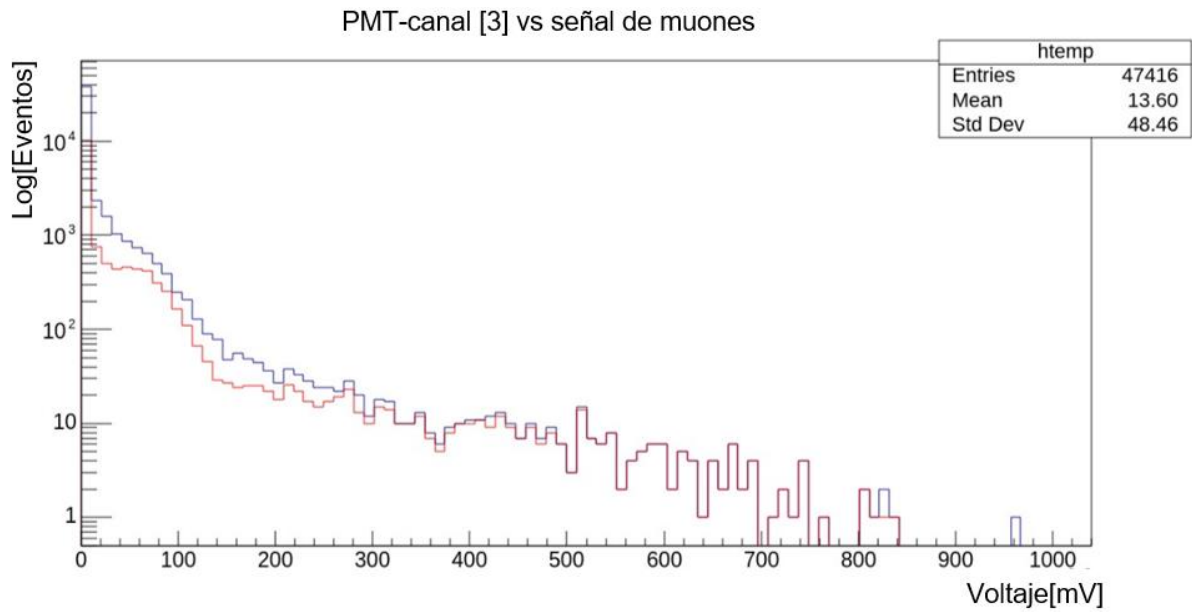


Figura 62

Histograma de voltajes de los PMTs vs señal de muones, capa de arriba – canal V[3]

**Figura 63**

Histograma de voltajes de los PMTs con señal de muones, capa de abajo - canal V[4]

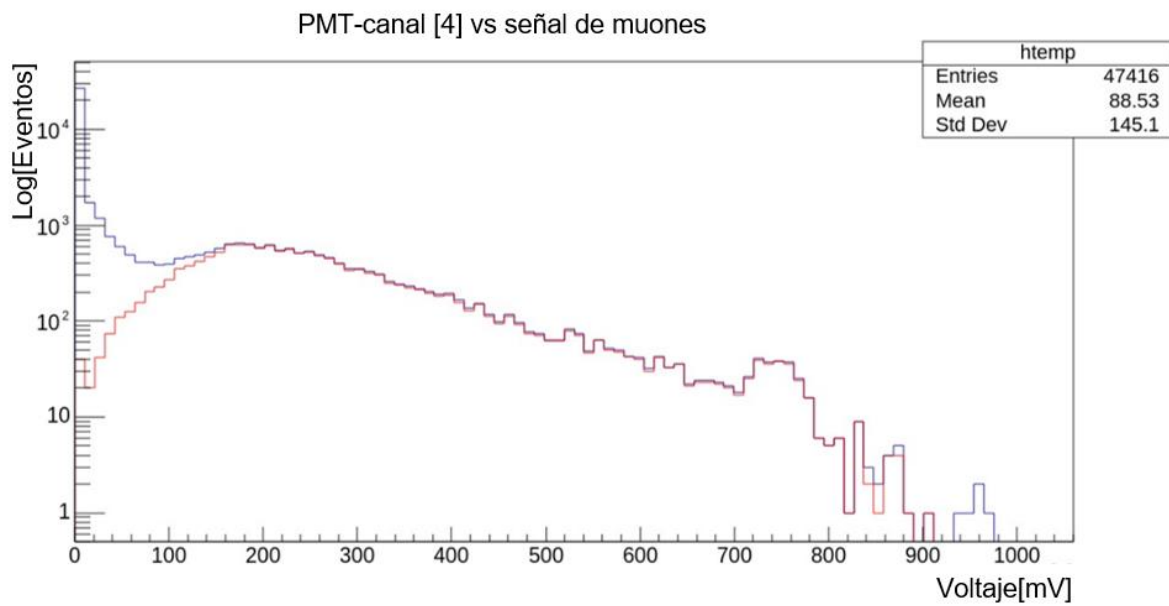
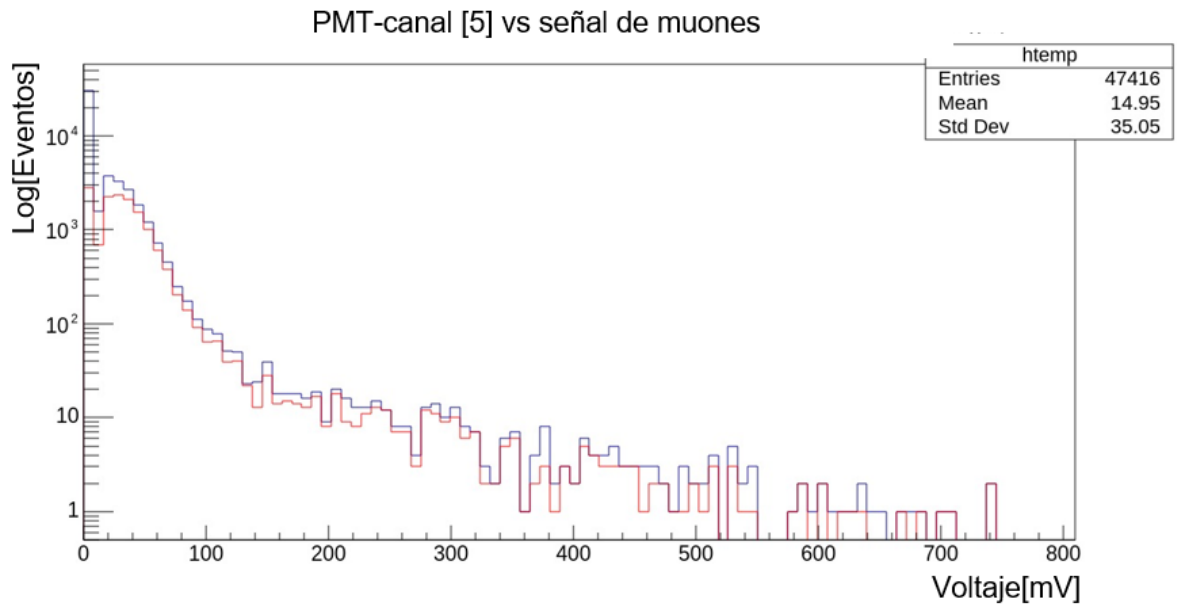


Figura 64

Histograma de voltajes de los PMTs con señal de muones, capa de abajo - canal V[5]

**Figura 65**

Histograma de voltajes de los PMTs con señal de muones, capa de abajo - canal V[6]

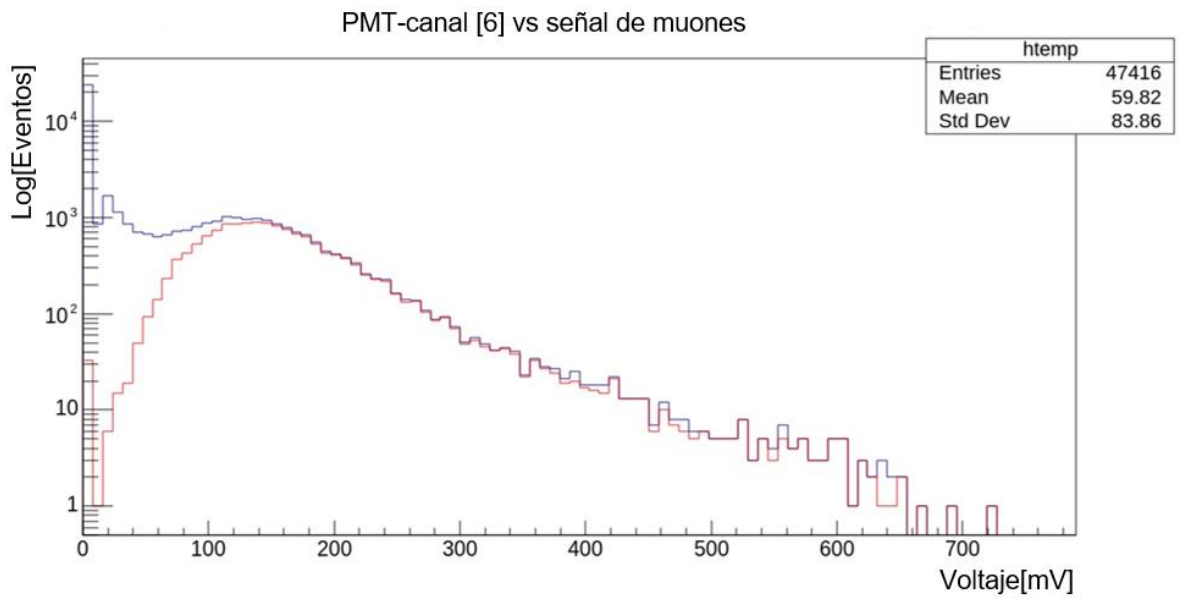
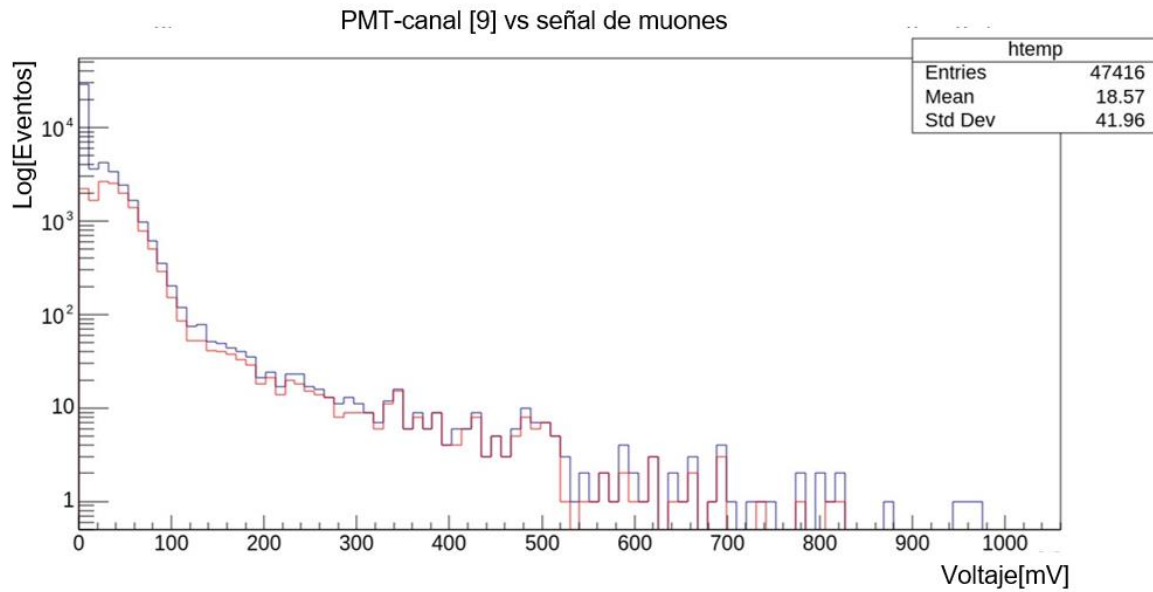


Figura 66

Histograma de voltajes de los PMTs con señal de muones, capa de abajo - canal V[9]



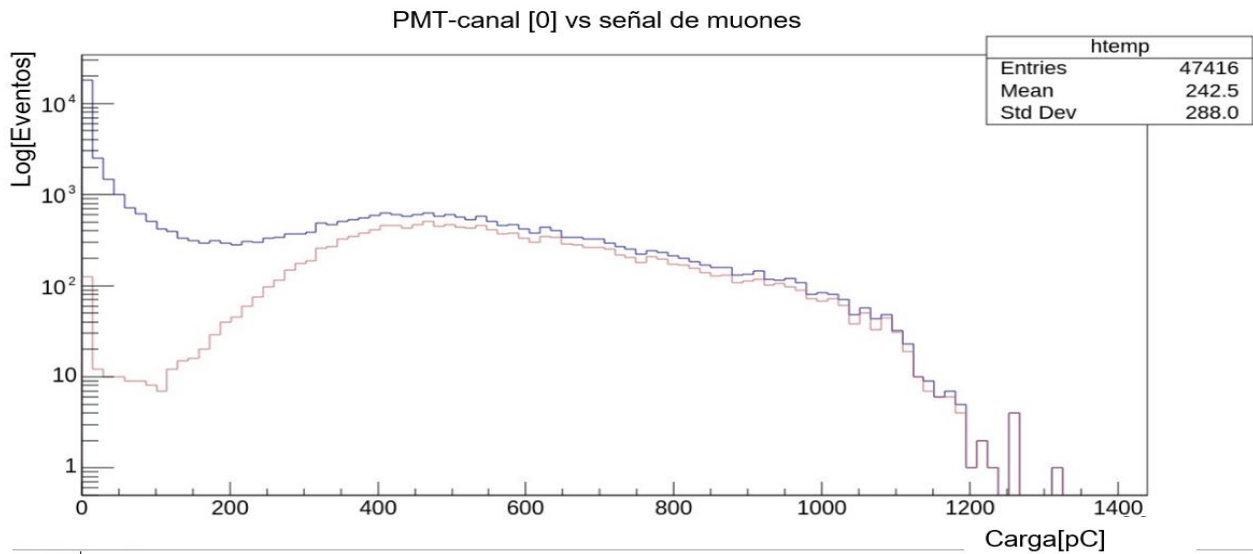
4.2.8. Análisis de Carga depositada con la macro Procesa14ChFADC.c

Este análisis es similar al de los voltajes en comparación con los muones solo que en este caso ya no se usa el pico de la señal, sino que ahora usamos la integral de la señal (área bajo la curva) para estimar el voltaje depositada por los muones incidentes con el agua.

Cabe recalcar que en todo el análisis se ha estado usando la línea de código generados desde las paletas centelladoras sumándole nuevos códigos que se han hecho en cada sección de análisis (ver anexo 4).

Figura 67

Comparación de carga de los PMTs y carga depositada por muones en los PMTs dentro del tanque, capa de arriba – canal Q[0]

**Figura 68**

Comparación de carga de los PMTs y carga depositada por muones en los PMTs dentro del tanque, capa de arriba – canal Q[2]

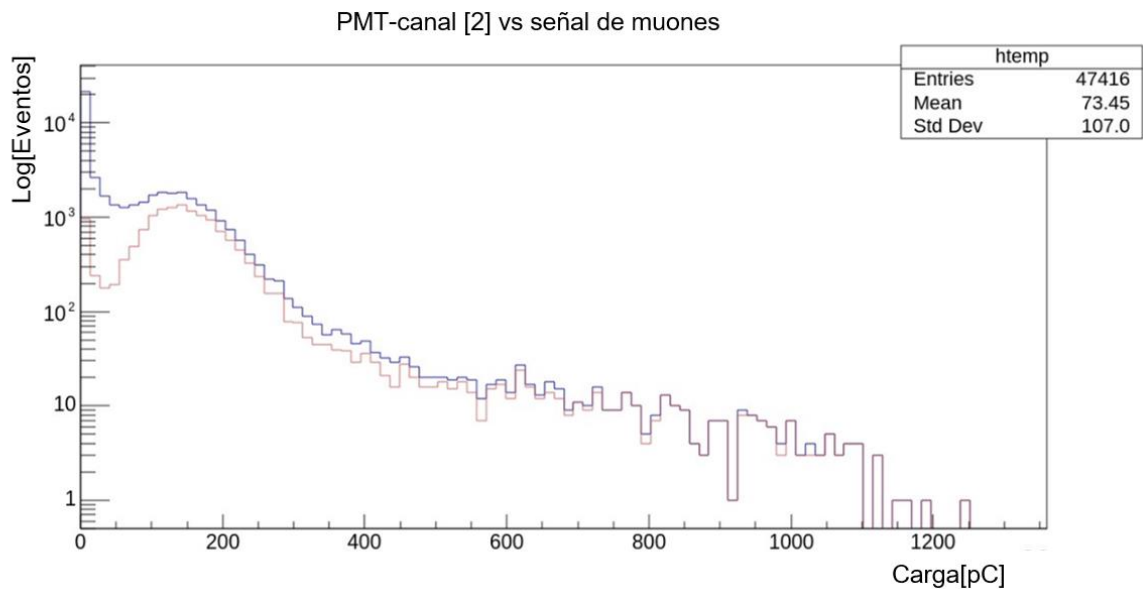
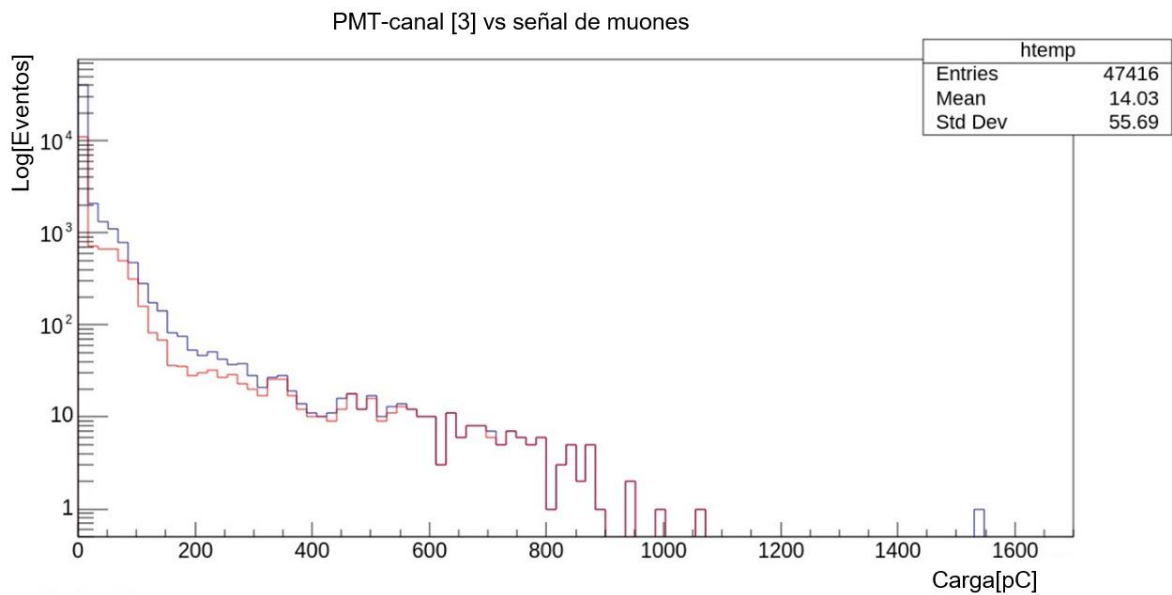


Figura 69

Comparación de carga de los PMTs y carga depositada por muones en los PMTs dentro del tanque, capa de arriba – canal Q[3]

**Figura 70**

Comparación de carga de los PMTs y carga depositada por muones en los PMTs dentro del tanque, capa de abajo – canal Q[4]

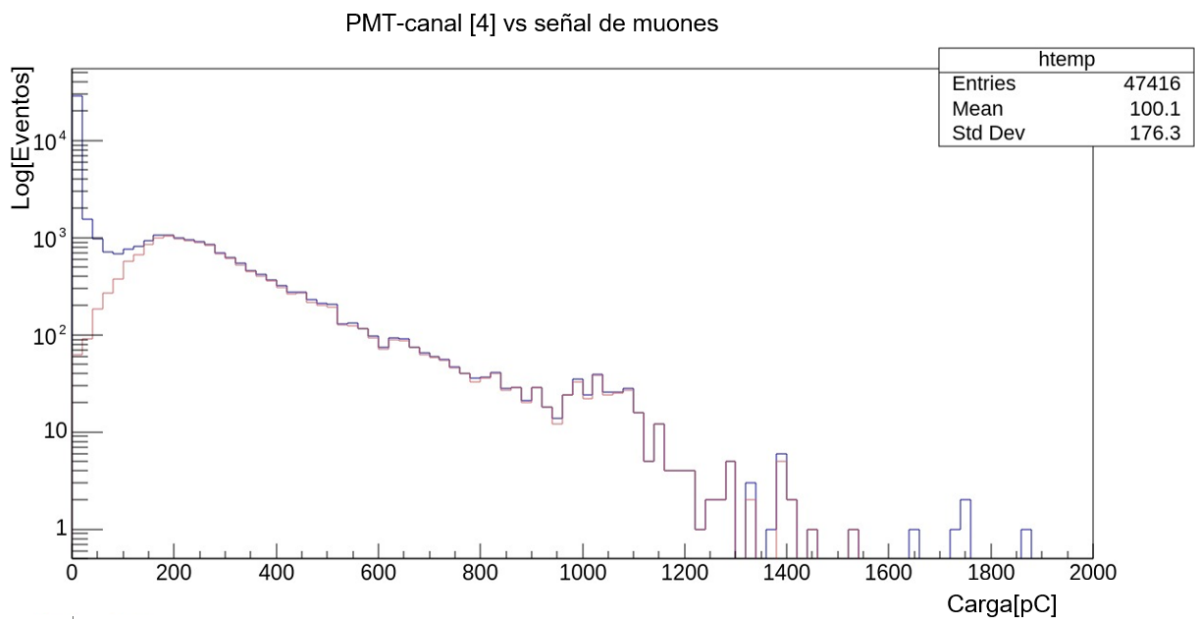
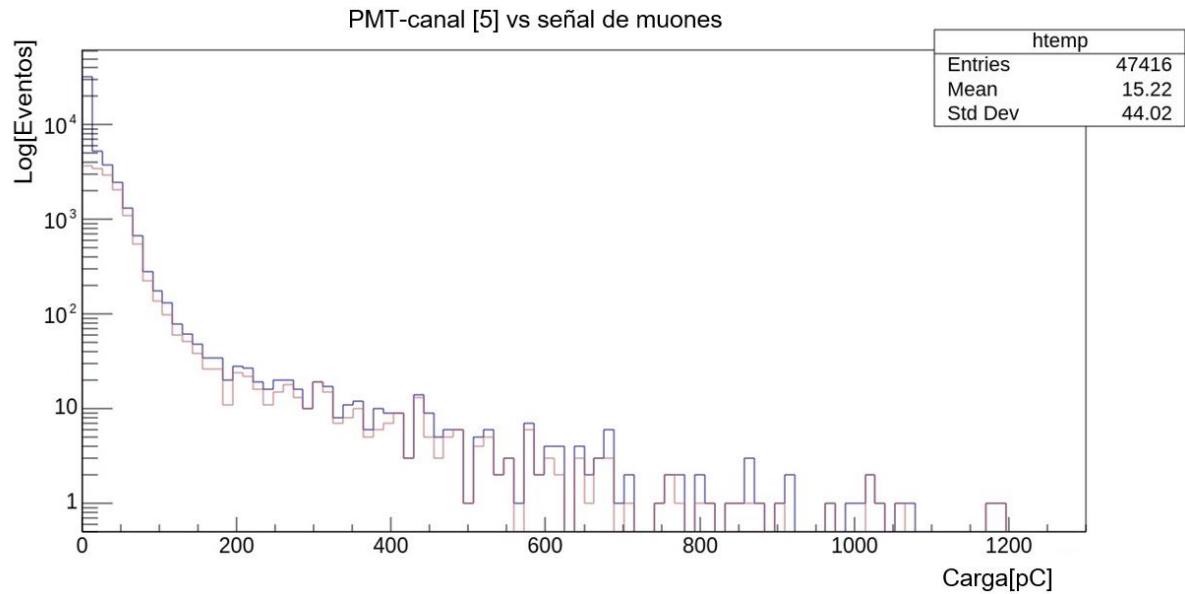


Figura 71

Comparación de carga de los PMTs y carga depositada por muones en los PMTs dentro del tanque, capa de abajo – canal Q[5]

**Figura 72**

Comparación de carga de los PMTs y carga depositada por muones en los PMTs dentro del tanque, capa de abajo – canal Q[6]

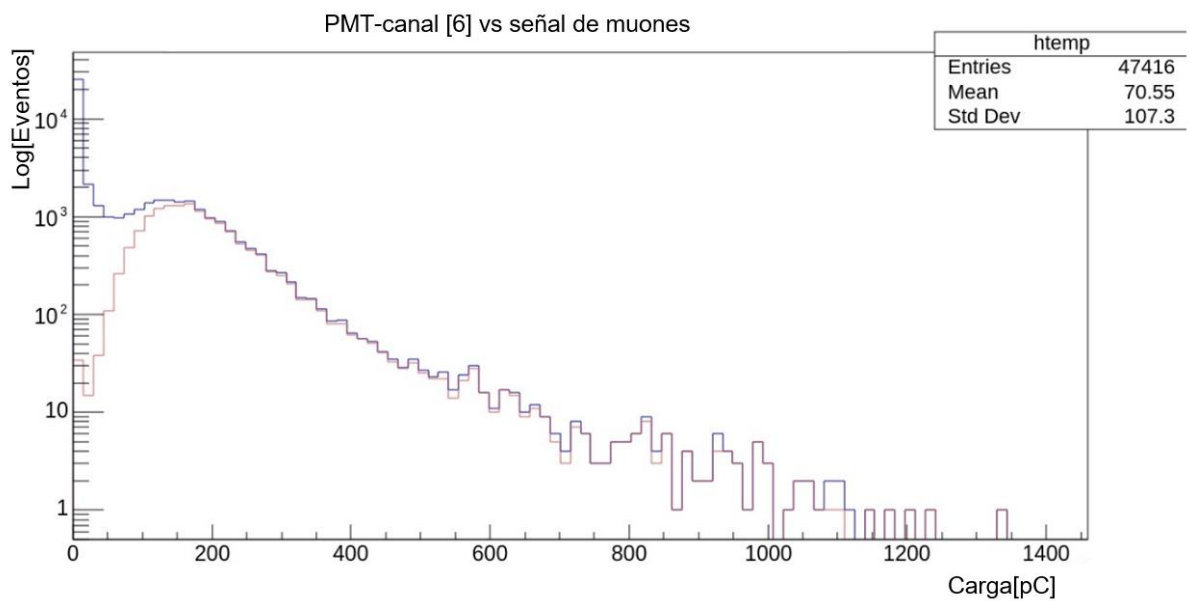
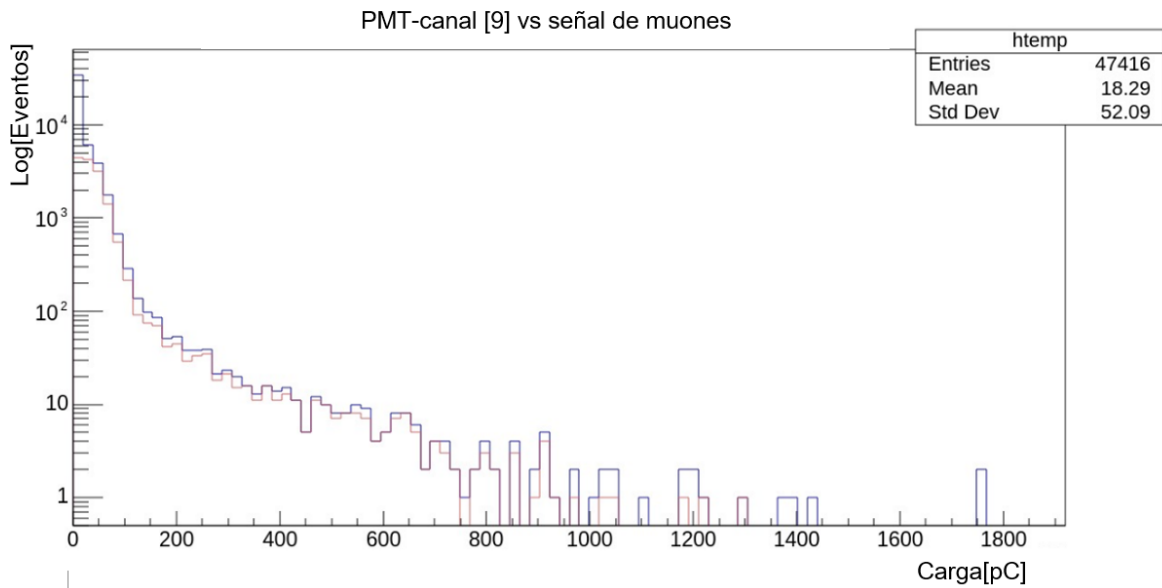


Figura 73

Comparación de carga de los PMTs y carga depositada por muones en los PMTs dentro del tanque, capa de abajo– canal Q [9]



4.2.3.4. Multiplicidad de los tanques

En el pre-análisis se tomó el evento 144, donde se trabajó con canales ahora con la conversión a mV, en la gráfica se muestra la saturación de todos los PMTs de los tanques tanto de O como de P, lo que indicaría que fue producto de una cascada de partículas.

Figura 74

Señales de multiplicidad de los tanques O

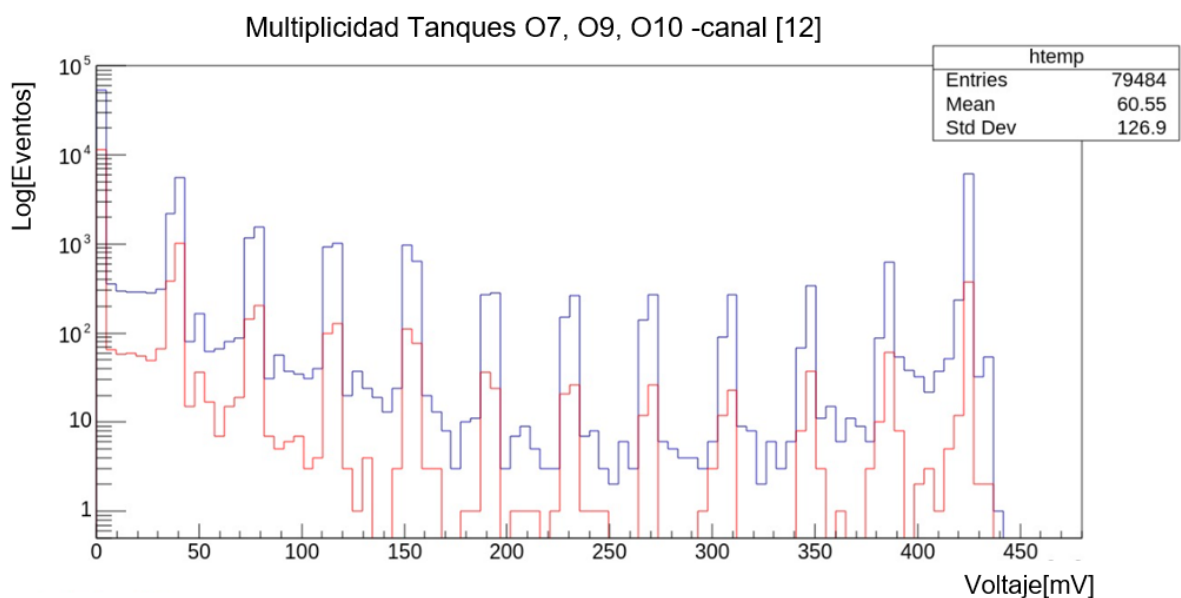
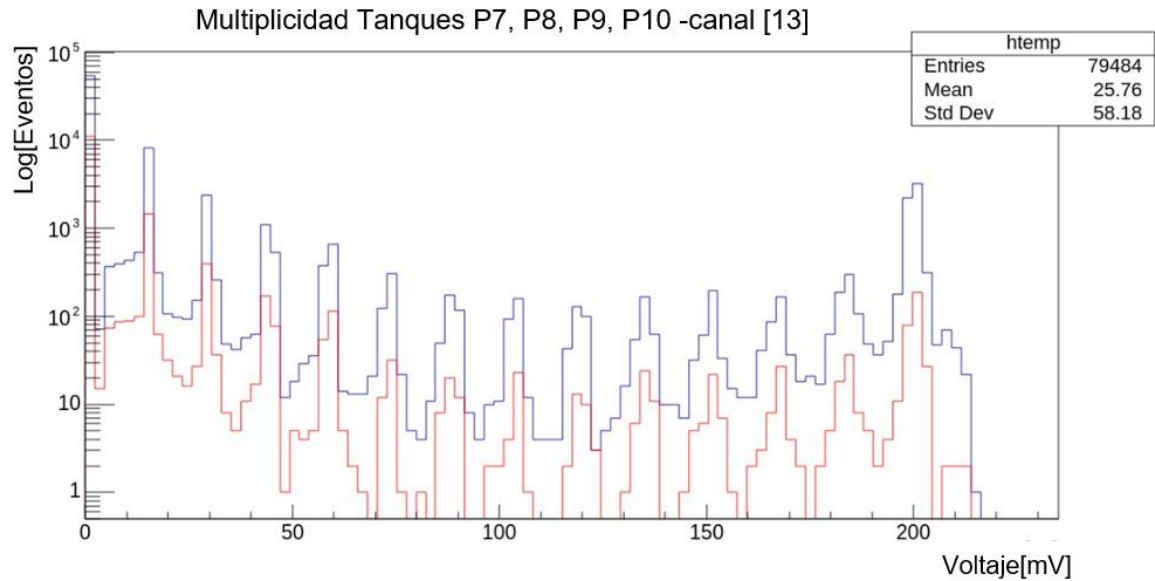


Figura 75

Señal de Multiplicidad de los tanques P

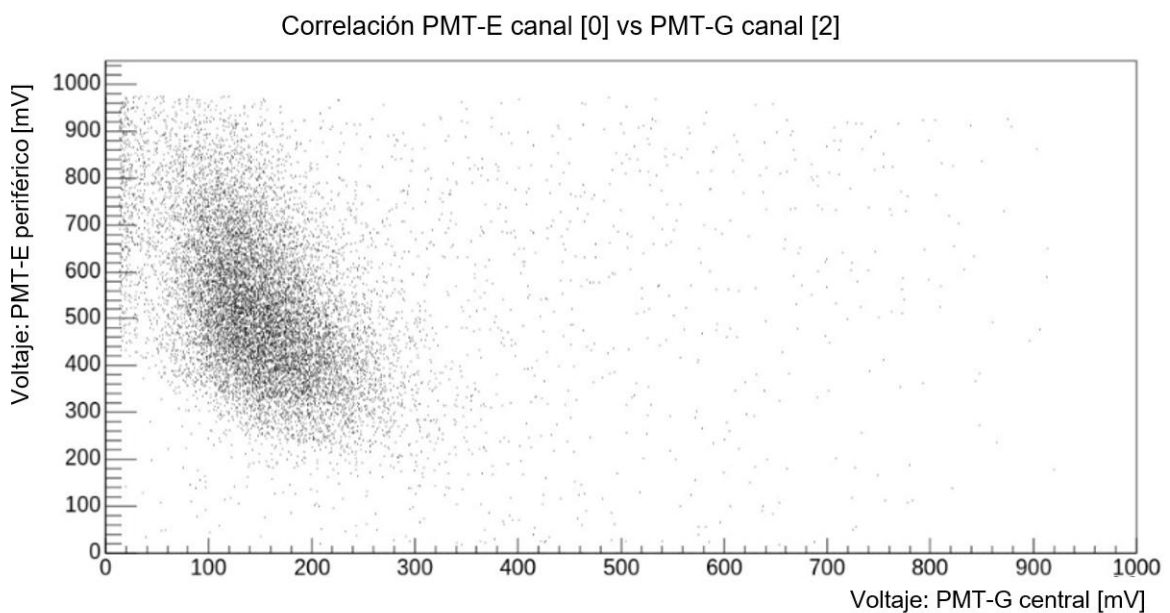


4.2.9. Correlación de Voltajes de PMT centrales y Periféricos

Para establecer la relación de amplitud entre los PMTs centrales con los periféricos ante el paso del muon realizamos graficas bidimensionales entre cada PMT de misma capa. A partir de la amplitud de la señal podemos decir que por donde paso el muon.

Figura 76

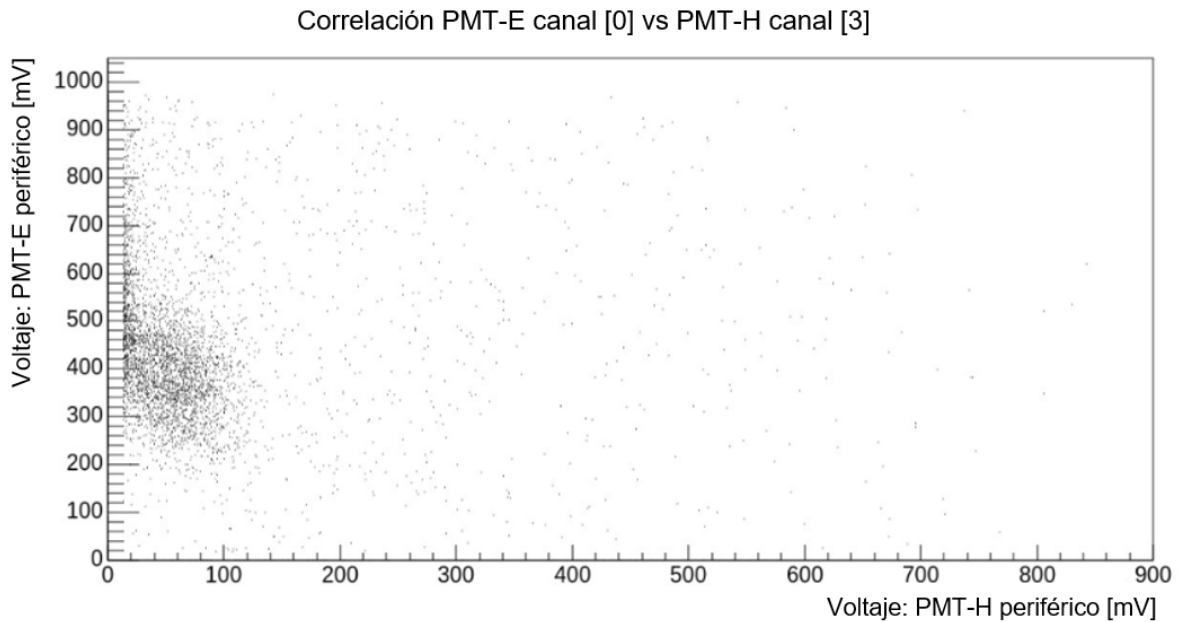
Espectro de correlación entre los PMTs periférico bajo las paletas: V[0] y central V[2]



En esta grafica se observa que la señal se acerca más al PMT periférico lo que indica una señal pequeña por ende implica que el muon está alejado de la periferia.

Figura 77

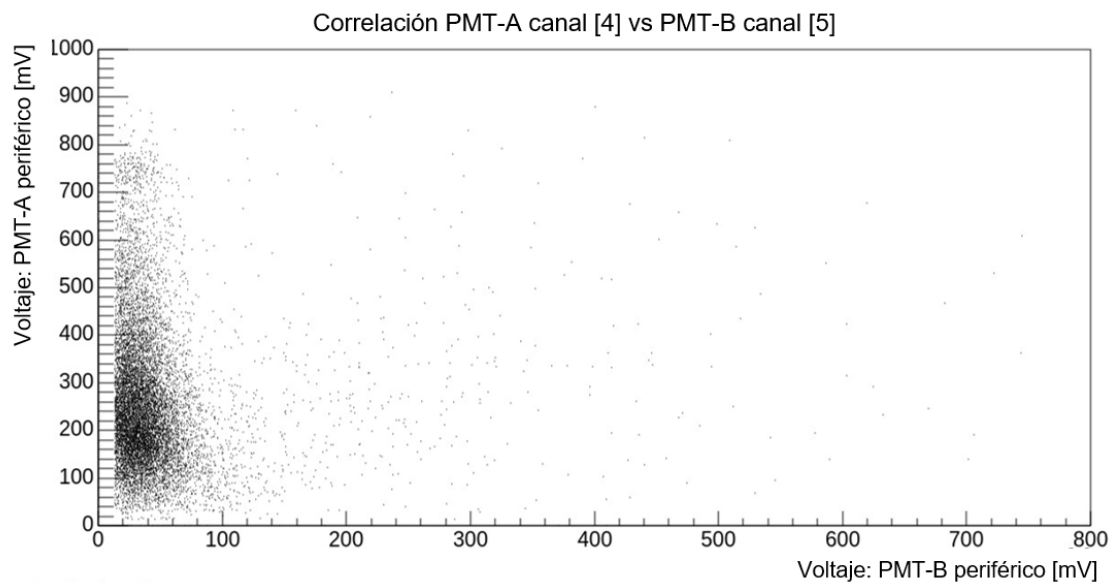
Espectro de correlación entre los PMTs periférico bajo las paletas: V[0] y periférico V[3]



También se aprecia que la señal de los muones es baja debido a que se aproxima al PMT E periférico.

Figura 78

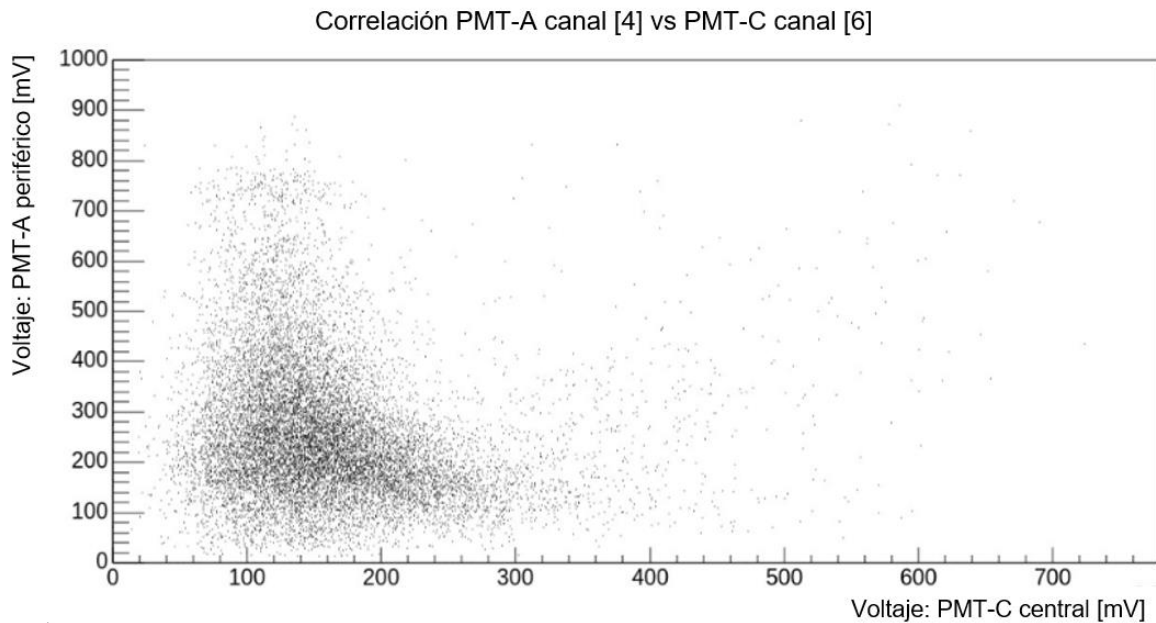
Espectro de correlación entre los PMTs periférico bajo las paletas: V[4] y PMT periférico lejos de la paleta V[5]



En la figura se visualiza que la señal de los muones tiene una mayor tendencia a ser detectada por el PMT periférico 4 que por el PMT periférico 5.

Figura 79

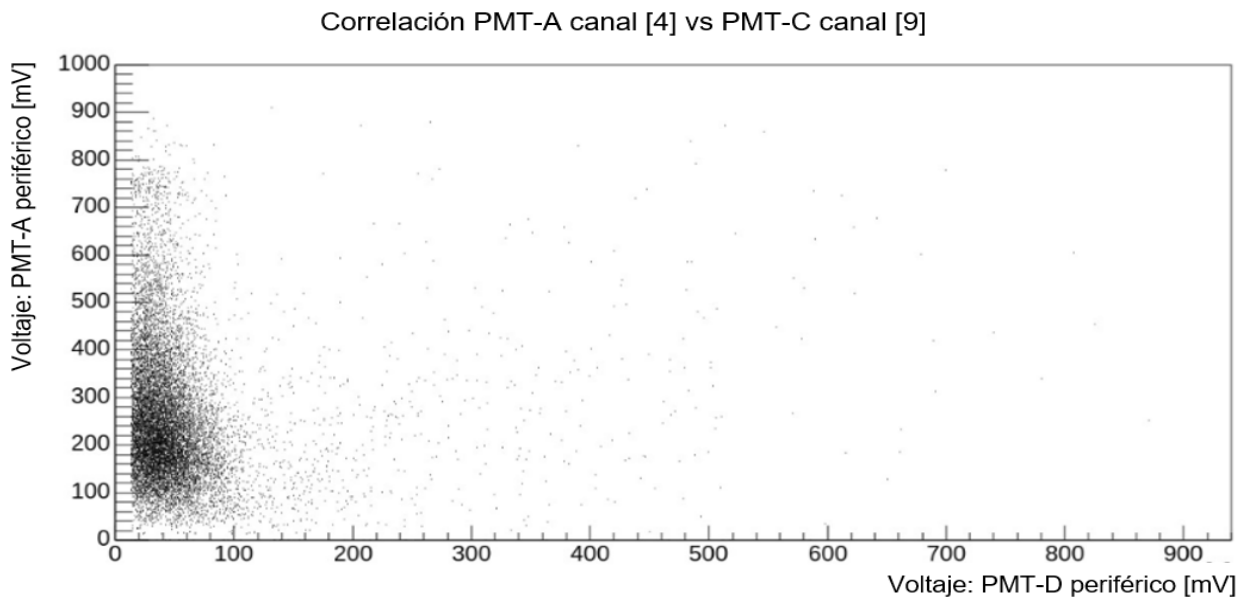
Espectro de correlación entre los PMTs periférico bajo las paletas: V[4] y el PMT central V[6]



Esta correlación es equivalente a la relación del canal 0 contra el canal 2, entonces lo que pasa arriba (la primera capa) también se repite bajo (la segunda capa), razón por la que tienen formas similares. La señal de los muones se aproxima al central lo que implica señales grandes y el paso del muon cerca al PMT-C.

Figura 80

Espectro de correlación entre los PMTs periférico bajo las paletas: V[4] y periférico lejano V[9]



Este espectro tiene el mismo comportamiento que en las relaciones del canal 4 con 5 y con el canal 0 y 3, presentando pequeñas señales, por ende, muon lejos de los PMTs periféricos evidencia la detección de muones verticales.

Entonces los muones pasan más cerca de los PMTs centrales canales (4, 6) y pasa lejos de los PMT periféricos canales 5 y 9.

4.3. Discusión

El Observatorio HAWC de rayos gamma utiliza 300 grandes detectores de luz Cherenkov en agua para detectar a 4,100 m de altitud las partículas de las cascadas atmosféricas producidas por rayos cósmicos y rayos gamma primarios al interactuar en lo alto de la atmósfera. Uno de los principales problemas de estos detectores es la separación de eventos hadrónicos, es decir producidos por rayos cósmicos cargados de los eventos producidos por rayos gamma, que son miles de veces menos frecuentes. Uno de los métodos más eficientes para llevar a cabo esta identificación es determinar el número de muones producidos en la cascada. Esto es debido a que interacciones hadrónicas contienen gran cantidad de muones del

decaimiento de los piones y kaones cargados producidos en la cascada mientras que las cascadas electromagnéticas producen muy pocos muones.

En este trabajo se modificó uno de los detectores de luz Cherenkov del Observatorio HAWC, el tanque O8, agregándole una capa más de cuatro fotomultiplicadores a una profundidad de 2 m complementando los 4 fotomultiplicadores de HAWC a una profundidad de 4 m y se estudió experimentalmente la respuesta de esta configuración al paso de muones que se seleccionaron con dos detectores de centelladores plásticos en coincidencia en la parte superior del tanque. Estudiando las correlaciones de la intensidad de luz Cherenkov detectada por cada fotomultiplicador en esta nueva configuración se pueden desarrollar métodos para una mejor identificación de la componente muónica.

Los resultados obtenidos en este estudio pueden analizarse en comparación con investigaciones previas.

En primer lugar, los hallazgos contrastan con el trabajo de Salazar (2020), quien enfocó su análisis en la reconstrucción del espectro de rayos cósmicos a través del algoritmo *Tunfold*, el enfoque que tuvo fue matemático, destinado a mejorar la precisión de las mediciones, complementa la metodología de este estudio, que se centró más en la optimización de las configuraciones físicas del detector. Aunque ambos trabajos abordan la mejora en la precisión experimental, este análisis resalta cómo las configuraciones específicas, como el arreglo de coincidencias y los cortes aplicados a las señales de muones, pueden ser un enfoque igualmente efectivo para lograr resultados confiables en la discriminación de partículas.

Por otro lado, Conceição et al. (2021) aplicaron técnicas avanzadas de aprendizaje automático para diferenciar muones de otras partículas, utilizando herramientas como CORSIKA y Geant4 para simular cascadas de partículas y la respuesta del detector, si bien el presente estudio no empleó enfoques de aprendizaje automático, los resultados experimentales obtenidos son consistentes con sus conclusiones. Ambos trabajos destacan la relevancia de las

señales temporales capturadas por fotomultiplicadores en la discriminación de partículas y la importancia de un diseño optimizado del detector, sin embargo, una diferencia clave radica en la metodología: mientras Conceição et al. utilizó simulaciones y redes neuronales convolucionales, este estudio se basó en datos experimentales reales, destacando la efectividad de configuraciones físicas y análisis manuales en un entorno operativo.

Los resultados también se relacionan con el trabajo de Luzquiños (2024), quien desarrolló una variable basada en la distribución temporal de partículas para separar rayos gamma y hadrones, aunque este estudio no introdujo una variable específica, el análisis de los histogramas temporales reveló patrones clave que permitieron diferenciar entre partículas, especialmente muones, ambos trabajos coinciden en resaltar la importancia de la temporalidad en la discriminación de partículas, aunque el presente análisis se basa en datos experimentales recolectados en el Observatorio HAWC, mientras que Luzquiños utilizó simulaciones en condiciones específicas de Arequipa, Perú, mostrando cómo los enfoques teóricos y experimentales pueden complementarse para validar los resultados en diferentes contextos.

En general, este estudio aporta una perspectiva única al campo, al centrarse en configuraciones experimentales prácticas, en lugar de depender exclusivamente de simulaciones o técnicas computacionales avanzadas, aunque métodos como los propuestos por Conceição y Luzquiños ofrecen un alto grado de precisión, los resultados aquí obtenidos demuestran que un diseño de detector optimizado, combinado con análisis manuales detallados, puede ser igualmente efectivo en la separación de partículas, en caso de la presente investigación de muones, y en la comprensión de los rayos cósmicos.

Se presentaron algunas limitaciones técnicas, como la saturación de ciertas señales y el desempeño irregular de algunos PMT, especialmente en el canal 2, además de la falla de uno de los PMTs (canal 1).

CONCLUSIONES

1. La configuración implementada en el tanque O8 del Observatorio HAWC con dos centelladores en un arreglo de coincidencias sirvió para seleccionar eventos en los que un muon atravesó casi verticalmente el tanque. Para ello se hicieron cortes en la amplitud de la señal en cada centellador y en el tiempo de coincidencia entre las dos señales. Se propone utilizar este método para analizar eventos de cascadas hadrónicas cenitales para buscar la identificación de muones en los 300 tanques de HAWC y evaluar si es posible la separación de eventos producidos por rayos cósmicos ligeros (protones y helios) de la componente más pesada (C, O, Fe entre otros).

2. Los macros "Scan14ChFADC.c" y "Procesa14ChFADC.c" extraen de la forma de la señal como función del tiempo digitalizada por el FADC: el tiempo de llegada de la señal, su voltaje máximo, el ancho de la señal y la carga integrada.

3. El uso de dos capas de detectores a diferentes profundidades, demostró ser efectiva para la identificación de muones. Correlacionando la suma de las señales en la primera capa con la suma de las señales en la segunda capa se encontró una clara separación entre eventos de muones y eventos de cascadas.

4. Seleccionando eventos producidos por muones se correlacionó la señal del PMT directamente abajo del muon identificado por los centelladores con las señales de los otros PMT's en la misma capa. Se encontró que estas correlaciones tienen estructuras bien marcadas dadas por las distancias del muon vertical a cada uno de los PMTs. Estas correlaciones se pueden usar para identificar muones en cascadas hadrónicas.

RECOMENDACIONES

1. Para mejorar la caracterización de las señales y diferenciar con mayor precisión entre muones y rayos gamma, se recomienda automatizar los procesos de corte en los histogramas de voltaje y tiempo de la macro en C++, para facilitar la eliminación del ruido de fondo y de señales saturadas de manera eficiente y uniforme, además se podría extender el análisis multicanal, evaluando patrones específicos en todos los PMT del sistema para corroborar la discriminación entre los diferentes tipos de partículas en una variedad de contextos energéticos.

2. En cuanto al arreglo de coincidencia, para garantizar una respuesta uniforme en el sistema y minimizar las variaciones en los datos recolectados, se deberá llevar a cabo calibraciones periódicas de las paletas centelladoras y los fotomultiplicadores (PMT) del tanque O8. Además, se recomienda incluir en la macro una línea de código que contemple la corrección de la longitud de los cables, de manera que la compensación por los nanosegundos perdidos debido a discrepancias en su extensión se realice de forma automática, evitando la necesidad de ajustes manuales en los tiempos, asimismo, es aconsejable optimizar los umbrales de voltaje y los tiempos de coincidencia con el objetivo de mejorar la detección de muones verticales, minimizando la interferencia de eventos esporádicos o irrelevantes.

3. La relación directa entre la configuración y las señales detectadas puede fortalecerse mediante un análisis más detallado del desempeño de los PMT. Identificar aquellos con mayor sensibilidad y capacidad de detección, comparando los PMTs aledaños. Se sugiere la implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real que permita detectar de manera temprana problemas en los detectores, como saturaciones o fallos, asegurando la calidad de los datos registrados.

4. Por último, para expandir el alcance científico del proyecto, es esencial aprovechar los datos obtenidos para realizar análisis sobre la composición de los rayos cósmicos primarios, explorando patrones de cascadas asociados a protones y núcleos pesados. Esto puede

complementarse con estudios sobre el origen astrofísico de los rayos cósmicos, integrando observaciones de anisotropía y simulaciones de trayectorias que ofrezcan pistas sobre fuentes extra galácticas.

Bibliografía

- Westerhof, S. (2013, March 21). HAWC: A next-generation all-sky gamma-ray telescope. *Advances in Space Research*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.03.016>
- Abe, A. (2016, August 16). Cosmic rays: bringing messages from the sky to the Earth's surface. *Brasileira de Ensino de Física*, vol. 39(nº 1, e1306). <https://doi.org/DOI:http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0168>
- Abeyssekara, A, Albert, A., Alfaro, R., Alvarez, C., & Álvarez, J. (2023). The High-Altitude Water Cherenkov (HAWC) observatory in México: The primary detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*(168253), 18.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168253>
- Abeyssekara, A., Albert, A., & Alfaro, R. (2023, Marzo 29). The High-Altitude Water Cherenkov (HAWC) observatory in México: The primary detector. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, 1-18.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168253>
- Abeyssekara, A., Alfaro, R., Álvarez, J., & Arceo, R. (2018). Data acquisition architecture and online processing system for the HAWC gamma-ray observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 888, 138-146.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.01.051>
- Albert, . A., Alfaro, R., Alvarez, C., & Andrés, A. (2024). Performance of the HAWC Observatory and TeV Gamma-Ray Measurements of the Crab Nebula with Improved Extensive Air Shower Reconstruction Algorithms. *The Astrophysical Journal*, 972(2). <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad5f2d>
- Alfaro, R., Alvarez, C., Álvarez, J., Ángeles, J., Arteaga-Velázquez, J., & Avila, D. (2022, Junio 22). Gamma/hadron separation with the HAWC observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166984>
- Cao, Z., & Aharonian , F. (2023, November 22). Method to measure muon content of extensive air showers with LHAASO KM2A-WCDA synergy. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, 1059(168958).
<https://doi.org/doi.org/10.1016/j.nima.2023.168958>

- Carrasco, S. (2019). *Metodología de la investigación científica. Pautas metodológicas para diseñar y elaborar el proyecto de investigación*. Editorial San Marcos. https://www.sancristoballibros.com/libro/metodologia-de-la-investigacion-cientifica_45761
- Casaus, J., & Gascón, D. (2023, 12 13). *La Sociedad Española de Astronomía (SEA)*. Retrieved 10 2024, 28, from <https://www.sea-astronomia.es/boletin/la-mision-espacial-herd>
- Comunicacion y Cultura Científica. (2019, 11 20). *Instituto de Astrofísica de Canarias*. Retrieved 11 13, 2024, from <https://www.iac.es/es/divulgacion/noticias/los-telescopios-magic-detectan-el-primer-estallido-de-rayos-gamma-en-muy-altas-energias>
- Conceição, R., González, B., Guillén, A., Pimienta, M., & Tome, B. (2021). Muon identification in a compact single-layered water Cherenkov detector and gamma/hadron discrimination using Machine Learning techniques. *The European Physical Journal C*, 81(542), 1-10. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-09312-4>
- Ferrer, A., & Ros, E. (2014). *Física de partículas y de astropartículas* (1ra ed.). Publicacions De La Universitat De València. <https://www.buscalibre.pe/libro-fisica-de-particulas-y-de-astroparticulas-2a-ed/9788437092898/p/39426614>
- Floyd, T. (2006). *Fundamentos de sistemas digitales* (Novena Edición ed.). Madrid, España: Pearson Educación-PRENTICE HALL. <https://electronicautm.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/06/fundamentos-de-sistemas-digitales-floyd-9ed.pdf>
- Flyckt, S., & Marmonier, C. (2002, September). Photomultiplier Tubes principles & applications. <https://web.archive.org/web/20060908113719/http://www.jhu.edu/iic/Photomultipliers.pdf>
- Gaisser, T. (1990). *Cosmic Rays and Particle Physics* (Vol. 1st). (C. U. Press, Ed.) EE.UU. https://books.google.com.pe/books?id=qJ7Z6oIMqeUC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Galindo, A. (2017). *Calibración e instalación de un detector Cherenkov de agua del sitio LAGO Sierra Negra [Tesis doctoral]*. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y

- Electrónica, Puebla, México.
<https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1009/349>
- García, P. (2017). *Rayos cósmicos*. Excelencia María de Metz. <https://indico.cern.ch/event/572737/contributions/2612066/attachments/1482662/2299945/PGA-Rayos-cosmicos.pdf>
- Greisen, K. (1960). Cosmic Rays Showers. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 10. <https://doi.org/10.1146/annurev.ns.10.12>
- Grieder, P. (2001). *Cosmic Rays at Earth* (1st Edition ed.). (P. Grieder, Ed.) Elsevier Science. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-50710-5.X5000-3>
- Grieder, P. (2010). *Extensive Air Showers: High Energy Phenomena and Astrophysical Aspects-A*. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-76941-5>
- Gruppen, C. (2020). *Astroparticle Physics* (2da edition ed.). Siegen, Alemania: Springer Berlin Heidelberg New York. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-27339-2>
- Hamamatsu Photonics K.K. (2017). *Photomultiplier Tubes* (Fourth Edition ed.). Japón: Library handbook. https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/PMT_handbook_v4E.pdf
- Hamamatsu Photonics K.K. (2019). *Large photocathode area photomultiplier tubes*. Hamamatsu Photonics K.K. <https://hep.hamamatsu.com/eu/en/products/R7081.html>
- Hernandez-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2023). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa mixta*. McGraw-Hill Interamericana S.A. https://www.sancristoballibros.com/libro/metodologia-de-la-investigacion_93340
- Kanbach, G. (2019, April 3). Gamma-ray astrophysics: roots, growth, and success. *Scienze Fisiche e Naturali* (2019) 30 . <https://doi.org/10.1007/s12210-019-00793-w>
- Knoll, G. (2000). *Radiation Detection and Measurement* (Third Edition ed.). Michigan : John Wiley & Sons Inc. <https://phyusdb.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/03/radiationdetectionandmeasurementbyknoll.pdf>

- Lacki, B. (2011). Cherenkov telescopes as optical telescopes for bright sources: today's specialized 30-m telescopes? *Monthly Notice of the Royal Astronomical Society*, 416(4), 3075-3082. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19255.x>
- Leo, W. (1994). *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments* (2da Edition ed.). Berlin, Alemania: Springer Verlag Berlin Heidelberg. [https://project-cms-rpc-endcap.web.cern.ch/rpc/Physics/Books/\[Dr._William_R._Leo_\(auth.\)\]_Techniques_for_Nuclear.pdf](https://project-cms-rpc-endcap.web.cern.ch/rpc/Physics/Books/[Dr._William_R._Leo_(auth.)]_Techniques_for_Nuclear.pdf)
- Longair, M. (1994). *High Energy Astrophysics* (2da ed.). UK: Cambridge University Press & Assessment. <https://doi.org/http://doi.org/10.1017/CB0978113917505>
- Luzquiños, D. (2024). *Gamma-Hadron separation using the temporal distribution of particle cascades at TeV energies in the SWGO experiment [Tesis pregrado]*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima. [https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/27943/LUZQUI%
c3%91OS_SAAVEDRA_DAVID_%20GAMMA_HADRON_SEPARATION.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/27943/LUZQUI%c3%91OS_SAAVEDRA_DAVID_%20GAMMA_HADRON_SEPARATION.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Mollerach, S., & Roulet, E. (2018, January). Progress in high-energy cosmic ray physics. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 98, Pages 85-118. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pnnp.2017.10.002>
- Monedero, M. P., Garayoa Roca, J., & Rodríguez Romero, R. (2016). Estructura de la materia y transformaciones nucleares. In L. N. Martín, *Elementos de radiofísica para técnicos superiores en radioterapia y dosimetría*. (1 ed., pp. 1-338). Barcelona, España: Elsevier. <https://tienda.elsevier.es/elementos-de-radiofisica-para-tecnicos-superiores-en-radioterapia-y-dosimetria-9788490228722.html>
- Núñez, J., & Molina, J. (2011). Medición de la distribución angular de muones en la superficie terrestre. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay*, 24(2), 238-248. https://doi.org/http://scielo.iics.una.py/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2617-47312019000200238
- Ñaupas, H., Valdivia, Marcelino, Palacios, J., & Romero, H. (2018). *Metodología de la investigación Cuantitativa - Cualitativa y Redacción de la Tesis*. Ediciones de la U. http://www.biblioteca.cij.gob.mx/Archivos/Materiales_de_consulta/Drogas_de_Abuso/Articulos/MetodologiaInvestigacionNaupas.pdf

- Picosecond Timing Project-University of Chicago. (n.d.). Electron Optics of Photomultipliers. In P. T. Project, *Photomultiplier Handbook*. Illinois, Estados Unidos. <https://psec.uchicago.edu/links.php>
- Popper, K. (1980). La logica de la investigación científica. In K. Popper, *La logica de la investigación científica* (pp. 1-23). Editorial Tecnos. <https://educacion.uncuyo.edu.ar/upload/popper-logica-inv-cientifica-cap1.pdf>
- Portocarrero, C. E. (2003). *La componente de radiación Cherenkov como elemento diferenciador entre cascadas atmosféricas iniciadas por rayos gamma y protones en el rango de energía de $10(10)$ - $10(16)$ eV [Tesis doctorado]*. Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España. <https://docta.ucm.es/rest/api/core/bitstreams/226d10d8-588b-4d54-ab2c-969bcf13083a/content>
- Pretz, J. (2015, September 25). Highlights from the High Altitude Water Cherenkov Observatory. *Proceedings of Science*, 16. <https://doi.org/https://doi.org/10.22323/1.236.0025>
- Reyes, A. Z. (2017). *Estudio de muones para separación Gamma/Hadron en el observatorio HAWC [Tesis maestría]*. Universidad Nacional Autónoma de México, México. <https://ru.dgb.unam.mx/handle/20.500.14330/TES01000761510>
- ROOT: analyzing petabytes of data, scientifically.* (2024). Retrieved 12 06, 2024, from <https://root.cern/about/>
- Ruiz Velasco, E. (2021). *Search and first detection of very-high-energy photons in gamma-ray bursts: an analysis with HAWC and H.E.S.S.* University of Heidelberg-Department of Physics and Astronomy, Germany. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/53/042/53042220.pdf
- Salazar, D. (2020). *Reconstrucción del espectro de rayos cósmicos con el observatorio HAWC [Tesis]*. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000805482/3/0805482.pdf>
- Salesa Greus, F. (2016, Abril). First Results from the HAWC Gamma-Ray Observatory. *Nuclear and Particle Physics Proceedings, Volumes 273-275*, 289-294. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2015.09.040>

- Salesa Greus, F., & Colaboración HAWC. (2013, June). First Results from the HAWC Gamma-Ray Observatory. *Nuclear and Particle Physics Proceedings*, 273–275, 289–294. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2015.09.040>
- Sandoval, A. (2015). HAWC Upgrade with a Sparse Outrigger Array. *Instrumentation and Methods for Astrophysics*, 1-6. <https://www.semanticscholar.org/paper/HAWC-Upgrade-with-a-Sparse-Outrigger-Array-Sandoval/5150480b9de5f3e57da504c5f0a41b6b911b04af>
- Shukla, P., & Sankrith, S. (2018, October 20). Energy and angular distributions of atmospheric muons at the Earth. *World Scientific Publishing Company*, 33(1850175), 12. <https://doi.org/10.1142/S0217751X18501750>
- Tanarro Sanz, A. (1970). *Instrumentación nuclear* (1ra ed.). España: Junta de Energía Nuclear (España) Servicio de Publicaciones. <https://www.abebooks.com/Instrumentaci%C3%B3n-Nuclear-Tanarro-Sanz-Agustin-Junta/31706196025/bd>
- Tavernier, S. (2010). *Experimental Techniques in Nuclear and Particle Physics*. Belgium: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-00829-0>
- Tim Huege. (n.d.). *CORSIKA*. (I. f. (IAP), Editor) Retrieved Noviembre 11, 2024, from <https://www.iap.kit.edu/corsika/>
- Vallejo, I. O. (2010). *Observations of Active Galactic Nuclei with the Magic Telescope [Tesis Doctoral]*. Universidad Complutense de Madrid. Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear, Madrid, España. <https://docta.ucm.es/entities/publication/64f0c7f3-60b0-4059-b2e2-7c52a8c7f38d>
- Wisher, I. (2016). *Real-time Transient Monitoring With the HAWC Detector: Design and Performance [Tesis doctoral]*. University of Wisconsin-Madison, EE.UU. <https://search.library.wisc.edu/digital/AEHISWQURM6L608C>

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia

NUEVA ESTRATEGIA EN LA CONFIGURACIÓN DE LOS DETECTORES CHERENKOV PARA UNA MEJOR SEPARACIÓN DE RAYOS CÓSMICOS CARGADOS Y RAYOS GAMMA A PARTIR DE LA DETECCIÓN DE MUONES EN LOS TANQUES DEL OBSERVATORIO HAWC-2024.

Definición del Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología	Población
<p>Problema general ¿Cómo optimizar la separación de rayos cósmicos cargados y rayos gamma de los tanques del Observatorio HAWC a partir de la detección de muones?</p> <p>Problemas específicos PE.1. ¿De qué manera se realiza la caracterización de las señales muónicas para diferenciar la componente electromagnética de la cascada hadrónica?</p> <p>PE.2. ¿Cómo se puede determinar si la nueva configuración en el</p>	<p>Objetivo general Establecer una nueva estrategia de configuración para la separación de rayos cósmicos cargados y rayos gamma en los tanques del Observatorio HAWC detectando muones.</p> <p>Objetivos específicos OE.1. Establecer una caracterización de las señales para diferenciar los muones de los rayos gamma. OE.2. Establecer un arreglo de coincidencias en el tanque O8 usando 2 paletas centelladoras</p>	<p>Hipótesis General La nueva estrategia de configuración permite una mejor separación de rayos cósmicos cargados y rayos gamma de tanques del observatorio HAWC a partir de la detección de muones.</p> <p>Hipótesis específicas HE.1. Existe una caracterización óptima de las señales para diferenciar los muones de los rayos gamma. H.E.2. La incorporación del arreglo de coincidentes a la nueva configuración del tanque O8 garantiza el</p>	<p>Variable independiente: Configuración de los detectores de Cherenkov</p> <p>Indicadores:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Amplitud de la señal detectada por cada PMT • Correlación de la suma de las señales de la primera capa contra la segunda capa • Multiplicidad <p>Variable dependiente: Separación de rayos cósmicos cargados y rayos gamma a partir de la detección de muones.</p>	<p>Tipo de investigación: Aplicado</p> <p>Enfoque de investigación Cuantitativo</p> <p>Nivel de investigación Exploratoria - Explicativo</p> <p>Método de investigación: Hipotético</p> <p>Diseño de investigación: Experimental</p>	<p>Población: Tanques del observatorio HAWC</p> <p>Muestra: Tanque O8</p> <p>Técnicas de recolección: Electrónica de adquisición de datos</p> <p>Técnicas de procesamiento de datos: - C++ - ROOT</p>

<p>tanque O8 junto con la electrónica asociada es adecuada para la separación de muones y rayos gamma?</p> <p>PE.3. ¿De qué manera se relacionan las señales del tanque O8 con los centelladores?</p>	<p>para la detección de muones y doble capa de detectores</p> <p>OE.3. Determinar la relación de las señales con la configuración del tanque O8 y los centelladores.</p>	<p>funcionamiento adecuado para la separación muones y rayos gamma.</p> <p>HE.3. Existe relación directa entre las señales con la configuración del tanque O8 y los centelladores</p>	<p>Indicadores:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Resolución temporal • Criterios de diferenciación de rayos cósmicos cargados y rayos gamma 		
---	--	---	--	--	--

Anexo 2: Matriz de operacionalización de variables

a) Matriz de operacionalización de la variable: Configuración de los detectores de Cherenkov

Variable	Definición conceptual	Indicadores	Unidades de medición	Instrumentos
Configuración de los detectores de Cherenkov	Se busca una nueva configuración de los detectores que permita una identificación de eventos en los que un muon atraviese el tanque usando dos capas de PMTs.	Amplitud de la señal detectada por cada PMT	mV	PMTs y la digitalización de sus señales por el sistema de adquisición de datos
		Correlación de la suma de las señales de la primera capa contra las de la segunda	mV	PMTs y la digitalización de sus señales por el sistema de adquisición de datos
		Multiplicidad	adimensional	Tanques O7, O9, O10, P7, P8, P9, P10

b) Matriz de operacionalización de la variable: Separación de rayos cósmicos cargados y rayos gamma a partir de la detección de muones

Variable	Definición conceptual	Indicadores	Unidades de medición	Instrumentos
Separación de rayos cósmicos cargados y rayos gamma a partir de la detección de muones	Para poder discriminar los rayos gamma y rayos cósmicos se debe caracterizar la señal de los muones en energía, carga y tiempo.	Resolución temporal	Nanosegundos (ns)	PMTs
		Criterios de diferenciación de rayos cósmicos cargados y rayos gamma	Energía (TeV), carga y voltaje	software de análisis de datos

Anexo 3. Evidencias fotográficas-Instalación de Nueva Configuración en HAWC



```

oem@Ana-Cristina: ~/Desktop/datos_sep_24/Septiembre-2024
Archivo Editar Ver Buscar Terminal Ayuda
root [17] tFADC->Draw("(Voltajes[10])>>(1024,-10,1000(long long) 79484
root [18] tFADC->Draw("Voltajes[10]", "Voltajes[10]>65.89&&Voltajes[10]<378", "")
(long long) 66664
root [19] tFADC->Draw("Ntimes[10]", "Voltajes[10]>65.8Error in <TTreeFormula::Compile>: Bad numerical expression : "Ntimes[10]"
Info in <TSelectorDraw::AbortProcess>: Variable compilation failed: {Ntimes[10],Voltajes[10]>65.89&&Voltajes[10]<378}
(long long) -1
root [20] tFADC->Draw("Ntimes[10]", "Voltajes[10]>65.89&&Voltajes[10]<378", "")
Error in <TTreeFormula::Compile>: Bad numerical expression : "Ntimes[10]"
Info in <TSelectorDraw::AbortProcess>: Variable compilation failed: {Ntimes[10],Voltajes[10]>65.89&&Voltajes[10]<378}
(long long) -1
root [21] tFADC->Draw("Ntimes[10]", "Voltajes[10]>65&&Error in <TTreeFormula::Compile>: Bad numerical expression : "Ntimes[10]"
Info in <TSelectorDraw::AbortProcess>: Variable compilation failed: {Ntimes[10],Voltajes[10]>65&&Voltajes[10]<378}
(long long) -1
root [22] tFADC->Draw("Ntime[10]", "Voltajes[10]>65.89Info in <TCanvas::MakeDefCanvas>: created default TCanvas with name c1
(long long) 66664
root [23] Info in <TCanvas::SaveSource>: C++ Macro file: /home/oem/Desktop/datos_sep_24/Septiembre-2024/unnamed.C has been generated
tFADC->Draw("Ntime[10]", "", "")
Error in <TTreeFormula::Compile>: Bad numerical expression : "Nt"
Info in <TSelectorDraw::AbortProcess>: Variable compilation failed: {Nt,}
(long long) -1
root [24] tFADC->Draw("Ntime[10])>>(1024,-10,1000)",Info in <TCanvas::MakeDefCanvas>: created default TCanvas with name c1
(long long) 79484
root [25] tFADC->Draw("Ntime[10])>>(1024,-10,1000)", "", "")
Info in <TCanvas::MakeDefCanvas>: created default TCanvas with name c1
(long long) 79484
root [26] tFADC->Draw("Ntime[11])>>(1024,-10,1000)", "", "")
Info in <TCanvas::MakeDefCanvas>: created default TCanvas with name c1
(long long) 79484
root [27] tFADC->Draw("Ntime[10]:Voltajes[10]", "Voltajes[10]>60.30&&Voltajes[10]<244&&Voltajes[11]>65&&Voltajes[11]<378", "")
(long long) 54241
root [28] tFADC->Draw("Ntime[11]:Voltajes[11]", "Voltajes[10]>86&&Voltajes[10]<240&&Voltajes[11]>71&&Voltajes[11]<200", "")
(long long) 48474
root [29] tFADC->Draw("Ntime[10]:Voltajes[10]", "", "")(long long) 79484
root [30] tFADC->Draw("Ntime[11]:Voltajes[11]", "Volta(long long) 54241ltajes[10]<244&&Voltajes[11]>65&&Volroot [31] tFADC->Draw("Voltajes[0]:Voltajes[6]", "", "")(long long)
) 79484
root [32] tFADC->Draw("Voltajes[0]:Voltajes[6]", "Volt(long long) 54241oltajes[10]<244&&Voltajes[11]>65&&Vooroot [33] tFADC->Draw("(Voltajes[0])>>(1024,-10,1000)(long long)
) 79484
root [34] tFADC->Draw("log10((Voltajes[0]))>>(1024,-1(long long) 79484
root [35]

```

Anexo 4. Línea de código de cortes obtenidas por el análisis de datos

Voltaje paleta – canal 11 y canal 10, con cortes aplicados:

- $V[11]\{V[11]>60\&\&V[11]<225.7\}$ Y $V[10]\{V[10]>70\&\&V[10]<254.94\}$

Diferencia de tiempo entre las paletas:

- $(T[11]-T[10]):\{V[10]>70\&\&V[10]<254.94\&\&V[11]>60\&\&V[11]<225.7\}$

Ancho de la señal 0 con los cortes aplicados previamente en las paletas:

- $W[0]:V[0]\{V[10]>70\&\&V[10]<254.94\&\&V[11]>60\&\&V[11]<225.7\&\&T[11]-T[10]>-13\&\&T[11]-T[10]<-3\&\&V[0]<950\&\&W[0]<156\}$

Suma de voltajes primera capa y segunda capa:

- $(V[4]+V[5]+V[6]+V[9]):(V[0]+V[2]+V[3])\{V[10]>70\&\&V[10]<254.94\&\&V[11]>60\&\&V[11]<225.7\&\&T[11]-T[10]>-13\&\&T[11]-T[10]<-3\&\&V[0]<975\&\&V[9]<970\&\&W[0]<156\&\&W[2]159\&\&W[3]<155\&\&W[4]<177\&\&W[5]<200\&\&W[6]<200\}$

Voltajes con curva de muones:

- $V[0]\{V[10]>70\&\&V[10]<254.94\&\&V[11]>60\&\&V[11]<225.7\&\&T[11]-T[10]>-13\&\&T[11]-T[10]<-3\&\&V[0]<950\&\&W[0]<156\&\&W[2]159\&\&W[3]<155\&\&W[4]<177\&\&W[5]<200\&\&W[6]<200\&\&W[9]<198\&\&V[0]<975\&\&V[9]<970\}$

Carga con los cortes previamente aplicados para visualización de solo muones:

- $Q[0]\{V[10]>70\&\&V[10]<254.94\&\&V[11]>60\&\&V[11]<225.7\&\&T[11]-T[10]>-13\&\&T[11]-T[10]<-3\&\&V[0]<950\&\&W[0]<156\&\&W[2]159\&\&W[3]<155\&\&W[4]<177\&\&W[5]<200\&\&W[6]<200\&\&W[9]<198\&\&V[0]<975\&\&V[9]<970\}$

Multiplicidad de canal 12:

- Sin cortes: $V[12]$
- Con cortes: $V[12]\{V[10]>70\&\&V[10]<254.94\&\&V[11]>60\&\&V[11]<225.7\&\&T[11]-T[10]>-13\&\&T[11]-T[10]<-3\&\&V[0]<950\&\&V[2]<950\&\&(V[4]+V[5]+V[6]+V[9])>230\&\&(V[0]+V[2]+V[3])>427\}$

Multiplicidad de canal 13:

- Sin cortes: $V[13]$
- Con cortes: $V[13]\{V[10]>70\&\&V[10]<254.94\&\&V[11]>60\&\&V[11]<225.7\&\&T[11]-T[10]>-13\&\&T[11]-T[10]<-3\&\&V[0]<950\&\&V[2]<950\&\&(V[4]+V[5]+V[6]+V[9])>230\&\&(V[0]+V[2]+V[3])>427\}$

PMTs centrales vs. PMTs periféricos con cortes:

- $V[0]:V[2]\{V[10]>70\&\&V[10]<254.94\&\&V[11]>60\&\&V[11]<225.7\&\&T[11]-T[10]>-13\&\&T[11]-T[10]<-3\&\&V[0]<950\&\&W[0]<156\&\&W[2]159\&\&W[3]<155\&\&W[4]<177\&\&W[5]<200\&\&W[6]<200\&\&V[4]+V[5]+V[6]+V[9])>230\&\&(V[0]+V[2]+V[3])>427\}$

Anexo 5. Líneas de código modificadas de las Macros para nuestro análisis de datos

Parte de la Macro Scan14ChFADC

```
void histos(TH1F *h[], string name, int Chan, Int_t NBin, Double_t BinMin,
Double_t BinMax );

void base_line(short data[17][1024], int Nchan, int BinNum, int (&Base_Line)
[17]);
void Positive(TH1F *h[], int Nchan, int Base_Line[17], short data[17][1024]);
void Negative(TH1F *h[], int Nchan, int Base_Line[17], short data[17][1024]);
//{
//
//};
```

```
array Upper limit Voltage
int Nchan=14 ; //DAQ number of channels. En el caso de las paletas este debe
ser 8.
```

Parte de la Macro Procesa14ChFADC

```
void histos(TH1F *h[], string name, int Chan, Int_t NBin, Double_t BinMin,
Double_t BinMax );

void base_line(short data[17][1024], int Nchan, int BinNum, int (&Base_Line)
[17]);
void Positive(TH1F *h[], int Nchan, int Base_Line[17], short data[17][1024]);
void Negative(TH1F *h[], int Nchan, int Base_Line[17], short data[17][1024]);
//{
//
//};
```

```
FILE *fp = NULL;
Mon_event evento;

int Nchan=14 ; //DAQ number of channels
```


Anexo 6. Manual de los fotomultiplicadores

HAMAMATSU
PHOTON IS OUR BUSINESS

LARGE PHOTOCATHODE AREA PHOTOMULTIPLIER TUBES

APPLICATIONS

- High energy physics
(Neutrino experiments, Cosmic-ray experiments)

FEATURES

- Hemispherical window
- Fast time response
- High stability
- Low dark count



SPECIFICATIONS

Type No.	Diameter (mm) / (inch)	Minimum effective area (mm)	Surface area		Dynode		Weight (g)
			Min. (cm ²)	Typ. (cm ²)	Structure	Number of stages	
R5912	202 / 8	φ190	330	380	Box & Line	10	approx. 1100
R5912-20	202 / 8	φ190	330	380	Box & Line	14	approx. 1100
R5912-100	202 / 8	φ190	330	380	Box & Line	10	approx. 1100
R7081	253 / 10	φ220	470	530	Box & Line	10	approx. 1400
R7081-20	253 / 10	φ220	470	530	Box & Line	14	approx. 1400
R7081-100	253 / 10	φ220	470	530	Box & Line	10	approx. 1400
R12860	508 / 20	φ460	2120	2600	Box & Line	10	approx. 8000

COMMON SPECIFICATIONS

Parameter	Description / Value
Spectral response	300 nm to 650 nm
Peak wavelength	420 nm
Photocathode material	Bialkali
Window material	Borosilicate glass

Subject to local technical requirements and regulations, availability of products included in this promotional material may vary. Please consult with our sales office. Information furnished by HAMAMATSU is believed to be reliable. However, no responsibility is assumed for possible inaccuracies or omissions. Specifications are subject to change without notice. No patent rights are granted to any of the circuits described herein. ©2019 Hamamatsu Photonics K.K.

LARGE PHOTOCATHODE AREA PHOTOMULTIPLIER TUBES

SPECIFICATIONS

Type No.	Cathode sensitivity						Anode sensitivity			
	Luminous (2856 K)		Radiant at 420 nm Typ. (mA/W)	Blue sensitivity index (CS 5-58)		Quantum efficiency at 390 nm Typ. (%)	Luminous (2856 K) Typ. (A/lm)	Radiant at 420 nm Typ. (A/W)	Gain Typ.	Applied voltage for typical gain Typ. (V)
	Min. (μA/lm)	Typ. (μA/lm)		Min.	Typ.					
R5912	40	80	80	6.0	10.0	25	800	8.0×10^6	1.0×10^7	1500
R5912-20	40	80	80	6.0	10.0	25	80 000	8.0×10^7	1.0×10^9	1500
R5912-100	80	130	110	12.5	13.5	35	1300	1.1×10^6	1.0×10^7	1500
R7081	40	80	80	6.0	10.0	25	800	8.0×10^6	1.0×10^7	1500
R7081-20	40	80	80	6.0	10.0	25	80 000	8.0×10^7	1.0×10^9	1500
R7081-100	80	130	110	12.5	13.5	35	1300	1.1×10^6	1.0×10^7	1500
R12860	40	80	90	10.0	12.0	30	800	9.0×10^6	1.0×10^7	2000

NOTE: Anode characteristics are measured with the voltage distribution ratio shown below.

Type No.	Maximum rating							
	Supply voltage		Average anode current (mA)	Operating ambient temperature (°C)	Storage temperature (°C)	Ambient pressure (Gauge) (MPa)	Direct interelectrode capacitances	
	Anode to cathode (V)	Anode to last dynode (V)					Anode to last dynode (pF)	Anode to all other dynodes (pF)
R5912	2000	300	0.1	-30 to +50	-30 to +50	0.7	approx. 3	approx. 7
R5912-20	2000	300	0.1	-30 to +50	-30 to +50	0.7	approx. 3	approx. 7
R5912-100	2000	300	0.1	-30 to +50	-30 to +50	0.7	approx. 3	approx. 7
R7081	2000	300	0.1	-30 to +50	-30 to +50	0.7	approx. 3	approx. 7
R7081-20	2000	300	0.1	-30 to +50	-30 to +50	0.7	approx. 3	approx. 7
R7081-100	2000	300	0.1	-30 to +50	-30 to +50	0.7	approx. 3	approx. 7
R12860	2500	300	0.1	-30 to +50	-30 to +50	0.8	approx. 21	approx. 35

Anode sensitivity											(at +25 °C)
Dark current (After 30 min storage in darkness)		Dark count (After 15 hours storage in darkness)		Time response			Single photo-electron (Peak to valley ratio)		Pulse linearity		Type No.
Typ. (nA)	Max. (nA)	Typ. (s ⁻¹)	Max. (s ⁻¹)	Rise time Typ. (ns)	Electron transit time Typ. (ns)	Transit time spread (FWHM) Typ. (ns)	Min.	Typ.	at 2 % Deviation Typ. (mA)	at 5 % Deviation Typ. (mA)	
100	1000	4000	8000	3.6	54	2.4	1.5	2.8	40	60	
5000	10 000	6000	12 000	4.4	72	3.0	1.5	2.8	30	60	R5912-20
500	1000	6000	10 000	3.6	54	2.4	1.5	2.8	40	60	R5912-100
100	1000	7000	15 000	3.8	62	3.4	1.5	2.8	40	60	R7081
5000	10 000	9000	19 000	5.0	80	3.9	1.5	2.8	30	60	R7081-20
500	1000	8000	16 000	3.8	62	3.4	1.5	2.8	40	60	R7081-100
500	1000	20 000	80 000	6.0	95	2.4	1.5	2.8	20 (100)	40 (150)	R12860

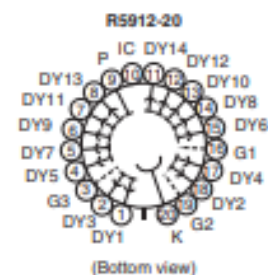
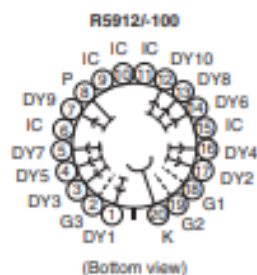
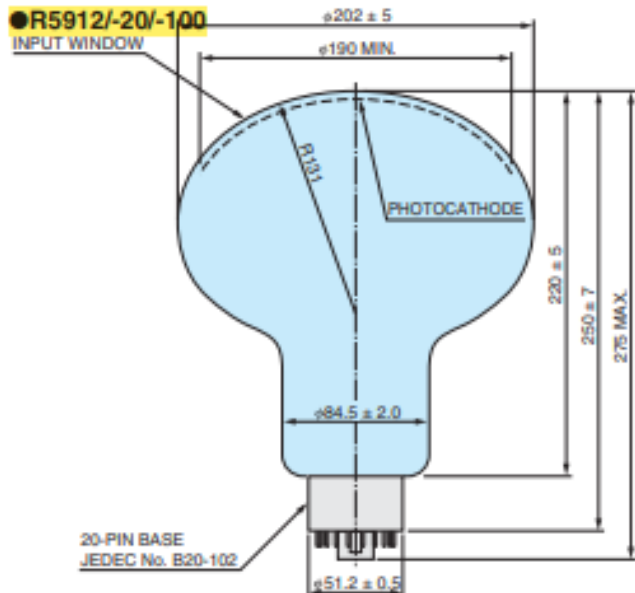
(): Measured with the special voltage distribution ratio (Tapered divider).

Type No.	Supply voltage (V)	Voltage distribution ratio																		
		K: Photocathode Dy: Dynode P: Anode G: Grid Acc: Accelerating electrode																		
		K	Dy1	G	Dy2	Dy3	Dy4	Dy5	Dy6	Dy7(Acc)	Dy8	Dy9	Dy10	P						
R12860	2000	11.5	1	3.5	4	2	2	1	1	1	1	1	1							
		Capacitors in μF									0.01	0.01	0.01	0.01						
R12860 (Tapered divider type)	2000	11.5	1	3.5	4	2	2	1	1	1	2	3	2							
		Capacitors in μF									0.01	0.01	0.01	0.01						
		K	Dy1	G2	G1	G3	Dy2	Dy3	Dy4	Dy5	Dy6	Dy7	Dy8	Dy9	Dy10	P				
R5912/-100 R7081/-100	1500	16.8	0	0.6	0	3.4	5	3.33	1.67	1	1.2	1.5	2.2	3	2.4					
		Capacitors in μF									0.01	0.01	0.01							
		K	Dy1	G2	G1	G3	Dy2	Dy3	Dy4	Dy5	Dy6	Dy7	Dy8	Dy9	Dy10	Dy11	Dy12	Dy13	Dy14	P
R5912-20 R7081-20	1500	11.3	0	0.6	0	3.4	5	3.33	1.67	1	1	1	1	1	1.2	1.5	2.2	3	2.4	
		Capacitors in μF									0.01	0.01	0.01	0.02	0.02					

LARGE PHOTOCATHODE AREA PHOTOMULTIPLIER TUBES

DIMENSIONAL OUTLINE (Unit: mm)

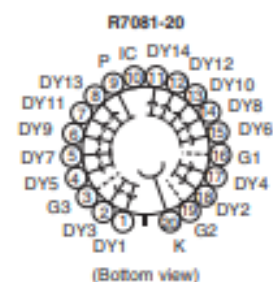
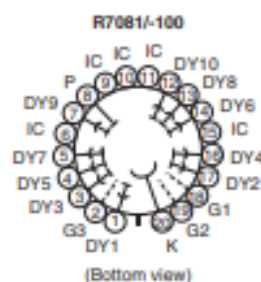
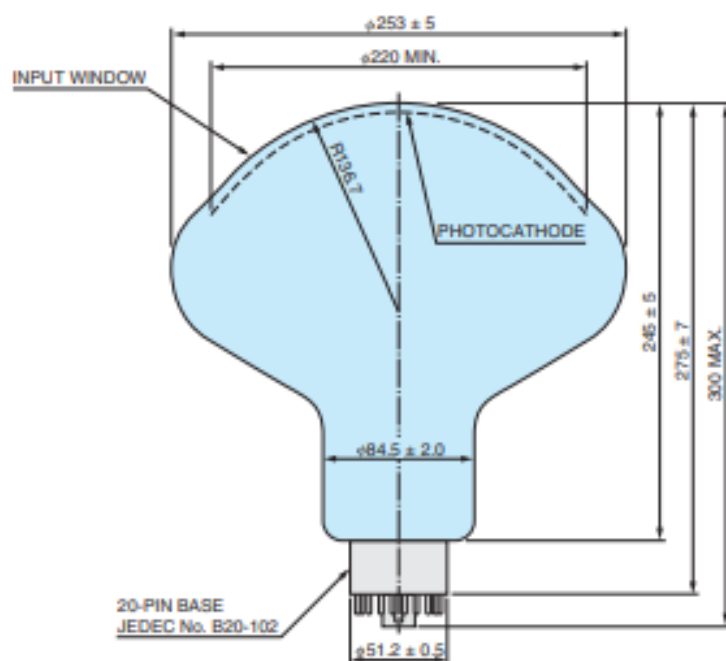
●R5912/-20/-100



IC: Internal connection
(Do not use)

TPM4022EC

●R7081/-20/-100



IC: Internal connection
(Do not use)

TPM4022EC

Anexo 7: Detalles de las paletas centelladoras

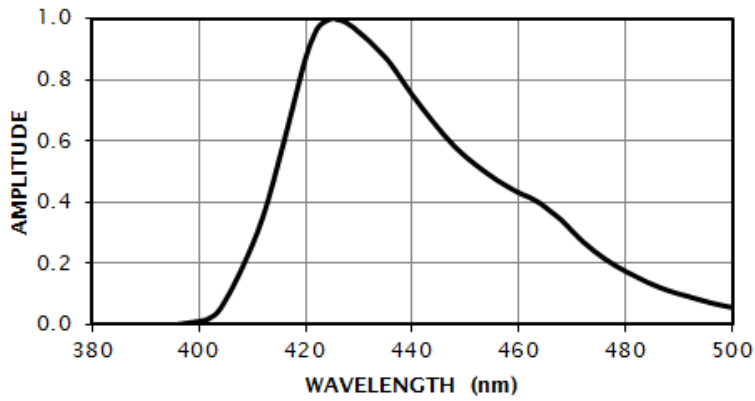
GENERAL PURPOSE

EJ-200, EJ-204, EJ-208, EJ-212



PROPERTIES	EJ-200	EJ-204	EJ-208	EJ-212
Light Output (% Anthracene)	64	68	60	65
Scintillation Efficiency (photons/1 MeV e ⁻)	10,000	10,400	9,200	10,000
Wavelength of Maximum Emission (nm)	425	408	435	423
Light Attenuation Length (cm)	380	160	400	250
Rise Time (ns)	0.9	0.7	1.0	0.9
Decay Time (ns)	2.1	1.8	3.3	2.4
Pulse Width, FWHM (ns)	2.5	2.2	4.2	2.7
No. of H Atoms per cm ³ (x10 ²²)	5.17	5.15	5.17	5.17
No. of C Atoms per cm ³ (x10 ²²)	4.69	4.68	4.69	4.69
No. of Electrons per cm ³ (x10 ²³)	3.33	3.33	3.33	3.33
Density (g/cm ³)	1.023	1.023	1.023	1.023
Polymer Base	Polyvinyltoluene			
Refractive Index	1.58			
Softening Point	75°C			
Vapor Pressure	Vacuum-compatible			
Coefficient of Linear Expansion	7.8 x 10 ⁻⁵ below 67°C			
Light Output vs. Temperature	At 60°C, L.O. = 95% of that at 20°C No change from -60° to 20°C			
Temperature Range	-60°C to 60°C			

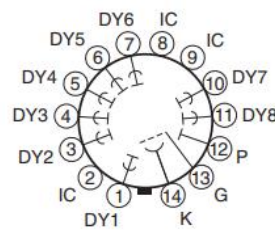
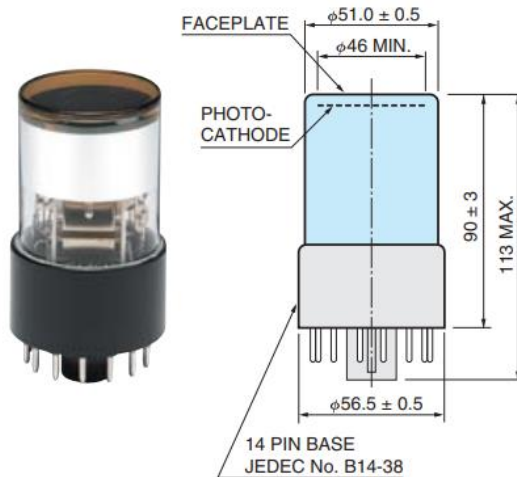
EJ-200 EMISSION SPECTRUM



PMT Hamamatsu modelo R6231 del centellador

Spectral response							Remarks				Max. ratings ^H		
A Type No.	Effective area (mm)		Spectral response range (nm)	B Curve code	C Peak wavelength (nm)	D Photo-cathode material	E Window material	F Out-line No. / Stages	G Socket & socket assembly	H Anode to cathode voltage (V)	I Average anode current (mA)	J Anode to cathode supply voltage (V)	
	← Wavelength (nm) →												
51 mm (2") Dia. types with plastic base													
R6231	φ46		300 to 650	400K	420	BA	K	1	B+L/8	E678-14W ³³ ³⁴	1500	0.1	1000 ⁵

1 R6231



Anexo 8: Detalles técnicos del FADC (Flash Analog-to-Digital Converter)



Features, Applications

Features

- 12 bit @ 5 GS/s, 1-unit wide NIM module
- Switched Capacitor technology based on the DRS4 chip (designed at Paul Scherrer Institute)
 - 1024 capacitor cells per channel (acquisition window of ~ 200 ns @ 5 GS/s)
- 5 GS/s, 2.5 GS/s, 1 GS/s, 750 MS/s software selectable sampling frequencies
- 16 analog input channels on MCX coaxial connectors
- 1 additional analog input (TR0):
 - fast (low latency) trigger
 - digitizable for high resolution timing (up to 50 ps)
- 1 V_{pp} input dynamic range (2 V_{pp} on request) with programmable DC offset adjustment
- Dead-time due to conversion: 110 μs (analog inputs only), 181 μs (TR0 input)
- Trigger modes:
 - External on TRG-IN connector; common to all groups
 - Fast (Low Latency) on TR0 connector; common to all groups
 - Self-trigger, combinations of channels over-threshold in logic OR; common to all groups
- Memory buffer options: 128 events/ch; 1024 events/ch
- USB and Optical Link communication interfaces
- Demo software tools, C and LabVIEW libraries

Ordering

WN6742BXAAAA	N6742B - 16+1 Ch. 12 bit 5 GS/s Switched-CapacitorDigitizer: 1024 events/ch (1kS/event), EP3C16, SE RoHS
WN6742XAAAAA	N6742 - 16+1 Ch. 12 bit 5 GS/s Switched-CapacitorDigitizer: 128 events/ch (1kS/event), EP3C16, SE RoHS