



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Mejoramiento del desempeño de las cámaras multi-alámbricas del detector
de muones para la pirámide del Sol en Teotihuacan

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
FÍSICO

P R E S E N T A :

Temilotzin Ibarra Delgadillo

TUTOR

Dr. Arturo Alejandro Menchaca Rocha



México, D.F., Marzo 2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Hoja de datos del jurado

<p>1. Datos del alumno. Apellido paterno: Apellido materno: Nombre: Teléfono: Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ciencias Carrera: No. De Cuenta:</p>	<p>1. Datos del alumno. Ibarra Delgadillo Temilotzin 41595613 Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ciencias Física 094327348</p>
<p>2. Datos del tutor Apellido paterno: Apellido materno: Nombre(s)</p>	<p>2. Datos del tutor Dr. Menchaca Rocha Arturo Alejandro</p>
<p>3. Datos del sinodal 1 Apellido paterno: Apellido materno: Nombre(s)</p>	<p>3. Datos del sinodal 1 Dr. Herrera Velázquez José Julio Emilio</p>
<p>4. Datos del sinodal 2 Apellido paterno: Apellido materno: Nombre(s)</p>	<p>4. Datos del sinodal 2 Dra. Fuentes Madariaga Beatriz Elizabeth</p>
<p>5. Datos del sinodal 3 Apellido paterno: Apellido materno: Nombre(s)</p>	<p>5. Datos del sinodal 3 Dr. Alfaro Molina José Rubén</p>
<p>6. Datos del sinodal 4 Apellido paterno:</p>	<p>6. Datos del sinodal 4 Dr. Sandoval</p>

Apellido materno: Nombre(s)	Espinosa Andrés
7. Datos del trabajo Título Número de páginas Año:	7. Datos del trabajo Mejoramiento del desempeño de las cámaras multi-alámbricas del detector de muones para la pirámide del Sol en Teotihuacan 114 2010

Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO	6
1.2 OBJETIVOS.....	7
1.3 APORTACIONES.....	7
2. RAYOS CÓSMICOS Y SU PASO POR LA MATERIA.....	10
2.1 LOS RAYOS CÓSMICOS.....	10
2.2 INTERACCIÓN CON LA MATERIA.....	12
2.3 MUONES	13
3. DETECCIÓN DE RADIACIÓN.....	19
3.1 DETECTORES DE RADIACIÓN.....	19
3.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE UN DETECTOR	20
3.2.1 SENSIBILIDAD DEL DETECTOR.....	20
3.2.2 RESPUESTA DEL DETECTOR.....	20
3.2.3 TIEMPO DE RESPUESTA	21
3.2.4 TIEMPO MUERTO.....	21
3.2.5 EFICIENCIA DE UN DETECTOR.....	22
3.3 DETECTORES DE IONIZACIÓN.....	23
3.3.1 DETECTORES GASEOSOS DE IONIZACIÓN.....	23
3.3.2 MECANISMOS DE IONIZACIÓN Y FENÓMENOS DE TRANSPORTE EN GASES	25
3.3.3 COMPORTAMIENTO DE IONES Y ELECTRONES EN UN GAS.....	27
3.3.4 MULTIPLICACIÓN DE AVALANCHAS Y CREACIÓN DE PULSOS.....	30
3.3.5 ELECCIÓN DEL GAS IONIZANTE.....	33
3.4 CÁMARAS MULTIALÁMBRICAS	34

3.4.1 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN EN CÁMARAS MULTIALÁMBRICAS	¡Error!
	Marcador no definido.
3.4.2 ESTRUCTURA DE LAS CÁMARAS MULTIALÁMBRICAS	36
3.4.3 SISTEMA DE LECTURA	37
3.4.4 SEÑALES MÚLTIPLES PARA UNA TRAYECTORIA	38
3.4.5 EFICIENCIA DE LAS CÁMARAS MULTIALÁMBRICAS	38
3.5 FOTOMULTIPLICADORES	39
3.6 DETECTORES DE CENTELLEO	42
3.6.1 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DE LOS CENTELLADORES	43
3.6.2 RESPUESTA DE SALIDA Y LINEALIDAD	44
4. DETECTOR DE MUONES, ELECTRÓNICA Y ADQUISICIÓN DE DATOS	46
4.1 DETECTOR DE MUONES	46
4.2 INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA	52
4.2.1 SUMINISTRO DEL ALTO VOLTAJE	52
4.2.2 SEÑALES Y PANEL DE CONTROL	52
4.2.3 CONFIGURACIÓN DE LA PRIMER ETAPA	54
4.2.4 CONFIGURACIÓN DE LA SEGUNDA ETAPA	56
4.2.5 AJUSTE DEL DISCRIMINADOR	¡Error! Marcador no definido.
4.3 ADQUISICIÓN DE DATOS	59
5. CALIBRACIÓN DEL DETECTOR, ANÁLISIS DE DATOS Y MEJORAS DE LAS MWPC	62
5.1 CALIBRACIÓN DEL DETECTOR DE MUONES	62
5.1.1 CALIBRACIÓN DE LOS CENTELLADORES	62
5.2 CALIBRACIÓN DE LAS MWPC	65
5.2.1 FLUJO DE GAS	66
5.2.2 UMBRALES	68
5.3 ANÁLISIS DE DATOS	69

5.3.1 CARACTERÍSTICAS DEL PAQUETE DE ANÁLISIS ROOT.....	69
5.3.2 ANÁLISIS DE DE LOS HISTOGRAMAS.....	70
5.4 ADECUACIONES A LAS MWPC:.....	78
5.5 PROGRAMA PARA ENDEREZAR LOS CÁTODOS.....	85
6 RESULTADOS	87
6.1 RESULTADOS DE LA PRIMERA ETAPA DEL ESTUDIO.....	87
6.1.1 CENTELLADORES.....	88
6.1.2 CÁMARAS MULTIALÁMBRICAS	90
6.2 PROCEDIMIENTO PARA EL ESTUDIO Y REPARACIÓN DE LAS MWPC.	94
6.3 RESULTADOS FINALES.....	96
7 CONCLUSIONES:.....	101
ANEXO A:.....	103
ANEXO B:	105
ANEXO C:	107
BIBLIOGRAFÍA:.....	112

1. INTRODUCCIÓN

En México existe un gran patrimonio arqueológico, herencia de las numerosas civilizaciones prehispánicas que habitaron el país y que han contribuido a dar una personalidad y características únicas a la nación. Entre las culturas más importantes en la historia de México y de Mesoamérica, se encuentra Teotihuacan, nombre que en Nahuatl significa “ciudad de los dioses”, de grandes dimensiones (20 Km²), majestuosidad en sus templos y sofisticación en su modelo de urbanización. En la actualidad, se han hecho hallazgos que permiten reconstruir parte de su historia, como entierros y elementos pictó-gráficos [1]. De lo que queda de la ciudad, sobresale el conjunto ceremonial en el cual se destacan la pirámide del Sol, la avenida de los muertos (orientada 15° 25' al este del Norte astronómico) alrededor de la cual se extendía la metrópoli y la pirámide de la Luna, en la cual se encontraron diversos entierros [2] que indican la posibilidad de que en la del Sol, también se halle una cámara mortuoria.

El propósito de esta tesis es contribuir a la aplicación de la detección de rayos cósmicos a un problema arqueológico muy antiguo: determinar si la pirámide del Sol se construyó como un monumento mortuario, cuyo volumen albergaría a algún gran personaje. En el Siglo pasado, durante los años 60, el científico de origen estadounidense Luís Álvarez [3] utilizó esa radiación por primera vez para resolver un enigma arqueológico parecido: buscar cámaras ocultas en la pirámide de Kefren, en Egipto. Una coincidencia afortunada hace que ambas pirámides posean túneles ubicados varios metros por debajo de su base y llegan a lugares muy cercanos a su eje de simetría. El presente trabajo difiere del de Álvarez, en que la geometría de la pirámide del Sol es más compleja que la de Kefren, y tiene una densidad más in-homogénea, por lo que se requiere mayor detalle y precisión en el análisis de los datos [4,5].

Un antecedente que obliga a realizar medidas de prospección no destructiva, es que a principios del Siglo pasado los arqueólogos mexicanos cavaron varios túneles que cruzan la pirámide del Sol sin encontrar algo de importancia. Desde entonces, con la finalidad de preservar la estructura, las autoridades del Instituto Nacional de Antropología e Historia prohíben cualquier excavación en el

edificio, hasta no contar con información suficiente que indique la existencia de un entierro en un lugar específico.

Además de esta aplicación en el campo de la arqueología, el desarrollo de este proyecto en México representa una innovación tecnológica en lo referente al proceso de diseño y fabricación de instrumentación, así como la programación para adquirir y analizar los datos que se colecten.

El diseño, ensamblaje y construcción de la mayoría de las piezas, así como la operación del “detector de muones” para este experimento, fueron desarrollados en el IFUNAM.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

El principio de operación del detector que se utiliza, está basado en la detección de un tipo de partículas denominadas “muones”. Éstas forman parte de los denominados rayos cósmicos “secundarios”, producto de la interacción de los “primarios” con los átomos que constituyen la atmósfera terrestre.

Sin embargo, los muones cósmicos poseen una energía tal que su vida media es suficiente para llegar hasta la superficie terrestre sin decaer. El flujo de muones es muy regular, del orden de un muón por minuto por centímetro cuadrado a nivel del mar. Por poseer carga eléctrica, los muones también son fáciles de detectar. Los más energéticos se llegan a medir cientos de metros bajo tierra, aunque su flujo disminuye dependiendo del espesor de materia atravesada. Es esta relación espesor-flujo la que permite asociar zonas de mayor flujo con posibles huecos, pues en las trayectorias que los cruzan hay menos masa. Esta técnica, denominada “de transmisión”, es la que hace necesario que el detector sea colocado bajo la pirámide. Lo que se requiere es reconstruir las trayectorias de los muones que cruzan el detector, haciendo un mapeo de la densidad interna de la pirámide. Por supuesto, el ángulo sólido que subtiende el detector limita el volumen observado, razón por la cual es importante maximizarlo. Así se medirá el flujo de los muones que provienen de la mayor parte de las direcciones, atravesando la masa de la pirámide. En el capítulo 2 se aborda con mayor profundidad lo que son los rayos cósmicos y en particular los muones.

Para identificar a los muones y reconstruir sus trayectorias, se utilizan dos tipos de detectores cuyos principios de operación se mencionan en el capítulo 3. Una descripción detallada del sistema específico de detección que se utilizó, constituido por elementos centelladores y cámaras

multialámbricas (o MWPC's por Multiwire Proportional Chambers), así como su electrónica asociada para el manejo de pulsos y la técnica para registrarlos en una PC, se hace en el capítulo 4.

En la medida en que la resolución temporal y la espacial sean buenas, será posible reconstruir las trayectorias de los muones a través de dicha estructura. De esta manera, se obtendrá la variación en la densidad del flujo de muones que la atraviesan y se conocerá la variación en la densidad de masa de la pirámide. Lo anterior se hará mediante la programación de una rutina de análisis fuera de línea, para determinar la existencia o no, de una cavidad en su interior. Esto requiere de un análisis de los datos con una rutina de análisis fuera de línea programada en C++ y ejecutada dentro del software de análisis ROOT, el cual brinda información indispensable a través de diversos histogramas, en vista de determinar el funcionamiento del detector. Los detalles se encuentran en el capítulo 5. Los resultados finales se encuentran en el capítulo 6.

1.2 OBJETIVOS

El propósito inicial de esta tesis fue mejorar el desempeño del detector para lograr una resolución espacial. En particular, se trabajó con las MWPC, manipulando las variables de operación: flujo de gas y el alto voltaje; el manejo de las señales eléctricas que arroja el detector. También nos propusimos mejorar la calibración de los detectores de centelleo, que proveen la señal de coincidencia que actúa como disparador de los pulsos arrojados por las cámaras.

La idea fue disminuir el ruido inherente al experimento y ajustar los tiempos de coincidencia entre las señales generadas a partir de eventos de detección válidos.

En una segunda fase, se encontró que los efectos electro-mecánicos podrían mejorar considerablemente el desempeño de las cámaras. Con tal propósito se desarrolló otro código en C++ que permitió optimizar la geometría de cada MWPC.

1.3 APORTACIONES

Se contribuyó a la mejoría en el desempeño del detector de muones, participando en el desarrollo e implementación de un procedimiento técnico para evaluar las condiciones del funcionamiento de las MWPC y corregir algunas fallas de origen electro-mecánico. Lo esencial de este trabajo, es que se establecieron relaciones claras entre el comportamiento electro-mecánico de las MWPC y la información observada en los histogramas generados por la rutina de análisis. De estas relaciones, es posible inferir el tipo de problema así como su ubicación aproximada, para entonces aplicar la técnica desarrollada en cada caso.

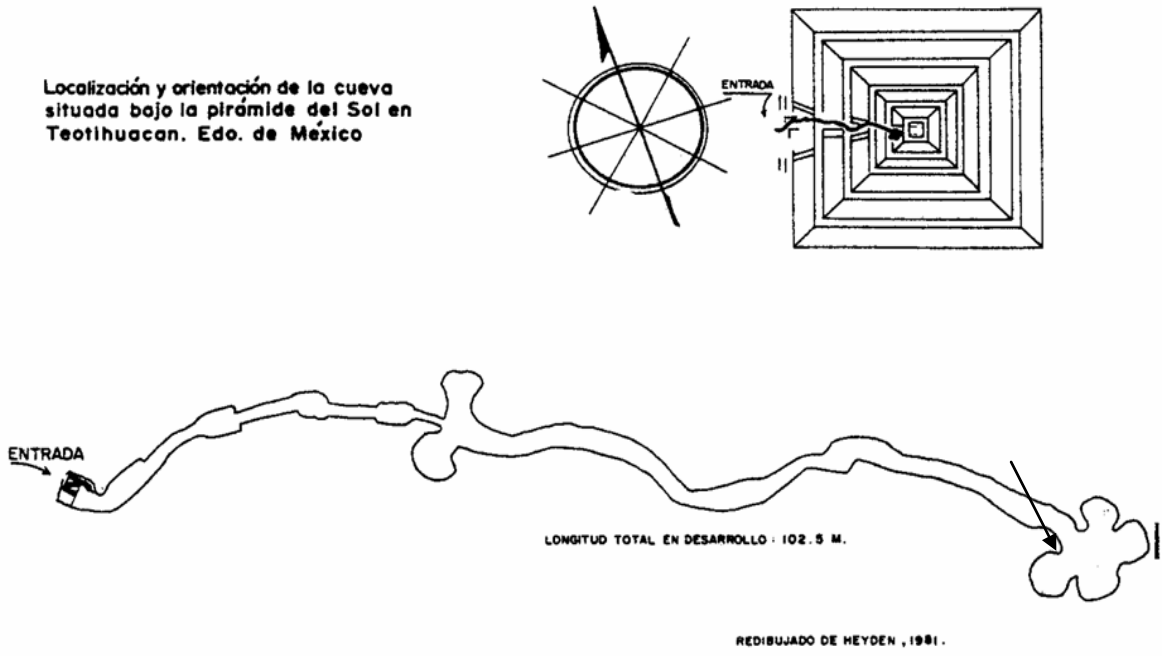


Fig.1.1 Diagrama del túnel bajo la pirámide del Sol. La flecha señala la ubicación actual del detector de muones.

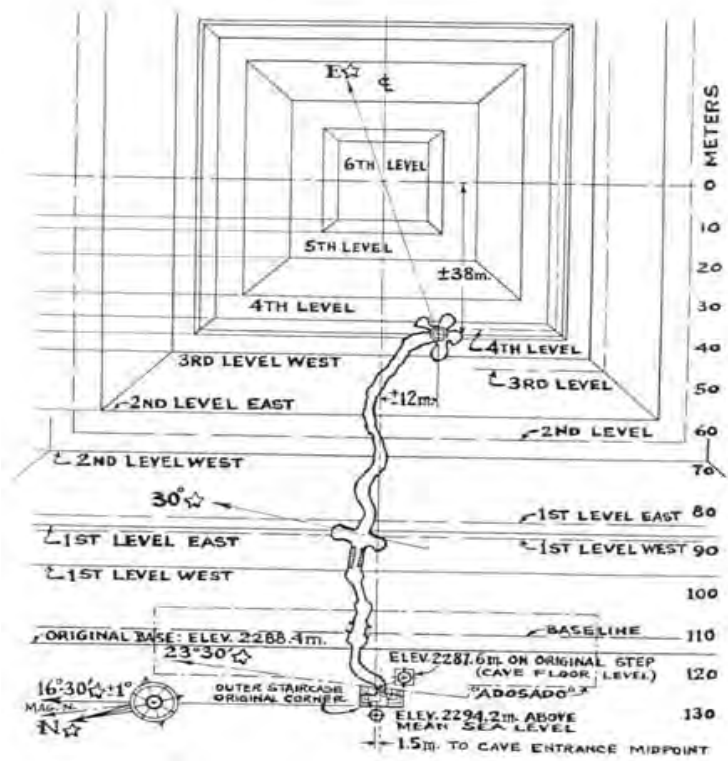


Fig.1.2 Ubicación del túnel respecto a la pirámide del Sol.



Fig.1.3 Caseta para el detector de muones dentro del túnel y vista de la entrada al mismo.



Fig.1.4 Equipo electrónico y de adquisición de datos. Detector de muones en su ubicación final.

2. RAYOS CÓSMICOS Y SU PASO POR LA MATERIA

Para entender el principio físico que se utiliza para detectar los muones es importante conocer sus características físicas, la forma en que son creadas estas partículas, así como la regularidad de su flujo a través de la atmósfera, en particular la fracción de éste que llega la superficie terrestre.

2.1 LOS RAYOS CÓSMICOS

Los rayos cósmicos son partículas con carga eléctrica y altas energías, que se originan en el espacio exterior. Viajan con velocidades cercanas a la de la luz, incidiendo sobre la Tierra desde todas las direcciones. Como veremos en esta sección, los rayos cósmicos son en su mayoría núcleos que van desde los elementos más ligeros de la tabla periódica hasta la zona del hierro. El flujo cósmico también incluye electrones y positrones con altas energías.

El término de rayos cósmicos, aunque se refiere principalmente a las partículas provenientes de la galaxia (más allá del sistema solar) también incluye a los electrones y núcleos acelerados por efectos solares, así como las partículas aceleradas en el espacio interplanetario.

En 1912 Victor Hess descubre la radiación cósmica al percatarse de que un electroscopio que lleva consigo en un globo aerostático, se descarga más rápido conforme asciende. El hecho se lo atribuyó a una fuente de radiación incidiendo en la atmósfera desde el exterior. A tal descubrimiento que le merecería el premio Nobel en 1936, le llamaron “rayos cósmicos”; en ese entonces se creía que eran de origen electromagnético. Sin embargo en 1930 se descubrió que debían estar cargados eléctricamente puesto que eran afectados por el campo magnético de la Tierra. A partir de entonces y hasta 1950, con la creación de los grandes aceleradores de partículas, los rayos cósmicos sirvieron como fuente de partículas para investigaciones en física de altas energías, contribuyendo al descubrimiento de varias partículas subatómicas como el positrón y el muón. En la actualidad, el estudio de los rayos

cósmicos está enfocado en develar su origen, así como en entender el proceso por el cual son acelerados a tales energías, y su contribución a entender la dinámica de las galaxias. Además, el análisis de su composición arroja información trascendente sobre la materia fuera del sistema solar.

Los rayos cósmicos usualmente se miden en unidades de Mega electrón-Volts (MeV) o en giga electrón-Volts (GeV). Un electrón-Volt (eV) corresponde a la energía que gana un electrón al ser acelerado en una diferencia de potencial de 1V. En su mayoría los rayos cósmicos tienen energías que van desde 100 MeV, que para protones corresponden a velocidades que son un 43% de la velocidad de la luz (C); hasta energías de 10 GeV que para protones corresponden a velocidades de 99.6% de C [6].

En la actualidad existen distintas teorías que tratan de explicar el mecanismo de aceleración de las partículas a energías tan grandes. Una de las más recientes, denominada “reconexión del campo magnético” [7] considera que en las galaxias se da un proceso por el cual se convierte directa y eficientemente la energía almacenada en su campo magnético en energía de la partícula. Otra teoría, quizá la que tiene mayor apoyo entre la comunidad científica como el origen probable de la radiación cósmica, es la explosión de supernovas. Existe evidencia considerable de que los rayos cósmicos adquieren su energía de las ondas de choque que viajan a través del gas interestelar [8].

Cuando estas partículas cargadas llegan al sistema solar, son “moduladas” por el viento solar. Dicho plasma magnetizado en expansión, generado por el Sol, desacelera y excluye parcialmente a los rayos cósmicos galácticos de menor energía del sistema solar interior. Hay una significativa anti-correlación entre la actividad solar (con ciclos de 11 años) y la intensidad de los rayos cósmicos con energías menores a los 10 GeV.

Esencialmente, la composición de los rayos cósmicos incluye un 98% de núcleos de los elementos de la tabla periódica con $Z \leq 28$, los cuales viajan desprovistos de sus electrones orbitales, además de un 2% de electrones y positrones. La componente nuclear de esta radiación consiste en un 89% de núcleos de hidrógeno (protones), un 12% de núcleos de helio, y un 1% de los elementos más pesados [9].

2.2 INTERACCIÓN CON LA MATERIA

Para los protones, la probabilidad de llegar a la superficie terrestre es casi nula por la cantidad de materia atmosférica que deben atravesar. En cada colisión ceden energía, interaccionan de múltiples formas con la materia que atraviesan disminuyendo la posibilidad de detectarlos en tierra. Sin embargo a grandes alturas ha sido posible su detección.

A la radiación cósmica acelerada por fuentes astrofísicas que incide en la atmósfera, se le conoce como rayos cósmicos “primarios”. Si estas partículas tienen energías superiores a un 1GeV, entonces se dan tres tipos de interacciones: Interacciones electromagnéticas, responsables de la generación de fotones y electrones; Interacciones hadrónicas inelásticas, importantes en la producción de flujos de hadrones secundarios; Interacciones nucleares, cuando los núcleos pesados se dividen en núcleos más ligeros, importantes en los cambios de la composición química e isotópica de los núcleos acelerados.

Si los rayos cósmicos primarios son muy energéticos, al colisionar contra los átomos de la capa superior atmosférica, interaccionan produciendo cascadas de partículas secundarias (conocidas como rayos cósmicos secundarios). Muchas de ellas alcanzan a llegar a la superficie terrestre, aunque su tiempo de vida sea extremadamente corto. Una cascada atmosférica es creada por un solo rayo cósmico (una partícula) con energía suficientemente grande para que la cascada que genera sea detectada en tierra. Todas las nuevas partículas son producidas dentro de la cascada de forma cónica con un centro hadrónico, y no se alejan más de 1° de la trayectoria de la partícula primaria. La cascada, a su vez actúa como fuente colimada de sub-cascadas electromagnéticas, generadas en su mayoría a partir del decaimiento $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$. Se conoce como la componente electromagnética y consiste en electrones, positrones y fotones.

A excepción de los protones y electrones cerca de lo alto de la atmósfera, todo tipo de partículas son creadas por la interacción de los rayos cósmicos primarios con el aire. En particular los muones y neutrinos son producto del decaimiento de los mesones cargados, mientras que los electrones y fotones se originan del decaimiento de mesones neutros [10].

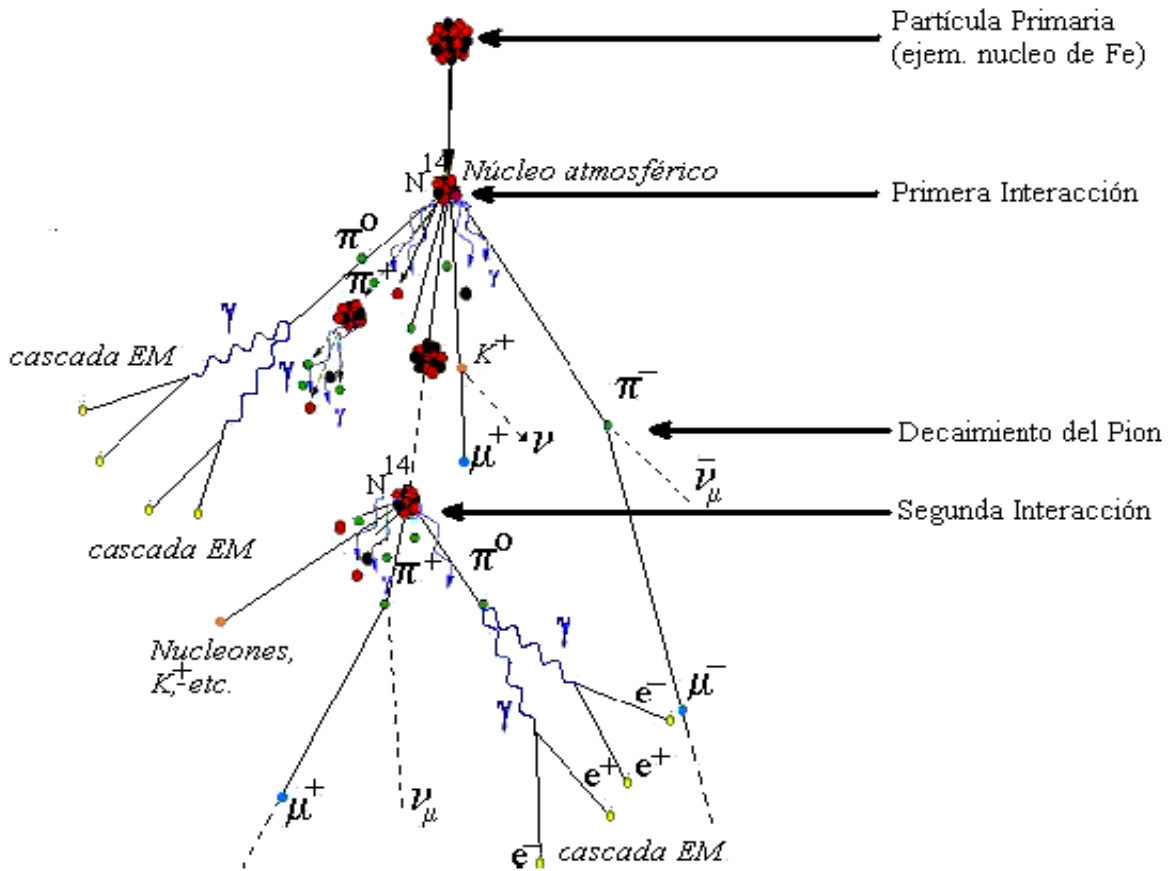


Fig 2.1 Proceso de creación de los rayos cósmicos secundarios dentro de una cascada atmosférica y de las cascadas electromagnéticas subsiguientes.

2.3 MUONES

Los muones son partículas con carga negativa igual a la del electrón, tienen una masa de $105.65883568 \pm 0.0000052 \text{ MeV}$ equivalente a 206 veces la masa del electrón aproximadamente. Los muones son partículas inestables que interactúan levemente con la materia a bajas energías, excepto por ionización. La pérdida por ionización sucede cuando una partícula eléctricamente cargada atraviesa la materia cediendo energía en excitación y en ionización de los átomos del medio. Tal pérdida de energía dE/dx es descrita por la ecuación de Bethe-Bloch, en la que la razón de pérdida energética por ionización varía logarítmicamente con la energía, considerando que las partículas son relativistas.

Para una partícula relativista con carga $-Ze$ en un material con número atómico Z y masa atómica A , la ecuación de Bethe-Bloch se escribe como:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right) = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 Z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta} \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I}\right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right] \quad \dots (2.1)$$

Donde m_e es la masa en reposo del electrón, r_e es el radio clásico del electrón, N_A es el número de Avogadro y $4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0.3071 \text{ MeV} \frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$. Además, γ es el factor de Lorentz, $\beta = v/c$, e I es la constante de ionización con un valor aproximadamente de $16Z^{0.9} \text{ eV}$ para $Z > 1$, dx es el espesor o “columna de densidad” expresada como masa por unidad de área. Por último, δ representa el “efecto de densidad” que se aproxima a $2 \ln \gamma$ más una constante para partículas muy energéticas.

Las dispersiones de tipo Coulomb se originan a partir de la interacción de partículas cargadas con la materia. Se deben a múltiples y pequeñas interacciones que provocan una desviación angular, descrita aproximadamente por una distribución gaussiana:

$$\frac{dN}{d\theta_x} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\theta_0} e^{-\frac{\theta_x^2}{2\theta_0^2}} \quad \dots (2.2)$$

donde la anchura θ_0 , se relaciona con el material dispersor a través de su longitud de radiación L_0 , mediante la ecuación:

$$\theta_0 = \frac{13.6}{\beta c p} \sqrt{\frac{L[1 + 0.038 \ln(L/L_0)]}{L_0}} \quad \dots (2.3)$$

donde p es el momento de la partícula en MeV/c y βc su velocidad. Si el número atómico del material se incrementa, entonces la longitud de radiación decrece rápidamente, mientras que θ_0 crece. Por ejemplo, para un espesor de 10 cm, un muón con 3 GeV se desvía a un

ángulo de 2.3 miliradianes en agua, 11 miliradianes en hierro y 20 miliradianes en plomo [11].

El hecho de que a bajas energías los muones solamente interactúen con la materia por ionización, implica que tienen una sección transversal de interacción muy pequeña, por lo que son muy penetrantes. De hecho se les conoce como la “componente penetrante” de los rayos cósmicos, ya que pueden viajar grandes distancias a través de la atmósfera y alcanzar la superficie terrestre. Sin embargo, a lo largo de su trayectoria, estas partículas pierden energía en proporción a la cantidad de materia que atraviesan, la cual se calcula como la densidad de materia por la longitud de camino $\left(\frac{gm}{cm^2}\right)$ y se denomina “longitud de interacción”.

A altitudes de 15 km la atmósfera terrestre tiene una “profundidad” de $175 \frac{gm}{cm^2}$, es en esta región donde se crean la mayoría de los muones. Conforme viajan a través de la atmósfera, pierden energía a una tasa aproximadamente constante de 2 MeV por $\frac{gm}{cm^2}$. Dado que la atmósfera tiene una profundidad promedio de $1030 \frac{gm}{cm^2}$, al llegar a la superficie terrestre los muones han perdido por ionización 2 GeV en promedio y la energía promedio con la que llegan a nivel del mar es de 4 GeV.

El espectro de energía para muones con energías por debajo de 1 GeV es casi plano, gradualmente aumenta su pendiente hasta reflejar el espectro primario (fig 2.1) en el intervalo entre los 10-100 GeV. Para energías mayores a éstas, la pendiente aumenta aún más como consecuencia de que los piones con energías $E_{\pi} > \epsilon_{\pi} \approx 115 GeV$ tienden a interactuar en la atmósfera antes de decaer. El espectro de energía de los muones atmosféricos es una potencia mayor que la del espectro primario, al cual se acerca asintóticamente para $E_{\mu} \gg 1 TeV$. Otro factor muy importante que hay que considerar, es la integral de la intensidad de los muones que inciden verticalmente con energías de 1 GeV/c a nivel del mar, que tiene un valor de $\approx 70 \frac{1}{m^2 s \cdot sr}$, que los experimentales conocen

como la intensidad promedio del flujo de muones $I \approx \frac{1 \text{ muon}}{\text{cm}^2 \text{ min}}$ para detectores horizontales [12]. Los muones que llegan a la ciudad de México, lo hacen con energías superiores a 8 GeV y con una frecuencia de incidencia 2.3 veces mayor que sobre la línea del ecuador a nivel del mar.

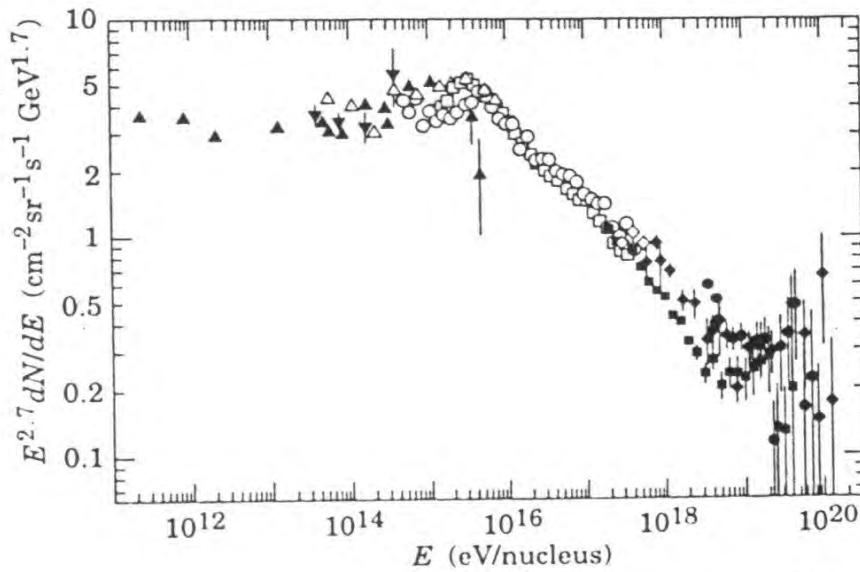


Fig. 2.1 Espectro de los Rayos Cósmicos Primarios [12]. Los símbolos en la gráfica representan las mediciones hechas por distintos grupos de investigación en el mundo.

Hay que añadir que la distribución angular total en tierra es $\propto \cos^2 \theta$, que es característica de los muones con energías $\sim 3 \text{ GeV}$. A energías menores la distribución angular se vuelve progresivamente más pronunciada, mientras que para energías mayores, la distribución se aplanan aproximándose a la $\sec \theta$ si $E_\mu \gg \epsilon_\pi$ y $\theta < 70^\circ$.

Como ejemplo, podemos mencionar los resultados con respecto a la distribución angular del flujo integral de muones producidos en la atmósfera, efectuada con un detector del tipo telescopio con una aceptación angular de 8° y precisión de 0.5° en su posicionamiento. Los resultados (Fig. 2.2) corresponden a medidas realizadas entre octubre y diciembre de 2003 en la Ciudad de México, a una latitud geográfica de 19° Norte, latitud geomagnética de 29° Norte, longitud 99° Oeste y a 2400 m sobre el nivel del mar. En la gráfica se observa el

ajuste, aproximadamente $\cos^2\theta$ para la distribución del ángulo azimutal, cuya curva reproduce el comportamiento citado dentro del intervalo de valores $0^\circ < \theta < 70^\circ$. [13].

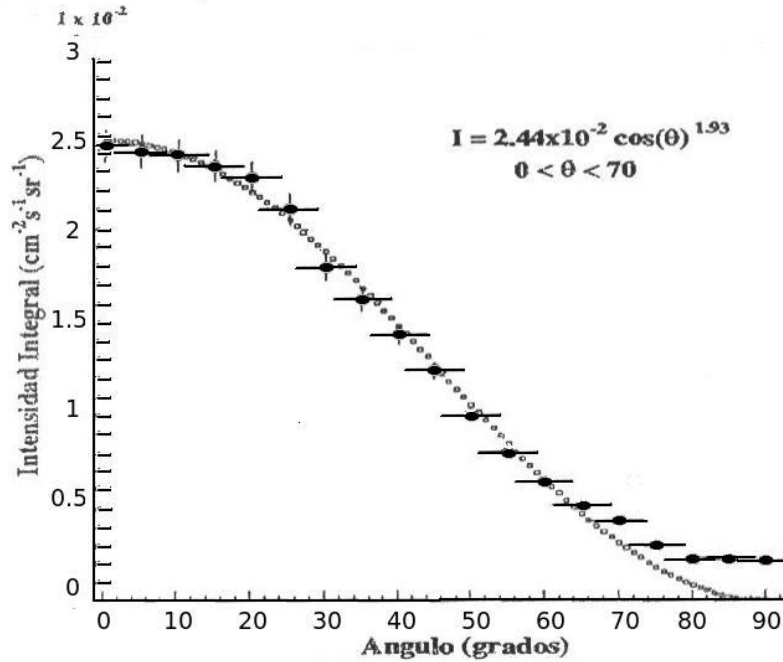


Fig. 2.2 Distribución angular del flujo integral de muones producidos en la atmósfera en la Ciudad de México. La curva representa el ajuste propuesto a los datos adquiridos [13].

En general, los muones positivos tienen mayor facilidad para alcanzar la superficie, decayendo en un positrón y un neutrino con su antineutrino $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$. En cambio los muones negativos son más susceptibles a decaer antes de llegar al suelo, desintegrándose en un electrón y una pareja de neutrinos $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$.

Es importante considerar los distintos factores que afectan las mediciones de esta radiación. Principalmente se trata del ciclo solar [14, 15], el viento solar, el campo magnético terrestre, la altura, la latitud, el efecto Forbush y de manera poco significativa si es de día o de noche.

Como ya lo he mencionado hay una anti-correlación entre el ciclo solar y la incidencia de radiación cósmica. Cuando aparecen las manchas solares disminuye hasta en un 20% la incidencia de muones en la Tierra, cuando desaparecen las manchas se recupera.

El campo magnético generado por el viento solar desvía la trayectoria de la radiación. Mientras que si es de día o de noche también afecta la llegada de los rayos cósmicos en un 0.02%, que indirectamente es consecuencia del viento solar.

El efecto Forbush es la rápida disminución, desde un 3% hasta un 30%, en el flujo observado de radiación cósmica seguida a una eyección de masa coronal del Sol (CME Coronal Mass Ejection), recuperando su intensidad en los siguientes días. El campo magnético del viento solar originado por la CME, barré muchos de los rayos cósmicos que se dirigen a la Tierra provocando la disminución en su intensidad [16].

Como mencioné anteriormente, los muones constituyen la componente penetrante de los rayos cósmicos, que junto con los neutrinos son las únicas partículas que consiguen llegar a profundidades significativas bajo tierra. En su paso por la roca de la corteza terrestre, los muones producen flujos terciarios de fotones, electrones y hadrones. El hecho de que puedan recorrer tales distancias, significa que estos muones son sumamente energéticos, y por lo tanto la energía que pierden debido a procesos radiativos no puede despreciarse.

Estos procesos se conocen como bremsstrahlung, producción directa de pares e^+e^- , e interacciones fotonucleares. Si se toma en consideración la pérdida de energía total para un muon, puede ser expresada como función de la cantidad de materia atravesada:

$$-\frac{dE_\mu}{dX} = a + bE_\mu \quad \dots (2.4)$$

Donde a es la pérdida por ionización y b es la pérdida fraccional de energía por los tres procesos de radiación. Ambas son funciones de la energía que varían lentamente. La cantidad $\epsilon \equiv a/b \approx 500 \text{ GeV}$ en roca común, define una energía crítica por debajo de la cual la pérdida por ionización es más importante que la pérdida por los procesos radiativos.

La potencia radiada en cada encuentro bremsstrahlung con un núcleo es proporcional al cuadrado de la aceleración dada para la partícula radiante. Para un momentum dado, la pérdida de energía por el efecto bremsstrahlung es por lo tanto inversamente proporcional al cuadrado de la masa de la partícula radiante. Por lo tanto la longitud de radiación para muones es mayor que para los electrones. Como la atmósfera tiene un espesor de

1030 g/cm^2 , la “radiación de frenado” en la atmósfera es crucial para los electrones, pero completamente despreciable para los muones. Sin embargo, en la propagación de muones a profundidad bajo tierra, los procesos discretos de pérdida de energía se vuelven importantes [12].

3. DETECCIÓN DE RADIACIÓN

Este capítulo contiene la teoría acerca de los detectores de radiación en general, profundizando en el comportamiento físico de los dos tipos de detectores involucrados en este trabajo: detectores de centelleo y las cámaras multialámbricas proporcionales (MWPC's por Multiwire Proportional Chambers).

Tal comportamiento determina el funcionamiento de estos detectores, aspecto que se pretende mejorar con el presente trabajo.

3.1 DETECTORES DE RADIACIÓN

Cualquiera que sea el tipo de detector con el que se trabaje, tiene como principio de operación, la transferencia de parte o de toda la energía de la radiación incidente en la materia del detector. Dependiendo del tipo de partícula, si tiene carga o no, la transferencia se da de forma distinta. Como vimos en el capítulo anterior, las partículas con carga lo hacen a través de colisiones directas con los electrones atómicos produciendo ionización o excitación de los átomos, mientras que las partículas neutras sufren primero algún tipo de reacción en el detector que a su vez crea partículas cargadas, las cuales ionizan o excitan los átomos. La energía convertida aparece en una forma u otra según el diseño y el tipo de detector. En un detector gaseoso se colectan directamente los electrones de ionización para producir un pulso eléctrico, en cambio si se trata de un centellador, tanto la ionización como la excitación inducen transiciones moleculares que resultan en emisión de luz.

3.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE UN DETECTOR

Lo que determina el comportamiento de un detector, ante la incidencia de radiación, depende de cuáles sean sus características físicas. De este modo, conocer la interacción entre determinado tipo de radiación y la materia posibilita la creación de detectores con características específicas para satisfacer las necesidades de la investigación.

3.2.1 SENSIBILIDAD DEL DETECTOR

Entre las características principales se halla la *sensibilidad* del detector, que es la capacidad de producir una señal útil para un cierto tipo de radiación y en un determinado intervalo de energía, la cual depende de varios factores: 1) la sección transversal del detector para reacciones ionizantes, 2) la masa del detector, 3) el ruido inherente al aparato de detección, 4) el material protector que recubre el volumen del mismo.

Los dos primeros factores determinan la probabilidad de que la radiación incidente convierta parte de su energía o toda en ionización al interactuar con el detector. Incluso para detectores con un volumen pequeño y poco denso se da la ionización como consecuencia de que las partículas cargadas son altamente ionizantes. La señal entonces producida, debe ser mayor que el ruido promedio inherente al detector y a la electrónica asociada para que pueda ser útil. El volumen sensible del detector es el factor que determina la ionización total para un cierto tipo dado de radiación y rango de energía. El otro factor que restringe el límite mínimo de energía que es posible detectar, es el espesor del recubrimiento de la ventana de detección del volumen sensible. Debido a la absorción, únicamente la radiación con energía suficiente puede atravesar tal material.

3.2.2 RESPUESTA DEL DETECTOR

La *respuesta del detector* consiste en la relación que existe entre la energía de la radiación y la carga total o la altura del pulso de salida registrado por la electrónica del detector. La cantidad de ionización producida por la radiación se da en proporción a la energía que ésta pierde. Sólo en caso de que el detector sea suficientemente grande y que la radiación sea

absorbida por completo se obtiene una medida de su energía. Así, la cantidad de ionización producida se refleja en la cantidad de carga que contiene el pulso, la cual se obtiene integrando el pulso con respecto al tiempo. Sin embargo la altura del pulso es directamente proporcional a la integral, por lo que ésta puede ser utilizada en lugar de la integración. Esta relación es aproximadamente lineal en un cierto intervalo de energías, y si lo es para cierto tipo de radiación no necesariamente lo será para otro. En general, la respuesta del detector es una función del tipo de partícula y de su energía.

3.2.3 TIEMPO DE RESPUESTA

Una de las características más importantes es el *tiempo de respuesta*. Una vez que la radiación alcanza el detector, el tiempo que éste tarde en formar la señal indica el tiempo de respuesta. Dicha señal debe formarse rápidamente en un pico con un flanco de subida casi vertical, y debe durar lo menos posible. Un segundo evento no podrá registrarse mientras exista otra señal, ya sea porque el detector se vuelve insensible o porque la segunda señal se apila sobre la primera, lo cual limita la tasa de conteo a la que se puede operar el detector, contribuyendo al tiempo muerto del mismo.

3.2.4 TIEMPO MUERTO

El *tiempo muerto*, está relacionado directamente con la eficiencia del detector. Es el tiempo que tarda el detector en procesar un evento que usualmente está conectado con la duración del pulso de la señal. Según el tipo de detector puede o no permanecer insensible durante este periodo. Si el detector se mantiene insensible durante el mismo, cualquier evento que suceda entonces se perderá. En cambio si el detector permanece sensible durante este periodo, un evento posterior podría apilarse en el primero distorsionando la señal y resultando en una pérdida de información de ambos. Éstas pérdidas afectan la tasa de conteo, distorsionando la distribución de tiempo entre el arribo de los eventos, por lo que los eventos que provengan de una fuente aleatoria no seguirán una distribución de Poisson para el tiempo [17].

3.2.5 EFICIENCIA DE UN DETECTOR

Existen dos tipos de eficiencia cuando se trata de detectar radiación. La eficiencia absoluta y la eficiencia intrínseca. La eficiencia total o absoluta del detector se define como

$$\mathcal{E}_{tot} = \frac{\textit{eventos registrados}}{\textit{eventos emitidos por la fuente}} \quad \dots (3.1)$$

La cual es una función de la geometría del detector y de la probabilidad de que se dé una interacción en el detector. Si la longitud de camino x en el detector no varía mucho a lo largo de él, y si el camino libre medio λ es despreciable, entonces es posible fraccionar la eficiencia absoluta en dos partes, la eficiencia intrínseca y la eficiencia geométrica o aceptación:

$$\mathcal{E}_{tot} \approx \mathcal{E}_{int} \mathcal{E}_{geom} \quad \dots (3.2)$$

La eficiencia intrínseca es la fracción de eventos registrados en el detector:

$$\mathcal{E}_{int} = \frac{\textit{eventos registrados}}{\textit{eventos emitidos por la fuente}} \quad \dots (3.3)$$

Dicha probabilidad depende de la sección transversal de interacción de la radiación incidente en el medio del detector. Por lo tanto la eficiencia intrínseca es una función del tipo de radiación, de su energía y del material del detector. Para partículas con carga la eficiencia intrínseca es en términos generales buena, puesto que es raro que no produzcan algún tipo de ionización.

La eficiencia geométrica es la fracción de la fuente de radiación interceptada por la geometría del detector, sin embargo debe tomarse en cuenta la distribución angular. En el caso de operar un sistema de múltiple detección donde las coincidencias sean requerimiento es necesario recurrir a simulaciones con el método Monte Carlo. Si se tratase de detectores diseñados para medir la energía de la radiación incidente, entonces la resolución en energía sería el factor más importante [17].

3.3 DETECTORES DE IONIZACIÓN

Los primeros dispositivos eléctricos para detección de radiación, fueron los detectores de ionización. Basados en la colección directa de los electrones y iones producidos en el gas contenido dentro del detector, por la radiación incidente. Algunos de estos dispositivos son las cámaras de ionización, el contador proporcional y el contador Geiger-Müller.

Posteriormente, se inventaron las cámaras proporcionales multialámbricas que son capaces de localizar la trayectoria de partículas con resoluciones menores a un 1mm, por lo que fueron rápidamente adoptadas en los experimentos de física de partículas de altas energías. Hoy en día su uso es muy extenso, debido en parte, a la sofisticación de los instrumentos electrónicos y de la adquisición de datos por computadora.

3.3.1 DETECTORES GASEOSOS DE IONIZACIÓN

La configuración básica para cualquier detector de este tipo es: un contenedor de paredes conductoras que hacen de cátodos, con una ventana de detección delgada y lleno de gas, que suele ser un gas noble, principalmente argón. Entre las paredes conductoras se ubica un ánodo el cual debe estar a un voltaje positivo respecto a los cátodos. Al incidir la radiación a través de la ventana cierto número de pares electrón-ión se crean, ya sea directamente por el paso de una partícula con carga, o indirectamente por medio de reacciones secundarias si se trata de partículas neutras.

El promedio de pares creados es directamente proporcional a la energía depositada en el contador. Bajo la acción del campo eléctrico los electrones viajan hacia el ánodo mientras que los iones positivos lo hacen hacia los cátodos donde son colectados. La señal observada depende de la intensidad del campo eléctrico que a su vez depende del voltaje; cuando éste es cero, no se colecta carga y los pares ion-electrón se recombinan bajo su propia atracción eléctrica. Al incrementar el voltaje, aumenta la cantidad de pares colectados antes de que puedan recombinarse hasta cierto punto, donde todos los pares creados son colectados sin que se note ningún otro efecto al incrementar el voltaje. A un detector trabajando en esta región se le conoce como cámara de ionización.

Si se sigue incrementando el voltaje, se entra en otra región donde el campo eléctrico tiene fuerza suficiente para acelerar los electrones libres primarios a una energía que les permite ionizar a su vez las moléculas del gas, generando nuevos electrones libres secundarios. Éstos son acelerados provocando sucesivamente más ionización, lo que constituye una avalancha o cascada. Este efecto se da rápidamente y exclusivamente, muy cerca del ánodo, dado que el campo eléctrico es mucho más intenso en esa región, siendo el número de pares en la avalancha directamente proporcional al número de electrones primarios. El resultado es una amplificación proporcional de la corriente, con un factor de multiplicación de hasta 10^6 , dependiendo del voltaje de trabajo. Lo anterior contribuye a que la señal de salida sea mayor que la de una cámara de ionización, pero aún en proporción a la ionización original. A un detector operando en esta región se le llama cámara proporcional.

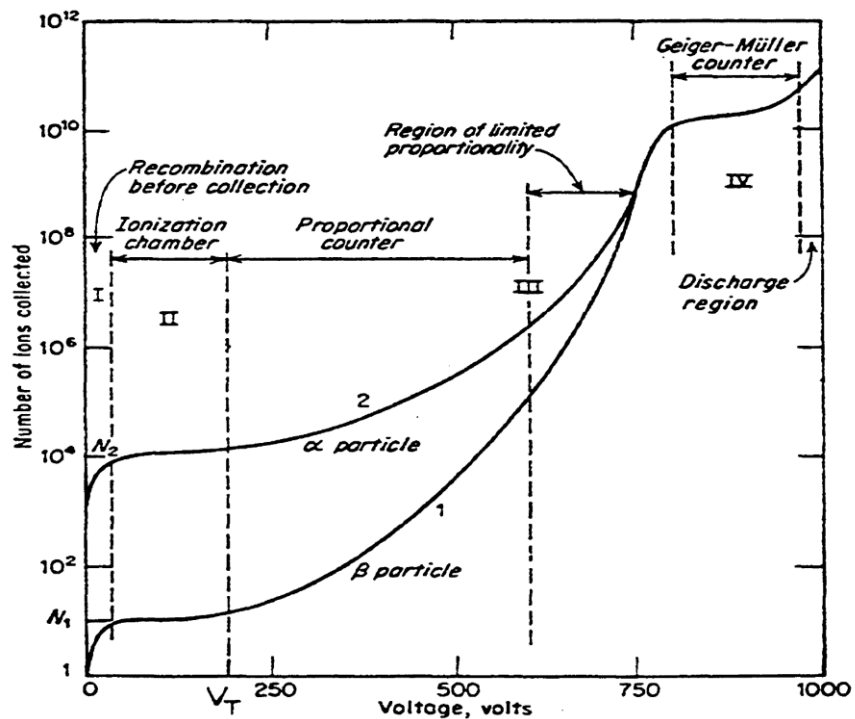


Fig. 3.1 Carga colectada contra voltaje de operación. Distintas regiones en las que pueden operarse un contador gaseoso. (I) Recombinación, (II) Cámara de ionización, (III) Contador proporcional, y (IV) Contador Geiger, [17].

Para un voltaje incluso mayor, la cantidad de ionización es suficientemente grande, tal que la carga espacial generada distorsiona el campo eléctrico alrededor del ánodo y comienza a perderse la proporcionalidad. Ésta, se denomina región de proporcionalidad limitada. Por

encima de esta región, al ir aumentando el voltaje, la energía se vuelve tan grande que suceden descargas continuas en el gas. Físicamente, en lugar de darse avalanchas en un punto del ánodo, se da una reacción en cadena de avalanchas a lo largo del mismo. Cuando las moléculas del gas se desexcitan, emiten fotones que causan ionización, en consecuencia, la señal se satura completamente dando la misma amplitud sin importar la energía del evento inicial. Para detener la descarga, se requiere de un gas capaz de absorber dichos fotones drenando su energía. A los detectores trabajando en esta región se les conoce como contadores Geiger-Müller [17].

3.3.2 MECANISMOS DE IONIZACIÓN Y FENÓMENOS DE TRANSPORTE EN GASES

Esencialmente, son dos los tipos de reacción a través de las cuales una partícula cargada pierde parte de su energía al atravesar la materia: 1) por excitación, 2) por ionización.

Para que se dé la primera, al ser una reacción resonante, se requiere la transferencia de la cantidad exacta de energía. A diferencia de ésta, la ionización no lo requiere, sin embargo este proceso tiene un umbral relativamente alto, favoreciendo el dominio de las reacciones de excitación, ya que la transferencia de baja energía es más probable.

A los electrones creados directamente por la radiación se les conoce como *ionización primaria*, aunque en cierto número de ionizaciones se transfiere una cantidad suficiente de energía a los electrones (rayos delta) tal que estos crean *ionización secundaria*.

Un segundo mecanismo de ionización en gases es el *Efecto Penning*. Para algunos átomos, estados metaestables se excitan y debido a una gran diferencia de paridad de spin, son incapaces de desexcitarse inmediatamente al estado base emitiendo un fotón. Sin embargo, pueden hacerlo mediante una colisión con otro átomo resultando en una posterior ionización.

Otro mecanismo, también importante en los gases nobles, es la formación de iones moleculares, donde un ión positivo interactúa con un átomo neutro del mismo tipo para formar un ión molecular.

Es importante hablar acerca de la energía promedio requerida para producir un par ión-electrón. Como las reacciones ionizantes son estadísticas en su naturaleza, en general dos partículas idénticas no producirán el mismo número de pares electrón-ión. El número promedio de pares electrón-ion es de 1 par por 30eV de pérdida de energía. Este valor promedio no depende fuertemente del tipo de partícula, y sólo depende débilmente del tipo de gas, pero sigue siendo importante para la eficiencia y la resolución en energía del detector. Sólo una cierta fracción de toda la energía perdida por la partícula se transforma en ionización.

La cantidad total de ionización de todos los procesos, se caracteriza por la energía W invertida en promedio en la creación de un electrón libre

$$W\langle N_1 \rangle = L \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \quad \dots (3.4)$$

Así mismo, es igualmente importante que los pares electrón-ión permanezcan libres el tiempo suficiente para ser colectados. Sin embargo, existen dos mecanismos que dificultan esta situación: la **recombinación** y la **adhesión de electrones**. En el primero sucede que cuando no hay campo eléctrico, los pares electrón-ion se recombinan bajo la fuerza de su propia atracción eléctrica, emitiendo un fotón en el proceso. Con los iones moleculares sucede una recombinación similar, donde su respectiva tasa de recombinaciones, depende de la concentración de iones negativos y positivos:

$$dn = bn^-n^+ dt \quad \dots (3.5)$$

donde b es una constante dependiente del tipo de gas y n^- n^+ son las concentraciones negativas y positivas respectivamente. Si hacemos $n^- = n^+ = n$, integrando obtenemos:

$$n = \frac{n_0}{1 + bn_0 t} \quad \dots (3.6)$$

con n_0 la concentración inicial en $t = 0$.

Por otra parte, la adhesión de electrones involucra la captura de electrones libres por átomos electronegativos para formar iones negativos. Tales átomos, tienen su capa externa casi completa, por lo que liberan energía al adherirse un electrón extra, por lo tanto, el ión negativo recién formado es estable. A la energía liberada en este proceso se le llama *afinidad del electrón*. Si algún gas electronegativo como el O_2 , CO_2 , CCL_4 u otros, están presentes en el detector, pueden disminuir severamente la eficiencia de recolección electrón-ión al capturar electrones antes de alcanzar los electrodos [17].

3.3.3 COMPORTAMIENTO DE IONES Y ELECTRONES EN UN GAS

Los iones y electrones son acelerados en la presencia de un campo eléctrico a lo largo de sus líneas de campo, sin embargo las colisiones con las moléculas de gas limitan la velocidad máxima a la que pueden viajar. A ésta se le denomina *velocidad de deriva*, la cual se superpone a su movimiento normal aleatorio.

Por otra parte a la movilidad de una carga se le define como

$$\mu = u/E \quad \dots (3.7)$$

donde u es la velocidad de deriva y E es el campo de fuerza eléctrica, para los iones positivos, la velocidad de deriva depende linealmente del campo eléctrico reducido E/p , hasta relativamente valores muy altos del campo eléctrico. Si la presión es constante, ello implica que la movilidad μ es constante, si E varía, entonces μ lo hace inversamente a la presión p .

La *dispersión*, se da cuando en la ausencia de un campo eléctrico, los iones y electrones liberados se alejan uniformemente de su punto de creación. Durante este proceso, pierden energía mediante colisiones con las moléculas de gas, alcanzando rápidamente el equilibrio térmico con el gas y recombinándose. A energías térmicas, la distribución de Maxwell describe la velocidad media de las cargas como:

$$v = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \quad \dots (3.8)$$

donde k es la constante de Boltzmann, T es la temperatura y m la masa de la partícula. Al ser los electrones menos masivos que los iones positivos, su velocidad es de pocas veces 10^6 m/s mientras que la de los iones es del orden de 10^4 cm/s [17].

Recordando un poco la teoría cinética, la distribución lineal de cargas después de un tiempo de dispersión t , tiene una forma Gaussiana:

$$\frac{dN}{dx} = \frac{N_0}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-\left(\frac{x^2}{4Dt}\right)} \quad \dots (3.9)$$

donde N_0 es el número total de cargas, x es la distancia desde el punto de creación y D es el coeficiente de dispersión.

Si la desviación estándar de la dispersión en x es:

$$\sigma(x) = \sqrt{2Dt} \quad \dots (3.10)$$

Entonces la distribución esférica de cargas después de un tiempo de dispersión t en tres dimensiones es:

$$\sigma(r) = \sqrt{6Dt} \quad \dots (3.11)$$

donde r es la distancia radial y el coeficiente de dispersión es:

$$D = \frac{1}{3} v\lambda \quad \dots (3.12)$$

con λ como el camino libre medio del electrón o ión, en el gas. Tratándose de un gas ideal clásico, el camino libre medio está relacionado con la temperatura T y la presión p por

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{kT}{\sigma_0 p} \quad \dots (3.13)$$

donde σ_0 es la sección transversal de colisión con una molécula de gas. Substituyendo la ecuación para v y λ en D se obtiene la expresión explícita:

$$D = \frac{2}{3\sqrt{\pi}} \frac{1}{p\sigma_0} \sqrt{\frac{(kT)^3}{m}} \quad \dots (3.14)$$

Puede observarse cómo D depende de múltiples parámetros del gas. Ahora, en un gas ideal donde las cargas en movimiento permanecen en equilibrio térmico, la movilidad se relaciona con la constante de dispersión de la siguiente forma:

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{e} \quad \dots (3.15)$$

A esta expresión se le conoce como la relación de Einstein [17].

A diferencia de los iones positivos, la movilidad de los electrones es mucho mayor, siendo ésta función de E . Al incrementarse la ganancia en velocidad de los electrones, puede verse afectada la tasa de dispersión si la energía promedio de los electrones, excede las energías térmicas. El factor kT es remplazado entonces en la relación de Einstein por la energía promedio. Lo que resulta en un incremento en la constante de dispersión D , lo que causa un mayor esparcimiento de la nube de electrones. Esto tiene consecuencias de importancia para detectores tales como las cámaras de deriva, las cuales intentan determinar la posición de la trayectoria de una partícula midiendo el tiempo de deriva de los electrones de la ionización.

3.3.4 MULTIPLICACIÓN DE AVALANCHAS Y CREACIÓN DE PULSOS

Cuando en un detector de gas los electrones, producto de la ionización primaria, obtienen suficiente energía del campo eléctrico para poder ionizar a su vez a las moléculas del gas, ocurre la multiplicación. Los electrones secundarios, ionizan nuevamente a las moléculas del gas, y este proceso se repite conforme los electrones se aproximan al ánodo, dando origen a la formación de avalanchas que continúan creciendo hasta ser colectadas. En la Fig. 3.2 se muestra la forma de una avalancha similar a una gota, con los electrones agrupándose cerca de la cabeza y los iones positivos más pesados detrás en la cola. Conforme los electrones viajan hacia el alambre más cercano, el campo eléctrico E se intensifica en la vecindad del mismo a una distancia equivalente al radio del alambre. El campo eléctrico está dado por la densidad de carga lineal λ :

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} \quad \dots (3.16)$$

Si α es el camino libre medio del electrón para una colisión que genere ionización secundaria, entonces $1/\alpha$ es la probabilidad de una ionización por unidad de longitud de camino, la cual se conoce como el primer coeficiente de Townsend.

El factor de multiplicación, se calcula para n electrones en un camino dx como sigue:

$$dn = n\alpha dx \quad \dots (3.17)$$

nuevos electrones creados. Si integramos el número total de electrones creados en una distancia xx , entonces:

$$n = n_0 e^{\alpha x} \quad \dots (3.18)$$

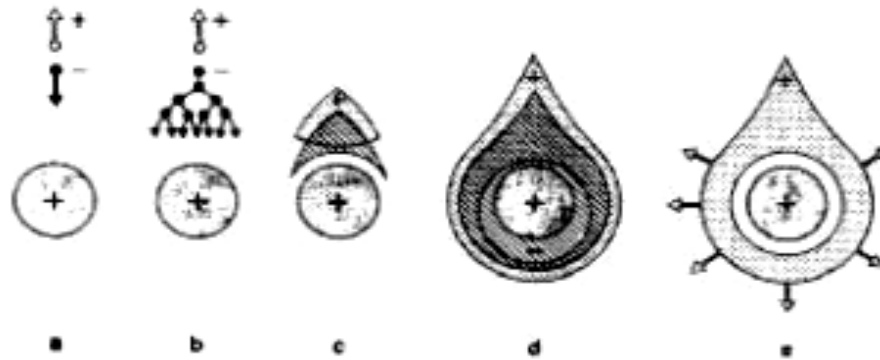


Fig. 3.2 Diagrama de la evolución temporal de una avalancha alrededor del ánodo. El tiempo total transcurrido desde $t(a)$ hasta $t(e)$ es aproximadamente 100 ns [18].

donde n_0 es el número original de electrones. Por lo tanto el factor de multiplicación es:

$$M = n/n_0 = e^{\alpha x} \quad \dots (3.19)$$

dicho factor es fundamental para desarrollar contadores proporcionales.

Antes se ha mencionado que la señal del pulso en dispositivos de ionización, se forma al colectarse la carga, sin embargo dicho proceso se da por la inducción debida al movimiento de los iones y de los electrones conforme se dirigen hacia el cátodo y el ánodo respectivamente.

Veamos el caso más simple, el de un contador proporcional de paredes cilíndricas con un solo alambre a lo largo de su eje. Supongamos que una carga pequeña q que viaja entre dos puntos 1 y 2 bajo la influencia del campo E , reduce la energía eléctrica ε del condensador por una cantidad:

$$\Delta\varepsilon = \int_1^2 qE \cdot dr = q(\Phi_1 - \Phi_2) \quad \dots (3.20)$$

proporcional a la diferencia de potencial entre los dos puntos. Este cambio en la energía es la fuente de la señal. Los iones positivos tienen casi la totalidad de la diferencia de potencial entre los electrodos, cerca de dos órdenes de magnitud más que los electrones. En

consecuencia, casi toda la energía y la señal en un contador proporcional se deben al movimiento de los iones positivos.

La diferencia de energía, como una función del tiempo, puede calcularse a partir del movimiento de los iones positivos desde el radio a del alambre:

$$\Delta\varepsilon = \int_a^{R(t)} qE \cdot dr = \int_a^{R(t)} \frac{q\lambda dr}{2\pi\varepsilon_0 r} = \frac{q\lambda}{2\pi\varepsilon_0} \ln \frac{R(t)}{a} \quad \dots (3.21)$$

El radio R alcanzado al tiempo t se obtiene usando la expresión para la velocidad de deriva de los iones. A pesar de que μ varía según la región del campo eléctrico en la que se halle el ion puede usarse un valor constante efectivo de μ para obtener una buena aproximación:

$$\Delta\varepsilon(t) = q \frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0} \ln \left(1 + \frac{t}{t_0} \right) \quad \dots (3.22)$$

resultando un tiempo característico:

$$t_0 = \frac{a}{2\mu E(a)} \quad \dots (3.23)$$

expresado en términos del campo sobre la superficie del alambre, el radio del alambre, y la movilidad del ión. Para un contador típico, t_0 es del orden de 1 ns. El cambio de energía continúa hasta que los iones alcancen la pared a un radio b , siendo el cambio en la energía total:

$$(\Delta\varepsilon)_{tot} = \frac{q\lambda}{2\pi\varepsilon_0} \ln \frac{b}{a} = qV \quad \dots (3.24)$$

reescribiendo el cambio en la energía como función del tiempo tenemos:

$$\Delta\varepsilon = qVF(t) \quad \dots (3.25)$$

con

$$F(t) = \frac{\ln(1 + t/t_0)}{2 \ln(b/a)} \quad \dots (3.26)$$

donde $F(t)$ va de 0 a 1. Depende de las dimensiones del contador y de la velocidad de deriva de los iones cerca del alambre [19]. En un ejemplo de un contador típico se observa que $F(t)$ tarda en alcanzar el valor 1 después de $320 \mu s$ y el valor de 0.5 después de $1 \mu s$.

3.3.5 ELECCIÓN DEL GAS IONIZANTE

Los factores que definen la elección del gas ionizante son: bajo voltaje de operación, buena proporcionalidad, mayor ganancia y alta tasa de ionización. Para tener un mínimo voltaje de trabajo, son los gases nobles los que requieren de las menores intensidades de campo eléctrico para la formación de avalanchas. El argón es usualmente preferido por su bajo costo y alta ionización, sin embargo no es posible obtener ganancias mayores de $10^3 - 10^4$ sin que ocurran descargas continuas. Esto se debe a que los átomos que son excitados durante la generación de avalanchas se desexcitan emitiendo fotones con energía suficiente para ionizar los cátodos creando nuevas avalanchas. El problema se resuelve agregando algún gas poli-atómico conocidos como *apagadores*, como el metano y el alcohol, o como algunos gases inorgánicos como el CO_2 , BF_3 que también pueden usarse.

Las moléculas de estos gases capturan los fotones, disipando su energía mediante disociación o colisiones elásticas. Incluso un porcentaje pequeño de los citados gases en la mezcla permite elevar el conteo hasta ganancias de 10^6 , siendo el porcentaje de entre el 10% y 20% del total de la mezcla. El uso de gases inorgánicos introduce mayores problemas que necesitan agregar otro tipo de gases. Sin embargo, aunque no presentan problemas extra, los gases inorgánicos son menos eficientes [17].

Para un contador sellado existe una eventualidad extra, la gran cantidad de *apagador* consumido en cada evento de detección. A una ganancia de 10^6 asumiendo 100 pares ion-electrón por evento, alrededor de 10^8 moléculas son disociadas por evento. En

consecuencia, después de aproximadamente 10^{10} eventos en un volumen de 10 cm^3 10 cm^3 , con una mezcla 90%--10% a presión atmosférica, se observan cambios en las características de operación. Solucionar tal eventualidad condiciona un flujo continuo de gas en el contador.

3.4 CÁMARAS MULTIALÁMBRICAS

En la física experimental de partículas uno de los requerimientos básicos es la determinación de la trayectoria de las partículas. Antes de la invención de las cámaras multialámbricas en 1968 por el físico Charpak, todos los detectores de trayectoria eran ópticos en esencia, emulsiones fotográficas, la cámara de niebla, la cámara de chispas, etc. Hacía falta filmar las trayectorias para después analizar cuadro por cuadro los eventos de interés. Con su invención Charpak mostró que era posible tener un arreglo de muchos alambres cercanos haciendo la función de ánodos y actuando cada uno como un contador proporcional independiente. Añadiendo la electrónica cada alambre tuvo su propio amplificador, lográndose un detector de posición muy práctico. Fueron adoptadas por la física de altas energías rápidamente encontrándose diversas aplicaciones en el campo de la astrofísica, cristalografía, medicina, arqueología, etc.

En este caso, el propósito de esta tesis es mejorar el desempeño de las MWPC's que son los elementos troncales del detector de muones, cuya aplicación es arqueológica. Entender los principios de operación y la estructura de las cámaras, así como, la formación de pulsos dentro ellas y el funcionamiento del sistema de lectura (*líneas de retardo*) es imprescindible para poder mejorar su eficiencia. Las siguientes secciones tratan los temas.

3.4.1 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN EN CÁMARAS MULTIALÁMBRICAS

El principio básico de una MWPC, consiste en un plano de alambres anódicos equidistantes, centrados entre dos planos de cátodos paralelos. Usualmente los alambres están espaciados entre sí a 2 mm, mientras que la distancia cátodo-ánodo es de 7 u 8 mm. Si se aplica un voltaje negativo a los cátodos se obtiene una configuración del campo eléctrico como se muestra en la Fig. 3.3. A excepción de la zona cercana a la superficie de los alambres, las líneas de campo son esencialmente paralelas y casi constantes. Para el caso simplificado en que los alambres tienen diámetro cero y el plano en que se encuentran se asume infinito, el potencial eléctrico es:

$$V(x, y) = -\frac{CV}{4\pi\epsilon} \ln \left[4 \left(\sin^2 \frac{\pi x}{s} + \sinh^2 \frac{\pi y}{s} \right) \right] \quad \dots (3.27)$$

donde V es el voltaje aplicado, s la distancia entre los alambres, y C es la capacitancia del ánodo-cátodo. Si $L \gg s \gg d$ la capacitancia está dada por

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\frac{\pi L}{s} - \ln \frac{\pi d}{s}} \quad \dots (3.28)$$

Con L la separación entre ánodo y cátodo, d el diámetro del alambre. Estas ecuaciones no describen el comportamiento en una cámara real, pero son buenas aproximaciones. Al igual que en las cámaras proporcionales, el campo E tiene una dependencia como $1/r$, que define las líneas de campo que guían electrones y iones hacia el ánodo y cátodo respectivamente. En la región donde el campo es más intenso los electrones son acelerados dando origen a las avalanchas, induciendo una señal negativa en el ánodo y positiva pero de menor amplitud en los alambres contiguos, como ya he mencionado que sucede en las cámaras proporcionales [17].

Para obtener información de dos coordenadas, puede colocarse una segunda MWPC con los alambres perpendiculares a la primera. Si además se quiere medir la trayectoria de las partículas, entonces por lo menos se necesita alinear dos arreglos X-Y como el mencionado para formar un “telescopio” y reconstruir las trayectorias.

La resolución espacial de una MWPC depende del espacio entre alambres, usualmente suele ser de la mitad de dicho espacio. La distancia típica de separación es de 2 mm , por ende tiene una resolución espacial de $\approx \pm 1\text{ mm}$. Adicionalmente estas cámaras tienen la capacidad de determinar múltiples trayectorias.

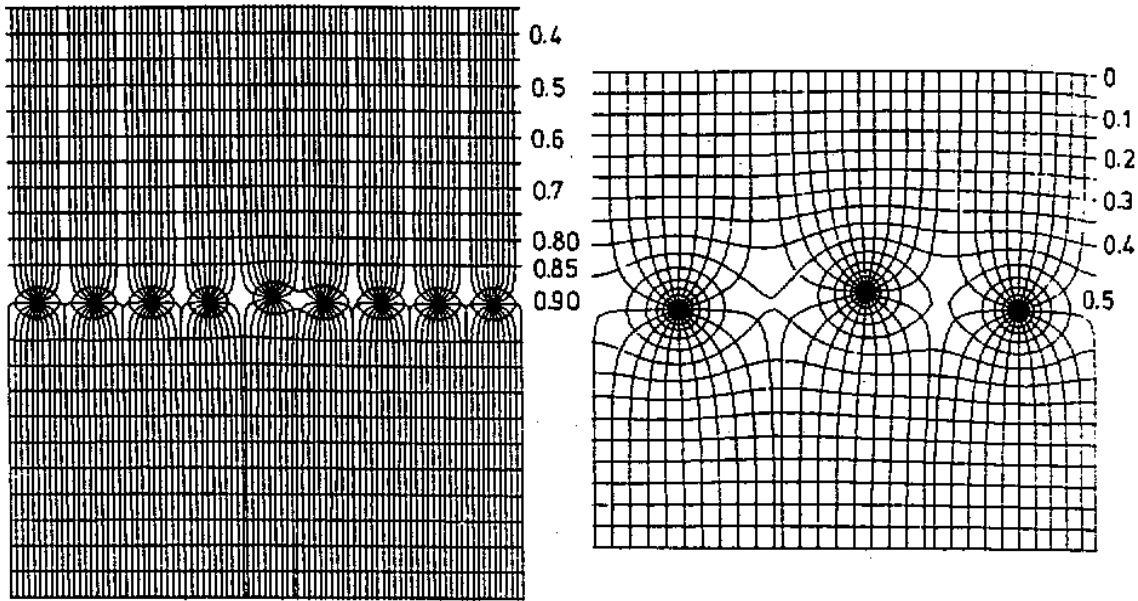


Fig. 3.3 Líneas del campo eléctrico y del potencial en una MWPC [18].

3.4.2 ESTRUCTURA DE LAS CÁMARAS MULTIALÁMBRICAS

El principal problema en MWPC de grandes dimensiones, de 1 m^2 o más, como las empleadas en el detector de muones, es el tendido de los alambres. La forma común de resolverlo es soldando los alambres de tungsteno recubiertos de oro de $25\ \mu\text{m}$ de diámetro directamente sobre las pistas de un circuito integrado previamente montado sobre el marco que da soporte a toda la cámara. El marco, por lo general se elige de aluminio por su ligereza y rigidez. Los cátodos, están hechos con hojas delgadas de cobre adheridas a placas de acrílico que a su vez son las ventanas de la MWPC. Se ensamblan las tres piezas con O-rings entre las mismas para evitar fugas, y se atornillan a lo largo de las orillas.

La estabilidad eléctrica y mecánica de los alambres es determinante para hacer mediciones precisas de la posición. Dado que existe una repulsión electrostática entre los alambres una

vez que se aplica voltaje a los electrodos, esta debe ser compensada con la tensión mecánica adecuada sobre los alambres. La tensión mínima necesaria es:

$$T > \frac{1}{4\pi\epsilon} \left(\frac{CVL}{s} \right)^2 \quad \dots (3.29)$$

para un voltaje dado V , una longitud del alambre L , capacitancia C y espaciado entre alambres s . La máxima tensión aplicable depende del grosor y elasticidad del alambre. En caso de no ser suficiente la tensión, los alambres se desplazan a una nueva posición de equilibrio, hacia arriba y hacia abajo del plano del ánodo alternativamente, como en la Fig. 3.3 [20]. Otra situación que se presenta en las MWPC grandes es que se curvan hacia dentro en su región central, cambiando la distancia ánodo-cátodo y el factor de multiplicación. En estos casos, es necesario colocar un soporte, considerando que su presencia modifica el campo y requiere añadir algún electrodo corrector para restaurar el campo [21].

3.4.3 SISTEMA DE LECTURA

En la práctica, existen distintos métodos para extraer la información de las MWPC. Uno de ellos es considerar cada uno de los alambres como un detector independiente con su propia electrónica asociada. Otra posibilidad, es utilizar el método del *centro de gravedad* que conlleva el uso de tiras individuales de cobre para conformar los cátodos, orientadas ortogonalmente a la dirección de los alambres del ánodo. También existe el método llamado *división de carga*, el cual utiliza el principio de que la carga colectada a cada extremo de un alambre anódico resistivo, se divide en proporción a la longitud del alambre a partir del punto donde la carga es inyectada.

El método análogo más sencillo y el primero en utilizarse, es *la técnica de las líneas de retardo* que fue desarrollada antes que estuviera disponible electrónica más sofisticada. La técnica consiste en acoplar capacitivamente líneas externas de retardo a los cátodos o al ánodo. Utilizando la señal del ánodo o alguna otra como disparo inicial, que puede ser de otro detector de partículas, se mide la diferencia temporal entre la llegada de la señal a cada extremo de la línea de retardo [17].

3.4.4 SEÑALES MÚLTIPLES PARA UNA TRAYECTORIA

Es importante aclarar, que no necesariamente se registra únicamente un pulso proveniente de un alambre. Las partículas que inciden angularmente al plano de los alambres, por lo general producen un “racimo” de señales a su paso por múltiples alambres. Incluso las partículas que inciden perpendicularmente al crear rayos delta, producen múltiples disparos de vez en cuando. A pesar de ello, las señales producidas por los alambres son diferidas en un lapso de tiempo correspondiente al tiempo de deriva de los electrones. Pero la señal que importa es la primera en llegar, lo que implica ser la más cercana al evento. La forma común de limitar el tamaño del “racimo” es ajustando la anchura de la señal de selección en la electrónica, eliminando los electrones que llegan tarde. De esta manera es posible limitar a uno o dos alambres dependiendo del ángulo de la trayectoria.

Para una MWPC con una separación típica de 2 mm y una distancia entre planos de 8 mm , la señal de selección debe de ser de 30 ns , si el intervalo fuese menor, comenzarían a perderse eventos válidos y decaería la eficiencia de detección [17].

Otra opción es aumentar el porcentaje del gas electronegativo, disminuyendo con ello la probabilidad de que los electrones producidos en regiones distantes de la cámara alcancen los ánodos, limitando así el número de alambres que producen señal. La cantidad de gas electronegativo que puede añadirse depende de la buena eficiencia de la cámara.

3.4.5 EFICIENCIA DE LAS CÁMARAS MULTIALÁMBRICAS

El número total de pares ion-electrón producidos y colectados en la MWPC, define la eficiencia intrínseca de la misma, la cual depende a su vez de múltiples factores como lo son: el dE/dx del gas ionizante, su presión, la cantidad de gas electronegativo, la distancia entre planos, el alto voltaje aplicado, el valor del discriminador en la electrónica, el ancho de la señal de selección, etc. Suponiendo que las distancias entre alambres y entre planos son correctas, y que la composición del gas es adecuada, los factores determinantes son el alto voltaje y la electrónica. Es posible alcanzar eficiencias del 99% para partículas con carga si las condiciones son óptimas.

El procedimiento usual para evaluar la eficiencia de las MWPC, es colocarla bajo un haz de protones, “ensandwichada” entre dos centelladores y usar la coincidencia entre los tres

detectores como disparo; de esta forma, el número de eventos sencillos contra el número de disparos indica la eficiencia. De ésta, uno puede cerciorarse encontrando una meseta al acercarse al 100% de eficiencia, de donde se elige un valor medio de la misma como voltaje de trabajo.

Por otra parte, el valor del discriminador debe ser suficientemente bajo para permitir el registro de todos los eventos válidos sin permitir que pase ruido, 1/10 de la amplitud suele ser suficiente para obtener el máximo en eficiencia. Un factor extra que afecta la eficiencia es la tasa de conteo. Si se fija el voltaje, la eficiencia decrece al aumentar el flujo de partículas incidentes. Tal suceso obedece a la acumulación de carga espacial alrededor de los alambres como consecuencia de la baja velocidad de deriva de los iones liberados en las avalanchas. La carga espacial provoca una perturbación en el campo eléctrico disminuyendo la ganancia alrededor del alambre y ocasionando que el espectro de amplitudes disminuya en promedio. Como consecuencia se pierde una parte de éste por debajo del discriminador, afectando la eficiencia de la MWPC. Elevando el voltaje es posible recuperar hasta cierto punto la eficiencia, sin embargo la meseta se estrecha [17].

3.5 FOTOMULTIPLICADORES

El tubo fotomultiplicador o PMT (Photo Multiplier Tube), es un dispositivo extremadamente sensible que transforma luz en una corriente eléctrica que puede ser medida. Esta característica es aprovechada para hacer investigación en el campo de la física nuclear y de las altas energías, al asociar los PMT's con los detectores de centelleo. Existe una gran variedad de sensibilidades en en este tipo de aparatos en la región del ultravioleta, el visible y cerca del infrarrojo del espectro electromagnético.

Un fotomultiplicador típico, consiste en un cátodo hecho de material fotosensible seguido por un sistema de colección de electrones, de una sección multiplicadora de electrones o cadena de dinodos y finalmente de un ánodo, del cual se toma la señal resultante. Generalmente, estas estructuras se colocan en un tubo de vidrio al vacío, por lo que lucen como los antiguos bulbos.

Para que los PMTs sean operados, necesitan que la estructura conformada por el cátodo, los dinodos y el ánodo, sea alimentada con alto voltaje formando una “escalera” de potencial a lo largo de la misma. La forma con la cual se logra mantener la diferencia de potencial entre estos elementos, es implementando un divisor de voltaje que consiste en un arreglo de resistencias colocadas en serie y la fuente de alto voltaje.

Cuando un fotón incide en el fotocátodo, un fotoelectrón es emitido vía el efecto fotoeléctrico y como existe un potencial eléctrico, el electrón es acelerado en dirección del primer dinodo, que tras colisionar él, transfiere parte de su energía a los electrones en el mismo. Esto, provoca que electrones secundarios sean emitidos y acelerados a su vez por el segundo dinodo, y así sucesivamente. De esta manera, se crea una cascada de electrones a lo largo de la cadena de dinodos que es colectada en el ánodo, arrojando una corriente que puede ser amplificada y analizada (ver Fig.3.4).

Si el fotomultiplicador va a ser operado con un centellador, debe ser operado en modo de pulso. En caso de que el cátodo y el sistema de dinodos se asuman lineales, la corriente a la salida del PMT será directamente proporcional al número de fotones incidentes.

El proceso de fotoemisión, comienza cuando un fotón incide en el fotocátodo y es absorbido, transfiriendo su energía a un electrón del material fotoemisor, lo cual puede representarse con la fórmula de Einstein (efecto fotoeléctrico):

$$E = h\nu - \phi \quad \dots (3.30)$$

donde E es la energía cinética del electrón emitido, ν la frecuencia de la luz incidente y ϕ la función trabajo. De aquí se deduce, que se necesita una cierta frecuencia mínima para darse el efecto fotoeléctrico. Sin embargo, aún para frecuencias mayores a la requerida, la probabilidad para este efecto no llega al 100%. Ya que, la eficiencia para la conversión del efecto fotoeléctrico varía mucho con la frecuencia de la luz incidente y la estructura del material. Ésta respuesta espectral, se expresa por la eficiencia cuántica $\eta(\lambda)$, donde

$$\eta(\lambda) = \frac{\text{número de electrones liberados}}{\text{número de fotones incidentes en el cátodo}(\lambda)} \quad \dots (3.31)$$

Con λ la longitud de onda de la luz incidente.

En general, la respuesta espectral de los materiales fotoeléctricos comúnmente utilizados en PMT's es tal, que sólo una cierta banda de longitudes de onda es eficientemente convertida. Por ello, ésta debe ser la primera consideración para escoger uno de estos instrumentos.

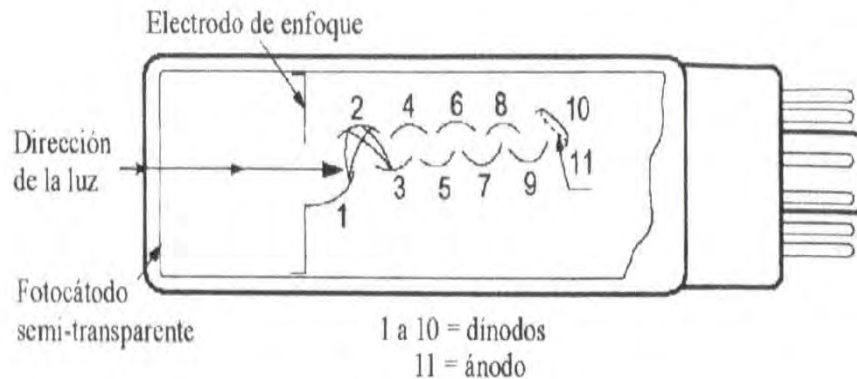


Fig.3.4 Diagrama de los componentes y del funcionamiento de un Tubo Fotomultiplicador.

El factor total de amplificación de un PMT, depende del número de dinodos en la sección multiplicadora y el factor δ de emisión secundaria, el cual es una función de la energía del electrón primario. La energía de los electrones incidentes, es una función de la diferencia de potencial V_d entre los dinodos, que puede escribirse como:

$$\delta = KV_d \quad \dots (3.32)$$

con K la constante de proporcionalidad. Si asumimos que el voltaje aplicado se divide igualmente entre los dinodos, la ganancia total de un fotomultiplicador, está dada por la expresión:

$$G = \delta^n = (KV_d)^n \quad \dots (3.33)$$

donde K es una constante de proporcionalidad, V_d es la diferencia de potencial entre los dinodos y δ es el factor de emisión secundario.

Por ejemplo, para diez etapas de un dinodo convencional caracterizado por un valor típico $\delta = 5$ y donde K es muy cercano a la unidad en la mayoría de los PMT's comerciales, se obtendría una ganancia total de 5^{10} equivalente a 10^7 .

Sin embargo, para pulsos que varían de tamaño, desde el producido por un fotoelectrón, hasta el ocasionado por varios miles de ellos, la amplitud del pulso colectado en el ánodo está relacionada linealmente con el número de fotoelectrones y consecuentemente a la intensidad del destello producido en el centellador. Sin embargo, debido a efectos de carga espacial entre el último dinodo y el ánodo, donde el número de electrones es muy grande, pueden presentarse casos de no-linealidad para pulsos muy grandes. El efecto de carga espacial afecta las trayectorias de los electrones en esa región provocando que muchos de ellos no sean colectados [17].

3.6 DETECTORES DE CENTELLEO

Como su nombre lo dice los detectores de centelleo emiten luz al ser impactados por una partícula o por radiación. Si se le acopla un dispositivo amplificador como lo es un fotomultiplicador, tales destellos, pueden ser convertidos en pulsos eléctricos para posteriormente ser analizados y contados electrónicamente con el objetivo de extraer la información concerniente a la radiación incidente.

El primer pseudo detector de centelleo era observado con los ojos a principios del siglo pasado, en los años 40's se añadieron los entonces tubos fotomultiplicadores (PMT) que le dieron eficiencia y fiabilidad.

Este tipo de detectores, que cumplen la función de “cronómetro” como parte del detector de muones, son los que proporcionan la resolución temporal que permite distinguir entre eventos distintos. Su correcta calibración a partir de determinar su voltaje de operación, incide radicalmente en la eficiencia del detector de muones.

3.6.1 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DE LOS CENTELLADORES

Como ya he mencionado en el párrafo anterior, un detector de centelleo está hecho de dos elementos: un material centellador ópticamente acoplado a un fotomultiplicador, ya sea directamente o vía una guía de luz. Sucede que cuando la radiación atraviesa el material centellador, excita los átomos y las moléculas de éste, haciendo que el centellador emita luz. Dicha luz, es transmitida hacia el PMT donde se convierte en una corriente débil de fotoelectrones, que luego son amplificados para que la señal resultante sea posteriormente analizada.

Los aspectos más importantes que provee un detector de centelleo, son por un lado la *Sensibilidad a la energía*. Por encima de un cierto valor de la energía, la mayoría de los centelladores se comportan casi linealmente respecto a la energía depositada, siendo proporcional la luz emitida por el centellador a la energía de excitación. Además si el PMT es operado correctamente, éste funciona como un dispositivo lineal, tal que la señal eléctrica final saldrá en proporción a la energía. El otro aspecto importante, es el *Tiempo rápido de respuesta* y de recuperación, que en los centelladores son cortos en relación con otro tipo de detectores. Esto permite tener información temporal con gran precisión, como lo es la diferencia de tiempo entre dos eventos. Otro punto a su favor es la alta tasa de conteo debida a su corto tiempo de recuperación, disminuyendo el tiempo muerto del detector.

Por otra parte, un buen centellador debe cumplir varios requerimientos:

- 1) Alta eficiencia para la conversión de energía de excitación a radiación fluorescente
- 2) Transparencia a su radiación fluorescente que permita una buena transmisión de luz
- 3) Debe haber consistencia entre el rango espectral de emisión con el espectro de respuesta del PMT
- 4) La constante τ de decaimiento debe ser pequeña

Existen seis variedades de materiales centelladores en uso: cristales orgánicos, líquidos orgánicos, plásticos, cristales inorgánicos, gases y vidrios. La luminiscencia es la principal propiedad que tienen estos materiales y su buen desempeño depende en gran parte de tal propiedad [17].

Los materiales centelladores, al ser expuestos a energía en forma de luz, calor, radiación, etc., la absorben y reemiten como luz visible. Si tal reemisión transcurre en un lapso del orden de 10^{-8} s, que corresponde al tiempo que toman las transiciones atómicas, se le denomina fluorescencia. Si tal reemisión se retrasa, porque el estado excitado es metaestable, se le llama fosforescencia. En este caso el intervalo de tiempo varía según el material, y puede durar desde algunos microsegundos hasta horas.

En física de partículas y en física nuclear es muy común el uso de centelladores plásticos, que al igual que los líquidos orgánicos, son también soluciones de centelladores orgánicos pero en un solvente plástico sólido. En general los plásticos centelladores producen una señal extremadamente rápida con una constante de decaimiento de 2 o 3 ns, además de alta salida de luz [22].

3.6.2 RESPUESTA DE SALIDA Y LINEALIDAD

En pocas palabras, la respuesta de salida es la eficiencia para convertir energía de ionización en fotones, la cual determina la eficiencia y la resolución del centellador. La salida de luz es distinta para cada partícula, incluso para un mismo tipo de partícula no siempre varía linealmente con la energía.

La estimación de la luz de salida de los centelladores, tradicionalmente se refiere al antraceno y está dada como porcentaje de la salida de luz del antraceno. Cabe recordar que para considerar la eficiencia del centellador debe considerarse la del fotomultiplicador, ya que están permanentemente acoplados.

También, hay que hacer notar, que la respuesta de los centelladores respecto a la energía de excitación suele asumirse como lineal, es decir que la luz fluorescente emitida L es directamente proporcional a la energía depositada por la partícula ionizante. Para muchas aplicaciones puede considerarse como lineal, pero no en todos los casos, ya que la respuesta de los centelladores es una función compleja que no depende únicamente de la energía, sino del tipo de partícula y de su ionización específica. Por ejemplo, para los centelladores orgánicos, se han observado comportamientos no lineales para electrones con

energías por debajo de los 125 *KeV*, en contraste para partículas más pesadas, las desviaciones son más pronunciadas.

Por último, existe una dependencia de la temperatura, sin embargo, ésta no es importante para los centelladores orgánicos o plásticos si son operados entre los 20°C y los -60°C, pues la salida de luz apenas cae a un 95% a 60°C.

4. DETECTOR DE MUONES, ELECTRÓNICA Y ADQUISICIÓN DE DATOS

A lo largo de este capítulo, se describen los elementos de nuestro detector de muones: MWPC's, centelladores, electrónica y hardware para adquisición de datos. También, se explican las distintas configuraciones electrónicas utilizadas en las pruebas.

4.1 DETECTOR DE MUONES

El detector de muones fue diseñado en función de las propiedades físicas de los muones y de la geometría del cuerpo de la pirámide, así como del lugar donde se planea colocarlo y la frecuencia de eventos detectados dentro de la cueva (alrededor de 1 Hz **30 Hz**). Debe cumplir con una resolución en tiempo y espacio que permita la reconstrucción de las trayectorias de las partículas con suficiente precisión [23].

Se trata de un detector híbrido, integrado a su vez por dos tipos de detectores, Fig.4.1. Por una parte, están los centelladores orgánicos, hechos de un polímero que contiene anillos de benceno. En ellos, los muones interactúan con las moléculas orgánicas, cediéndoles energía. Al desexcitarse, éstas emiten luz en la región verde del espectro visible. Los centelladores que se utilizaron fueron placas cuadradas con dimensiones de 1 m² por 2 cm de espesor, envueltos en dos capas de papel Tyvek® hecho a base de fibras de polietileno de alta densidad que le dan a este papel una gran flexibilidad, durabilidad y principalmente reflejan un gran porcentaje de luz. Además, tres de los costados de los centelladores, están recubiertos de pintura blanca, para también reflejar la luz y así perder lo menos posible las señales luminosas. El costado restante tiene acoplada una barra colectora, que re-emite en el azul la luz verde que recibe, para luego ser capturada por un fotomultiplicador (PMT) adherido a uno de los extremos de la barra. El PMT requiere un voltaje de - 1200 V que usa

para transformar los pulsos luminosos en pulsos eléctricos, amplificados millones de veces, para luego procesarse con los módulos electrónicos.

El plástico centellador está contenido, junto con el PMT, en un armazón de aluminio para darle soporte y aislarlo de la luz externa, Fig.4.2. Dentro del mismo hay calzas de plástico para amortiguar los golpes. Se utilizan cuatro centelladores ubicados, por parejas, en la parte inferior y superior de soporte (*rack*), conteniendo cuatro de las seis MWPC entre ellos.

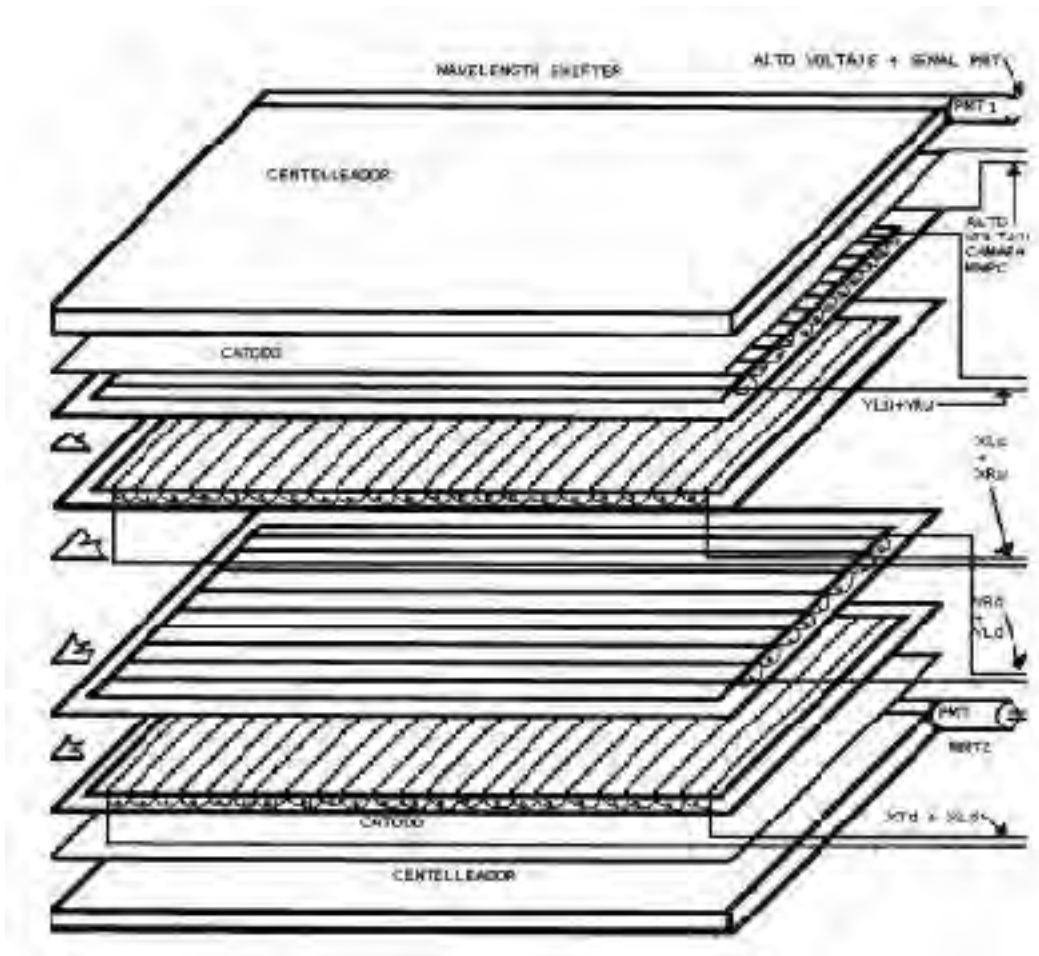


Fig.4.1 Diagrama del detector de muones que muestra las cuatro MWPC's entre los dos centelladores. Hay dos MWPC extras por encima del centellador superior que no aparecen en el esquema.

Se conoce la distancia entre las parejas de centelladores y se sabe que los muones viajan a velocidades cercanas a la de la luz. Con estos datos se puede calcular el tiempo que tarda un muón en recorrer dicha distancia y los eventos registrados durante este intervalo de tiempo, son los que se considerarán válidos o “coincidencias”. De este modo, los centelladores

cumplen el propósito de discriminar entre las señales generadas por los muones y aquellas producidas por la radiación ambiental, que por no cruzar todo el detector, no cumplen con la condición de “coincidencia”.

Idealmente, para reconstruir la trayectoria de los muones detectados, hace falta conocer sólo dos puntos en el espacio. Sin embargo, si cada punto tiene asociada una incertidumbre (producto de la resolución espacial finita del detector), es importante medir más puntos.



Fig. 4.2 Plástico centellador envuelto en papel Tyvek®, PMT y soportes de acrílico ensamblados dentro del armazón de aluminio.

En nuestro caso se encontró que tres puntos son suficientes para lograr la resolución espacial esperada. Para lograr eso, se colocaron tres parejas de MWPC. En cada una de ellas, una cámara tiene los alambres en una dirección, y la otra los tiene en la dirección perpendicular. De este modo, tenemos un plano cartesiano por cada pareja de MWPC, haciendo posible realizar el “trazado” (*tracking*) o reconstrucción de las trayectorias, necesario.

Las cámaras se ubican a pocos centímetros de espaciamiento vertical entre una y otra, cuatro de ellas entre los centelladores y dos más por encima de ellos.

A grandes rasgos, las MWPC son como cámaras de ionización. Contienen un gas especial, el cual se ioniza a un menor voltaje que otros, pero se trabaja en la región proporcional, a diferencia de la anterior. En la cara interna de las tapas superior e inferior de la MWPC, hay cátodos de cobre y en medio de ellos se encuentra el plano de alambres paralelos de tungsteno recubiertos de oro, con un grosor de $25 \mu\text{m}$, menor al de un cabello, Fig.4.4.

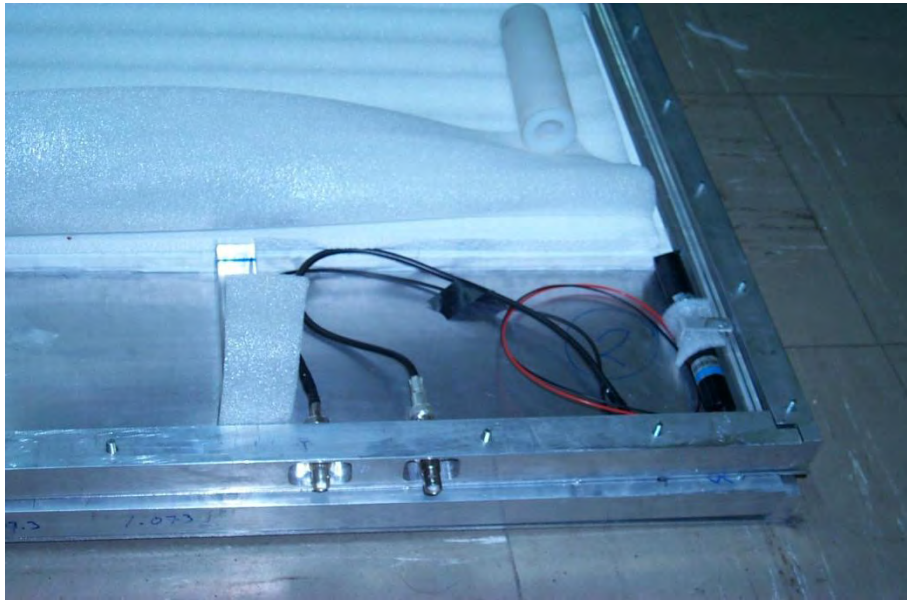


Fig.4.3 Detalle del PMT, que forma parte del centellador, en una esquina del armazón de aluminio.

Como ya vimos (ver 3.4.1), al suministrar alto voltaje (alrededor de 2000 V) a estos alambres, las líneas del campo eléctrico que se forman son perpendiculares entre las placas y a al plano de los alambres, pero solamente hasta un cierto radio alrededor de estos últimos. Cerca de los alambres el campo eléctrico se convierte en radial, intensificándose al punto que el gas se pueda ionizar en esa región. Cuando un muón atraviesa la cámara, interactúa con las moléculas del gas ionizándolo, entonces, los electrones viajan en dirección de los alambres generando cascadas de electrones al acercarse. De esta forma, la corriente generada es conducida por alguno de los alambres hasta la línea de retardo que une todos los alambres por un extremo. Así, la carga eléctrica colectada en el alambre se divide por dos caminos, izquierdo y derecho.

Dependiendo de la longitud de ambos trayectos se establece un retardo en cada ruta que es proporcional a la posición. Para este propósito, se utilizaron circuitos electrónicos con 19 chips modelo SIP5-405 [24], que actúan como línea de retardo [25]. Las dos señales producidas, salen entonces de la cámara por un par de cables BNC, y son amplificadas por sus respectivos preamplificadores.

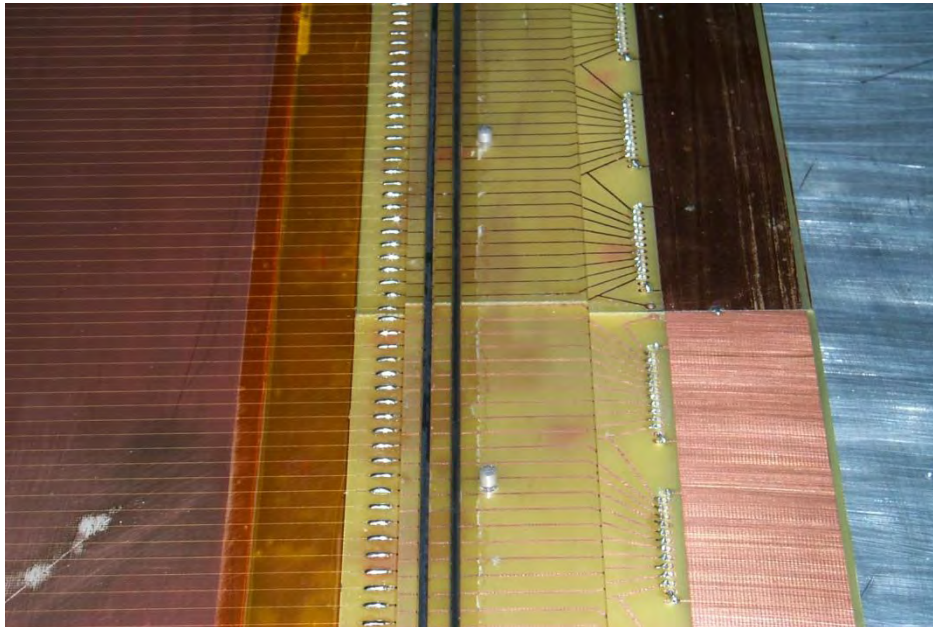


Fig.4.4 Alambres de Tungsteno de una MWPC que conforman el plano anódico. Del lado derecho de la imagen se observan las pistas de cobre, en cuyos extremos se colocan los chips que forman la línea de retardo.

La instrumentación electrónica implementada en este proyecto, incluye dos sistemas distintos. El primero, es el sistema analógico y digital denominado NIM (Nuclear Instrument Module), el cual, fue el primer sistema modular establecido en los años sesenta con especificaciones mecánicas y eléctricas estándar, para su implementación en física nuclear y de altas energías. Con este equipo se procesan las señales provenientes del detector.

El segundo, llamado CAMAC (Computer Automated Measurement And Control), es un sistema electrónico estándar, también modular, desarrollado para la transmisión de datos

digitales e introducido en 1969 para complementar la electrónica NIM que es inconveniente para sistemas basados en computadoras.

Por medio de este sistema, se envía la información a la PC, donde los datos son almacenados en archivos sin procesar (*raw*) mediante un programa de adquisición, para posteriormente ser analizados fuera de línea.



Fig. 4.5 Imagen del detector de muones para la Pirámide del Sol.

4.2 INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

A lo largo del trabajo con el detector, se usaron dos configuraciones ligeramente distintas de los módulos electrónicos. La primera, se usó para la calibración de los centelladores y la segunda, para hacer la adquisición de datos.

4.2.1 SUMINISTRO DEL ALTO VOLTAJE

En lo concerniente al suministro de alto voltaje que requieren los módulos electrónicos, así como, el que alimenta a los detectores, debe cumplir ciertas características. Entre ellas, la más importante es la estabilidad del voltaje, puesto que variaciones abruptas del mismo afectan la respuesta de los aparatos. Para evitar dichas variaciones, tanto a las MWPC como a los PMTs de los centelladores, se les alimenta con una fuente universal de alto voltaje Voltronics 1458, modelo de fuente especialmente fabricado para trabajar con PMTs y cámaras de deriva, que resulta muy conveniente para el uso con el detector de muones [26].

La fuente se controla desde una PC, por medio de un programa que emula una terminal vt 100, vía el puerto serial ubicado en su panel frontal. Dicha terminal permite controlar y monitorear el estado de los múltiples canales de la fuente (voltaje y corriente) al mismo tiempo. Además de ésta se emplea una fuente de 12 V para alimentar los 12 pre-amplificadores.

4.2.2 SEÑALES Y PANEL DE CONTROL

Las diferentes señales eléctricas que obtenemos del detector son dos. La primera corresponde a los pulsos provenientes de los centelladores y la segunda a los emitidos por las MWPC. Los pulsos de éstas últimas, no pueden ser procesados por el sistema electrónico, sin antes ser amplificados. Para este fin, se conectan a la salida de las señales de la MWPC, preamplificadores D2L sensibles a la carga, los cuales han sido diseñados para este tipo de detectores [27], con un consumo de +12 V , impedancia de 50 Ω , ganancia de 20, tiempo que tarda el pulso en llegar hasta el 90% de su amplitud (*rise time*) del orden de ~ 10 ns y una salida máxima de 1 V .

Después de ser amplificadas, las señales son conducidas directamente a un panel de conexiones a través de cables BNC. En éste los cables de señal de cada elemento de detección (cuatro centelladores y seis cámaras), tienen sus correspondientes conectores de entrada y salida BNC: uno para cada centellador, y dos para cada cámara (señal derecha e izquierda), a los cuales se les agregó un adaptador BNC-Lemo.

Todos los conectores están debidamente etiquetados para identificar la cámara o el centellador al que pertenecen siguiendo la convención que se estableció en el presente trabajo, y que indica lo siguiente: el conector izquierdo y derecho correspondientes a cada cámara en el panel de control, deben recibir la señal proveniente de los respectivos lados izquierdo y derecho de las MWPCs vistas de frente.

Tratándose de los detectores de centelleo, éstos y sus conectores fueron identificados por el número de canal que ocupan en la unidad de alto voltaje.

En la Fig.4.6 se muestra el detalle del panel de control junto con el equipo NIM en su *crate* o contenedor, que le proporciona el voltaje requerido y soporte mecánico.

La electrónica NIM trabaja con señales rápidas negativas con un *rise time* del orden de nanosegundos, con impedancias de entrada y de salida de 50Ω , iguales a las de los cables utilizados tipo BNC y lemo. De este modo se busca tener un acoplamiento adecuado de impedancias entre la electrónica y los cables.

Por último, las conexiones entre el panel y los módulos NIM, las realizamos con cables lemo de $3ns$.



Fig.4.6 Panel de conexiones y electrónica NIM.

4.2.3 CONFIGURACIÓN DE LA PRIMER ETAPA

La primera configuración de la electrónica, con la cual se procesaron las señales del instrumento, se estableció para calibrar el voltaje de operación de los centelladores 8 y 9. Ello se logró, comparando el número de cuentas en coincidencia triple contra la coincidencia doble de las dos paletas centelladoras, de las cuales se conoce su respectivo voltaje de operación (en la sección 5.1 se explica el procedimiento).

El arreglo de la electrónica NIM, originalmente quedó establecido de la siguiente manera: todas las señales fueron amplificadas en un módulo y discriminadas con un CFD o módulo de discriminación por fracción constante Ortec CF8000 de ocho canales. A continuación, los pulsos fueron multiplexados en un FIFO Philips (Fan-In-Fan-Out) para observarlas en el osciloscopio, mientras que el duplicado de las mismas se condujo a una unidad lógica. En ella, se aplicó la función AND a las señales, para obtener la coincidencia triple a la salida, que finalmente se conectó a un contador de eventos.

Sin embargo, se encontró que el comportamiento del módulo FIFO variaba con la temperatura, introduciendo un desplazamiento del offset en la señales. Hecho que se corroboró al recalibrar dicho offset en ceros para cada señal en el osciloscopio y operar el

arreglo experimental durante un cierto intervalo de tiempo. Al final de éste, los *offset* (corrimiento de la línea de base) se habían desplazado nuevamente y en consecuencia, se decidió retirar el FIFO del arreglo, quedando finalmente como se indica en la Fig.4.7.

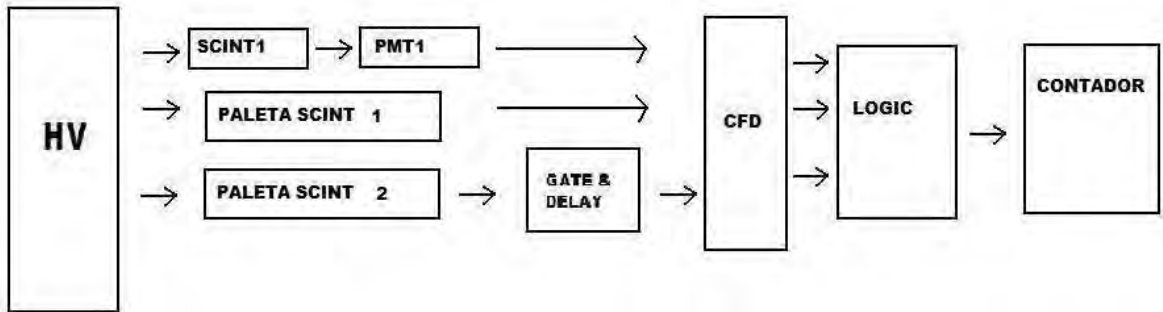


Fig.4.7 Diagrama de conexiones de la primera configuración para la calibración del voltaje de los centelladores 8 y 9.

La siguiente variación de la configuración anterior, permitió el ajuste del voltaje de las MWPC en función del número de cuentas en coincidencia con los centelladores 8 y 9. Primero, se amplificó la señal de los detectores de centelleo con un módulo amplificador, de ahí, la señal del centellador 9, ubicado en el extremo inferior del armazón del detector, fue retrasada 30 ns para crear una compuerta temporal que permita que los pulsos de las MWPC se generen entre la señal de inicio (Cent. 8) y la final (Cent. 9). Enseguida, los pulsos son conducidos a un CFD, donde el umbral de cada canal se ajusta con el correspondiente control y se mide el voltaje con un multímetro. Paralelamente, la señal de las MWPC pasa por el mismo proceso, exceptuando el módulo de amplificación, ya que esta señal es preamplificada con los D2L, ver Fig.4.8.

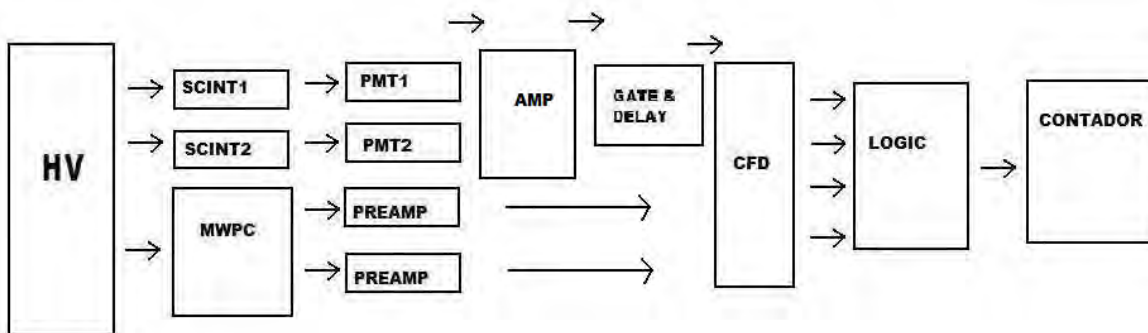


Fig. 4.8 Variante del diagrama de conexiones para ajustar el voltaje de las MWPC.

Los pulsos son observados en un osciloscopio digital Tektronix TDS 3054B de cuatro canales y después se conectan a la unidad lógica. Esta última, se configura en el modo AND para obtener como salida; primero, la coincidencia doble entre los centelladores, que se manda a la siguiente sección de la unidad lógica junto con ambos pulsos de la MWPC. A la salida de ésta, obtenemos la coincidencia cuádruple, que se deriva a un contador de eventos.

4.2.4 CONFIGURACIÓN DE LA SEGUNDA ETAPA

En esta segunda etapa, se incluyeron dos centelladores extra para probar una posible mejoría en la selección de eventos válidos, en la que también se incorporó, intentando disminuir el ruido, un módulo LTD (Low Threshold Digitizer) N840 de CAEN. Su papel es filtrar la señal que buscamos del ruido de fondo, aún cuando ésta sea de apenas unos cuantos mili-volts (mV). Se trata de un discriminador de frente de onda de ocho canales, con una gran sensibilidad que le permite detectar señales negativas de hasta $-5 mV$. Este valor, resulta ser el mínimo al que pueden ajustarse los umbrales de los canales de entrada y hasta un valor máximo de $-250 mV$. Aprovechando estas características, se ajustó el umbral de los canales utilizados, para filtrar la señal de los cuatro centelladores.

Los pulsos de salida de dichos canales se conectaron a la unidad lógica N405 de CAEN. Tal aparato, cuenta con tres secciones independientes, cada una con cuatro canales de entrada. Para cada sección se puede seleccionar una de las funciones OR o AND. En la

primera sección del módulo lógico, mediante la aplicación de la función AND, se obtiene como pulso de salida la coincidencia entre las señales de los centelladores 9 y 10. Éstas se ubican en la parte superior del detector, justo encima uno del otro. De forma que el PMT del centellador 9 queda orientado a la derecha del detector visto de frente, mientras que el PMT del centellador 10 queda cargado a la izquierda.

En la segunda sección, las conexiones para los centelladores 8 y 11, son idénticas. Estos últimos se encuentran colocados en la parte inferior del detector, uno encima del otro de la misma forma que los anteriores. Finalmente en la tercera sección, se obtiene la coincidencia de los pulsos de salida de las primeras dos secciones. Esta última señal actúa como disparador (o *trigger*) de la señal de las cámaras, es decir, cumple con el criterio de selección para eventos válidos, el cual demanda la coincidencia cuádruple de la señal de los centelladores, como la condición que garantiza que la mayoría de los eventos efectivamente sean muones. Aplicando dicho criterio se redujo notablemente el ruido inherente del medio y del experimento (ver Fig. 5.1.b).

Sin embargo, lo que se observó en el osciloscopio, fueron una serie de pulsos (ruido) que llegaban dentro de un intervalo de aproximadamente 100 ns, después de recibida la señal de inicio. Posiblemente se trata de reflexiones internas del pulso inicial que se dan dentro del cable. Para limpiar la señal se aplicó una técnica sencilla, aprovechando las características de la unidad lógica, la cual tiene una entrada de veto a la que conectamos su propia señal de salida, pero retrasada 50 ns. Esto se logra utilizando una unidad generadora de retraso de ocho canales N-RY 005. El resultado evita que haya reflexiones de la señal original durante los subsecuentes 50 ns, como se comprobó en el osciloscopio.

Por otra parte, las señales del lado derecho e izquierdo de cada MWPC, se conectan al módulo de discriminación por fracción constante Ortec CF8000. Dicho módulo, tiene las características y el desempeño necesarios para usarse en experimentos de coincidencia con múltiples detectores. La técnica de fracción constante provee una óptima resolución en un amplio intervalo de amplitudes para los pulsos. En el CFD, se fijó individualmente el umbral para filtrar el ruido de cada una de las señales. En la Fig.4.9, se muestra el diagrama de conexiones para la instrumentación electrónica.

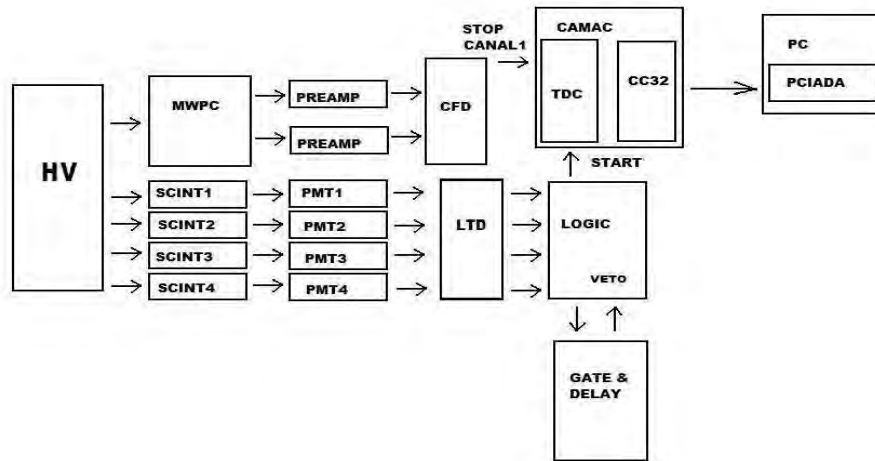


Fig.4.9 Diagrama de conexiones para la instrumentación electrónica del detector de muones.

4.2.5 AJUSTE DEL DISCRIMINADOR

El método para fijar el valor del discriminador, consistió en observar la señal de uno de los lados de cada cámara directamente en el osciloscopio, mientras que la señal del lado contrario, fue derivada, primero hacia el módulo CFD y luego se conectó a un segundo canal del osciloscopio. De esta forma se trabajó con una señal lógica correspondiente a la salida del CFD y con una analógica, obtenida del pre-amplificador colocado a la salida de los pulsos de las cámaras. El cual, se encargó de multiplicar varios cientos de veces la amplitud de los pulsos y que permitió trabajar con ellos.

Para medir en mV_{mV} el umbral de cada canal en uso del CFD, se utilizó un multímetro digital. Al mismo tiempo, en el osciloscopio, se asignó como trigger la señal digital. Enseguida se calibró el umbral minimizando el ruido observado en el osciloscopio sin “silenciar” la señal analógica. Si el umbral se fija a un voltaje muy alto se verán escasos pulsos ya que muchos de ellos se pierden al tener una amplitud menor al valor del umbral. En caso contrario, si el nivel del filtro es muy bajo habrá mucho ruido contaminando los datos.

4.3 ADQUISICIÓN DE DATOS

El sistema de adquisición de datos, comprende la electrónica CAMAC y una PC. El CAMAC se encarga de transferir los pulsos de salida del NIM a la PC. Para ello, la unidad CC32 Plein & baus GmbH de Wiener, que tiene un formato de 32 bits, utiliza el bus PCI estándar como interface entre el crate y la PC. La CC32 está conectada a la tarjeta de interface PCIADA mediante un cable paralelo de 32 bits tipo SCSI 2.

Al igual que en la electrónica NIM, en la CAMAC, existen una amplia variedad de módulos que permiten realizar cualquier tipo de adquisición de datos en un experimento de física de partículas. Para este experimento se empleó un TDC (Time Digital Converter) de 8 canales C414 de CAEN, que permite obtener una medida del intervalo de tiempo de los pulsos de salida del NIM, en forma digital.

El TDC mide el tiempo que tarda en llegar la señal de alto, con respecto al pulso de inicio, el cual es la coincidencia cuádruple en la unidad lógica. Mientras que las señales de alto, son los pulsos de ambos lados de cada cámara que llegan dentro de la compuerta generada generado por la misma unidad.

Por convención, decidió enviarse a los canales del TDC con números impares, la señal del lado izquierdo de las cámaras y a los pares la del lado derecho. En la Fig.4.10 se muestra el CAMAC y la fuente de alto voltaje.

El formato en el cual se archivan los datos recolectados es del tipo *raw*, que puede procesarse con lenguajes de programación como C y C++ entre otros. El software de captura de datos es una adaptación de una versión libre GNU, para controlar la interfaz entre el CAMAC y el PCIC32. Donde se incluye una rutina para controlar la adquisición de datos con el TDC, que almacena en columnas el tiempo digitalizado. En total, son doce columnas, ya que se opera con seis cámaras y se registran dos tiempos para cada una.



Fig.4.10 El Rack con la electrónica CAMAC en la parte superior, en medio se observa la fuente de los pre-amplificadores, abajo se ubica la fuente de alto voltaje para los centelladores y MWPC.

La información del tiempo digitalizado se almacena en su equivalente en número de canales. Donde, un pulso que recorre la totalidad de la línea de retardo, es decir, de un extremo al otro de la MWPC, tarda 736 ns . Dicho intervalo equivale a 4096 canales, dividiendo este valor entre $n-1$ alambres (con n el número total de alambres) obtenemos el número de canales que representa el intervalo de tiempo que le toma a la señal recorrer la distancia entre un alambre y el subsecuente. Lo anterior permite identificar el alambre donde se generó la señal. En la figura 4.11 se ve una impresión del archivo *raw*.

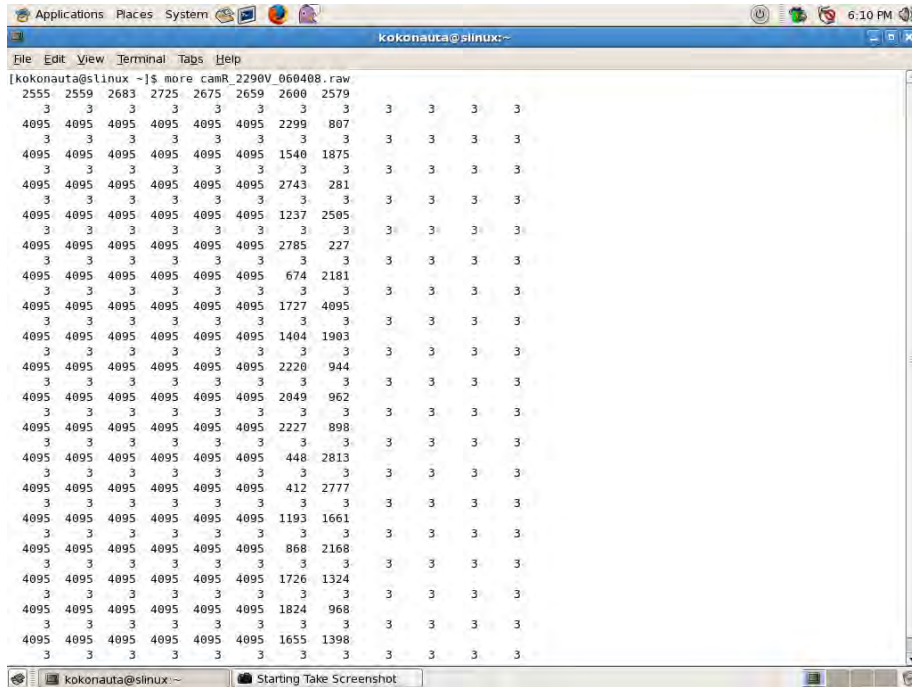


Fig.4.11 Archivo raw con los datos de una corrida con una sola MWPC. Las últimas dos columnas, con valores distintos a 4095, son el equivalente en número de canales de los intervalos de tiempo digitalizados.

Todo el equipo electrónico NIM y CAMAC ha sido remplazado por electrónica VME que es capaz de digitalizar la forma de onda completa de cada pulso detectado. Con ello es posible mejorar la resolución espacial del detector mediante el análisis de los datos fuera de línea [31].

5. CALIBRACIÓN DEL DETECTOR, ANÁLISIS DE DATOS Y MEJORAS DE LAS MWPC

El análisis consistió en dos etapas distintas. En la primera, se trató de mejorar la eficiencia del detector ajustando el alto voltaje y los umbrales del discriminador, tanto para los centelladores, como para las MWPC; así como el flujo de gas para éstas últimas.

Al no haberse alcanzado la eficiencia necesaria en la primera etapa, en particular las MWPC, en la segunda etapa se hizo un estudio de su estructura mecánica y electrónica, con la finalidad de entender el origen de la baja eficiencia.

5.1 CALIBRACIÓN DEL DETECTOR DE MUONES

Como es sabido, en este tipo de experimentos la cantidad y la calidad de datos acumulados es esencial para tener un buen análisis estadístico. Optimizando la eficiencia del detector, se busca que los eventos registrados estén limpios de ruido en lo posible. Además, entre mayor sea la eficiencia del instrumento, se requerirá de menos tiempo para acumular suficientes datos para su posterior análisis. En la Fig.4.5, se tiene una imagen del detector de muones.

5.1.1 CALIBRACIÓN DE LOS CENTELLADORES

En el capítulo de resultados (capítulo 6) se muestran los correspondientes a la calibración de los centelladores y de las MWPC.

La literatura indica que para operar detectores de centelleo, el primer paso es encontrar la meseta del voltaje de operación. De esta forma, la respuesta de los detectores será lineal en esa región, por lo que la calibración comienza con este punto en mente.

Esta calibración se realizó comparando el conteo de muones de la coincidencia de dos centelladores que llamaremos “paletas” debido a su forma, de las cuales se conocen las

condiciones óptimas de operación. Dicho conteo, se contrapuso con el de la coincidencia triple entre las mencionadas “paletas” y uno de los centelladores a la vez, en un intervalo de 10 *min*, esto con ayuda de un contador de eventos (*ratemeter*).

Las paletas se colocaron, una en la parte superior del detector, por encima del armazón del mismo y otra en su sección inferior, centrando ambas respecto a los centelladores. El alambrado de los módulos NIM para esta prueba, se indica en la sección 4.1.1.

Habiendo encontrado la meseta de operación para ambos centelladores 8 y 9 (Fig. 6.1 a y b), a continuación, se eligió el voltaje comparando en el osciloscopio la amplitud de sus señales. Los valores elegidos fueron 1250 *V* para el 8 y 1500 *V* para el 9. Con estos valores se efectuó otra prueba que involucró nuevamente a las paletas situadas a la misma altura, midiendo el número de coincidencias cuádruples durante intervalos de 10 *min*.

Sin embargo, como las paletas tienen un área menor que la de los centelladores, de aproximadamente 40×100 *cm*², hubo que dividir en tres secciones la superficie de los centelladores: izquierda, central y derecha. Se deslizaron ambas paletas, de forma que cubrieron cada sección y se realizaron dos corridas en cada una, con la finalidad de corroborar que el conteo fuera aproximadamente homogéneo en toda la superficie. Además, tomando en consideración que los centelladores están hechos del mismo material plástico, es suficiente con verificar el comportamiento para dos de ellos (Fig.6.2).

El siguiente paso fue equilibrar la amplitud de los espectros de carga de los centelladores, mediante el uso de un qVT 3001 LeCroy, Fig.5.1. Este instrumento sirve para medir la carga, el voltaje y el tiempo de las señales eléctricas. Operado en el modo de carga y aprovechando la memoria para cinco espectros que posee, permitió acumular varios espectros, cada uno durante 1 minuto. Éstos, se compararon gráficamente en el display x-y del módulo, buscando que se asemejaran.

Este procedimiento, se repitió hasta encontrar el voltaje adecuado para cada centellador.

En una etapa posterior, se incluyeron dos centelladores extra, que tienen la misma estructura que el 8 y 9. Esto debido a que el ruido de las señales generadas por otro tipo de radiación dificultaba la detección de muones exclusivamente y al forzar la coincidencia

cuádruple (más restrictiva), como nueva condición lógica a los centelladores, se minimizaron las señales espurias.



Fig.5.1 Módulo qVT 3001 utilizado para integrar el espectro de carga de los centelladores.

El voltaje de operación de los centelladores 10 y 11, se conocía de antemano al comienzo de este trabajo (1600 V). Para corroborarlo se realizaron pruebas comparando el número de cuentas en 1 minuto, de la coincidencia doble entre los centelladores 8 y 9 ya calibrados. Después, variando el voltaje del centellador 10, se contaron las coincidencias triples durante 1 minuto. El mismo procedimiento se repitió para el centellador 11. De esta forma se encontraron las mesetas y se verificó que el voltaje a 1600 V se encuentra en dicha región. Durante las pruebas ya mencionadas, los umbrales permanecieron en valores muy cercanos a los 150 mV.

Cabe mencionar, que una vez empleados los cuatro centelladores, se cambió la instrumentación electrónica, utilizando el módulo LTD, descrito en la sección 4.2.4, para discriminar los pulsos de los centelladores, en vez del CFD. También se utilizó otra unidad lógica en lugar de la empleada en las primeras pruebas.

Una vez establecidos los voltajes de operación para los centelladores, la siguiente labor fue ajustar los umbrales del discriminador individualmente. Con este fin se efectuaron corridas de 1 minuto para los centelladores 8 y 9 midiendo el número de eventos sencillos. Así, se

obtuvo la variación del conteo en función del valor umbral del discriminador, de donde se evidenció que los umbrales con los que se efectuaron las pruebas anteriores, son demasiado altos y se perdían eventos válidos.

Por último, para encontrar los umbrales adecuados, primero se observó la señal en el osciloscopio para umbrales desde 1 mV hasta 8 mV , este último resultó ser el valor mínimo por encima del ruido. Fijando en 8 mV el umbral para todos los centelladores, se hicieron corridas de 10 s y se contaron el número de eventos simples por centellador. Tres de los centelladores registraron un conteo del orden de 10^4 eventos, a excepción del 11, que registró un conteo mayor a los demás, del orden de 10^5 eventos. Para equilibrar el conteo con el mismo orden de magnitud que los restantes centelladores, se efectuaron corridas de 10 s con distintos umbrales hasta encontrarse el mejor.

5.2 CALIBRACIÓN DE LAS MWPC

A la par de la calibración de los centelladores se llevó a cabo un procedimiento similar al descrito en la sección anterior para hacer más eficientes a las MWPC. En un principio, para la MWPC 6 (que llamaremos “blanca”), se encontró el voltaje de operación usando como señal de inicio la coincidencia de los centelladores 8 y 9. Estos operaron con los voltajes elegidos inicialmente de 1250 V y de 1500 V respectivamente.

La cámara blanca tuvo 253 mV en el umbral izquierdo (señal del lado izquierdo de la MWPC), y como umbral derecho 309 mV . Previo a la corrida se dejó fluir el gas por 3 hrs para llenar la MWPC. Hecho esto, se incrementó el alto voltaje progresivamente para evitar descargas y con el *ratemeter* se midió el número de eventos en coincidencia triple por minuto, buscando que el conteo sea máximo sin que domine el ruido en la señal de salida.

Las restantes MWPC se calibraron en forma un poco distinta: se aprovechó el contador de pulsos, que requiere poco tiempo para dar una idea del valor aproximado del voltaje de operación, acotando la región donde dicho voltaje debe encontrarse. Pero en lugar de utilizarlo como el único recurso se utilizó el CAMAC para adquirir una gran cantidad de datos que contienen información que no da el método de conteo. Como puede verse en los

histogramas generados (Fig.5.3) con la rutina de análisis que se explica en la siguiente sección (5.3).

Los parámetros que indican una buena eficiencia a primera vista en las MWPC son la forma de los histogramas. Por ejemplo, en la esquina superior e inferior derecha de la Fig.5.3.b, la forma ideal de los histogramas debe ser una meseta bien definida. En el caso del histograma en la esquina superior izquierda se espera una curva gaussiana con una sigma pequeña y sin algún otro pico. Por último, en el histograma de la esquina inferior izquierda, se busca obtener una banda con pendiente negativa, que muestre líneas perpendiculares a dicha pendiente y que sean equidistantes entre sí.

En la siguiente sección, dedicada al análisis de datos, se describe con mayor detalle la información visualizada en cada histograma. Por el momento, para la calibración de las MWPC, fueron dos los parámetros principales que se revisaron. El primero de ellos fue, como ya mencioné, comparar la forma de los histogramas superior e inferior derechos del “display” (Fig.5.3.b) con una meseta ideal. El segundo fue realizar un acercamiento (zoom) del histograma en la esquina superior derecha de la misma figura, que en adelante denominaré de la “resta”, para buscar una estructura de picos equidistantes correspondientes a la ubicación de los alambres en la MWPC (Fig.5.2). Ello significa que se logró una buena resolución espacial, lo cual determina la eficiencia de las MWPC.

5.2.1 FLUJO DE GAS

Otro aspecto importante, para la calibración de las MWPC, es el flujo de gas que se inyecta en ellas. Con el fin de entender el impacto en la eficiencia de las cámaras de este hecho, se concretó una prueba con la MWPC 6, de la cual ya se conoce el voltaje de operación aproximado. Ésta consistió, en comparar los resultados del análisis por medio de la observación de los histogramas, de dos adquisiciones de datos. Siguiendo esta línea, se compararon los resultados del análisis de los datos obtenidos en la corrida con la que se determinó el alto voltaje (con poco flujo de gas), contra una nueva corrida con el mismo número de datos y al mismo voltaje, pero incrementando radicalmente el flujo de gas. El comportamiento de la cámara no varió más allá de una fluctuación estadística. Sin embargo,

un efecto importante que se observó con la experiencia fue, que al comenzar una corrida sin haber dejado fluir el gas por al menos un par de horas, la adquisición se volvía muy lenta. Esto como consecuencia de la baja concentración del gas Ar/CO_2 en la mezcla formada con

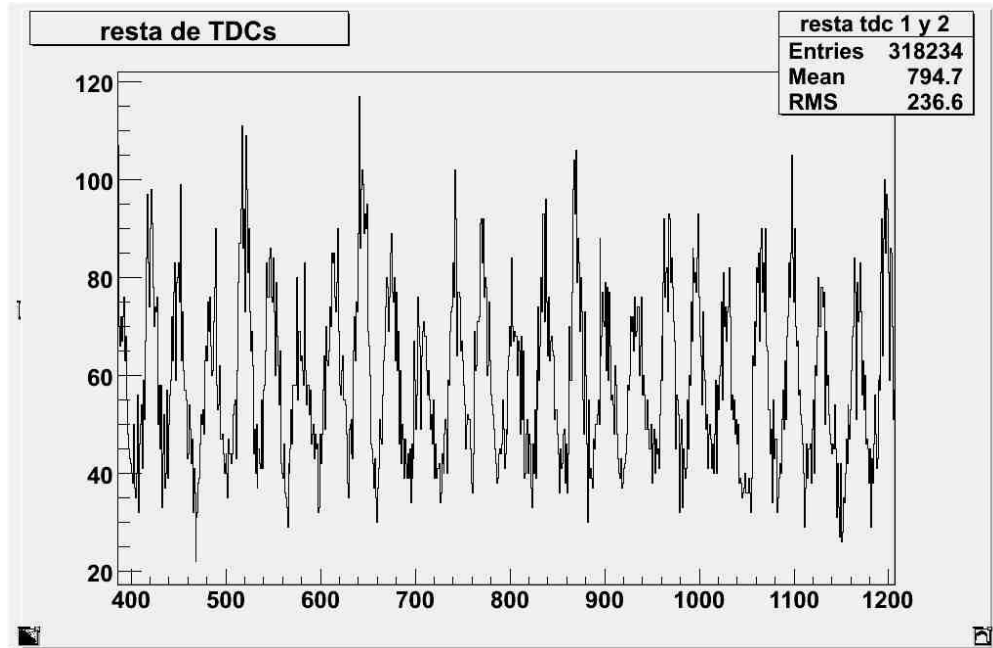


Fig. 5.2 Acercamiento del histograma de la resta de la MWPC 6 a 1950 V, en él se observa claramente los picos que corresponden a la ubicación de los alambres en la cámara y que reflejan el número de muones detectados por cada alambre.

el aire acumulado en el interior de las MWPC. Lo que se refleja, en una baja probabilidad de que se dé la ionización con el paso de los muones.

Una duda que se presentó, fue la posibilidad de que manteniendo el flujo de gas a un nivel alto, antes de comenzar una adquisición, se modificase la geometría de las MWPC, en particular, su cubierta superior podría deformarse con el empuje de la presión interna.

Con el objetivo de corroborar la hipótesis, se montó un pequeño experimento: sobre dos soportes universales se colocó un rotámetro capaz de medir un leve desplazamiento, con una precisión de décimas de milímetro. Efectivamente, con un flujo aproximado de 6 litros por minuto, el centro de la tapa superior se desplazó 0.2 mm .

Por otra parte, como el campo eléctrico aumenta con el voltaje, también lo hace la fuerza de atracción entre los cátodos y el ánodo. A pesar de mantener el alto voltaje (1950 V), no se presentó algún desplazamiento negativo de la tapa superior de la MWPC 2 (verde).

5.2.2 UMBRALES

El procedimiento técnico para realizar el ajuste del discriminador, se detalla en la sección 4.2.5. En ésta, sólo se menciona el por qué es necesario el ajuste, las observaciones y con qué criterio se escoge el umbral.

El tercer y último factor, indispensable para calibrar las MWPC, es el ajuste de los umbrales que discriminan los pulsos que generan, en otras palabras, son filtros que permiten reducir el ruido en las señales. Éstos deben ajustarse a un nivel que permita el paso de las señales generadas por eventos válidos, incluso de amplitudes pequeñas, pero teniendo cuidado de evitar el paso de señales espurias.

Por ejemplo, lo ideal sería mantener un valor muy pequeño para los discriminadores en el CFD, pero si el ruido tiene una amplitud que le permita pasar el filtro, el conteo de eventos se verá significativamente alterado. Esto implica que la estadística contenga gran cantidad de datos falsos, distorsionando los resultados de su análisis y quizá llevando a conclusiones erróneas, por ello este punto adquiere mucha importancia.

Durante esta etapa de la calibración se presentaron algunas dificultades para discriminar los pulsos de las MWPC sin perder pulsos correspondientes al paso de muones. La más importante fue el comportamiento de los pre-amplificadores a la salida de la señal de las MWPC. Tales componentes están diseñados para este tipo de experimentos, pero a pesar de ello, algunos presentan un desempeño irregular.

Su funcionamiento depende, en parte, de la temperatura a la que se encuentren. Si se mantiene encendido el voltaje con el que operan, por un cierto tiempo, los pre-amplificadores se calientan y mejoran su desempeño, volviéndose menos ruidosos. Aún procediendo de este modo algunos de estos componentes permanecieron ruidosos, en tales casos, simplemente se sustituyeron por otro que funcionara mejor.

El procedimiento de calibración para las MWPC comienza encontrándose el voltaje de operación, manteniendo para ello un flujo de aproximadamente 10 *L/hr* durante dos o tres horas antes de aumentar el voltaje. Una vez transcurrido este periodo se incrementa el alto voltaje en pasos de 500 *V* hasta alcanzar los 1500 *V*. A partir de este punto, se debe incrementar a pasos de 100 *V*, mientras se observan las señales producidas por la cámara en el osciloscopio. Cuando éstas comienzan a presentar muchas “perturbaciones” el voltaje se disminuye en algunas decenas de volts hasta conseguir que las señales sean “normales”. A partir de ese valor se hacen corridas para 5×10^5 eventos, que se realizan en aproximadamente tres horas.

5.3 ANÁLISIS DE DATOS

El proceso que permite extraer la información física, de un conjunto de datos experimentales, es el análisis de los mismos. Hoy en día la capacidad de las nuevas tecnologías y de sus aplicaciones nos facilita la realización de experimentos en los que el volumen de datos es tan grande que sería imposible analizarlos sin el uso de computadoras y software. Este es el caso del experimento con el detector de muones.

Para poder tener certidumbre en la determinación de la existencia o no de una cámara en el interior de la pirámide del Sol, hace falta acumular millones de datos para que el tratamiento estadístico arroje resultados precisos y confiables.

5.3.1 CARACTERÍSTICAS DEL PAQUETE DE ANÁLISIS ROOT

Dadas las necesidades del experimento, se requiere de un paquete estadístico capaz de procesar un gran volumen de datos y ser versátil en las opciones de análisis que ofrece. El paquete ROOT, es una estructura de análisis de datos orientada a objetos desarrollada en el CERN para analizar las enormes cantidades de información de sus experimentos. Dicho paquete cumple con las características que demanda el tipo de análisis que queremos realizar y además de lo mencionado, otorga una gran flexibilidad para adaptar la mayoría de sus funciones preprogramadas a cualquier rutina que se quiera programar. Otro aspecto

indispensable, es la compatibilidad con el formato de adquisición de datos tipo *raw* del que se hizo mención en el capítulo 4.

5.3.2 ANÁLISIS DE DE LOS HISTOGRAMAS

La primera parte del análisis consistió, en programar una rutina en C++ dentro del ambiente ROOT, la cual despliega la información contenida en los datos mediante histogramas que muestran el comportamiento de las MWPC desde distintas perspectivas.

Los histogramas desplegados por la interfaz gráfica, son producto de operaciones aritméticas aplicadas a los datos. Por ejemplo, si observamos el primer histograma que aparece en la esquina superior izquierda en el recuadro (Fig.5.3a), éste representa la suma de los tiempos de ambos lados de una de las MWPC.

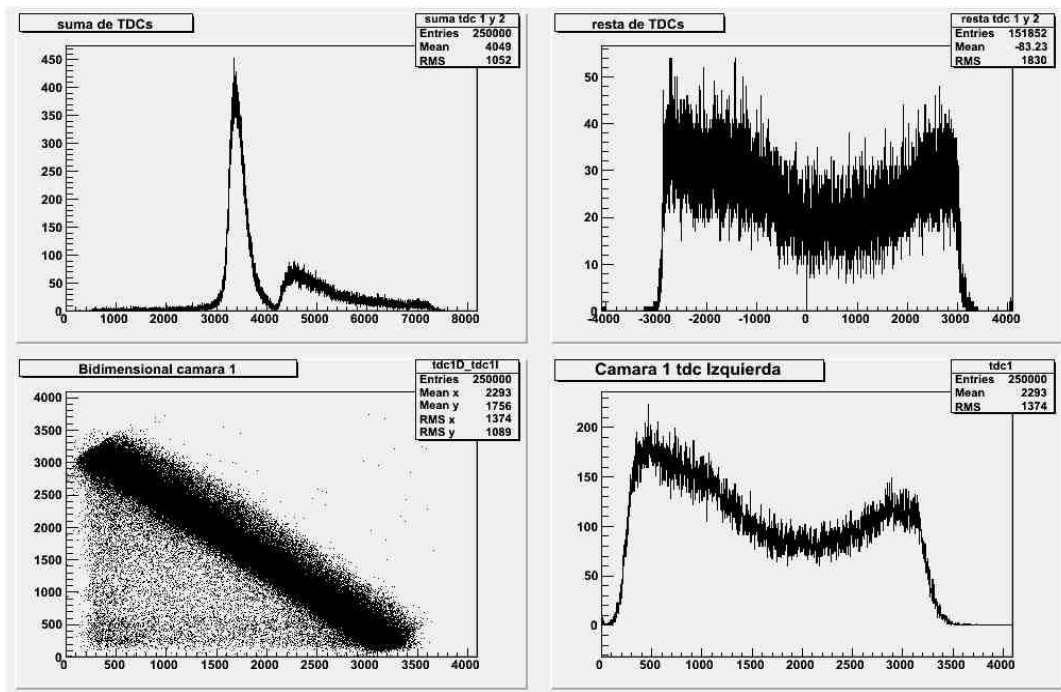


Fig. 5.3a

Fig. 5.3 En este caso, se muestran los histogramas correspondientes a la cámara número 6, con la cual se comenzó el estudio. Fig.5.3a Histogramas de la MWPC 6 a 1850 V. El histograma superior izquierdo es la suma de los tiempos de ambos lados de la MWPC. El histograma superior derecho es la resta de los tiempos de ambos lados de la MWPC. El histograma inferior izquierdo es el tiempo de un lado de la MWPC contra el

otro. El histograma inferior derecho representa el tiempo del lado izquierdo de la MWPC contra el número de cuentas.

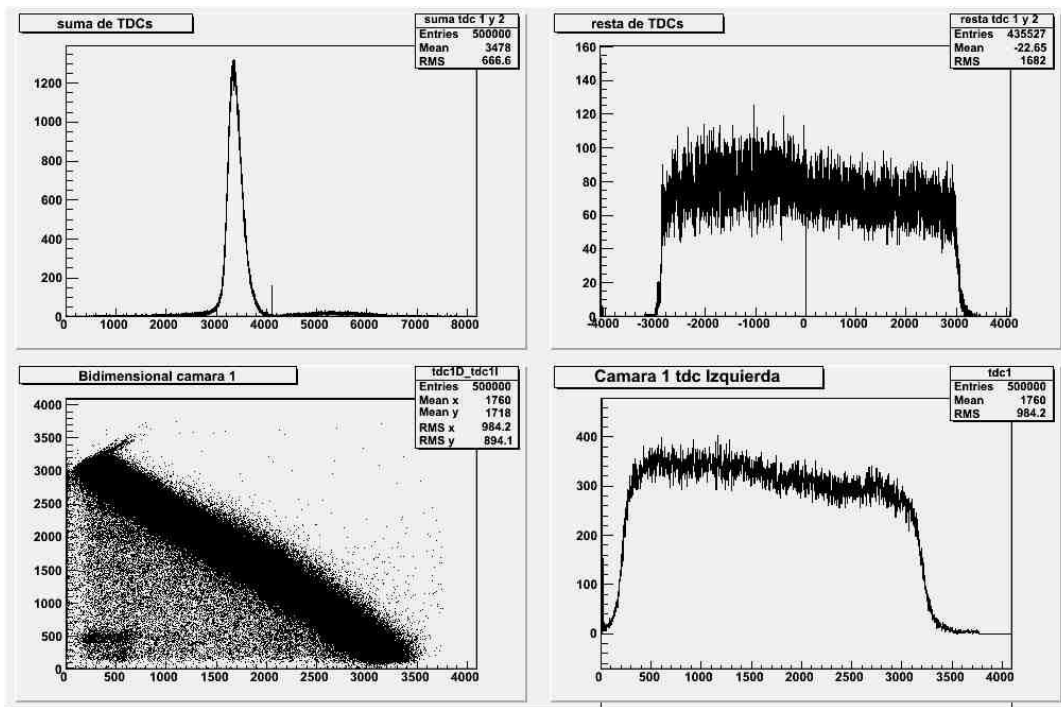


Fig 5.3b La misma MWPC a 1950V, se observa una clara mejoría en su respuesta.

Como puede observarse, la gráfica es una distribución gaussiana de la suma, como recién se menciona. Si el sistema fuese perfecto, en lugar de obtener ésta distribución, veríamos un pico sin anchura donde se concentrarían la totalidad de los eventos detectados, lo que correspondería a que la suma de los tiempos resulte exacta en cada evento.

Al lado derecho del histograma de la suma se muestra la substracción de los tiempos de la MWPC 6. Este histograma contiene la información de mayor importancia para entender el comportamiento de las MWPC y para realizar en una etapa posterior la reconstrucción de las trayectorias de los muones. En este histograma se grafica el número de eventos válidos (muones) contra la cantidad de canales, donde el canal cero representa el alambre central de la MWPC y aproximadamente treinta y dos canales corresponden a un intervalo de cuatro nanosegundos. En concreto, la operación de substracción da la coordenada de la posición de cada alambre.

Suponiendo que existen 5 alambres paralelos y equidistantes con un espaciado entre ellos de 4 ns. Si al tiempo izquierdo se sustrae el derecho, medidos ambos desde el alambre que transmite el pulso, se obtienen valores iguales a cero además de otros muy cercanos, para el alambre del centro. Cabe recordar que los instrumentos no son perfectos por lo que se registran tiempos que fluctúan alrededor de 4 ns. Entonces, al calcular la resta de los tiempos para cada alambre se obtiene una distribución gaussiana tal que su valor medio representa la ubicación física del alambre.

A continuación, en la figura 5.4, en el recuadro inferior derecho, vemos el histograma del número de eventos contra el tiempo de viaje de la señal izquierda de la MWPC 4. Al igual que en el histograma de la resta, en éste esperamos una meseta lo más plana posible. Lo cual sería indicador de que la cámara opera correctamente. De este histograma podemos extraer información respecto a la preamplificación de la señal observada, por ejemplo si se presenta saturación en el pre-amplificador.

El cuarto histograma, ubicado en el recuadro inferior izquierdo, muestra el pulso derecho contra el izquierdo. Cuando uno crece, el otro valor disminuye resultando una banda con pendiente negativa constante, ver fig. 5.4. En teoría, al efectuar un acercamiento a un área de dicha banda se deberían ver líneas paralelas, equidistantes y con una longitud promedio del ancho de la banda, muy similares a las que se observan en el histograma inferior izquierdo de la fig. 5.8. Cada una de estas líneas representaría un alambre y en conjunto se observaría la relación física entre ellos, sólo que, el programa ROOT realiza el acercamiento en una variable a la vez y la gráfica se va distorsionando por una rotación a cada paso del acercamiento. Ello impide que podamos observar las líneas paralelas.

Durante el análisis de los histogramas de las MWPC comenzamos a detectar en algunas de ellas comportamientos inesperados como se ve en el siguiente caso. La prueba se efectuó con la MWPC 4 (roja) a 2100 V, en cuyo histograma de la resta se observa un pico doble que sobresale a los demás (Fig.5.4). Haciendo un acercamiento del mismo identificamos el intervalo de canales correspondientes al pico. Además, conocemos el número de alambres, lo que en conjunto, nos permite predecir la ubicación en la MWPC del alambre posiblemente dañado.

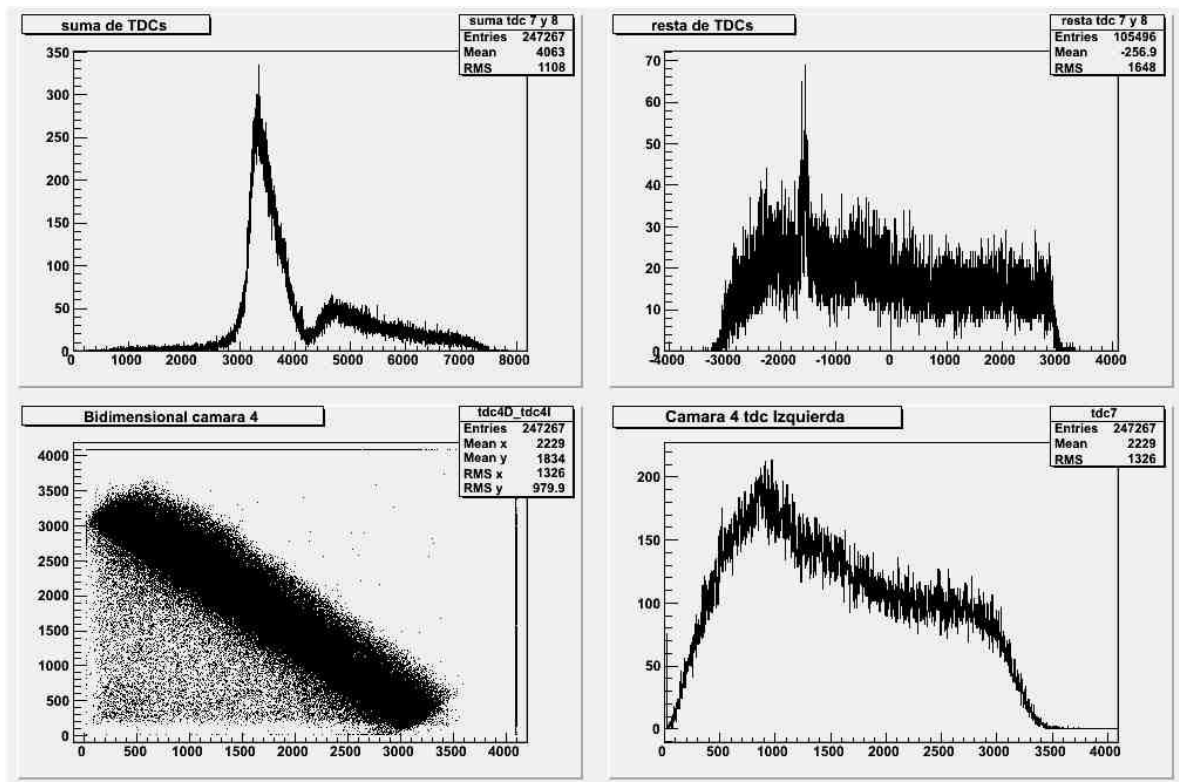


Fig.5.4 Histogramas de la cámara 4, con un voltaje de 2100 V. En el histograma correspondiente a la resta, se observa un pico que refleja una falla en una de las pistas del circuito. Ésta, se encontraba dañada, por lo que la señal proveniente del alambre, no llegaba al chip de la línea de retardo.

Al abrirla, se encontró que el alambre no tenía problema alguno, sin embargo, la pista que conduce la señal al chip de retardo se encontraba dañada cortando el flujo de corriente eléctrica y posiblemente provocando que el alambre se cargara hasta el punto de desencadenar una descarga o chispazo.

Una forma en la que se dedujo si se trata de un alambre roto ó si se trata de una falla en el chip y/o pista, fue elevar el alto voltaje después de la descarga. Si es posible incrementarlo significa que los alambres no han sufrido daño alguno, por lo que el problema debe hallarse en los chips y/o pistas. En cambio, si el voltaje se cae con valores relativamente pequeños (200 V) es señal de que uno o más alambres se han roto y están haciendo un corto circuito.

En una ocasión, el análisis evidenció la estructura de un pico sobresaliendo por encima de los demás. Amplificando el histograma de la resta, se observó la ausencia de los picos a los

lados del sobresaliente. Para ubicar este alambre en la MWPC se hizo el mismo cálculo que en la sección 4.2. En esta ocasión si se encontraron alambres rotos y fueron los ubicados a los lados del alambre representado por el pico sobresaliente.

Otro problema que se presentó, durante las pruebas electro-mecánicas de la cámara 4, es la repentina caída del voltaje, aún después de ser reparada. Esto sucedió en repetidas ocasiones. Se comprobó que no se trataba de un alambre o de una pista dañada abriendo la MWPC y revisando su estado. Sin embargo, al realizar pruebas de alto voltaje con la cámara abierta, se encontró que para un cierto valor, se presentaban chispazos, cayéndose en consecuencia el voltaje. Se indagó acerca del origen del fenómeno y resultó que al perforar los bordes de los cátodos de cobre para sujetarlos con tornillos plásticos a las tapas de acrílico, algunas rebabas de la perforación quedaron atrapadas en la cuerda del orificio, dado que el cobre es conductor, sometido a un cierto alto voltaje generaba descargas. Para evitar que sucediese de nuevo, se elevó el voltaje varias veces consecutivas quemando las rebabas tras cada descarga, hasta que eventualmente quedó libre.

Después de reparada se tuvieron dificultades con el ruido en los pulsos de la MWPC 5, lo que ya había sucedido antes con otras cámaras y que se logró resolver aumentando el flujo del gas. Los gases liberados por el silicón negro con el que se sellan los costados de las MWPC, contaminaron la mezcla especial con las que las MWPC trabajan. Esto provocó que un estado de descargas continuas similar a lo que sucede en un contador Geiger se diera en las cámaras. Una vez seco el silicón deja de emanar gases y entonces se procedió con la descontaminación del gas dentro de las cámaras que tardó aproximadamente dos días. Después de dicho periodo los pulsos de la MWPC regresaron a la normalidad.

En la Fig. 5.5 se observa en el histograma de la suma que cerca del canal 4100 aparece un pico seguido de una pequeña curva no gaussiana. Esto se debe a la saturación de al menos uno de los pre-amplificadores que ocasiona constantes señales a intervalos de tiempo irregulares, que se suman a los pulsos que continúa generando la MWPC. Como consecuencia de esto la acumulación de eventos que registran un tiempo sumado de 4096 canales o más. Ello implica, una pérdida de eventos válidos, pues deben ser descartados al momento de crear el histograma de la resta.

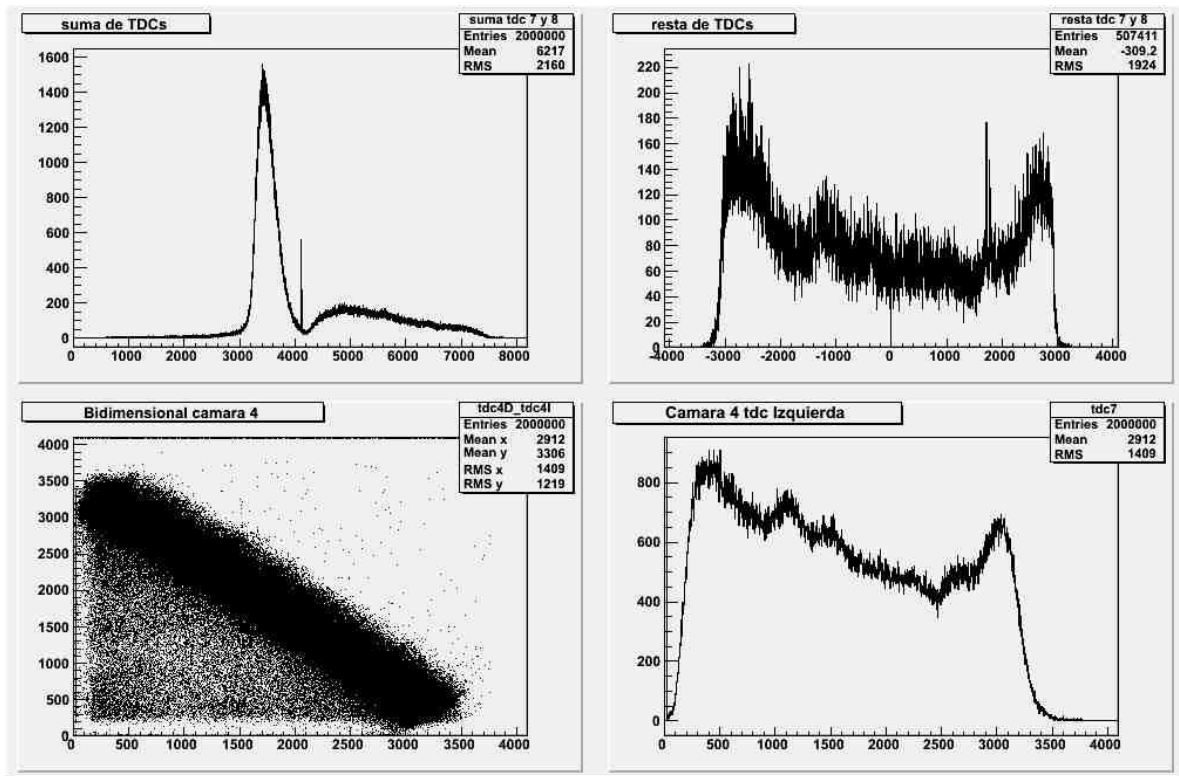


Fig. 5.5 Histogramas de la MWPC 5 a 1900V.

Este proceder se explica por la necesidad de sólo utilizar los mejores datos para graficar el histograma de la resta. Lo cual se hace tomando una ventana de eventos que sólo considera a los más cercanos a la media de la distribución gaussiana obtenida en el histograma de la suma. Dicha ventana es de aproximadamente 400 canales con la media como centro. De esta forma, puede obtenerse una mejor resolución que si se incluyen los eventos con valores fuera de la ventana mencionada.

De hecho, para una cantidad de datos cientos de veces mayor a la de las adquisiciones que hemos realizado, es posible y conveniente estrechar la ventana. De modo que al hacer un acercamiento del histograma de la resta, la estructura de picos equidistantes, debería mostrar una relación de diez a uno entre la altura del pico y el valor de fondo.

En relación a la MWPC 3 (gris), si miramos el histograma de la resta, notaremos que la respuesta no es uniforme. La región central muestra un comportamiento que podemos

considerar como esperado, sin embargo, es evidente una respuesta deficiente conforme nos alejamos de dicha región central, Fig. 5.6.

Gracias a la experiencia acumulada por el equipo de trabajo se conjeturó que uno de los cátodos de ésta cámara presentaba una curvatura convexa respecto al ánodo, lo cual se confirmó al abrirla y estudiar las medidas en la matriz de puntos que caracteriza a este cátodo.

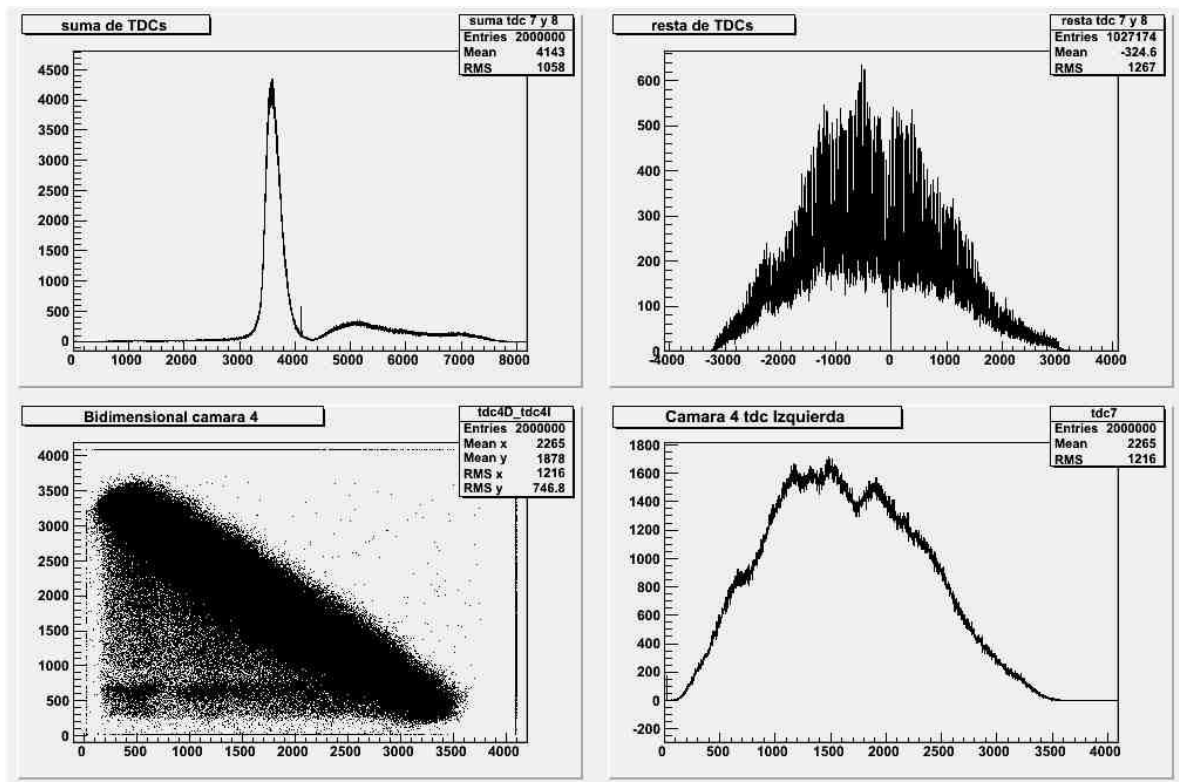


Fig.5.6 MWPC 3 a 1920 V.

En la matriz se muestra que las columnas correspondientes al borde izquierdo y derecho de la misma presentan valores en promedio mayores en profundidad que las columnas de la región central. Tal deformación acompañada de una ligera inclinación que limita la respuesta de ésta MWPC.

En los histogramas desplegados con los datos de la MWPC 2 (Fig.5.7) se observó que presenta una respuesta asimétrica. Uno de sus lados registró una cantidad mucho mayor de eventos que el opuesto y que ambos lados presentan un conteo mayor que la región central.

Recordando los casos anteriores, para este cátodo se supuso una superficie “ondulada” de forma tal que donde se ven los picos en el histograma el cobre se encuentra más cercano al ánodo. Además, la región del plano que muestra en el histograma un mayor conteo está más próxima que la correspondiente al otro pico de menor magnitud.

Esto se constató como en cada una de las MWPC anteriores, midiendo la profundidad del cátodo. Se analizaron los valores de la matriz que caracteriza dicha superficie, e incluso a simple vista, fue posible observar una ligera curvatura en concordancia con la suposición.

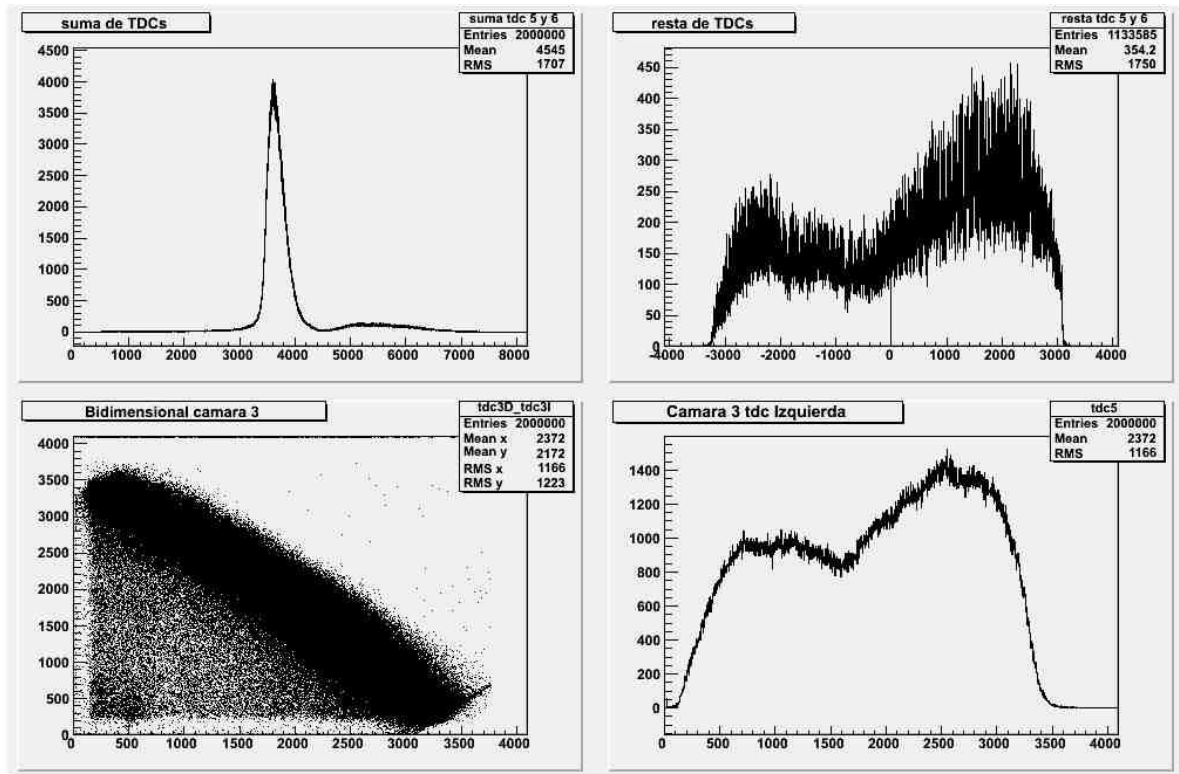


Fig. 5.7 MWPC 2 (verde) 1920 V

La cámara restante, la MWPC 1 (azul), mostró un comportamiento inesperado cuando se probó por primera vez, luego de que algunos alambres rotos le fueron reemplazados y al cerrarla, se selló con silicón negro (ver Fig.5.8). En un principio, no se comprendieron las posibles razones que dieron origen a este comportamiento, pero más adelante se comprobó que se debe a que los gases que libera el silicón mientras se seca, contaminan la mezcla original.

Puede observarse, que para valores relativamente bajos del alto voltaje el conteo se dispara enormemente reflejando en el histograma de la resta un número de picos que no corresponde a la cantidad de alambres en la MWPC, Fig. 5.8.

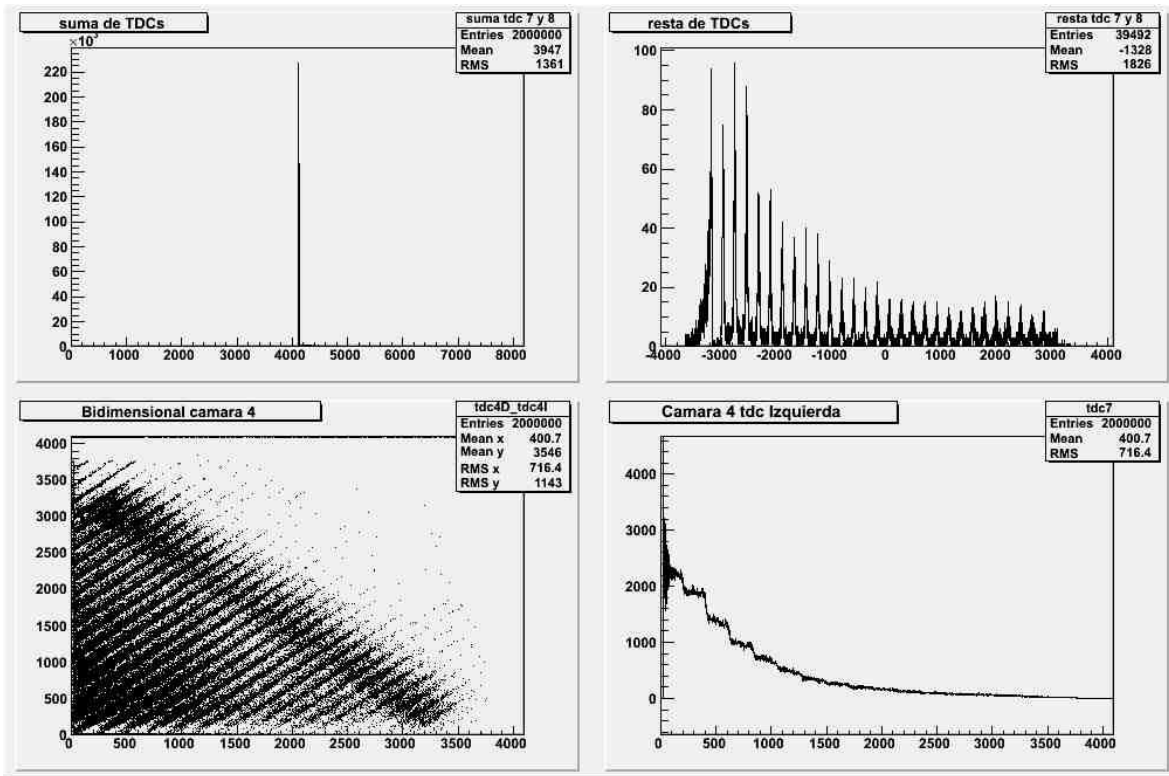


Fig. 5.8 Efecto de la contaminación de la mezcla Ar/CO₂ con los gases emanados del silicón con el que se sellaron las MWPC. En el histograma superior derecho se observan picos que no corresponde a los alambres.

5.4 ADECUACIONES A LAS MWPC:

Después de analizar los espectros de las cámaras, se hizo evidente, que el comportamiento de algunas de ellas estaba lejos de la eficiencia requerida. Por ello, se comenzó el estudio en mayor detalle con la cámara 4, que particularmente resultó ser la menos eficiente. En el siguiente histograma (Fig. 5.9), en lugar de una meseta, se observa una pendiente que culmina en un pico cargado a uno de los extremos de la gráfica, al igual que puede verse este mismo comportamiento en el histograma de la resta.

Para poder entender el origen de este comportamiento, se abrió la cámara para realizar distintas pruebas con ella. La primera, fue medir la distancia de separación de cada cátodo y el borde superior del marco de aluminio que da soporte a los alambres. Se midió una separación de 6 mm,

diferenciando de la distancia existente entre dicho borde y la tapa superior por un milímetro, midiendo 5 mm. Sin embargo, estas mediciones preliminares sólo dieron información para decidir el siguiente procedimiento: caracterizar cada uno de los tres planos para profundizar en detalle sobre su geometría y orientación en el espacio, ya que la condición de que los planos sean paralelos entre sí es parte fundamental del diseño y buen funcionamiento de la MWPC.

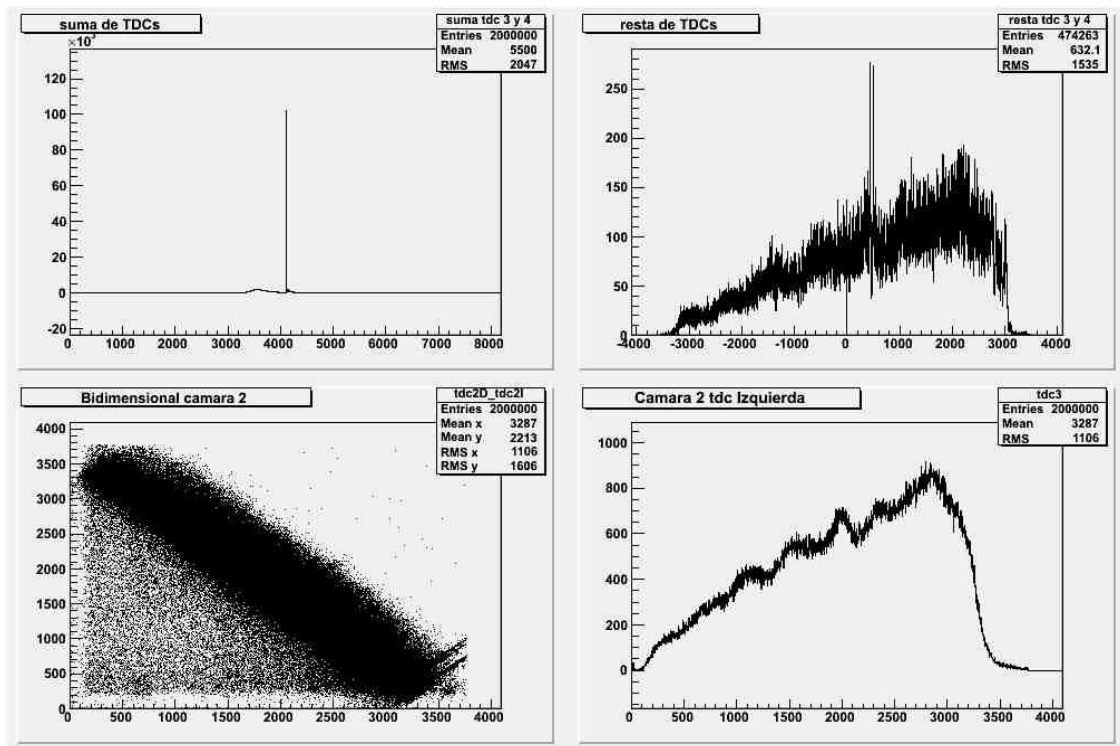


Fig. 5.9 Histogramas correspondientes a la cámara roja. Puede apreciarse un conteo in-homogéneo en toda la MWPC Esquina superior izquierda: la suma de los tiempos provenientes de ambos lados de la MWPC. Esquina superior derecha: resta del tiempo izquierdo menos el derecho. Esquina inferior izquierda: tiempo izquierdo contra tiempo derecho. Esquina inferior derecha: tiempo izquierdo contra número de cuentas.

Para caracterizar los planos se experimentó con distintas técnicas, de las cuales, la mejor y con menos complicaciones, fue usar una de las barras de aluminio que refuerzan las tapas de acrílico dándoles rigidez. Se colocó sobre el marco haciendo coincidir los orificios de cada extremo de la barra con los tornillos sujetos al mismo. La barra funcionó como referencia y soporte, desde ella se midió con un vernier digital la profundidad del plano de cobre a través de los orificios para los tornillos que sujetan las tapas al marco de aluminio. En la Fig. 5.10 se muestra el montaje.

Los orificios son equidistantes, lo cual permitió llenar una matriz de puntos de la superficie al recorrer la barra de un extremo al otro de la MWPC. Se tomó un sistema de referencia cartesiano derecho, con el origen en el tornillo de la esquina numerada como 2 (esquina superior izquierda de la Fig.5.10), la cual corresponde a la entrada (0,0) de la matriz. El eje X es delineado por la hilera de tornillos paralela a la barra (costado izquierdo de la imagen Fig.5.10) y el eje Y es delineado por la hilera de tornillos perpendicular a la barra (costado superior Fig.5.10).



Fig.5.10 MWPC sin la tapa superior con el montaje para la caracterización de los planos. Se observa la barra con orificios que sirvió para llenar la matriz de puntos con la que se caracterizaron los planos.

El archivo “txt” generado, que contiene los datos de la matriz, se introdujo al software gratuito gnuplot 4.0, el cual permite realizar un ajuste por mínimos cuadrados con el que se obtuvieron las constantes que definen la ecuación general de los planos promedio. También fue posible graficarlos junto con los puntos medidos y observar que, al medir con el vernier digital por los orificios de la barra, la presión ejercida la deformaba ligeramente durante la medición. A simple vista fue difícil apreciarlo, pero una vez hecho el ajuste y graficados los planos, cada hilera de

puntos de la matriz describía una curva, la cual reflejaba una deformación mayor en el centro que en los extremos, como era de esperarse. Este error sistemático en las mediciones causaba una variación de hasta 1 mm entre los puntos de una hilera, correspondientes a los orificios cercanos a los extremos de la barra de aluminio y los correspondientes al centro de la barra.

Para mejorar el método se probó unir con dos tornillos a un par de las barras, formando una especie de “viga” que resultó deformarse menos ante la misma presión ejercida. Con la “viga” se disminuyó la variación máxima a 0.5 mm, es decir a la mitad, mejorando cualitativamente nuestros datos y en consecuencia los valores de las constantes del plano promedio resultante.

También se caracterizó el plano de los alambres utilizando el mismo método, salvo el hecho de colocar una pequeña tira de papel bond sobre un conjunto de alambres cada vez haciendo un promedio de su posición. Limitado a tomar mediciones únicamente para llenar la primera y última hilera de la matriz, ya que los alambres están soldados a un tensión de $120 \frac{gm}{cm^2}$ $120 \frac{gm}{cm^2}$, calculada para mantenerlos inmóviles aún bajo la acción de un intenso campo eléctrico y basta con conocer los valores en sus extremos.

Las gráficas de los planos promedio mostraban que el cátodo inferior se encontraba inclinado en la dirección de una de sus diagonales, provocando que una región quedara más cerca al plano de los alambres, mientras que la más distante tenía una diferencia de aproximadamente 1.5 mm, lo cual es demasiado. Se consideró que ésta fuese la causa más probable que ocasionó el mal desempeño de la cámara roja. Como ya se mencionó, la condición de que los planos sean paralelos entre ellos es necesaria para garantizar un campo eléctrico homogéneo, mejorando la eficiencia en el conteo de partículas, que idealmente debe ser la misma en toda la superficie de la cámara.

La solución que se implementó, consistió en colocar una tira de hule-espuma (*gasquet*) entre el marco y las tapas, con un cierto espesor y consistencia. Se utilizó el mismo tipo de hule-espuma que se usa para sellar las puertas de un auto. De esta forma se tienen tres grados de libertad para ajustar la ubicación y orientación del cátodo respecto al ánodo, pues la espuma puede comprimirse lo suficiente. Rotación respecto a los ejes Y, X y traslación en el eje Z.

El hule-espuma se recortó siguiendo la forma del marco y se perforó para permitir que los tornillos lo atraviesen. Para igualar la distancia promedio de cada cátodo al plano de alambres, conociendo

que entre ambas medidas hay una diferencia de un milímetro, se utilizaron dos espesores distintos del gasquet.

Los tornillos no están fijos a ninguna de las partes mecánicas, sólo las atraviesan y junto con las contratuercas mantienen unidos al marco y a las dos tapas. Sin embargo, es necesario calibrar independientemente cada tapa, pues su inclinación respecto al ánodo es distinta. Para ésta cámara, el plano de cobre superior resultó bastante paralelo al de los alambres, por lo que únicamente hizo falta alejarlo un par de milímetros sin tener que modificar su inclinación.

Este nuevo sistema de acoplamiento demanda que los tornillos se fijen al marco y que sean del tipo conocido como “espárragos” o prisioneros (no tienen cabeza), para así poder colocar tuercas (46 por tapa) y apretarlas de forma independiente en cada extremo, para corregir la inclinación del cátodo en lo posible. El gasquet permite a las tapas tener cierto grado de movimiento rotacional alrededor de los ejes X, Y como para enderezar la inclinación del cátodo.

La técnica que se probó para fijar los tornillos al marco de aluminio, fue desbastarles la cuerda con una pulidora de metal en su región central, quedando dos caras planas paralelas donde se colocó plastilina epóxica y los espárragos se introdujeron en sus respectivos orificios dejando secar la plastilina antes de trabajar con la cámara.

Una vez lista la cámara, se colocó el gasquet correspondiente a la tapa inferior y se hicieron las mediciones para caracterizar el plano. Con los datos se ejecutó el programa que calcula el plano promedio, se graficaron y se observó que realmente la desviación respecto al plano paralelo al de los alambres era cercana a los 2 *mm*.

Se corrió el programa que hace el ajuste tuerca por tuerca, se llevó a cabo el ajuste mecánico y se caracterizó de nueva cuenta al plano de cobre, obteniendo la ecuación que lo define y se graficó junto con el plano original del cátodo, el de los alambres y el nuevo plano resultante del ajuste tuerca por tuerca. Con lo anterior se redujo la desviación a menos de 5 décimas de milímetro, lo cual es satisfactorio. Sin embargo se presentó un nuevo problema, puesto que para hacer la primera calibración sólo se atornilló una de las tapas, pero nunca ambas al mismo tiempo. Cuando finalmente se cerró por completo la cámara, la plastilina epóxica no soportó el esfuerzo cortante y la mayoría de los tornillos se recorrieron verticalmente al apretar las tuercas por ambos lados, perdiéndose la calibración.

Fue indispensable diseñar una nueva técnica para fijar los tornillos al marco de aluminio. Surgieron dos ideas que se pusieron a prueba en un modelo que recrea las partes mecánicas mencionadas. El modelo se fabricó con una pieza de aluminio del mismo espesor que el marco, a ésta se le perforaron dos orificios con el mismo diámetro que en la cámara y se fijaron dos tornillos aplicando los dos nuevos métodos.

El primero método consistió en fabricar un taquete con nylamid, que es un plástico muy resistente, al que se le hizo cuerda. Se introdujo a presión en el orificio de la pieza y se atornilló el espárrago.

La segunda técnica requirió hacerle cuerda a la pieza de prueba e introducir una espiral de acero llamada heli-coil, que a su vez tiene cuerda. Se atornilló el espárrago de forma que en ambos casos quedaron centrados y se montaron las demás piezas del sistema que reproduce la estructura rígida de la cámara (marco de aluminio, gasquet de ambos lados del marco al igual que dos piezas de acrílico que forman las tapas en la cámara, junto con las rondanas y las tuercas). Se ajustó al límite forzando el sistema para conocer su respuesta. Ambas técnicas fueron eficientes, sin embargo en la primera el taquete de nylamid permitía un poco de movimiento en la dirección perpendicular al tornillo a diferencia del heli-coil, por lo que se prefirió la segunda.

Al final, con los resultados que arrojó el programa que calcula el ajuste de los cátodos (los resultados que indican el número de vueltas de tuerca son expresados en grados) y aplicando la técnica mencionada a esta cámara, colocamos el gasquet correspondiente a la tapa inferior de la misma para cerrarla y comprobar la viabilidad de la nueva técnica.

Cada MWPC necesitó variaciones sobre la técnica del gasquet, según sus condiciones. Algunas no necesitaron la modificación porque sólo uno de sus cátodos requería ser enderezado.

Finalmente, aplicamos una técnica ya existente [28], que se utiliza en MWPC de grandes dimensiones para evitar que los alambres se desplacen perpendicularmente respecto al plano que forman, hacia arriba y abajo de forma alternada [29], ver fig. 5.11. Consiste en trenzar hilos (en este caso de nylamid) entre los alambres en dirección perpendicular a los mismos a ambos extremos y tenzarlos, fig. 5.12.

Cualquier objeto de material aislante que sea introducido en las MWPC crearía una zona “ciega” dentro de ellas, sin embargo, en los extremos de los alambres justo antes de la

soldadura con las pistas de cobre es posible colocar el hilo de nylamid ya que esa región no detecta [30]. Los alambres ubicados en esa región son los de guarda y sólo sirven para matizar los efectos de borde que se dan entre el plano de alambres y el marco de aluminio de las MWPC.

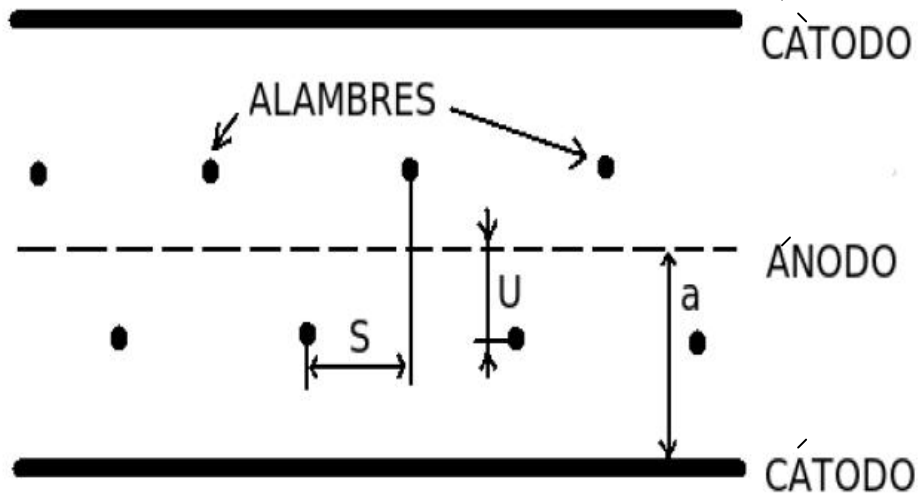


Fig. 5.11 Vista transversal de una MWPC donde se observa el desplazamiento perpendicular de la posición de los alambres de forma alternada hacia arriba y hacia abajo, debido al campo eléctrico.

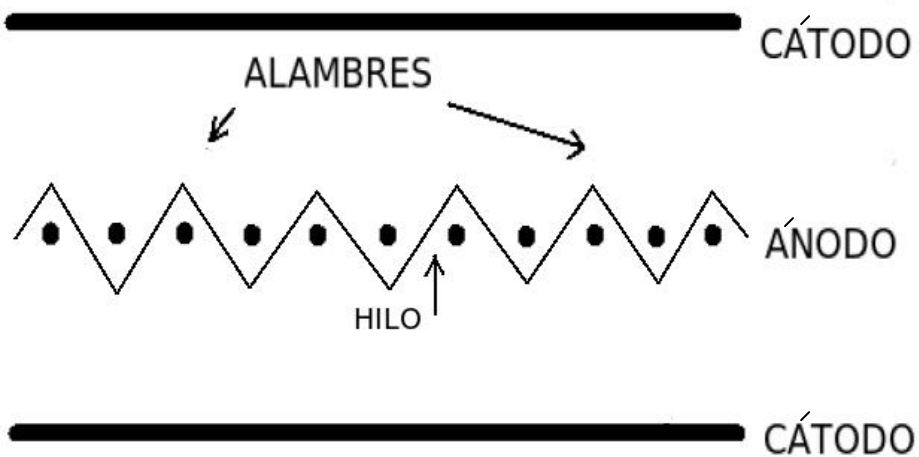


Fig. 5.12 Esquema que muestra el hilo trenzado entre los alambres para limitar su desplazamiento bajo el campo eléctrico.

5.5 PROGRAMA PARA ENDEREZAR LOS CÁTODOS

El principal problema que afecta el comportamiento de las MWPC es la inclinación que presentan algunos de sus cátodos respecto al plano anódico. En la sección anterior se relata el proceso para repararlas mecánicamente, pero un elemento indispensable para lograrlo es conocer con precisión cuánto apretar las cuarenta y seis tuercas que sujetan cada tapa en una cámara. La mejor forma de encontrar la solución, fue programar una rutina que lo calcule a partir de conocerse la ecuación de los planos involucrados. Como se menciona en la sección 5.4, haciendo un ajuste de los puntos que caracterizan cada plano se obtienen las constantes que definen a los correspondientes planos promedio. Estos datos son suficientes para que el programa calcule la combinación necesaria de cuánto apretar cada tuerca.

El razonamiento que acompaña la elaboración del algoritmo consistió en encontrar la ecuación del plano donde idealmente debe ubicarse el cátodo respecto al plano de alambres. Como se conoce la ecuación del plano de los alambres (caracterizado previamente), el plano deseado debe ser una traslación a lo largo del eje Z , ya que deben ser paralelos. Haciendo un poco de álgebra se puede simplificar la ecuación de dicho plano forzando la constante que acompaña a la variable z a que sea 1, de este modo a la constante D le sumamos el valor d de la distancia a la que queremos ubicar el cátodo del plano de alambres, construyendo así la ecuación. Con ella el programa realiza una substracción punto a punto entre el valor de la variable z y z' , sustituyendo las variables tanto x como y para cada coordenada correspondiente a cada tornillo (ver Anexo A). De este modo, obtenemos el valor de la distancia a la que se encuentra el plano de cobre respecto al plano donde debería ubicarse.

Por otra parte, efectuamos el cálculo para conocer la distancia que avanza una tuerca con cada vuelta a lo largo del espárrago, resultando en 1.1 mm . A continuación, este valor se multiplica por 360° para convertir a grados el número de vueltas o de fracciones de vuelta que debe apretarse cada tuerca. En las imágenes de la página siguiente, se muestra el plano promedio del cátodo inferior de la cámara 1 (azul) sin ajustar (Fig. 5.13.a), y ya ajustada (5.13.b). La desviación en la Fig. 5.11.b parece exagerada, pero esto se debe a la ampliación hecha en gnuplot. La diferencia final, después de ser reparada la MWPC es de $\approx 0.2 \text{ mm}$, la cual indica que la técnica desarrollada funciona.

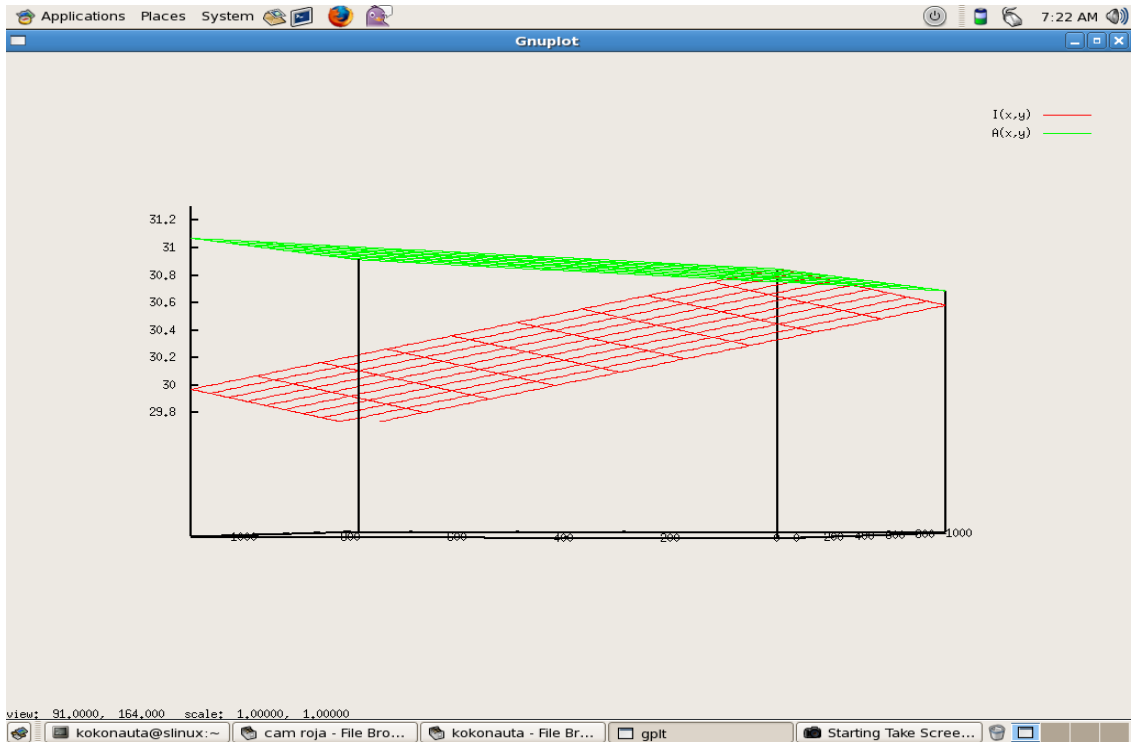


Fig. 5.13a Planos promedio del cátodo inferior de la MWPC 1 sin ajustar.

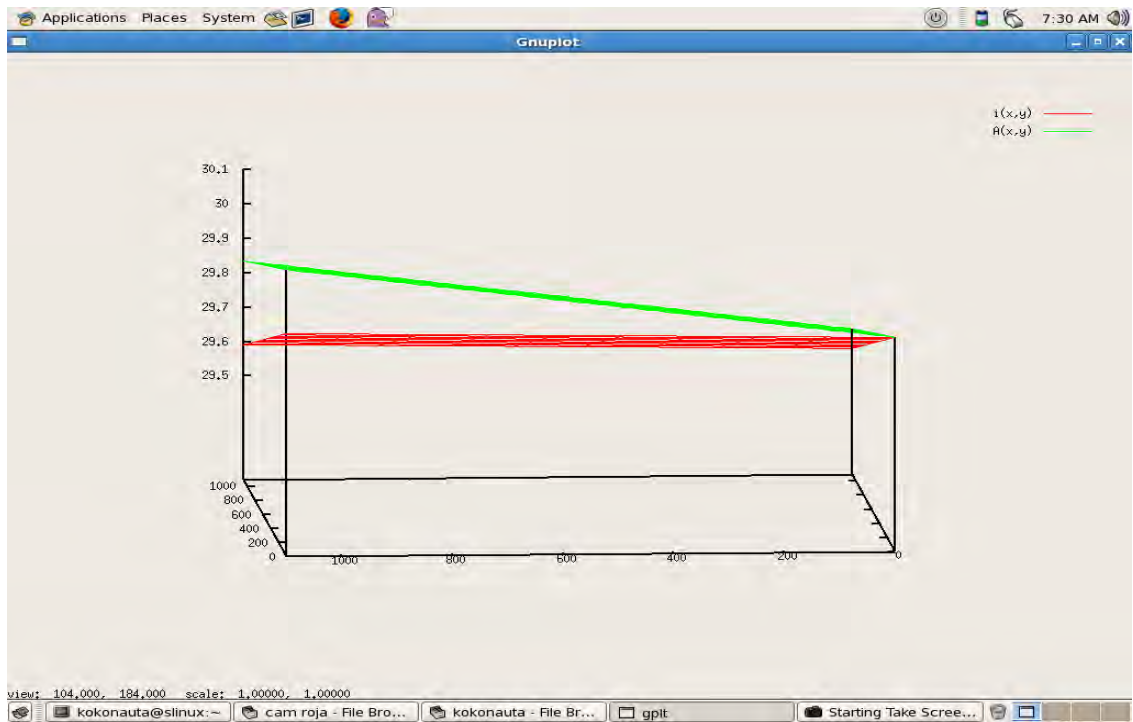


Fig. 5.13b Planos promedio del cátodo inferior de la MWPC 1 después del ajuste. La desviación se redujo.

6 RESULTADOS

Este capítulo se divide en dos partes, en las que se indican los resultados obtenidos durante la primer y segunda etapa de la investigación. En la primera parte, se muestran los resultados de la calibración del detector de muones después de ajustar las variables correspondientes, es decir, el alto voltaje de los centelladores y de las MWPC, así como el flujo de gas y los umbrales del discriminador para estas últimas.

En la segunda parte, se incluyen los resultados de las mejoras electro-mecánicas, así como el procedimiento de estudio y reparación para las MWPC.

Estos resultados son preliminares y sirven como punto de partida para volver a calibrar el detector de muones una vez instalado bajo la pirámide del Sol. Dado que las condiciones en el túnel bajo la pirámide son muy diferentes a las del laboratorio, tales como la temperatura, la humedad, la frecuencia de conteo de muones. Además, todo el sistema de tratamiento y captura de las señales del detector será cambiado. Lo mismo sucede con el software de análisis el cual está sujeto a prueba y siendo modificado. Por lo anterior es que el trabajo realizado no necesita ser tan riguroso en las mediciones sino cualitativo de forma que sirva de guía en las subsecuentes etapas del proyecto.

6.1 RESULTADOS DE LA PRIMERA ETAPA DEL ESTUDIO

En esta primera etapa, realizamos distintas pruebas con las MWPC y centelladores con el objetivo de hacerlos más eficientes, mejorando la resolución espacial y temporal del detector de muones.

Para ello, se encontró el voltaje de operación de los centelladores con el uso de dos paletas centelladoras ya calibradas. Se ajustaron los umbrales del discriminador y se corrigió la ventana temporal de coincidencia entre la señal de inicio y alto de los centelladores, que finalmente se tradujo en una mejora en la resolución temporal.

Respecto a la resolución espacial, se encontró el voltaje de operación de las MWPC, se ajustaron los discriminadores, se escogieron los pre-amplificadores con la mejor respuesta y se encontró el flujo adecuado de gas para alimentar las cámaras, mejorando así la resolución espacial de forma sustancial en una de las MWPC.

6.1.1 CENTELLADORES

En primer lugar, se calibraron los detectores de centelleo comparando el número de eventos contra el de las dos paletas centelladoras en coincidencia doble. A partir de este punto de comparación, se cambió el valor del discriminador y del voltaje hasta encontrar el voltaje de operación adecuado. También, se ajustó el tiempo de la ventana temporal para la coincidencia entre los centelladores con el uso de un generador de compuertas y retraso, junto con lo anterior se igualó la longitud de los cables BNC que conducen la señal de los centelladores. De esta forma, se corrigió el retraso de algunos nanosegundos en la señal de uno de ellos y por ende, se mejoró la resolución temporal del detector.

Otro detalle importante, fue la homologación del material que recubre a los plásticos centelladores. Todos ellos, fueron envueltos en papel Tyvek®, el cual es el material que mejor ha funcionado para contener y reflejar la luz generada en los centelladores, de los que se probaron.

En cuanto a la electrónica, se retiró el módulo FIFO del alambrado debido a que su “offset” variaba con la temperatura, alterando la señal. Otro módulo que se retiró, fue el amplificador de los pulsos de los detectores de centelleo. Se cambió por un discriminador LTD que filtra dichos pulsos del ruido. También se revisaron los CFD, para evitar deficiencias en las adquisiciones, así como la calibración de los umbrales.

Las mesetas del voltaje de operación de los cuatro centelladores, se muestran en la Fig.6.2a y Fig.6.2b. En éstas se observa que el valor del alto voltaje es idéntico en tres de ellos, pero un poco menor en el restante. Los centelladores 9, 10 y 11, operan con un voltaje de -1600 V, mientras que el 8, opera con -1500 V. Lo que determina estos valores es la ganancia de sus respectivos tubos fotomultiplicadores.

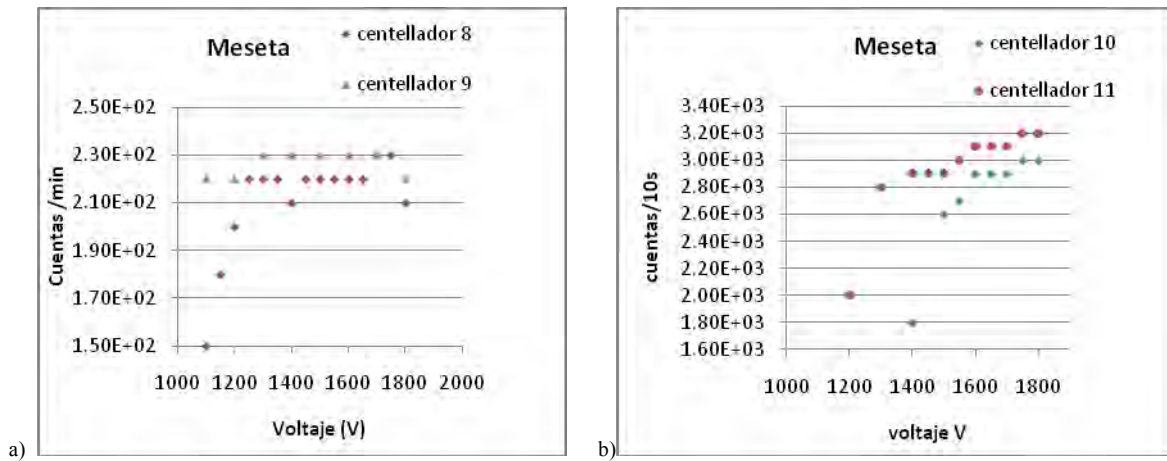


Fig.6.1 Mesetas para el voltaje de operación de los centelladores 8 y 9.(b) Meseta para los centelladores 10 y 11.

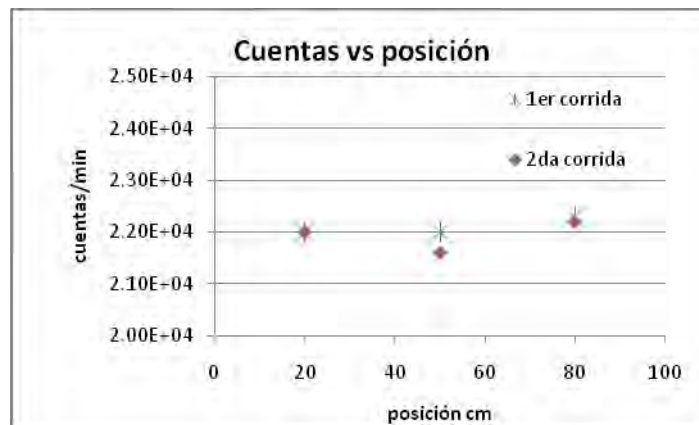


Fig.6.2 Conteo de muones en cada una de las tres secciones tomadas de los centelladores 8 y 9.

Por otra parte, las características del plástico centellador que se mencionan en la descripción del fabricante indican la homogeneidad en la respuesta del material en toda su superficie. Hecho que se confirmó con el procedimiento descrito en la sección 5.1.1 del capítulo anterior. Los resultados de la prueba, se muestran en la Fig. 6.2, donde se observa que las fluctuaciones entre el número de cuentas de cada sección son pequeñas y que por lo tanto, la respuesta de los centelladores es homogénea.

Como parte de la calibración de los centelladores, se corrigieron cuestiones tales como la longitud de los cables BNC que conducen la señal de los centelladores, la cual debe ser la misma para todos; una mayor longitud en alguno de los cables provocaría un retraso aproximado de 3 ns por cada metro extra. También se ajustó el valor umbral del

discriminador, así como el intervalo de la ventana de coincidencia de las señales de inicio y final. Esto se hizo mediante el modulo generador de compuertas y de retraso, con lo que se consiguió mejorar la resolución temporal del detector.

En la siguiente figura 6.3, se muestra el número de cuentas por minuto de los centelladores 8 y 9, contra el valor del discriminador. Si el umbral es muy bajo, el ruido se filtra produciendo un aumento en el conteo, por el contrario, si el valor es muy alto se pierden muones.

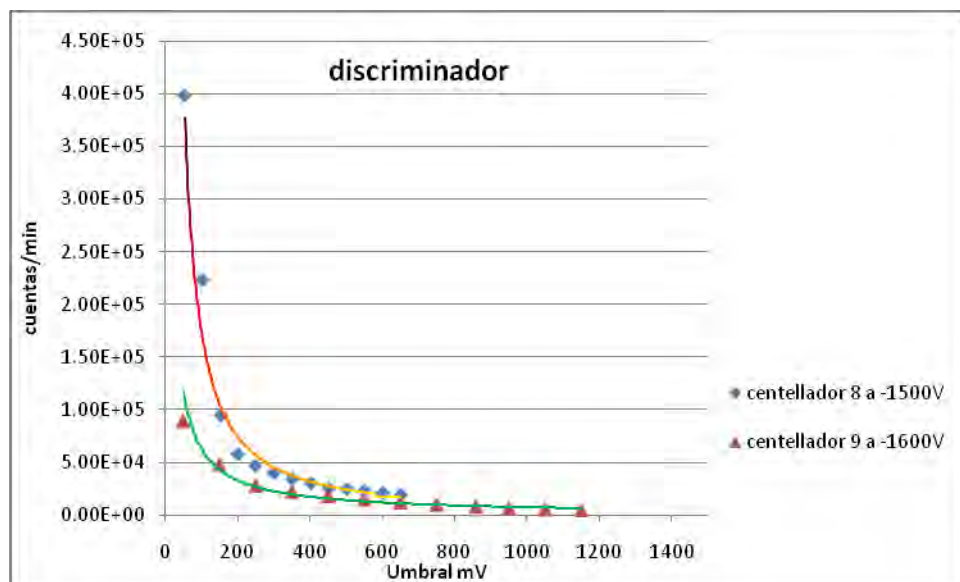


Fig. 6.3 Variación del conteo de los centelladores 8 y 9, respecto al valor del discriminador.

6.1.2 CÁMARAS MULTIALÁMBRICAS

Mediante el procedimiento descrito en la sección 5.2, fue posible hallar un valor adecuado para el voltaje de operación de la cámara 6. Dicho voltaje se estableció en 1950 V, tomando el valor máximo antes de que domine el ruido en la señal de salida. Posteriormente, cuando la rutina de análisis hecha en ROOT estuvo lista, se confirmó que el valor del voltaje es el adecuado para operar esta cámara. Esto se puede observar en el histograma de la Fig. 6.5, mientras que en la Fig. 6.4 la gráfica muestra el comportamiento esperado en la región de proporcionalidad como se observa en la curva de Montgomery en la fig. 3.1.

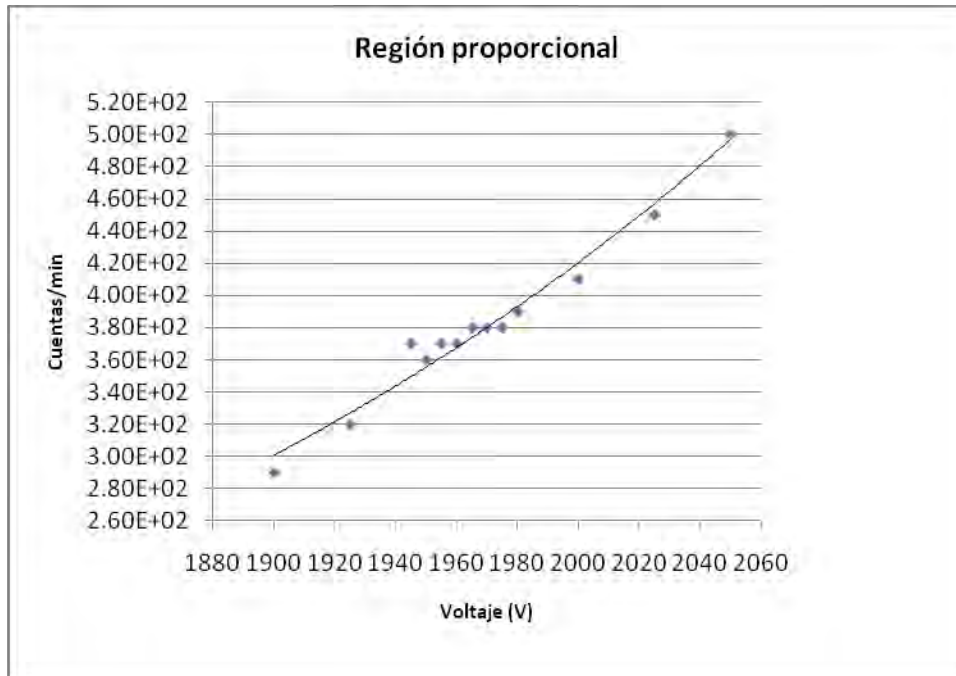


Fig.6.4 Gráfica de la meseta del voltaje de operación de la MWPC 6.

Para las restantes cámaras, el voltaje de operación se definió a partir de los histogramas creados por el programa de análisis, donde los datos colectados mediante el CAMAC y el programa de adquisición son tratados para mostrar información referente al estado y comportamiento físico de las MWPC. A partir del histograma de la resta la elección del voltaje de operación se vuelve más precisa, tomando en cuenta que la forma de la gráfica debe verse como una meseta. Los picos que la conforman y que visualizamos haciendo un acercamiento, deben tener una amplitud similar indicando un conteo presumiblemente homogéneo. Además, la relación pico-valle debe ser de diez a uno, cuestión que no logramos observar puesto que el programa de análisis necesita algunas modificaciones como substraer del histograma el ruido de fondo. Sin embargo, dado que el equipo electrónico CAMAC, así como el de cómputo (PC) han sido sustituidos por un equipo VME actualmente ya instalado, la rutina de análisis que está siendo programada será distinta a la utilizada en este trabajo. El nuevo equipo es capaz de almacenar la forma completa de cada pulso, en lugar de registrar el tiempo que tardan en recorrer la línea de retardo de las MWPC en cada dirección. Con éste método podrá mejorarse aún más la resolución espacial y temporal, durante el análisis fuera de línea [31].

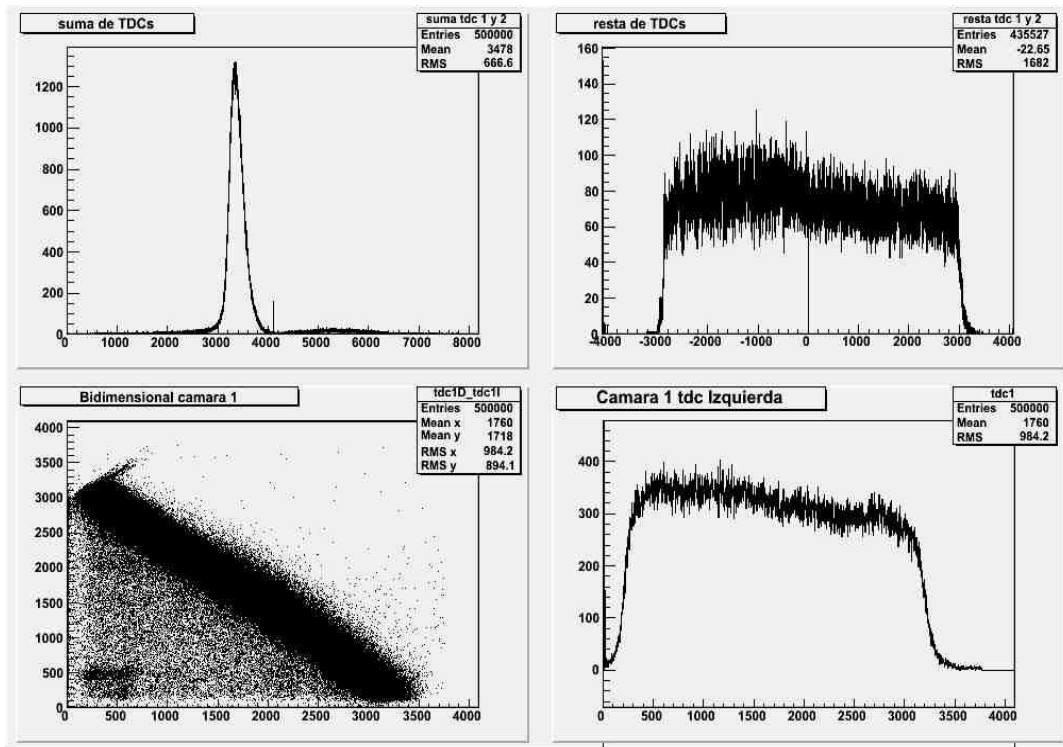


Fig. 6.5 Histogramas de la MWPC 6 operando a 1950 V. En el de la resta, se observa un buen desempeño de la cámara.

El último factor a considerar para determinar el voltaje de operación, es observar que la resolución espacial sea buena. En ese sentido, el ruido que aparece como pequeñas fluctuaciones visibles en el histograma de la resta, contribuyó a que la separación entre pico y pico se pierda. La información en este histograma permitió determinar cualitativamente, si la resolución espacial es buena o mala. Por ejemplo, si con la ampliación de dicho histograma es posible contar un número de picos equidistantes claramente definidos y entre ellos valles lisos, coincidente con el número de alambres de las MWPC, se puede saber si el voltaje de operación elegido se acerca al óptimo para cada cámara.

Tener una buena resolución espacial es fundamental para, a posteriori, realizar la reconstrucción de las trayectorias de los muones mediante una rutina en C++ ejecutada en ROOT.

Un ejemplo de una buena resolución espacial, se observa en la Fig. 5.5, donde el histograma de la resta para la MWPC 6 (blanca), muestra claramente los picos

correspondientes a la posición de los alambres en la cámara, así como el conteo de muones de cada uno de ellos.

En relación a los valores del discriminador de las MWPC, es importante subrayar, que dependen fuertemente de los pre-amplificadores utilizados. Algunos de éstos, mostraron ser muy ruidosos, lo que obligó a incrementar el valor umbral durante las pruebas. Sin embargo, los pre-amplificadores serán remplazados por una versión mejorada, lo que implica volver a calibrar los discriminadores para alcanzar una mayor resolución espacial.

Por otra parte, se ajustó el flujo de gas que necesita mantenerse a una tasa baja para evitar que las cámaras se inflen, pues ello modifica temporalmente su geometría aunque el cambio es muy pequeño (del orden de 0.5 mm ~~0.5 mm~~). El cual se da únicamente en la tapa superior, ya que sobre la tapa inferior se distribuye el peso total de la cámara, lo que impide que sufra una mayor deformación.

La cantidad de flujo requerido varía según la cámara con la que se trabaje y la tubería que se utilice para alimentarla. Se encontraron algunos valores de dicho flujo para cada caso, sin embargo, actualmente todas las conexiones han cambiado y sólo se realizó la mencionada prueba antes de reparar la mayoría de las cámaras. Cuando todas las tuberías se hayan cambiado, y a cada MWPC le corresponda una en particular, entonces, se hará una calibración definitiva, que en algunos casos será muy distinta a las establecidas durante las pruebas.

También relacionado con la mezcla especial de gas que usan las cámaras, se encontró que el sello de silicón que se aplicó a las juntas (entre el marco de las MWPC y sus tapas), libera gases altamente contaminantes para la mezcla original. En el osciloscopio, se observó que la forma de los pulsos era notoriamente distinta a la que conocemos cuando las MWPC operan correctamente. En estas condiciones no es posible acumular datos que únicamente reflejen el paso de muones por que la cantidad de señales espurias lo impide. Un ejemplo de este comportamiento se observa en la figura 5.8.

6.2 PROCEDIMIENTO PARA EL ESTUDIO Y REPARACIÓN DE LAS MWPC.

Como resultado de las pruebas y estudios realizados a lo largo de ésta investigación, se desarrolló un procedimiento para entender el comportamiento de las MPWC a partir del análisis de los datos adquiridos y de la experiencia acumulada a través del estudio electro-mecánico de sus componentes.

Considero que para comenzar es necesario realizar el proceso de calibración del detector de muones (detallado en el capítulo 5) y con los histogramas de cada adquisición será posible identificar fallas en la operación de las MWPC, si las hay, así como formular una imagen de la geometría de las mismas de forma cualitativa. Ello nos permite saber cómo y dónde buscar posibles fallas en un chip o pista, un alambre roto, deformaciones mecánicas, etc. En la sección 5.3 dedicada al análisis de los datos, explico la relación entre lo observado en los histogramas y el estado electro-mecánico de las MWPC.

Después de identificar la causa probable de un mal desempeño, se abre la respectiva MWPC y se hace el estudio de sus componentes, teniendo en mente lo observado en los histogramas. Aunque, la forma del histograma no sugiera alguna deformación o inclinación de alguno de los cátodos respecto al ánodo, aún en ese caso, es necesario caracterizar los tres planos con el método expuesto en la sección (5.4). Este resultado permite conocer la distancia promedio entre los tres planos, lo cual es una condición necesaria para que las MWPC funcionen correctamente (sección 3.4.1).

En el caso de presentarse uno o más alambres rotos, conviene remplazarlos antes de caracterizar el ánodo. Sin embargo, de existir problemas con las pistas o los chips de retardo es preferible dejarlo para después de reparar los problemas mecánicos, es decir, enderezar los cátodos con el método desarrollado y modificar cuando sea necesario el sistema de sujeción entre tapas y marco (colocar heli-coils con la técnica aprendida y descrita en la sección 5.4).

Esta técnica se aplica cuando debe enderezarse un cátodo y al mismo tiempo se debe corregir la distancia de separación entre el cátodo opuesto y el ánodo. En cambio, si no

existe deformación o desviación de alguno de los planos de cobre, pero sí una diferencia en la separación entre éstos y el ánodo, entonces debe colocarse un gasquet del espesor adecuado para igualar dichas distancias. Aunque es importante precisar, que esto debe realizarse una vez que hayan sido revisadas y solucionadas otras posibles fallas.

Después de reparar los problemas mecánicos de las cámaras, el siguiente paso consiste en checar los elementos electrónicos. Para ello se cierra el circuito de la línea de retardo mediante el uso de cables y se mide la continuidad del mismo. De no haberla, probablemente se deba a un falso contacto en alguna conexión entre los chips o por una pista dañada. También hay que revisar los cables de alto voltaje y de señal de las MWPC, que accidentalmente suelen ser machucados cuando se manipulan las cámaras.

Al concluir el trabajo con la electrónica y antes de cerrar la(s) MWPC es importante hacer pruebas con el alto voltaje. Por experiencia se sabe que cualquier “basura” o rebaba de cobre provoca descargas al interior de la cámara cuando se incrementa el voltaje hasta un cierto valor. Para evitar que suceda esto se queman las pelusas y rebabas de cobre incrementando el alto voltaje a 3000 V o más ya que la MWPC está abierta.

Cuando se considera que ha pasado las pruebas, se cierra la cámara ajustando las tuercas conforme a la técnica descrita en la sección 5.4. Para ello, se siguen los resultados del programa que calcula cuánto apretar en grados cada tuerca y mencionado en la sección 5.5. De ser necesario colocar gasquets en ambas caras del marco, primero se comprime uniformemente aquél donde no hace falta enderezar el cátodo.

Finalmente se suministra gas a la cámara por un par de horas y se eleva el voltaje algunos cientos de volts para observar su comportamiento en el osciloscopio, previo a colocarla de nuevo en su posición. Si este es normal, entonces se hacen adquisiciones de datos con el detector para determinar el nuevo voltaje de operación después de ser reparadas.

6.3 RESULTADOS FINALES

Como resultado del proceso llevado a cabo, se logró mejorar el funcionamiento de las MWPC como se constató tras probarlas nuevamente. Durante este proceso, la mayoría de los problemas mecánicos fueron resueltos. En concreto la inclinación de los cátodos respecto al ánodo y la distancia de separación entre ambos elementos. Estos dos factores son de gran importancia para el desempeño de las cámaras, como se menciona en la sección 3.4.1.

A continuación, en la Fig. 6.7, se muestra la comparación de los histogramas correspondientes al comportamiento de la MWPC 5 antes y después de ser reparada. En ella, se nota claramente la mejoría en su desempeño, como lo refleja el histograma de la resta. En él podemos observar que la meseta se muestra pareja y con un conteo mucho más homogéneo a lo largo de la cámara. Como se incrementó la distancia de separación entre cátodos y ánodo, en consecuencia, el voltaje de operación para ésta cámara ahora es mayor. Sin embargo, en el histograma de la suma es evidente un pico, que como sabemos, aparece cuando hay saturación en algunos de los pre-amplificadores. La misma situación provoca que el histograma del número de eventos contra la señal del lado izquierdo aparezca cortado.

En la figura 6.8, se muestran los resultados obtenidos tras reparar la MWPC 1. Esta cámara presentó los mismos problemas mecánicos que las demás, pero el extraño comportamiento observado en los histogramas, se debe a que la mezcla de gas especial está contaminada con los gases que emana el silicón negro con el que se sellan. Este hecho provoca continuas avalanchas y por ende descargas que se asemejan a las de un contador Geiger pero a menor diferencia de potencial.

La MWPC 4, fue la primera que se estudió a fondo y en la cual se desarrollaron la mayoría de las técnicas implementadas en las restantes. Los trabajos con dicha cámara duraron cerca de cuatro meses durante los cuales hubo que solucionar gran cantidad de problemas (sección 5.4). Pero finalmente se consiguió una evidente mejoría en el comportamiento de ésta y de las demás cámaras.

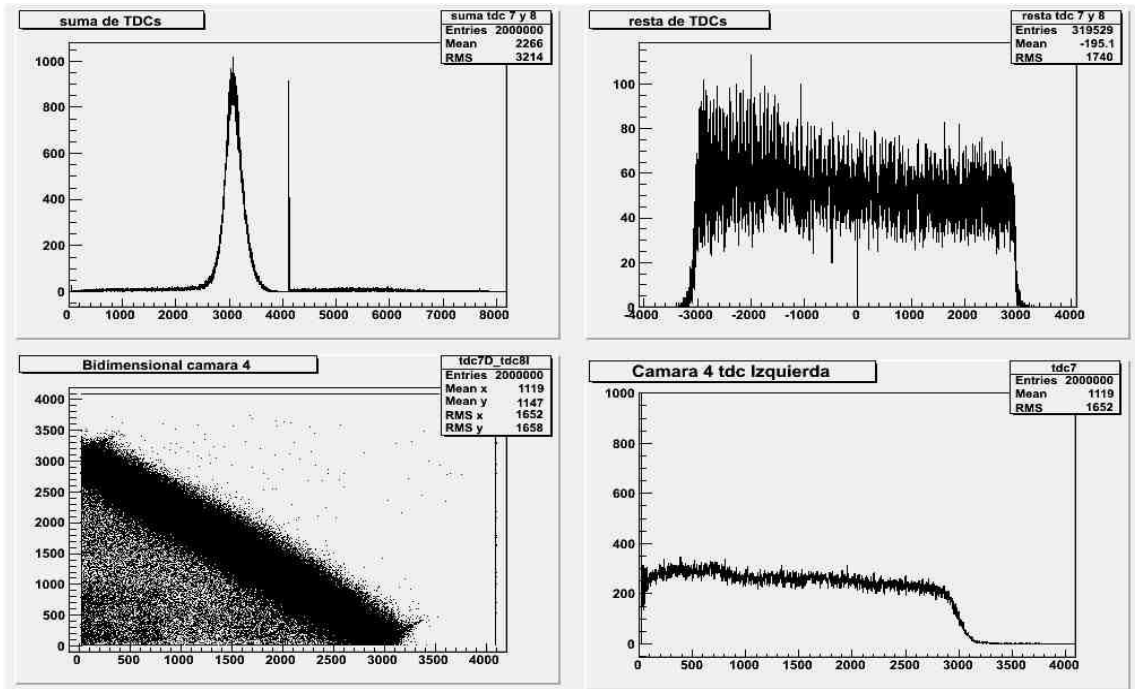


Fig.6.7a Cámara 5 reparada a 2180 V con 2×10^6 eventos. Se observa un espectro más uniforme

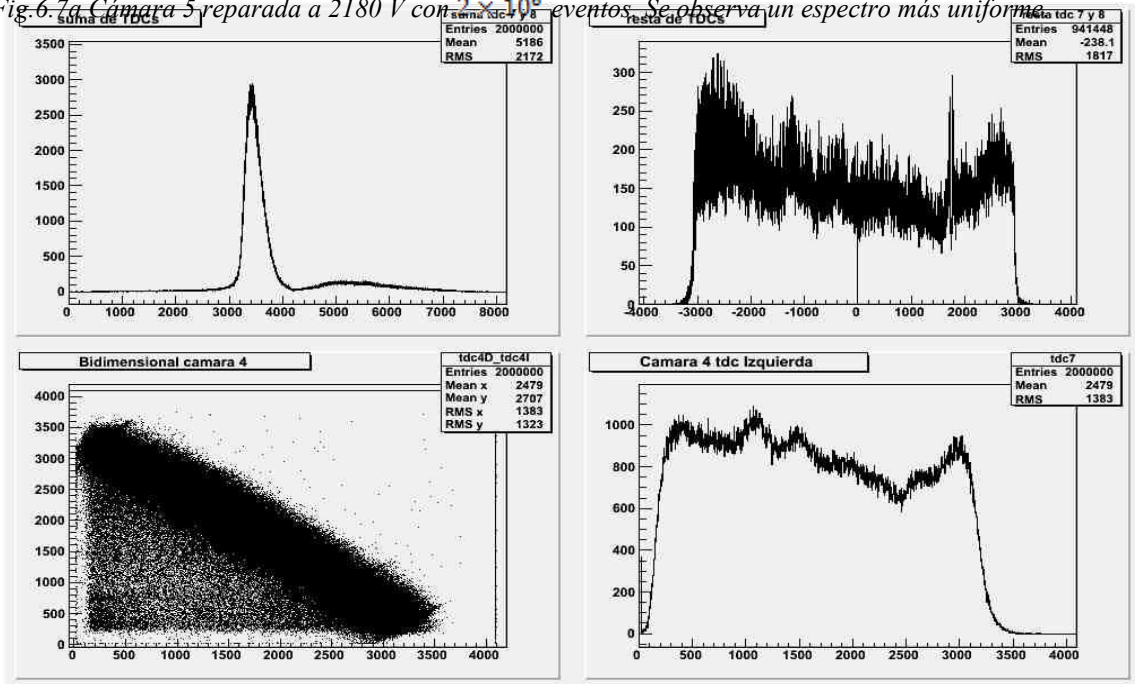


Fig.6.7b La misma cámara antes de ser reparada.

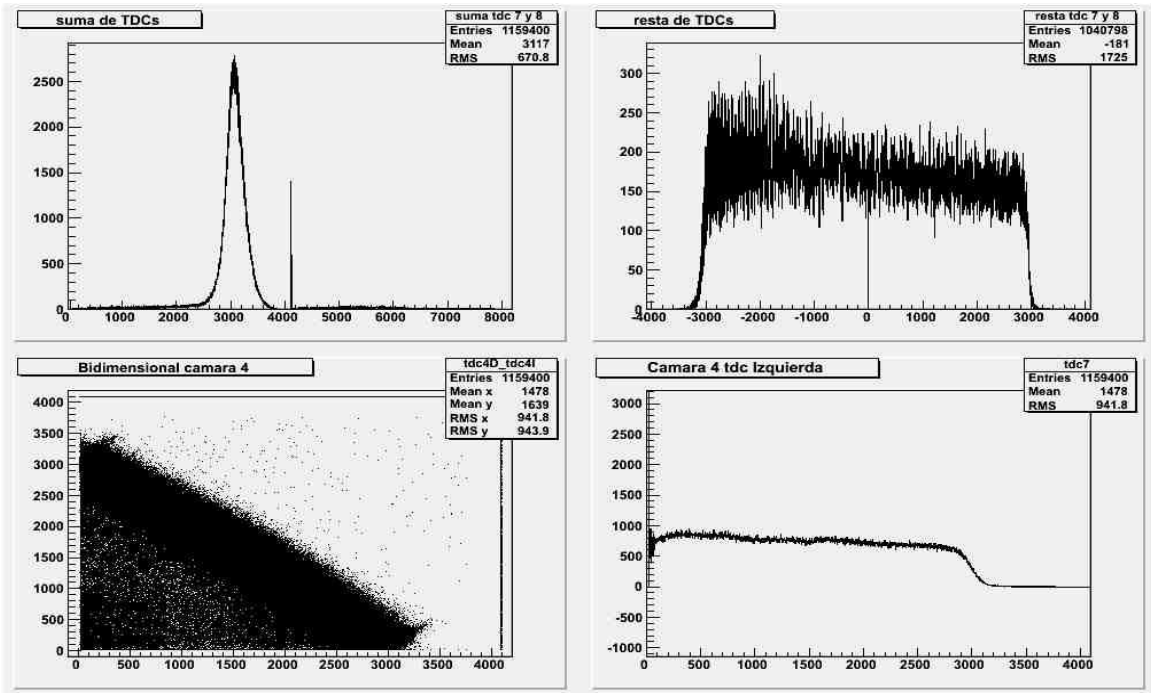


Fig.6.8a Cámara 1 reparada a 2180 V.

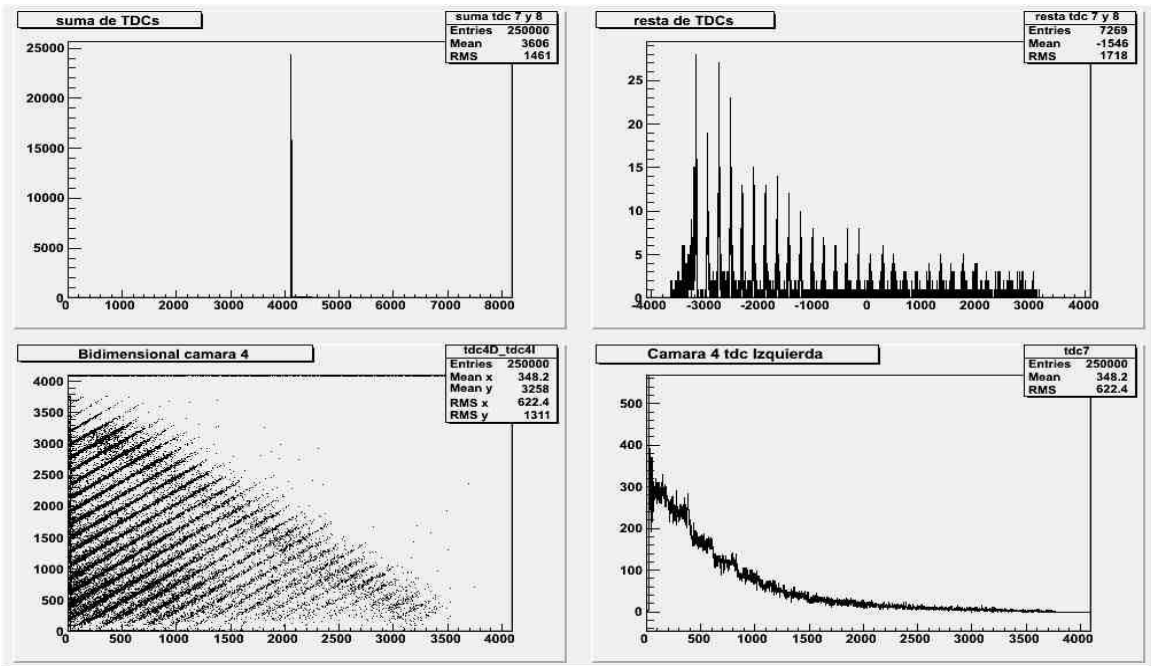


Fig.6.8b La misma cámara sin reparar.

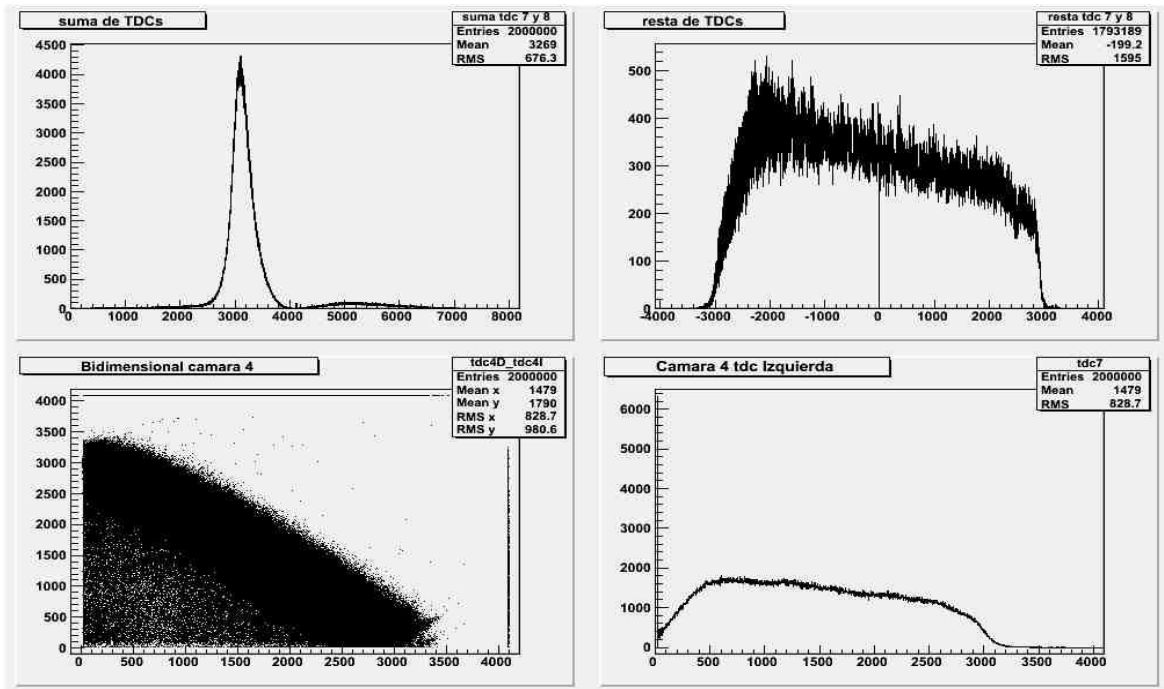


Fig. 6.9a Cámara 4 reparada a 2270 V

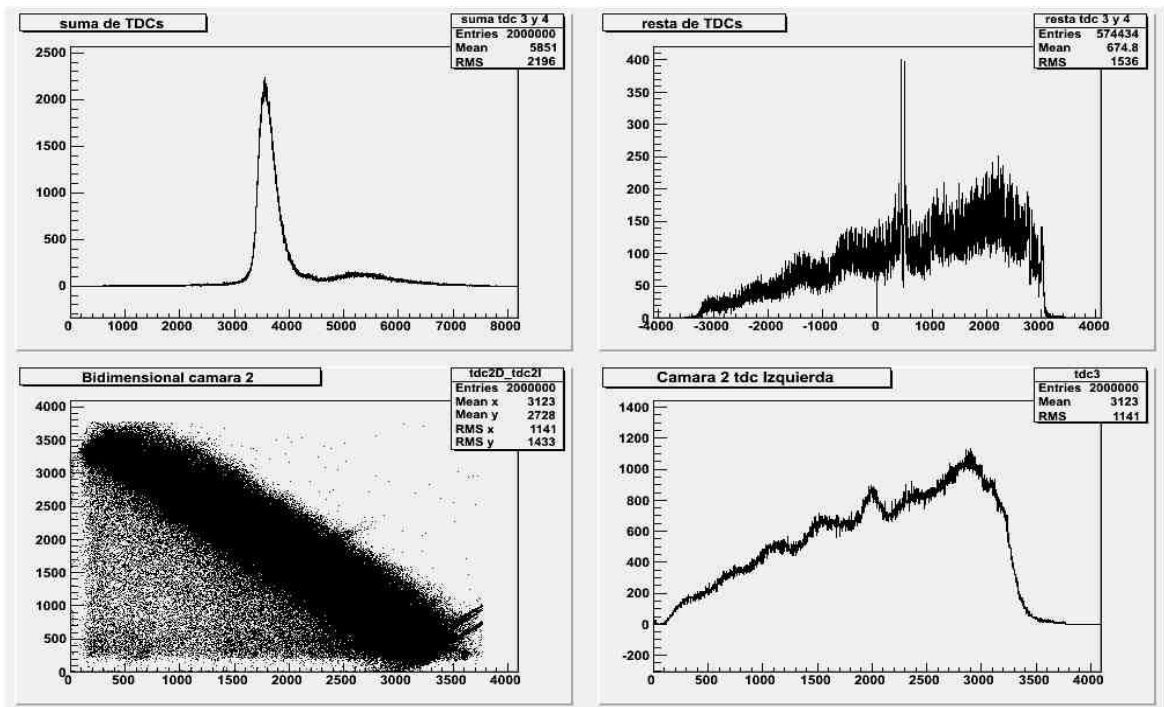


Fig. 6.9bLla misma cámara a 1940V antes de ser reparada.

Si se observa la Fig. 6.9b, es evidente la mejoría lograda en la respuesta de la MWPC 4. En la primera gráfica la pendiente en el histograma de la resta es muy pronunciada, por lo que la forma del histograma está lejos de ser la meseta deseada. En cambio, después de componer la cámara, la pendiente disminuyó en gran medida y la respuesta a lo largo de la cámara es ahora más homogénea (considerando que puede mejorarse el voltaje de operación).

Quizá puede resultar extraño que la pendiente se muestre invertida, pero la razón es que originalmente los cables de salida estaban intercambiados en el panel de control. Después de corregirlos vemos que la imagen se refleja respecto al eje vertical (Fig. 6.9).

7 CONCLUSIONES:

El trabajo realizado en el presente proyecto para mejorar el desempeño del detector de muones, en particular, el estudio y reparación de las MWPC, dio resultados favorables que permitirán incrementar la eficiencia del detector, hasta conseguir la resolución espacial y temporal que el experimento necesita.

La mejoría lograda en el desempeño de las MWPC, se debe principalmente a la corrección en la inclinación de los cátodos que son parte fundamental de las mismas (sección 5.3). Esto se consiguió con ayuda de una rutina programada en C++, que calculó cuánto ajustar las tuercas de cada una de sus tapas a partir de los datos, como lo son la matriz de posición de los tornillos y las constantes de los planos promedio, tanto del cátodo como del ánodo.

Paralelamente, en dos de las MWPC se improvisó un nuevo sistema para ajustar ambos cátodos en forma independiente. Ello implicó modificaciones mecánicas permanentes, como la cuerda hecha a los orificios en los marcos de aluminio.

Las anteriores modificaciones, no fueron las únicas, puesto que los planos de alambres de cinco de las seis MWPC, también sufrieron cambios. Recordemos que fueron sujetos por hilos de Nylamid, trenzados a los alambres en su dirección transversal, mejorando con ello, la posición de los alambres entre sí, además de reducir el desplazamiento de éstos respecto a los cátodos con el alto voltaje.

En la literatura sobre MWPC de dimensiones similares a las nuestras, se mencionan soluciones como la que implementamos y que arrojaron resultados positivos. En nuestro caso, podemos decir que el trenzado limita el desplazamiento de los alambres bajo el campo eléctrico intenso. También se constató, que los hilos colocados no afectan el área sensible de las MWPC, dado que se colocaron en los bordes cercanos a los marcos de aluminio que conforman su zona ciega.

De la experiencia en ésta investigación, resultaron conocimientos trascendentes acerca del comportamiento de las MWPC del detector de muones. Uno de los más importantes, es la gran sensibilidad que muestran respecto a su estructura mecánica. En los histogramas, producto del manejo y análisis de los datos colectados, se ve reflejada la geometría de las MWPC. Sin embargo, éstos últimos sólo dejan ver una proyección de la misma, lo que en un principio, dificulta la comprensión de la información que los histogramas nos dan, aunque se esclareció con el estudio electro-mecánico de la estructura de las cámaras y al final se comprendió mucha de la información que esconden histogramas.

Con la comprensión que se logró de las MWPC, ahora es posible saber cuál es el origen del comportamiento observado, si es mecánico o electrónico. Esto, gracias a una mejor interpretación de los histogramas, lo que resulta muy importante para las subsecuentes etapas del proyecto. Por ejemplo, cuando el detector se encuentre colocado bajo la pirámide del Sol, éste necesitará mantenimiento de manera regular y de presentarse algún problema, éste podrá ubicarse y solucionarse con las técnicas expuestas, o al menos servirá de guía para descartar los problemas resueltos en el presente trabajo, de algún nuevo problema que pueda presentarse.

ANEXO A:

Código del programa de ajuste en C++ para enderezar los cátodos de las MWPC:

```
{
  gROOT->Reset();
#include <Riostream.h>
Double_t A, B, D, E, F, H;
const Int_t Num_Var = 2;
const Int_t Num_Torn = 46;
ajuste_z_auto2()
{
  Double_t x, y, z, d, s, a, v, L;
  Double_t g;
  Int_t nlines;
  Int_t ctr1; //contador hileras
  Int_t ctr2; //contador columnas
  Int_t ctr3; //numerador de tornillos
  char filename[20];
  ifstream inFile;
  A = 0.000334939; // Constantes obtenidas con gnuplot para el plano de alambres.
  B = -0.0000504911;
  D = 23.1443;
  E = -0.000128074; // Constantes obtenidas con gnuplot para el cátodo.
  F = -0.000793198;
  H = 30.6802; // a la constante obtenida en gnuplot se le suman 3.83mm del
```

```

d = 5.67; // espesor del gasquet delgado
cout << " restandole a d 3.83 del gasquet\n";
cout << " d = " << d << "\n";
//almacena las coordenadas x, y
Double_t coor_x_y[Num_Torn][Num_Var];
inFile.open("prueba.txt");
if (!inFile) {
    cerr << "no es posible abrir el archivo";
    exit(1); // terminate with error
}
for( ctr1=0; ctr1<=45; ctr1++)
{
    inFile >> coor_x_y[ctr1][0] >> coor_x_y[ctr1][1];
    x = coor_x_y[ctr1][0];
    y = coor_x_y[ctr1][1];
    //calculo para enderezar el plano de cobre
    z = (A*x) + (B*y) + (D+d); //plano deseado
    //    L = D + d; //nueva constante para dicho plano
    s = (E*x) + (F*y) + H; //plano de cobre
    a = s - z; //distancia entre el plano de cobre y el deseado
    v = a / 1.1 ; //vueltas de tuerca por cada 1.1mm
    g = v * 360 ; //equivalencia en grados por vuelta de tuerca
    cout << " Girar " << g << " grados el tornillo (" << ctr1 << " , " << 0 << " ) \n ";
}
inFile.close();
cout << "\n" << " lectura terminada \n" << endl;
return 0;

```

}

ANEXO B:

Fórmulas para enderezar los cátodos de cada una de las MWPC del detector de muones.

Tapa Inferior de la MWPC 4 (Roja)

X,Y	Grados	X,Y	Grados	X,Y	Grados	X,Y	Grados
0,0	409	0,12	376	0,1	406	11,1	56
1,0	375	1, 12	342	0,2	403	11,2	53
2,0	343	2, 12	310	0,3	400	11,3	50
3,0	310	3, 12	277	0,4	398	11,4	48
4,0	278	4, 12	244	0,5	395	11,5	45
5,0	245	5, 12	212	0,6	392	11,6	42
6,0	212	6, 12	179	0,7	389	11,7	39
7,0	179	7, 12	146	0,8	387	11,8	37
8,0	147	8, 12	114	0,9	384	11,9	34
9,0	114	9, 12	81	0,10	381	11,10	31
10,0	82	10, 12	48	0,11	378	11,11	28
11,0	59	11, 12	26				

Tapa Superior de la MWPC 4, comprimir a 3 mm.

Tapa Inferior de la MWPC 1 (Azul)

X,Y	Grados	X,Y	Grados	X,Y	Grados	X,Y	Grados
0,0	213	0,12	-3	0,1	195	11,1	200
1,0	214	1, 12	-3	0,2	177	11,2	182
2,0	214	2, 12	-2	0,3	159	11,3	164
3,0	215	3, 12	-2	0,4	141	11,4	146
4,0	215	4, 12	-1	0,5	123	11,5	128
5,0	216	5, 12	-1	0,6	105	11,6	110
6,0	216	6, 12	0	0,7	87	11,7	92
7,0	217	7, 12	0	0,8	69	11,8	74
8,0	217	8, 12	1	0,9	51	11,9	56
9,0	218	9, 12	1	0,10	33	11,10	38
10,0	218	10, 12	2	0,11	15	11,11	20
11,0	219	11, 12	2				

Tapa Inferior de la MWPC 5 (Amarilla) a 9 mm del plano de alambres.

X,Y	Grados	X,Y	Grados	X,Y	Grados	X,Y	Grados
0,0	774	0,12	519	0,1	753	11,1	591
1,0	759	1, 12	503	0,2	732	11,2	569
2,0	744	2, 12	488	0,3	710	11,3	548
3,0	729	3, 12	473	0,4	689	11,4	527
4,0	713	4, 12	458	0,5	668	11,5	505
5,0	698	5, 12	443	0,6	646	11,6	484
6,0	683	6, 12	427	0,7	625	11,7	463
7,0	668	7, 12	412	0,8	604	11,8	441
8,0	653	8, 12	347	0,9	582	11,9	420
9,0	638	9, 12	382	0,10	561	11,10	399
10,0	622	10, 12	367	0,11	540	11,11	377
11,0	612	11, 12	356				

Tapa Superior de la MWPC 5 (Amarilla) comprimir a 3 mm.

ANEXO C:

Código en C++ del programa de análisis que crea los histogramas a partir de los datos de la adquisición del detector de muones, el cual se ejecuta dentro del software de análisis ROOT:

```
{
    gROOT->Reset();
#include "Riostream.h"
    char filename[20];
    int run_number, parte;
    ifstream in;
    Float_t tdc[8];
    Float_t tdc1, tdc2, tdc3, tdc4, tdc5, tdc6, tdc7, tdc8;
    Int_t nlines = 0;
    Float_t suma1_2, resta1_2;
    Float_t suma3_4, resta3_4;
    Float_t suma5_6, resta5_6;
    Float_t suma7_8, resta7_8;

    TFile *f = new TFile("online.root","RECREATE");
    TH1D *htdc1 = new TH1D("tdc1","Camara 1 tdc Izquierda",2048,0,4096);
    TH1D *htdc2 = new TH1D("tdc2","Camara 1 tdc Derecha",2048,0,4096);
    TH1D *htdc3 = new TH1D("tdc3","Camara 2 tdc Izquierda",2048,0,4096);
    TH1D *htdc4 = new TH1D("tdc4","Camara 2 tdc Derecha",2048,0,4096);
    TH1D *htdc5 = new TH1D("tdc5","Camara 3 tdc Izquierda",2048,0,4096);
    TH1D *htdc6 = new TH1D("tdc6","Camara 3 tdc Derecha",2048,0,4096);
    TH1D *htdc7 = new TH1D("tdc7","Camara 4 tdc Izquierda",2048,0,4096);
```

```

TH1D *htdc8 = new TH1D("tdc8","Camara 4 tdc Derecha",2048,0,4096);

TH2D *tdc1D_tdc2I = new TH2D("tdc1D_tdc2I","Bidimensional camara 1",1024,-
100,4200,1024,-100, 4200);

TH2D *tdc3D_tdc4I = new TH2D("tdc3D_tdc4I","Bidimensional camara 2",1024,-
100,4200,1024,-100, 4200);

TH2D *tdc5D_tdc6I = new TH2D("tdc5D_tdc6I","Bidimensional camara 3",1024,-
100,4200,1024,-100, 4200);

TH2D *tdc7D_tdc8I = new TH2D("tdc7D_tdc8I","Bidimensional camara 4",1024,-
100,4200,1024,-100, 4200);

TH1D *tdc_suma1_2 = new TH1D("suma tdc 1 y 2","suma de TDCs",8192,0,8192);
TH1D *tdc_suma3_4 = new TH1D("suma tdc 3 y 4","suma de TDCs",8192,0,8192);
TH1D *tdc_suma5_6 = new TH1D("suma tdc 5 y 6","suma de TDCs",8192,0,8192);
TH1D *tdc_suma7_8 = new TH1D("suma tdc 7 y 8","suma de TDCs",8192,0,8192);

TH1D *tdc_resta1_2 = new TH1D("resta tdc 1 y 2","resta de TDCs",8192,-4095,4095);
TH1D *tdc_resta3_4 = new TH1D("resta tdc 3 y 4","resta de TDCs",8192,-4095,4095);
TH1D *tdc_resta5_6 = new TH1D("resta tdc 5 y 6","resta de TDCs",8192,-4095,4095);
TH1D *tdc_resta7_8 = new TH1D("resta tdc 7 y 8","resta de TDCs",8192,-4095,4095);

run_number = 0;
parte = 2;
nlines = 0;
sprintf(filename,"../camAM_2330V_050608.raw",run_number);
in.open(filename);
for(nlines=0; nlines<2000000 ; nlines++) {
    in >> tdc1 >> tdc2 >> tdc3 >> tdc4 >> tdc5 >> tdc6 >>tdc7 >> tdc8 ;
    suma1_2 = tdc1 + tdc2;

```


suma3_4 = tdc3 + tdc4;

suma5_6 = tdc5 + tdc6;

suma7_8 = tdc7 + tdc8;

resta1_2 = tdc1 - tdc2;

resta3_4 = tdc3 - tdc4;

resta5_6 = tdc5 - tdc6;

resta7_8 = tdc7 - tdc8;

if (!in.good()) break;

htdc1->Fill(tdc1);

htdc2->Fill(tdc2);

htdc3->Fill(tdc3);

htdc4->Fill(tdc4);

htdc5->Fill(tdc5);

htdc6->Fill(tdc6);

if(tdc7 > 200)htdc7->Fill(tdc7);

htdc8->Fill(tdc8);

tdc_suma1_2->Fill(suma1_2);

tdc_suma3_4->Fill(suma3_4);

tdc_suma5_6->Fill(suma5_6);

tdc_suma7_8->Fill(suma7_8);

if((tdc1 + tdc2 > 3200)&& (tdc1 + tdc2 < 4200))tdc_resta1_2->Fill(resta1_2);

if((tdc3 + tdc4 > 3500)&& (tdc3 + tdc4 < 3900))tdc_resta3_4->Fill(resta3_4);

```

    if((tdc5 + tdc6 > 3600)&& (tdc5 + tdc6 < 4400) )tdc_resta5_6->Fill(resta5_6);
    if((tdc7 + tdc8 > 2900)&& (tdc7 + tdc8 < 3400) )tdc_resta7_8->Fill(resta7_8);
    tdc1D_tdc2I->Fill(tdc1,tdc2);
    tdc3D_tdc4I->Fill(tdc3,tdc4);
    tdc5D_tdc6I->Fill(tdc5,tdc6);
    tdc7D_tdc8I->Fill(tdc7,tdc8);
}
in.close();
// display de histogramas
c1=new TCanvas("c1","Camara Blanca 1950V ",30,30,600,600);
c1->Divide(2,2);
c1->cd(1);
tdc_suma1_2->Draw();
c1->cd(2);
tdc_resta1_2->Draw();
c1->cd(3);
tdc1D_tdc2I->Draw();
c1->cd(4);
htdc1->Draw();

c2=new TCanvas("c2","Camara Roja 1920V ",30,30,600,600);
c2->Divide(2,2);
c2->cd(1);
tdc_suma3_4->Draw();
c2->cd(2);
tdc_resta3_4->Draw();
c2->cd(3);

```

```

tdc3D_tdc4I->Draw();
c2->cd(4);
htdc3->Draw();

c3=new TCanvas("c3","Camara Roja 2200V ",30,30,600,600);
c3->Divide(2,2);
c3->cd(1);
tdc_suma5_6->Draw();
c3->cd(2);
tdc_resta5_6->Draw();
c3->cd(3);
tdc5D_tdc6I->Draw();
c3->cd(4);
htdc5->Draw();

c4=new TCanvas("c4","Camara Amarrillal 2330V ",30,30,600,600);
c4->Divide(2,2);
c4->cd(1);
tdc_suma7_8->Draw();
c4->cd(2);
tdc_resta7_8->Draw();
c4->cd(3);
tdc7D_tdc8I->Draw();
c4->cd(4);
htdc7->Draw();
}

```

BIBLIOGRAFÍA:

- [1] Leonardo López Luján, “Teotihuacan, ciudad de los dioses”, *arqueología mexicana*, vol 13, No 74 (2005) pp. 76-83.
- [2] Saburo Sugiyama y Rubén Cabrera C., “Hallazgos recientes en la Pirámide de la Luna”, *arqueología mexicana*, vol 11, No64 (2003) pp. 42-49.
- [3] L. W. Álvarez, *et al.*, “Search for hidden chambers in the pyramids”, *Science*, **167** (1970) pp. 832-839.
- [4] R. Alfaro, E. Belmont-moreno, A. Cervantes, V. Grabski, J. M. López-Robles, L. Manzanilla, A. Martínez-Dávalos, M. Moreno and A. Menchaca-Rocha, “A muon detector to be installed at the pyramid of the sun”, *Revista mexicana de física*, vol.49, sup.4, nov 2003, pp. 54-59.
- [5] V. Grabski, R. Reche, R. Alfaro, E. Belmont-Moreno, A. Martínez-Dávalos, A. Sandoval and A. Menchaca-Rocha, “The use of cosmic muons in detecting heterogeneities in large volumes”, *Nucl. Instr. And Meth. in Phys. Resc. A*, 585 (2008) pp. 128-135.
- [6] T. K. Gaisser, *Cosmic Rays and Particle Physics*, Cambridge University Press, Cambridge 1990.
- [7] E. Priest, T. Forbes, *Magnetic reconnection MHD theory and applications*, Cambridge University Press, 2000, cap. 13, pp. 509-518.
- [8] E. A. Helder et al., “Measuring the cosmic ray acceleration efficiency of a supernova remnant”, *Science*, June 26, 2009
- [9] J. A. Simpson, “Elemental and Isotopic Composition of the Galactic Cosmic Ray”, *Annual Reviews of Nuclear and Particle Science*, Vol. 33 (1983), pp. 323-381.
- [10] Todor Stanev, *High Energy Cosmic Rays*, Springer-Praxis, germany, 2004.

- [11] K. Hagiwara, *et al.*, Particle Data Group, *Phys. Rev. D* **66**, Part 1, (2002) 10001.
- [12] T.K. Gaisser, T. Stanev, “Cosmic rays review of particle physics”, *Eur. Phys. J C*, **3** (1988) 132-137.
- [13] R.Ponce-Juárez, *Medida de la distribución angular de muones atmosféricos en la Ciudad de México*, Tesis de Licenciatura en Física, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 2004.
- [14] V. Okhlopov, Y. Stozhkov, “On the relation of cosmic ray fluxes with solar activity parameters”, Proceedings from 30th International Cosmic Ray Conference, Vol. 1 (SH) pp. 481–484, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico 2008
- [15] N. Bostanjyan and A. Chilingarian, “Cosmic Ray Intensity variations detected by ASEC monitors during the 23rd solar activity cycle in correlation with Solar Transient events”, Proceedings of the 31st International Cosmic Ray Conference, Łódź 2009.
- [16] A. Belov, E. Eroshenko, H. Mavromichalaki, V. Oleneva, A. Papaioannou, V. Yanke, “Cosmic ray variation properties during Forbush effects associated with far western solar sources”, European Cosmic Rays Symposium , Kosice 2008.
- [17] W.R. Leo, *Techniques for nuclear and particle physics*, Springer-Verlag, Berlín, 1987.
- [18] F. Sauli, “Principles of operation of multiwire proportional and drift chambers”, CERN, Yellow report 77-09, France (1977).
- [19] W. Blum, L. Rolandi, *LinkParticle detection with drift chambers*, Springer, New York , 1993.
- [20] J.H. Dieperink, K. Kleinknecht, “Construction problems with large proportional chambers”, CERN, NP internal report 69-28.
- [21] G.Charpak, G. Fisher, A. Minten, L. Nauman, F. Sauli, “Some features of large multiwire proportional chambers”, *Nucl. Instr. And Meth.*, **97** (1972) 565-572.
- [22] J.K. Walker, “Characteristics of plastic scintillators in their use as large area particle detectors”, *Nucl. Instr. Meth.*, **68** (1969) 131-134.

- [23] J.M. López-Robles, Instrumentación de un sistema de detección para rayos cósmicos, Tesis de Doctorado en Ciencias Físicas, Instituto de Física, UNAM, México, 2005.
- [24] Especificaciones técnicas del chip SIP5-405, <http://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/268040/RHOMBUS-IND/SIP5-405.html>
- [25] R.Grove, et. al., “Electromagnetic delay line readout for proportional wire chambers”, *Nucl. Instr. Meth.*, **89** (1970) 257-262.
- [26] Portal de internet con las especificaciones de la fuente universal Voltronics 1458, www.voltronics.com/products/NEW_VISyN/index.php
- [27] D2L, *Preamplifier for position sensitive detectors V 1.4*, Hoja de especificaciones técnicas, Francia, 2004.
- [28] P. Schilly, J. Steinberger, K. Kleinknecht, “Construction and Performance of Large MWPC”, *Nucl. Instr. Meth.*, **91** (1971) 221-230.
- [29] G.A. Erskine, “Electrostatic problems in multiwire proportional chambers”, *Nucl. Instr. Meth.*, **124** (1975) 189-214.
- [30] G. Charpak, G. Fischer, A. McInten, L. Naumann and F. Sauli, “Some features of large multiwire proportional chambers”, *Nucl. Instr. Meth.*, **97** (1971) pp. 377-388.
- [31] J.M. López-Robles, R. Alfaro, E. Belmont-Moreno, V. Grabski, A. Martínez-Dávalos, A. Menchaca-Rocha, “Improving MWPC Delay Line Readout by Waveform Analysis”, *IEEE Transactions on Nucl. Science*, **6** (2005) 2841-2845.