

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE CIENCIAS**

Sección de Posgrado y Segunda Especialización Profesional



Tesis para Optar el Grado Académico
de Maestro en Ciencias con Mención en
Física

**Construcción, Simulación y Análisis de datos del
Sistema de Identificación de Partículas del Detector
del haz de Prueba del Experimento MINERVA**

Presentada por

Marcos Antonio Alania Vicente

Asesor

Carlos Javier Solano Salinas

LIMA-PERÚ

*Dedicado a todas las personas que hicieron posible
la realización de este trabajo.*

Agradecimientos

El presente trabajo es el resultado del esfuerzo de estos últimos años. Durante este proceso, muchas han sido las personas que me han apoyado, colaborado, guiado y sostenido. Entendiendo que las palabras se quedan cortas cuando el sentimiento es inconmensurable, para todas ellas de antemano mi gratitud. Específicamente, deseo agradecer en primer lugar a mi asesor Dr. Javier Solano por el apoyo brindado durante el periodo de la maestría, por su constante apoyo, dedicación, y los muchos consejos recibidos de su persona, cabe mencionar también que gracias a él fue posible realizar la estancia en el Centro de Investigación del FERMILAB.

También deseo agradecer a las personas de la colaboración MINERvA especialmente al Dr. Jorge Morfin y David Schmitz por sus valiosas observaciones y sugerencias durante mis presentaciones. A Lee Patrick y David Martínez por toda la ayuda brindada en el entendimiento del software y hardware durante la realización del proyecto TestBeam. A Arturo Fiorentini, César Castromonte y José Palomino por sus sugerencias, ideas y la gran ayuda con el software minerva y los programas asociados como son Gaudi, C++, Python, Root, etc.

Al Consejo Nacional De Ciencia Y Tecnología (CONCYTEC) por el apoyo económico brindado para realizar el viaje.

Un especial agradecimiento a mi familia padres, hermanas, hermano y sobrinos por su constante apoyo y preocupación desde siempre, también un especial agradecimiento a mi prima Mery Petra, esposo e hijos por el cálido recibimiento que me brindaron durante la estancia en los Angeles y las llamadas constantes al Fermilab.

Finalmente y no menos importante agradecer a mis amigos Juan Pablo y Noemi de la PUCP, César Capetillo y Alfonso de la Universidad de Guanajuato asimismo a mis amigos Abraham, Jorge y especialmente a Kenyi Hurtado por la ayuda en linux y su incondicional amistad.

Resumen

El objetivo principal de esta tesis es el desarrollo de un prototipo, el TestBeam, para un sistema de toma y análisis de datos con la información necesaria para los estudios del haz de prueba que exige el experimento MINER ν A . Para cumplir con sus objetivos, MINER ν A debe poder caracterizar el comportamiento y determinar la energía de los hadrones dentro del detector. Este propósito se conseguirá apartir de un detector de prueba (TestBeam) que es una reproducción a pequeña escala del detector de MINER ν A, al cual se le diseñó un sistema de identificación de partículas y su momentum (sistema beamline), y que fue el objetivo central de mi tesis.

El trabajo desempeñado en el montaje del sistema del beamline y del detector de prueba se inició con la calibración y testeo de los dispositivos electrónicos (centelladores, cámaras multialámbricas, magnetos, fotomultiplicadores,etc) que se dispuso cuidadosamente en la linea del haz de hadrones para identificación de las partículas y de su momentum asociado previo a la interacción de dicho haz con el detector.

Concluida la fase de prueba y calibración de cada componente, y de prueba del sistema beamline, se procedió con el ensamblado del detector TestBeam finalizando con la toma de datos. Para verificar si los datos obtenidos eran correctos y estaban dentro de los parametros exigidos por el proyecto se desarrollo códigos de procesamiento de datos para compararlos con los datos simulados, haciendo adicionalmente análisis de algunos eventos, tal como se muestra en los capítulos finales.

La mayor parte del trabajo se realizó en la colaboración del experimento MINER ν A (Main Injector Experiment to study ν -A) durante una estadía en el Fermilab (Fermi National Accelerator Laboratory, Illinois-USA) durante el año 2010. MINER ν A es un experimento dedicado al estudio de la interacción neutrino nucleo, cuenta con un detector altamente segmentado y de gran precisión para registrar una alta estadística de eventos (más de 13 millones en sus cuatro años de funcionamiento). El estudio detallado de las interacciones neutrino-núcleo, que se están realizando con este detector, servirá de soporte a los experimentos de oscilación de neutrinos como MINOS (Main Injector Neutrino Oscillation Search) y otros mas.

Índice general

Agradecimientos	II
1. Introducción	2
2. Física de Neutrinos	5
2.1. Historia	5
2.2. Propiedades de los Neutrinos	7
2.3. Experimentos Realizados	8
2.3.1. Neutrinos Atmosféricos	8
2.3.1.1. Super-Kamiokande	8
2.3.1.2. Soudan 2	10
2.3.1.3. SNO	10
2.3.1.4. MACRO	10
2.3.1.5. IceCube	11
2.3.2. Neutrinos Solares	11
2.3.3. Experimentos con Aceleradores	11
2.4. Modelo Estándar	12
2.5. Neutrinos en el Modelo Estándar	15
2.6. Neutrinos masivos	17
2.7. Interacciones Neutrino-Nucleón	19
2.7.1. Dispersión Quasi-elástica	20

2.7.2.	Dispersión Profundamente Inelástica	22
2.7.3.	Producción Coherente, Resonante de Piones	23
3.	Experimento MINERνA	25
3.1.	Introducción	25
3.2.	El haz del NuMI	26
3.3.	Descripción del Detector MINER ν A	27
3.4.	Dispositivos Fotosensores	30
3.5.	Elementos Centelladores	30
3.6.	Calorímetros y blancos	31
3.6.1.	Calorímetro Electromagnético	33
3.6.2.	Calorímetro Hadrónico	35
3.6.3.	Blancos Nucleares	35
3.7.	Parámetros del Detector MINER ν A	38
3.8.	Sistema Electrónico y de Adquisición de Datos (DAQ)	38
3.8.1.	Hardware y DAQ	39
3.8.2.	DAQ Software	42
3.9.	Detector MINOS Como Espectrometro de Muones	43
3.10.	Pruebas Experimentales de Testeo	44
3.10.1.	Mapeador	44
3.10.2.	Testeo de los Tubos Fotomultiplicadores PMTs	44
3.10.3.	Detector de Testeo (TestBeam)	45
3.11.	Fases del Detector	45
3.11.1.	Traking Prototype	46
3.11.2.	Frozen Detector	47
3.11.3.	Full Detector	47
3.12.	Toma de Datos	47
4.	Detector TestBeam	53
4.1.	Introducción	53
4.2.	Diseño conceptual del Haz terciario	54
4.2.1.	El Haz de Mesones (<i>The Meson Beam</i>)	55
4.2.2.	El Haz Terciario	55
4.3.	Descripción del Detector TestBeam	56

4.4.	Diseño del BeamLine	58
4.4.1.	Blanco de Cobre	59
4.4.2.	Colimador de Acero	60
4.4.3.	Cámaras Multialámbricas (Wire Chambers)	60
4.4.4.	Hodoscopios	61
4.4.5.	Magnetos	62
5.	Análisis de los sistemas de medición	65
5.1.	Introducción	65
5.2.	Testeo de las Cámaras Multialámbricas	65
5.2.1.	Testeo de las Cámaras Multialámbricas con Sr-90	66
5.2.2.	Reconstrucción de los hits en las Cámaras Multialámbricas	68
5.3.	Distribución de Momentum de las partículas	70
5.4.	sistema del Tiempo de Vuelo (TOF)	72
5.4.1.	Disparador de la Medida del Tiempo de Vuelo	74
5.4.2.	Identificación de Partículas del Haz	76
5.4.3.	Calibración y resolución del tiempo de vuelo	76
5.5.	Sistema de Adquisición de Datos ACNET	82
5.6.	Respuesta del sistema al haz de partículas	87
5.6.1.	Espectro del Tiempo de vuelo	87
5.6.2.	Respuesta de las Wire Chambers	88
6.	Simulación	90
6.1.	Introducción	90
6.2.	Simulación del haz de partículas del Beamline	90
6.2.1.	Simulación de partículas negativas	91
6.2.2.	Simulación de partículas positivas	93
6.3.	Simulación del Detector Testbeam	94
7.	Análisis de Datos del Detector Testbeam	101
7.1.	Filtrando eventos con patrones comunes	107
8.	Resultados y Conclusiones	110

A. Testeo de los Tubos Fotomultiplicadores PMTs	112
A.1. Pasos del testeo	112
B. Introducción a los paquetes usados para la simulación	119
B.1. Localización de las Wire chambers y TOFs	123
B.1.1. Wire Chamber 1	124
B.1.2. Wire Chamber 2	124
B.1.3. Wire Chamber 3	124
B.1.4. Wire Chamber 4	125
B.1.5. Posicioón de los TOFs	125
C. Codigos desarrollados	126
C.0.6. códigos para procesamiento de la data del ACNET	126
C.0.7. Códigos usados en la simulación	131
C.0.8. Código para el procesamiento de datos	133

Índice de figuras

2.1. Vista esquemática de la interacción de un rayo cósmico con la atmósfera generando una cascada de partículas conocida como un “ <i>Air Shower</i> ”, aquí se muestra la producción convencional de muones y neutrinos atmosféricos. Figura tomada de la referencia [22].	9
2.2. Esquema simplificado para el Modelo Estándar. Aquí no se hace alusión al hecho de que para cada partícula existe una antipartícula, no se considera la propiedad del color de los quarks (de modo que sería 18 el número de quarks) y que la interacción fuerte pueda ser presentada como fundamental o residual (que estaría mediada por mesones). Además, sugiere que la interacción gravitacional está perfectamente integrada al Modelo Estándar, lo cual aún no ha ocurrido. Sugiere que las partículas W y Z son, de hecho, virtuales. Es una visión simplificada que pretende destacar la simetría de la teoría. Por eso, hay que aceptarla críticamente. Esquema tomado de la referencia [33].	13
2.3. Diagramas de Feynman representando las contribuciones de corriente neutra (derecha) y corriente cargada (izquierda) del proceso de dispersión $\nu_l + l \rightarrow \nu_l + l$, donde l representa cualquiera de las tres familias de leptones ($l = e, \mu, \tau$).	15

2.4.	La figura de la izquierda, muestra la reconstrucción de un evento candidato a la interacción de dispersión cuasi-elástica para corriente cargada, en el cuadro, el eje Y representa los strips (tiras centelladoras) y el eje X corresponde a los módulos a lo largo del detector. Este evento corresponde a la corrida 920, subcorrida 2 y evento número 158 obtenido de la toma de datos. Al lado derecho se muestra el diagrama de Feynman para este tipo de interacción.	20
2.5.	Al igual que la figura anterior, la imagen de la izquierda muestra la reconstrucción de un evento candidato a interacción de dispersión cuasi-elástica para corriente neutra, al lado derecho se muestra su diagrama de Feynman que lo representa.	21
2.6.	La figura del lado izquierdo muestra la reconstrucción de un evento candidato a interacción de dispersión profundamente inelástica para corriente neutra, al lado derecho se muestra el diagrama asociado a este tipo de interacción.	22
2.7.	Reconstrucción de un evento candidato a producción resonante de piones, registrado por el detector MINER ν A , al lado derecho se muestra su diagrama asociado a esta interacción.	24
3.1.	Vista aérea del los anillos del Main Injector y el Tevatron en donde son acelerados los protones, y la ubicación aproximada del detector MINER ν A y MINOS Near Detector.	26
3.2.	Descripción de los principales componentes del haz del NUMI. Viniendo de la izquierda podemos ver: el blanco de grafito (target), magnetos focalizadores (Horns) de los mesones positivos (π^+), el túnel de 675 m donde decaen estos mesones (Decay Pipe), el monitor de partículas hadronicas, las paredes absorvedoras, los monitores de muones y finalmente los neutrinos muonicos ν_μ en su mayoría	27
3.3.	Vista superior del detector MINER ν A en su etapa de <i>Frozen Detector</i> , los tubos azules y rojos son los tubos fotomultiplicadores (PMTs), las tarjetas verdes colocadas sobre los tubos son los <i>Front End Board</i> (FEBS), los cables amarillos son que llevan la información de los PMTs al sistema de adquisición de datos, los cables celestes son para controlar el voltage de los PMTs. La parte exagonal externa es el Outer Detector y la interna el Inner Detector.	28
3.4.	Izquierda: Corte lateral del detector MINER ν A , aquí se puede ver la disposición de los calorímetros y blancos, la flecha roja nos indica la dirección del haz de neutrinos. Derecha: Vista frontal del detector, señalando la zona activa y los calorímetros electromagnético (ECAL) y hadrónico (HCAL).	30

3.5.	Esta figura muestra las dimensiones y forma de las tiras centelladoras usadas en MINER ν A , además muestra como estan insertadas las fibras WSL en el centellador, también podemos ver el arreglo de prismas para formar un plano del detector. . . .	32
3.6.	Vista esquemática de la disposición de las tiras centelladoras en los diferentes planos del detector MINER ν A	33
3.7.	Vista de los calorímetros del Detector Minerva	34
3.8.	Blancos Nucleares: Rojo=Fe, Gris=Pb, Negro=C	37
3.9.	Vista real de los diferentes Blancos Nucleares, los números hacen la correspondencia al gráfico anterior, el blanco número 6 corresponde a un blanco de agua	37
3.10.	Vista esquemática del sistema de adquisición de datos	41
3.11.	Esta figura muestra el sistema de mapeo de los centelladores	44
3.12.	Laboratorio de testeo de los PMTs. En la figura podemos ver cuatro tubos azules que corresponden cada uno a un PMT, en los costados de los tubos están las fuentes de luz cada una de ellas ilumina dos PMTs también se puede ver la fuente de voltage, el osciloscopio digital, el VM crate y la computadora donde se recibe y procesa los datos	45
3.13.	Esquema del detector MINER ν A mostrando la parte correspondiente al <i>prototipo de rastreamiento</i> (Tracking Prototype)	46
3.14.	Vista del detector en su fase de <i>prototipo de rastreamiento</i>	46
3.15.	Fotografía del detector MINER ν A y parte de las personas que integran la Colaboración, aquí se aprecia la parte frontal del detector por donde incide el haz de neutrinos (ν)	48
3.16.	Evento registrado por el <i>tracking prototype</i> con el 20 % del detector este evento se puede calificar como un candidato de ($\nu_e + n \rightarrow e^- + p$), el cuadro rojo muestra la parte correspondiente al calorímetro electromagnético	49
3.17.	Evento registrado en el <i>Frozen Detector</i> con el 55 % del detector, el círculo azul muestra una discontinuidad en la trayectoria del evento, esto nos indica que uno de los problemas puede ser el paquete que relaciona la geometría del detector con la electrónica (Plex).	50
3.18.	Este evento muestra un problema con el plex para el detector completo, el círculo rojo muestra la discontinuidad de la trayectoria de la partícula.	51
3.19.	Evento para el período de la toma de datos con anti-neutrinos, la figura muestra las partes del detector como son la región activa, ECAL y HCAL	51

3.20. Esta figura nos muestra cuatro eventos candidatos a producción de pi cero (π^0), Corriente neutra (NC), quasi-elástico con corriente cargada (CCQE) y dispersión profundamente inelástica (DIS) respectivamente	52
4.1. Vista del Prototipo simulado y el Detector real. En el detector simulado podemos ver los 40 PMTs en un solo lado, en el real se colocó la mitad en cada lado	57
4.2. Vista del diseño del sistema Beamline	58
4.3. Área de testeo de los mesones en el Fermilab, para el testeo del haz del experimento se ocupó las áreas MT6-2A, MT6-2B, MT6-2C	59
4.4. Fotografías del Blanco de cobre y el Colimador de acero	60
4.5. Esta figura muestra el esquema de la sección eficaz las Cámaras multialámbricas (<i>wire chambers</i>) y el esquema de conexión que se uso para integrarlo al sistema de adquisición de datos	61
4.6. Descripción de algunos de los dispositivos que utiliza las Wire Chamber	62
4.7. Fotografía de los magnetos usados por el experimento	63
4.8. Esta imagen muestra la correspondencia de la fotografía con el esquema del sistema beamline	64
5.1. La figura (a) muestra uno de las muchas reparaciones que se realizó durante el testeo de las cámaras multialámbricas, aquí se desmontó todos los preamplificadores para la reparación de los hilos de uno de sus planos, la figura (b) muestra la cámara multialámbrica lista para su uso	66
5.2. La figura (a) y (b) son las dos caras de una misma cámara multialámbrica, en (a) se muestra la fuente radiactiva de estroncioa puntado a un pequeño sector de la cámara multialámbrica, para tener información de todos los canales se hacia un barrido de izquierda a derecha. En (b) se muestra el fotomultiplicador con su plastico centellador, esto nos servía para el conteo de las partículas.	67
5.3. Esta gráfica muestra los eventos registrados por los cuatro planos de la cámara multialámbrica 3. Los círculos en azul muestra los canales que registraron una baja estadística de eventos, los círculos rojos muestran canales muertos (no registraron ningun evento).	68
5.4. Determinación de la posición de un hit en la cámara multialámbrica	69

5.5.	La figura (a) muestra la reconstrucción de la posición de un evento registrado en las cuatro cámaras multialámbricas, el punto rojo muestra la posición de dicho evento y las líneas representan los planos de cada una de las wire chambers. En la figura (b) se muestra la reconstrucción de la posición de 433 eventos registrados.	71
5.6.	Esta figura muestra el diagrama de la estructura de las clases del código de programación de la lectura de datos de las cámaras multialámbricas, cada caja celeste representa una clase.	72
5.7.	La figura (a) muestra la marca dejada por una partícula al atravesar las 4 cámaras multialámbricas. En la figura (b) se muestra a la partícula atravesando el sistema beamline, la línea azul representa el recorrido de la partícula y los segmentos rojos muestra como se construirán los vectores para el cálculo del momentum.	73
5.8.	Sistema del tiempo de vuelo TOF	74
5.9.	Diagrama del sistema eléctrico del TOF Fastsum Trigger	75
5.10.	En esta Figura podemos ver la disposición final de los elementos que conforman el (Trigger + Veto), esta configuración se logró luego de muchas variaciones y quedando esta como la mejor configuración	77
5.11.	Aquí se muestra la disposición de las barras centelladoras con sus respectivos PMTs para la toma de datos, para esta parte se hizo uso de los rayos cósmicos (principalmente muones) para el cálculo de la resolución	79
5.12.	Eventos vs la diferencia del <i>tiempo de vuelo</i> calculado de las configuraciones de los centelladores apilados. Los gráficos corresponden a: (a) $T4 \rightarrow T1$, (b) $T4 \rightarrow T2$ y (c) $T4 \rightarrow T3$. Un TDC count = 25PS. La curva roja punteada es el ajuste gaussiano	80
5.13.	Descripción de los MTSCl en el beamline	82
5.14.	Consolas de Monitoreamiento de los datos a través de las consolas ACNET. En la figura (a) dentro del cuadrado rojo se puede ver los contadores del spill, su correspondencia de cada uno se puede ver en la tabla 5.5. En la figura (b) muestra la temperatura de los magnetos y la intensidad de la corriente en Amperios.	83
5.15.	Esta figura muestra la diferencia en la escritura de los datos registrados (a) por el DAQ del beamline y (b) por el ACNET	84
5.16.	Distribucion de los valores registrados por el ACNET para la corrida #7 del 25 de enero del 2010 en esta gráfica se muestran los valores del MTSCl1 (valores de entrada neto), MTSCl4 (coincidencia entre los TOF1 y TOF2) y MTSCl5 (coincidencia entre TOF1, TOF2 y beta)	85
5.17.	comparacion entre ACNET y DAQ	85

5.18. Espectro del tiempo de vuelo (a) solo coincidencias entre los TOF de entrada y salida, (b) Coincidencias entre TOF entrada, salida y las wire chambers. En las figura se puede ver la diferencia en la cantidad de eventos.	87
5.19. Muestra enumeradamente alguno de los problemas que se puede apreciar en las wire chambers, luego de procesar los datos iniciales.	88
5.20. Resultado final después de los ajustes de testeo de las wire chambers con el haz durante las corridas del mes de enero del 2010.	89
6.1. Estos gráficos muestran las distribuciones de los datos simulados por Monte-Carlo y los obtenidos en el experimento.	91
6.2. Estos gráficos muestran la comparación entre los datos simulados por Monte-Carlo y los obtenidos en el experimento en el rango de 19 a 22 nanosegundos, además de los cortes se puede apreciar la distribución de los piones negativos y los electrones para la configuración del haz negativo.	92
6.3. Los gráficos muestran los protones producidos tanto por la simulación como los obtenidos por la data real	94
6.4. Los gráficos muestran los archivos generados por la simulación dentro de los dos archivos principales <code>MTestStudies-histograms.root</code> y <code>MtestStudies-ntuple.root</code>	95
6.5. En este gráfico podemos ver los histogramas producidos por la implementación en el código para la visualización de la distribución de fotoelectrones de cada uno de los eventos y la distribución total	96
6.6. Estas figuras muestran los eventos característicos de la interacción de los piones con el detector para una configuración de 20 calorímetros electromagnéticos y 20 calorímetros hadrónicos	99
6.7. La figura (a) muestra la distribución total de fotoelectrones de una corrida de 1000 eventos para una energía de 1.2 GeV, La figura (b) corresponde a la distribución de fotoelectrones de una corrida 1000 eventos en un rango de energía de 0.2 GeV a 1.6 GeV	100
7.1. En la figura (a) en parte izquierda podemos ver la distribución de momentum de las partículas positivas, el rango seleccionado por el recuadro rojo nos muestra el rango de mayor importancia para el estudio que exige MINER ν A , al lado derecho se muestra una distribución del momentum del haz respecto de su tiempo de vuelo. La figura (b) muestra la misma descripción que la figura (a) para la configuración del haz negativo.	102

7.2.	En estas figuras, haciendo uso del event-display podemos ver la marca dejada por dos eventos diferentes de una misma corrida que tienen huellas parecidas. En el evento de la parte superior se ve una mayor deposición de fotoelectrones, esto se puede deducir de la cantidad de entradas que se registran en parte izquierda donde se muestra la distribución de fotoelectrones, en la parte derecha se muestra las huellas dejadas en el detector	104
7.3.	Esta figura muestra la distribución de masa de los piones positivos y negativos. . .	105
7.4.	Espectrometros de masas de las dos configuraciones del haz para la primera configuración del detector	106
7.5.	Las figuras de la parte superior muestran los módulos con mayor deposición de fotoelectrones para el negativo y el haz positivo, las figuras de la parte inferior muestra los módulos donde terminaron el recorrido las partículas a las que nos referimos como módulos finales.	107
7.6.	distribución de los valores de la división de la figura (a) entre la figura (b).	109
A.1.	Distribución de ADCs por pixel	116
A.2.	Distribución del pedestal en ADCs por pixel	117
A.3.	Distribución de carga por pixel	118
B.1.	Estructura del paquete	120
B.2.	Estructura del paquete	122
B.3.	Estructura del paquete Det/MinervaDDDB	123

Índice de tablas

2.1. Partículas que componen el Modelo Estandar de las interacciones fundamentales de la natureleza. Tabla extraída de la referencia [34] . . .	14
3.1. Cantidad de eventos de corriente cargada en los blancos nucleares con (M=1 millón)	36
3.2. Parámetros de MINER ν A , US hace referencia al término <i>Upstream</i> . . .	38
3.3. Algunas de las exigencias y parámetros de la eletrónica de MINER ν A	39
4.1. Algunas características de las Cámaras Multialámbricas.	61
5.1. Tiempo de vuelo para las partículas del haz con $0,5\text{GeV}/c$ de momentum y una distancia de $6m$ entre los hodoscopios	76
5.2. Asignación de los canales TDC a los PMT, medidas de los pulsos en el osciloscopio y de la longitud de los cables entre los PMT, discriminador y TDC. T4A y T4B son las unidades de entrada. Los otros seis son las unidades de salida del haz.	78
5.3. Resumen de las corridas y cálculo en la configuración de los centelladores apilados. Media y sigma en el recuento de TDC ($1\text{cuenta} = 25ps$). Ajuste de errores de $\pm 0,1$ cuentas para la media y menos de $\pm 0,1$ cuentas de sigma.	81

5.4. Cálculo de los Offsets durante las corridas del verano del 2010 (junio y julio). El valor absoluto del tiempo de vuelo determinado por el ajustes del momentum y la longitud de la trayectoria de un pion.	81
5.5. Valores de correspondencia de el ACNET respecto del beamline de acuerdo a la figura 5.13(a)	84
5.6. Aquí se puede ver los valores promedios de lo que registraba el ACNET (MTSCL#) y el DAQ. En esta tabla los valores importantes son los del MTSCL5 y el DAQ ya que ambos corresponden al número de coincidencias entre TOF1, TOF2 y beta	86

CAPÍTULO 1

Introducción

Actualmente, el estudio de la Física de neutrinos es uno de los tópicos más excitantes de la Física actual. Diferentes experimentos alrededor del mundo colaboran y a la vez compiten por comprender su comportamiento.

Mi participación en el experimento MINER ν A , no solo ha contribuido a un mejor entendimiento de la Física de neutrinos, sino también a tener una visión mas general de como se trabaja y se construyen experimentos de esta envergadura. MINER ν A no solo está estudiando los objetivos trazados, sino también está tratando de darles una aplicación, esto lo podemos ver en sus primeras dos publicaciones [1, 2].

Este trabajo se divide en cuatro partes: Los capítulos 2, 3 y 4 tratan la parte teórica y la descripción de los detectores y sus componentes. En los capítulos 5, 6 y 7 muestra el método y el trabajo realizado y aportado al experimento, la mayor parte hecha durante la estadía en el FERMILAB. El capítulo 8 resume el aporte y las conclusiones, y finalmente los apéndices describen algunos de los procedimientos que se consideran más importantes.

El capítulo 2 desarrolla los fundamentos teóricos de la Física de neutrinos empezando con una reseña histórica desde su concepción teórica hasta la actualidad. Se

mencionan también algunos de los experimentos más resaltantes que han contribuido a encontrar algunas de las propiedades que se conocen de los neutrinos. Luego se introducen los conceptos básicos de los neutrinos en el modelo estándar y mas allá del mismo y, finalmente, se mencionan los tipos de interacciones con la materia que les caracteriza.

En el capítulo 3 se describe al detector MINER ν A y sus componentes más importantes, empezando desde la producción del haz de neutrinos, y siguiendo con la descripción y operación de sus partes más importantes. En esta parte también se menciona los objetivos del experimento y se explica su sistema de adquisición de datos DAQ, finalizando con las fases de su construcción.

En el capítulo 4 se describe al detector TestBeam y sus objetivos de acuerdo a las exigencias de MINER ν A . Se menciona el proceso de generación del haz terciario, y también se describe el sistema beamline y la función de sus componentes.

El capítulo 5 Se centra exclusivamente en el trabajo realizado durante el ensamblado del sistema beamline y de las pruebas que se fueron realizando hasta lograr un funcionamiento dentro de los parámetros exigidos, también se sustenta los cálculos y la aplicaciones usadas para su funcionamiento y su almacenamiento de datos.

El capítulo 6 se divide en dos partes, la primera parte corresponde al trabajo realizado a la simulación de las partículas en el sistema beamline que se trata basicamente de la identificación de las partículas y de su momentum asociado. La segunda parte corresponde a la simulación de las partículas dentro del detector TestBeam, principalmente de los piones cargados para ciertas configuraciones del detector.

El capítulo 7 corresponde al análisis de los datos obtenidos durante las corridas del mes de junio-julio para una de las configuraciones del detector.

El capítulo 8 corresponde a la conclusiones que se obtuvieron producto de este trabajo.

Se presenta tres apéndices: el apéndice A hace referencia al procedimiento de testeo de los tubos fotomultiplicadores; el apéndice B hace referencia a la descripción de los

paquetes del software que se aplicó para la simulación del detector; en el apéndice C se muestran los códigos más importantes que se desarrollaron para este trabajo.

El objetivo principal de este trabajo fue desarrollar un prototipo, el TestBeam, de un sistema de toma y análisis de datos con la información necesaria para los estudios del haz de prueba que exige el experimento MINER ν A . Para cumplir este objetivo se inició con la calibración, ensamblado y sincronización del sistema de identificación de partículas, que además de identificar debía permitirnos conocer el momentum asociado. A este sistema en adelante se le mencionará como "sistema beamline".

2.1. Historia

Los neutrinos tienen una larga e interesante historia. Entre 1909 y 1911, Charles Thomson Rees Wilson, Meitner Lise, Otto Von Baeyer y Otto Hahn, realizaron un experimento que parecía demostrar que la energía de los electrones emitidos por el decaimiento beta ($n^0 \rightarrow p^+ + e^-$) tenían un espectro continuo en lugar de un espectro discreto, en aparente contradicción con la ley de conservación de la energía, ya que parecía que la energía se perdía en el proceso de la desintegración beta [3].

En 1927, Ellis y Woster [4] establecieron, sin lugar a dudas, que el espectro del decaimiento beta es, en realidad, continuo.

En 1930 [5], en una carta a los asistentes de una conferencia de Física en la ciudad de Tübingen - Alemania, Wolfgang Pauli propuso como un recurso desesperado” la existencia de una nueva partícula neutra para explicar la aparente no-conservación de la energía en los decaimientos radioactivos. Durante los siguientes años, los científicos elaboraron la teoría de Pauli y concluyeron que la nueva partícula debe interactuar muy débilmente y ser extremadamente ligera en masa.

En 1934, Enrico Fermi [6] propuso el nombre de *neutrino* a la partícula postulada por Pauli. Él formula una teoría cuantitativa de la interacción de las partículas débiles en el cual el neutrino juega un papel crucial.

En 1956, dos Científicos Americanos, Reines y Cowan [7], reportaron la primera evidencia de neutrinos. Ellos usaron un reactor de fisión como fuente de anti-neutrinos y cloruro de cadmio y agua como blanco de colisión, logrando observar la siguiente reacción:



En 1957, el físico italiano Bruno Pontecorvo [8], formuló una teoría de oscilación de neutrinos. Él muestra que si existen diferentes especies de neutrinos, éstos deberían oscilar entre ellos.

En 1958, Maurice Goldhaber, Lee Grodzins y Andrew Sunyar demostraron (en el Brookhaven National Laboratory) la helicidad del neutrino [9].

En 1959, Davis demostró que el neutrino podía ser distinguido del anti-neutrino [10].

En 1962, un grupo de científicos de la Universidad de Columbia y del Brookhaven National Laboratory elaboraron el primer acelerador experimental de neutrinos demostrando la existencia de dos tipos de neutrinos, *neutrino electrónico* ν_e y *neutrino muónico* ν_μ [11] (años más tarde, en 1987, Jack Steinberger, Leon Lederman, y Mel Schwartz ganarían el premio Nobel por estos descubrimientos).

En 1968, un experimento en las profundidades de la mina de Homestake, en Dakota del Sur, hizo la primera observación de neutrinos procedentes del sol. Pero la cantidad de neutrinos detectados era mucho menor a aquellos precedidos por los modelos solares.

En 1973, un equipo internacional del CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) [12] - Ginebra, Suiza - usaron una cámara de burbuja para observar el primer ejemplo de un evento de corriente neutra [14]. La observación de esta interacción le dio un fuerte soporte a la teoría unificada de interacciones débiles y electromagnéti-

cas propuesta unos años antes por Sheldon Glashow, Abdus Salam, y Steven Weinberg.

En 1975, el leptón tau es descubierto por un grupo de físicos liderados por Martin Perl en el Stanford Linear Accelerator Center. Experimentos llevados a cabo poco después dieron una fuerte evidencia de que también existía una tercera especie de neutrino *neutrino tauónico* ν_τ (en 1995, Perl y Reines ganaron el Premio Nobel por estos descubrimientos).

En 1989, experimentos en el CERN [12] y Stanford [13] mostraron que sólo pueden existir tres especies de neutrinos. Así que los ν_e , ν_μ y ν_τ deben completar esta clase de partículas. Estas mediciones directas verifican fuertemente las sugerencias previamente deducidas de las mediciones cosmológicas.

En 1998, en una conferencia de Neutrinos en Japón, los físicos del experimento Super-Kamiokande [23] presentaron nuevos datos significativos en el déficit de neutrinos muónicos producidos en la atmósfera de la Tierra. Los datos sugieren que el déficit varía dependiendo de la distancia del viaje de los neutrinos, esta muestra es una indicación de que los neutrinos tienen masa y oscilan.

En 1999, The Main Injector del FERMILAB [15] empieza sus operaciones. La combinación de su haz de partículas de alta intensidad y de una energía de 120GeV permite una nueva generación de experimentos de neutrinos.

2.2. Propiedades de los Neutrinos

Varias propiedades de los neutrinos ya han sido medidos, por ejemplo:

- El experimento clásico de Wu et. al. [16] en 1957 determinaron que las interacciones débiles violan la conservación de paridad. Este resultado aplicado a neutrinos sin masa lleva a la conclusión de que los neutrinos deben ser polarizados, con helicidad de $+1$ ó -1 . En 1958, Goldhaber et. al. [9] mide la helicidad y observa que sólo neutrinos levógiros participan en la interacción débil.

- Solo hay tres tipos de neutrinos con acoplamiento estándar al boson Z y con masas menores a $45\text{GeV}/c^2$ [17].
- Los neutrinos satisfacen la conservación de su número leptónico, lo que significa que un neutrino está siempre asociado a su leptón cargado.
- Las masas de los neutrinos aún no son conocidas a precisión. Inicialmente se creía que éstas no poseían masa, experimentos recientes indican que sí poseen y son bastante pequeñas lo cual dificulta poder medirlas. La oscilación de neutrinos es un buen indicativo de que éstas poseen masa ya que sin ellas no podrían oscilar.

2.3. Experimentos Realizados

A continuación se mencionan algunos de los experimentos que se consideran más importantes en el área de investigación de los neutrinos. Sus resultados son los que más han influido en todo lo que se conoce hasta hoy de la Física de Neutrinos.

2.3.1. Neutrinos Atmosféricos

Al interactuar los rayos cósmicos con la parte superior de la atmósfera se produce un chorro de mesones cuyo decaimiento produce los neutrinos [18, 19], en la figura 2.1 se puede apreciar de forma esquemática de este proceso. Varios experimentos que estudian este tipo de interacción proveen información para la oscilación de neutrinos atmosféricos.

2.3.1.1. Super-Kamiokande

El detector Super-Kamiokande [20], es un gran detector cherenkov de agua (50 000 toneladas de agua) para la observación de neutrinos (Kamioka Neutrino Detection Experiment) y decaimiento nuclear (Kamioka Nucleon Decay Experiment) que se encuentra a una profundidad de 1000 metros en Ikenoyama Japón con el fin de reducir el background de rayos cósmicos de muones. La reducción de estos rayos cósmicos se da en cinco ordenes de magnitud [21]. Las 50 000 toneladas de agua, están llenadas en un tanque cilíndrico de acero inoxidable de 39 metros de diámetro y 42 metros de

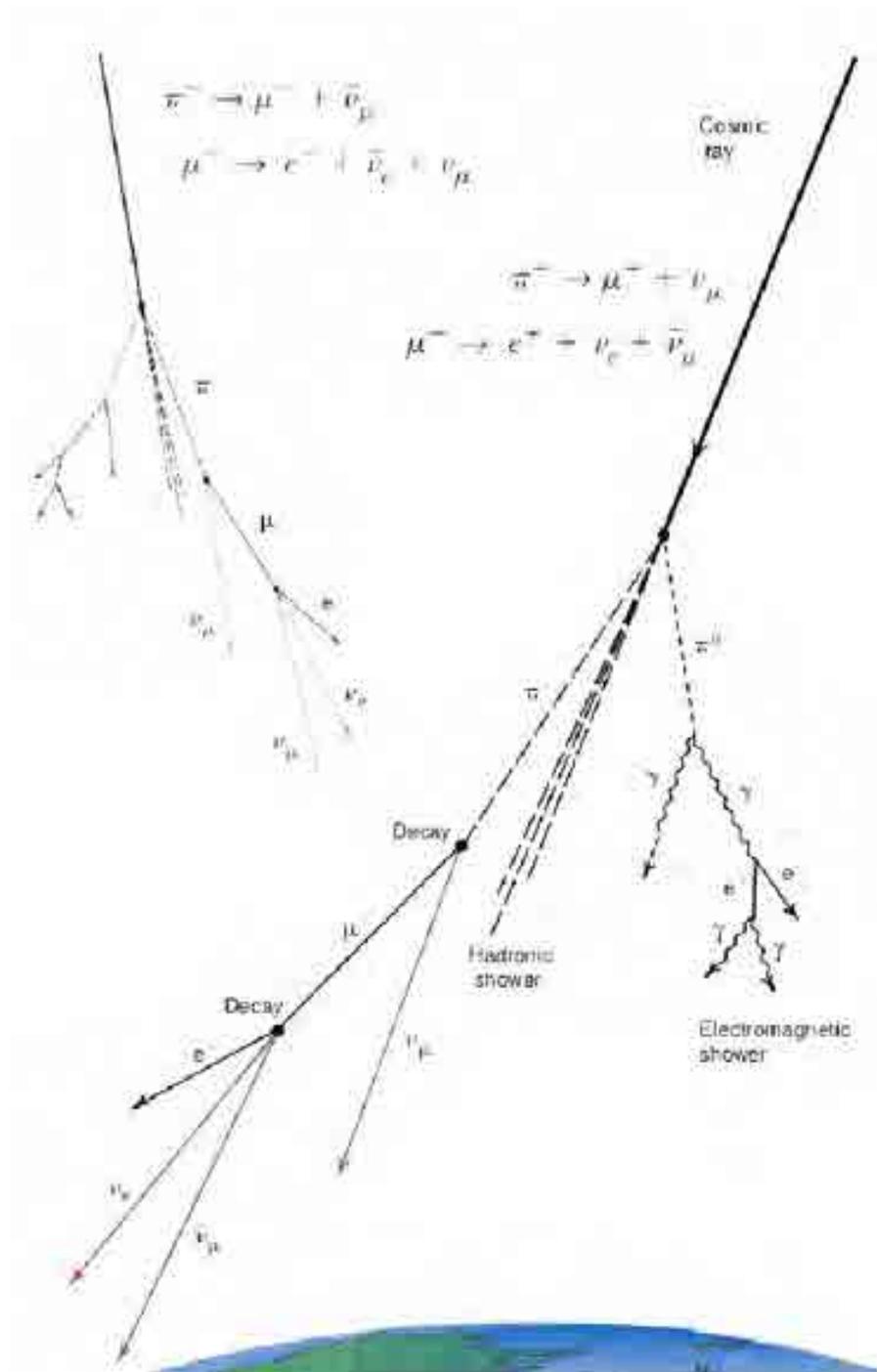


Figura 2.1: Vista esquemática de la interacción de un rayo cósmico con la atmósfera generando una cascada de partículas conocida como un “Air Shower”, aquí se muestra la producción convencional de muones y neutrinos atmosféricos. Figura tomada de la referencia [22].

altura, rodeado con 13 0000 fotomultiplicadores [23]. El experimento detecta y mide neutrinos, a partir del movimiento del electrón en una reacción de dispersión elástica.

$$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^- \quad (2.2)$$

Donde $x = e, \mu, \tau$. Es sensible a los tres sabores de neutrinos,

2.3.1.2. Soudan 2

Este experimento estaba localizado en las minas de hierro de Soudan al norte de Minnesota en USA, el detector principal era un calorímetro de hierro con una masa total de 963 toneladas, dividida en 224 módulos. Cada módulo consistía de 7560 tubos en una estructura de forma de un panal hexagonal. El calorímetro se cubrió con un escudo de $1700m^2$ de tubos de aluminio activo proporcional al rechazo del background. El análisis de los neutrinos atmosféricos fueron reportados en 1997 [24] con datos obtenidos desde abril de 1989 a diciembre de 1993. El almacenamiento total de eventos fue de 1500 ton-año. Conteniendo eventos con energía mayores a $200MeV$ que fueron usados para el análisis de neutrinos atmosféricos [25].

2.3.1.3. SNO

El Sudbury Neutrino Observatory (SNO), es un detector Cherenkov de agua, diseñado para detectar los neutrinos solares producidos por las reacciones de fusión, fue construido a 6.800 metros bajo tierra, en las minas INCO Creighton cerca de Sudbury, Ontario - Canadá. Anteriormente era de 1000 toneladas de agua pesada, cedido por Atomic Energy of Canada Limited (AECL), contenidos en un recipiente acrílico de 12 metros de diámetro. Los neutrinos reaccionan con el agua pesada (D_2O) para producir destellos de radiación conocida como "luz Cherenkov". Esta luz es detectada por una serie de 9600 tubos fotomultiplicadores montados sobre una estructura de apoyo geodésico que rodea el recipiente de agua pesada. El SNO llegó a medir el flujo de neutrinos solares [26].

2.3.1.4. MACRO

El detector de centelleo MACRO, se encuentra ubicado en el Laboratorio Nacional del Gran Sasso en Italia. Su propósito físico es el estudio de neutrinos atmosféricos, oscilación de neutrino y la detección de monopolos magnéticos, sin embargo este

detector de 550 toneladas de líquido también permite una buena sensibilidad al colapso gravitacional en nuestra galaxia. para una mayor información se puede revisar las referencias [27, 28]

2.3.1.5. IceCube

El detector IceCube, se encuentra ubicado en la estación Amundsen-Scott en el Polo Sur en la Antártica. IceCube busca las fuentes astrofísicas más violentas de neutrinos tales como: eventos de explosiones de estrellas, explosiones de rayos gamma, y fenómenos cataclísmicos que envuelven la participación de agujeros negros y estrellas de neutrones. El telescopio IceCube es una poderosa herramienta para búsqueda de materia oscura, y podría revelar los nuevos procesos físicos asociados con el origen enigmático de las partículas de alta energía en la naturaleza. Además, explorará el fondo de neutrinos producidos en la atmósfera, IceCube estudiará los neutrinos con energías muy superiores a los producidos por los haces generados en los aceleradores. IceCube es el detector de neutrinos más grande del mundo en la actualidad, abarca un kilómetro de hielo cúbico [29].

2.3.2. Neutrinos Solares

Los neutrinos solares se originan producto de la fusión nuclear que ocurre en el sol. Los detalles de estas reacciones que ocurren en el sol son explicados por el Modelo solar estándar. Donde nos indica, que cuatro protones (átomos de hidrógeno) se funden para convertirse en un núcleo de helio, dos de ellos tienen que convertirse en neutrones, y cada conversión lanza un neutrino electrónico ν_e .

2.3.3. Experimentos con Aceleradores

Estos experimentos emplean un haz de neutrinos producidos en los aceleradores de partículas. El proceso de la producción se detalla en el capítulo siguiente en el haz del NuMI. Ahí se explica como a partir de la aceleración de protones se puede obtener neutrinos utilizando un blanco adecuado y aprovechando el decaimiento de los mesones.

El experimento K2K [30] emplea un haz de neutrinos con una energía media de 1.3 GeV

El experimento MINOS [31] es un experimento que tiene como propósito estudiar la oscilación de neutrinos, para ello usa el haz de neutrinos generado por el NuMI (el mismo haz de neutrinos que usa el experimento MINERνA). MINOS cuenta con dos detectores funcionalmente idénticos separados una distancia de 750km, el detector que se encuentra en el Fermilab mide el espectro y la composición del haz, mientras que el detector localizado en Minnessota busca evidencias de la oscilación.

2.4. Modelo Estándar

El Modelo Estándar de partículas no es propiamente un modelo, es una teoría. Y por ahora una de las mejores que se tiene. Este modelo identifica las partículas básicas del Universo y sus interacciones. Según el Modelo Estándar, en el Universo existen cuatro fuerzas fundamentales, que entre las cuatro, en teoría son capaces de explicar físicamente todos los sucesos que se den en el mismo. Las cuatro fuerzas fundamentales que interactúan a través de sus *bosones* son: la gravedad¹ (*gravitón*), la electromagnética (*fotón*), la fuerza de interacción fuerte (*gluon*) y la fuerza de interacción débil (W^\pm y Z^0). En la figura 2.2 muestra un esquema simplificado para el Modelo Estándar [32].

De acuerdo al Modelo Estándar, *leptones* y *quarks* son partículas elementales que no poseen estructura interna. Las partículas con estructura interna se llaman *hadrones*; y están constituidas por quarks: *bariones* cuando están formadas por tres quarks o tres antiquarks, o *mesones* cuando están constituidas por un quark y un antiquark. Hay seis leptones (electrón, muón, tau, neutrino del electrón, neutrino del muón y neutrino del tau) y seis quarks [quark up (u) quark down (d), quark charm (c), quark extraño (s), quark bottom (b) y quark top (t)]. Sin embargo, los quarks tienen una propiedad llamada color y cada uno puede presentar tres colores (rojo, verde y azul). Por lo tanto, hay 18 quarks. Pero, como a cada partícula le corresponde una antipartícula, existirían en total 12 leptones y 36 quarks.

El Modelo Estándar ha tenido éxito en la explicación de la Física de partículas, sin embargo, los neutrinos con masa no nula se puede considerar como una física más allá del Modelo Estándar².

¹La fuerza de Gravedad no forma parte del Modelo Estándar

²En el Modelo Estándar no existe neutrinos dextrógiros, que le permita el mecanismo para la masa.

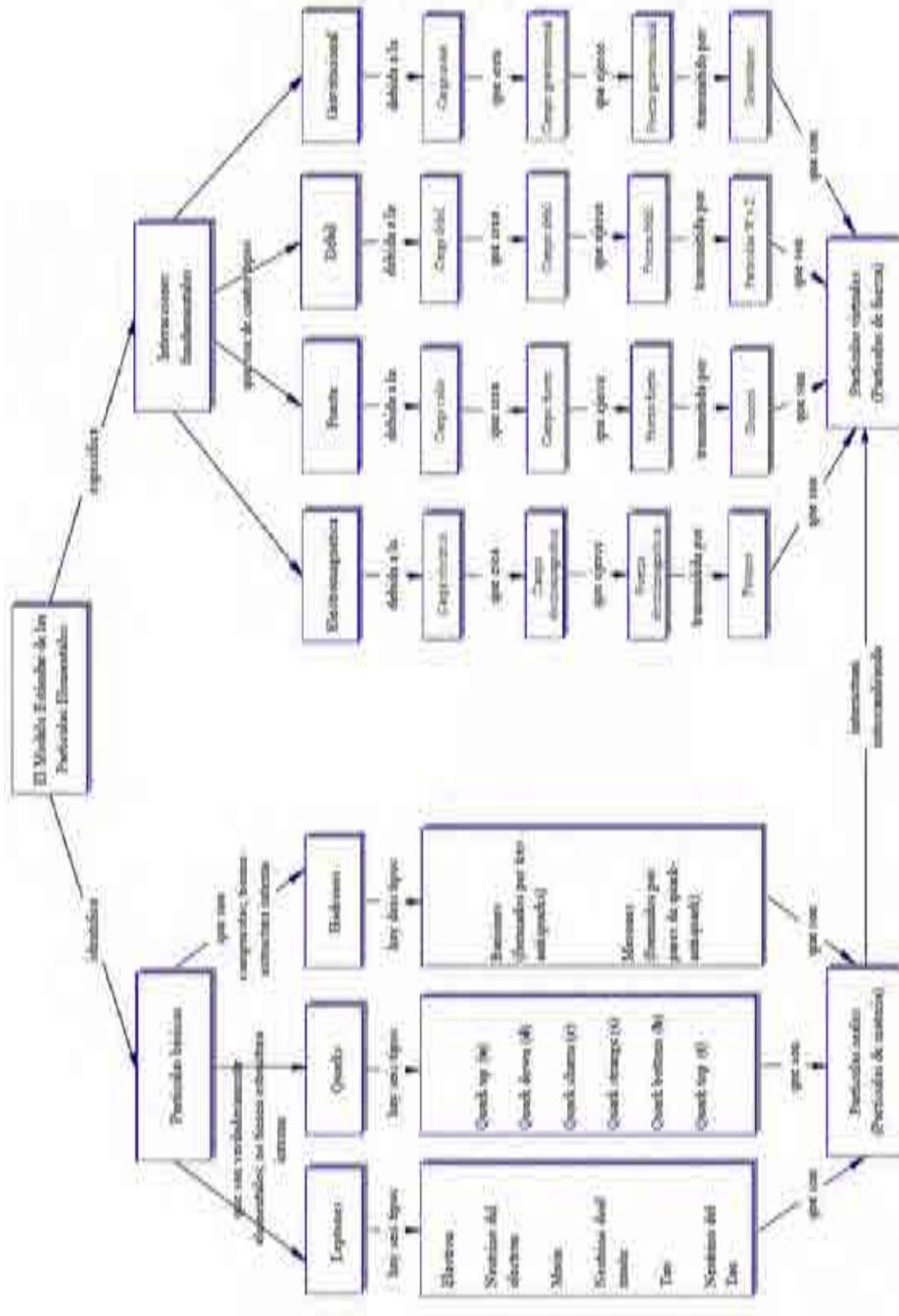


Figura 2.2: Esquema simplificado para el Modelo Estándar. Aquí no se hace alusión al hecho de que para cada partícula existe una antipartícula, no se considera la propiedad del color de los quarks (de modo que sería 18 el número de quarks) y que la interacción fuerte pueda ser presentada como fundamental o residual (que estaría mediada por mesones). Además, sugiere que la interacción gravitacional está perfectamente integrada al Modelo Estándar, lo cual aún no ha ocurrido. Sugiere que las partículas W y Z son, de hecho, virtuales. Es una visión simplificada que pretende destacar la simetría de la teoría. Por eso, hay que aceptarla críticamente. Esquema tomado de la referencia [33].

La tabla 2.1 muestra algunas de las propiedades de las partículas del Modelo Estándar.

QUARKS		
Quarks	Masa	Carga eléctrica
up (u)	1,7 a 3,3 MeV/c ²	$+\frac{2}{3}$
down (d)	4,1 a 5,8 MeV/c ²	$-\frac{1}{3}$
strange (s)	80 a 130 MeV/c ²	$-\frac{1}{3}$
charm (c)	1,18 a 1,34 GeV/c ²	$+\frac{2}{3}$
bottom (b)	4,19±0,18 GeV/c ²	$-\frac{1}{3}$
top (t)	172±0,9 GeV/c ²	$+\frac{2}{3}$
LEPTONES		
Leptones	Masa	Carga eléctrica
electrón (e)	0,510998910 ± 0,000000013 MeV/c ²	-1
neutrino electrónico (ν_e)	< 2 eV/c ²	0
muon (μ)	105,6583668 ± 0,00000038 MeV/c ²	-1
neutrino muónico (ν_μ)	< 0,19 eV/c ²	0
tau (τ)	1776,82 ± 0,16 MeV/c ²	-1
neutrino tauónico (ν_τ)	< 18,2 eV/c ²	0
BOSONES INTERMEDIARIOS		
Bosones	Masa	Carga eléctrica
fotón(γ)	< 6×10^{-17} eV/c ²	0
W [±]	80,399 ± 0,023 GeV/c ²	±1
Z ⁰	91,1876 ± 0,0021 GeV/c ²	0
gluon (g)	0	0

Tabla 2.1: Partículas que componen el Modelo Estándar de las interacciones fundamentales de la naturaleza. Tabla extraída de la referencia [34]

Los neutrinos, pueden acoplarse a los bosones portadores de la interacción débil a través de los procesos de *corriente neutra* (NC) o *Corriente cargada* (CC) tal como se muestra en la figura 2.3.

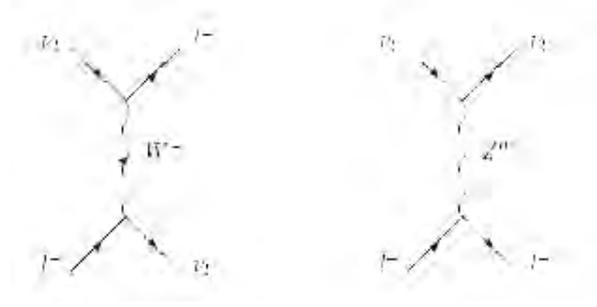


Figura 2.3: Diagramas de Feynman representando las contribuciones de corriente neutra (derecha) y corriente cargada (izquierda) del proceso de dispersión $\nu_l + l \rightarrow \nu_l + l$, donde l representa cualquiera de las tres familias de leptones ($l = e, \mu, \tau$).

2.5. Neutrinos en el Modelo Estándar

El Modelo Estándar ha sido enormemente exitoso al describir y predecir los datos experimentales. Este modelo contempla una invariancia de norma local con simetría $SU(3) \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$ la cual contiene tres generaciones de leptones y quarks.

El grupo $SU(3)$, describe la interacción fuerte, la cual tiene ocho bosones de norma llamados gluones con diferentes números cuánticos de color, la teoría que surge de este sector se conoce como cromodinámica cuántica y los únicos fermiones que son sensibles a esta interacción son los quarks. El sector $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$ describe las interacciones electromagnéticas y débiles, llamadas de manera colectiva interacciones electrodébiles, las cuales tienen cuatro bosones de norma (W^\pm , Z^0 y γ). Las interacciones electromagnéticas y débiles se unifican a altas energías obteniendo, entre otros resultados, la mezcla del bosón de la norma neutro de $SU(2)_L$ y el bosón de norma de hipercarga $U(1)_Y$. A bajas energías, esta simetría está rota, si bien permanece vigente una simetría $SU(1)_Q$.

El proceso de quiebra espontánea de simetría $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$, permite a los bosones adquirir masa al interactuar con un campo escalar (bosón de Higgs) que permeabiliza todo el espacio. Los bosones masivos son denotados por W_μ^\pm y Z_μ^0 , mientras que el fotón A_μ permanece sin masa [35].

En la mecánica cuántica relativista, los fermiones de spin $\frac{1}{2}$ de masa m , están

descritas por la ecuación de Dirac (utilizando convenciones de Einstein y considerando $\hbar = c = 1$) [36]

$$\left(i\gamma^u \frac{\partial}{\partial x^u} - m \right) = 0 \quad (2.3)$$

Tal que ψ denota un espinor de cuatro componentes y γ^u (representación de Weyl) son las matrices 4×4 denotadas por:

$$\gamma^0 = \begin{pmatrix} 0 & \sigma^0 \\ \sigma^0 & 0 \end{pmatrix} \quad \gamma^i = \begin{pmatrix} 0 & \sigma^i \\ -\sigma^i & 0 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Donde σ^i , son las matrices 2×2 de Pauli [37].

Las cuatro componentes de ψ , corresponden a partículas y antipartículas con dos posibles proyecciones $J_Z = \pm \frac{1}{2}$, equivalente a las dos helicidades $\mathcal{H} = \frac{\mathbf{s} \cdot \mathbf{p}}{|\mathbf{p}|} = \pm 1$, donde \mathbf{s} es el spin y \mathbf{p} el momentum de la partícula. Los neutrinos son leptones de spin $\frac{1}{2}$ como otros fermiones, sin embargo, es un hecho experimental de que sólo los neutrinos de quiralidad izquierda ($\mathcal{H} = -1$) y los antineutrinos de quiralidad derecha ($\mathcal{H} = +1$) son observados [36].

Por lo tanto, la descripción de un espinor de dos componentes (espinores de Weyl), deberían, en principio, ser suficientes. En una teoría con 4 componentes, esto se obtiene con la ayuda de los operadores $P_{L,R} = \frac{1}{2}(1 \mp \gamma^5)$ [37]:

$$= (P_L + P_R)\psi = \frac{1}{2}(1 - \gamma^5)\psi + \frac{1}{2}(1 + \gamma^5)\psi = \psi_L + \psi_R \quad (2.5)$$

$$\text{en donde } \gamma^5 = i\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3 = \begin{pmatrix} -\sigma^0 & 0 \\ 0 & \sigma^0 \end{pmatrix}$$

El iso-espín débil $SU(2)_I$, consiste de un doblete para campos quirales de quiralidad izquierda y singletes para los campos de quiralidad derecha en la forma:

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}_L \quad e_R \quad \mu_R \quad \tau_R \quad (2.6)$$

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L \quad u_R \quad d_R \quad c_R \quad s_R \quad t_R \quad b_R \quad (2.7)$$

La lagrangiana del modelo Glashow-Weinberg-Salam utilizando corrientes electromagnéticas, cargadas y neutras está dada por [36, 39]:

$$\mathcal{L} = -e\mathcal{J}_{EM}^\mu A_\mu - \frac{g}{\cos(\theta_W)}\mathcal{J}_{NC}^\mu Z_\mu - \frac{g}{\sqrt{2}}\left(J_{CC}^{\mu\dagger}W_\mu^+ + J_{CC}^\mu W_\mu^-\right) \quad (2.8)$$

De donde, \mathcal{J}_{EM}^μ es la corriente electromagnética, \mathcal{J}_{NC}^μ la corriente neutra débil, y $J_{CC}^{\mu\dagger}$, J_{CC}^μ la corriente cargada débil y sus acoplados: el campo fotónico A_μ , el campo del bosón W_μ^\pm y el campo del bosón neutrino Z_μ .

A continuación se muestra las corrientes leptónicas, donde los leptones se representan por l ($l = e, \mu, \tau$), esta representación se conoce como *La representación de Dirac* [38]:

$$\begin{aligned} \mathcal{J}_{EM}^\mu &= \bar{l}_L\gamma^\mu l_L + \bar{l}_R\gamma^\mu l_R = \bar{l}\gamma^\mu l \\ \mathcal{J}_{NC}^\mu &= \frac{1}{2}\bar{\nu}_l\gamma^\mu\left(\frac{1-\gamma^5}{2}\right)\nu_l - \frac{1}{2}(1-2\sin^2\theta_W)\bar{l}\gamma^\mu\left(\frac{1-\gamma^5}{2}\right)l + \sin^2\theta_W\gamma^\mu\left(\frac{1-\gamma^5}{2}\right)l \\ J_{CC}^{\mu\dagger} &= \bar{\nu}_l\gamma^\mu\left(\frac{1-\gamma^5}{2}\right)l \\ J_{CC}^\mu &= \bar{l}\gamma^\mu\left(\frac{1-\gamma^5}{2}\right)\nu_l \end{aligned} \quad (2.9)$$

Siendo θ_W el *ángulo de Weinberg*, tal que: $\sin\theta_W = \frac{e}{g}$

Cabe mencionar, que también se puede llegar a definir estas corrientes usando la representación quiral que está dada por [36, 39]:

$$\begin{aligned} \mathcal{J}_{EM}^\mu &= \bar{l}_L\gamma^\mu l_L + \bar{l}_R\gamma^\mu l_R = \bar{l}\gamma^\mu l \\ \mathcal{J}_{NC}^\mu &= \frac{1}{2}\bar{\nu}_L\gamma^\mu\nu_L - \frac{1}{2}\bar{l}_L\gamma^\mu l_L - \sin^2\theta_W\mathcal{J}_{EM}^\mu \\ J_{CC}^{\mu\dagger} &= \bar{\nu}_L\gamma^\mu l_L \\ J_{CC}^\mu &= \bar{l}_L\gamma^\mu\nu_L \end{aligned} \quad (2.10)$$

2.6. Neutrinos masivos

El Modelo Estándar, aún cuando ha sido capaz de predecir y explicar gran cantidad de fenómenos físicos (predicción de una tercera familia de quarks, momento dipolar magnético anómalo del electrón) que le han consolidado como una teoría precisa, se ha visto en la necesidad extenderse y generalizarse, ya que existen algunas interrogantes

que quedan sin resolver. Por ejemplo, no es capaz de explicar las masas de los fermiones, ni tampoco dice algo sobre su número de familias.

Por otro lado, desde el punto de vista teórico el Modelo Estándar [40] predice a los neutrinos como partículas de masa cero. Sin embargo, los resultados experimentales muestran que los neutrinos poseen masa. El estudio de las propiedades de los neutrinos es un área de exploración que bien puede llevar a física más allá del modelo estándar. Para dar masa a los neutrinos se puede hacer de dos formas.

Una posibilidad es que los neutrinos, a diferencia de cualquier otro fermión, sean partículas de Majorana, esto es, que sean su propia antipartícula. Si el neutrino es un fermión de Majorana, un proceso llamado doble decaimiento beta puede tener lugar y la búsqueda de este proceso es objeto de investigación.

La otra posibilidad de la adición de masas a los neutrino se puede dar mediante el quiebre de simetría via Mecanismo de Higgs. Para romper la simetría de $SU(2)$, se introduce un doblete de campos escalares complejos, uno cargado y uno neutro:

$$\phi = \begin{pmatrix} \phi^\dagger \\ \phi^0 \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

lo cual nos lleva a adicionar el llamado Acoplamiento de Yukawa a la lagrangiana del Modelo Standard para cada familia leptónica:

$$\mathcal{L}_{Yuk} = -c_l [\bar{\nu}_L \phi^\dagger l_R + \bar{l}_L \phi^0 l_R] + h.c \quad (2.12)$$

donde c_l es una constante arbitraria de acoplamiento y $h.c$ la conjugada hermitiana.

Después del quiebre espontáneo de simetría, los valores para el campo ϕ vienen de una configuración particular seleccionada llamada *estado vacío*, motivados por el hecho de que dicho estado es electricamente neutro, en donde los valores esperados al vacío del campo de Higgs son $\langle \phi^\dagger \rangle = 0$ y $\langle \phi^0 \rangle = v/\sqrt{2}$, donde $v \simeq 246 GeV$, dejando por tanto a los neutrinos sin masa, y a los leptones cargados e, μ, τ un término de masa, proveniente de:

$$\mathcal{L}_D = -(m_D^l) \bar{l}_L l_R + h.c \quad (2.13)$$

siendo $m_D^l = c_l v / \sqrt{2}$, cuya constante c_l de acoplamiento se obtiene experimentalmente.

Sin embargo, es un hecho experimental también que los neutrinos tienen masa, para lo cual se introduce el término de quiralidad derecha del neutrino, obteniendo una lagrangiana similar a la obtenida para los leptones cargados:

$$\mathcal{L}_D^{\nu_l}(x) = -\nu_{\alpha_L}(x)m_{\alpha\beta}\nu_{\beta_R} + h.c \quad (2.14)$$

en donde $m_{\alpha\beta}$ es una matriz compleja, que puede ser puesta en forma diagonal real con la ayuda de dos matrices unitarias:

$$m_{\alpha\beta} = U_{\alpha i}^{L*} m_i U_{\beta i}^R \quad (2.15)$$

aquí, m_i es una masa positiva real que puede tomar hasta tres valores, U^L , U^R son las matrices unitarias, y si definimos:

$$\nu_{i_L}(x) = U_{i\alpha}^{L*} \nu_{\alpha_L}(x) \quad (2.16)$$

$$\nu_{i_R}(x) = U_{i\alpha}^{R*} \nu_{\alpha_R}(x) \quad (2.17)$$

y reemplazamos en 2.14, obtenemos:

$$\mathcal{L}_D^{\nu_l}(x) = -m_i \left(\nu_{i_L}^\dagger \nu_{i_R} + \nu_{i_R}^\dagger \nu_{i_L} \right) \quad (2.18)$$

La cual se parece al término de masa de de la densidad lagrangiana estándar utilizando ψ_L y ψ_R .

2.7. Interacciones Neutrino-Nucleón

En la mayoría de programas de simulación para experimentos de neutrinos [41, 42] se utilizan modelos bastante simples basados en un gas de Fermi, por ejemplo ver referencia [43], que no describen demasiado bien los resultados experimentales de dispersión de electrones por núcleos. Es por tanto de indudable interés mejorar la descripción de las secciones eficaces para la interacción neutrino-núcleo, sobretodo para los experimentos de oscilación de neutrinos. Las interacciones alrededor de 1GeV son particularmente importante porque ésta es la región en la que se espera

la señal de oscilación en muchos experimentos, pero las secciones eficaces en esta región no se conoce muy bien. Esta región de energía es complicada debido a las contribuciones solapadas de *dispersión cuasi-elástica*, *producción resonante de piones individuales*, y *dispersión profundamente inelástica*. Todas estas interacciones se miden conjuntamente para estudiar el déficit en el número de eventos esperados de neutrinos, y las interacciones cuasi-elásticas se estudian a parte para medir el déficit como una función de la energía [44].

2.7.1. Dispersión Quasi-elástica

La dispersión quasi-elástica domina la tasa de interacciones $\nu - N$ para $E \leq 2\text{GeV}$. Mediciones de alta precisión de la sección eficaz para éstas reacciones, incluyendo su dependencia de energía y la variación con distintos blancos es esencial para los presentes y futuros experimentos de oscilaciones de neutrinos.

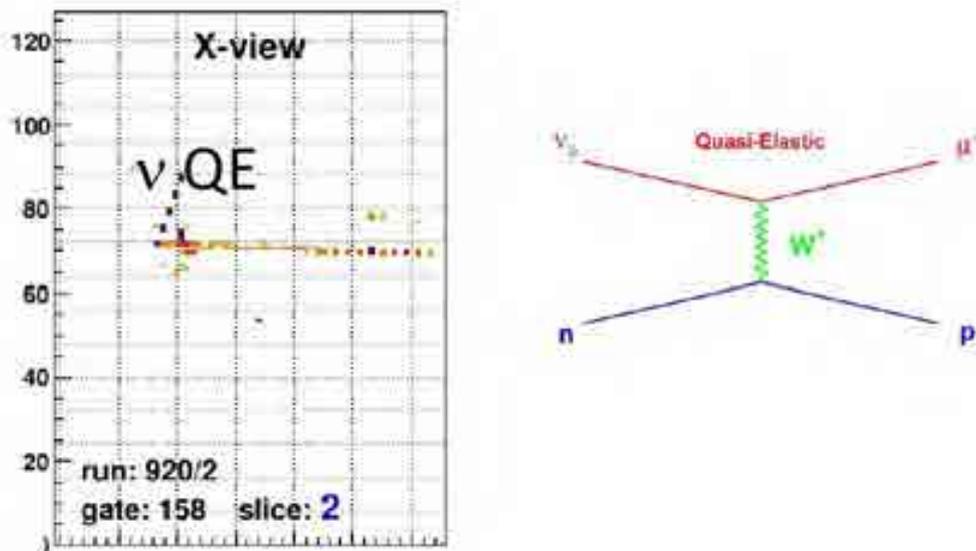


Figura 2.4: La figura de la izquierda, muestra la reconstrucción de un evento candidato a la interacción de dispersión cuasi-elástica para corriente cargada, en el cuadro, el eje Y representa los strips (tiras centelladoras) y el eje X corresponde a los módulos a lo largo del detector. Este evento corresponde a la corrida 920, subcorrida 2 y evento número 158 obtenido de la toma de datos. Al lado derecho se muestra el diagrama de Feynman para este tipo de interacción.

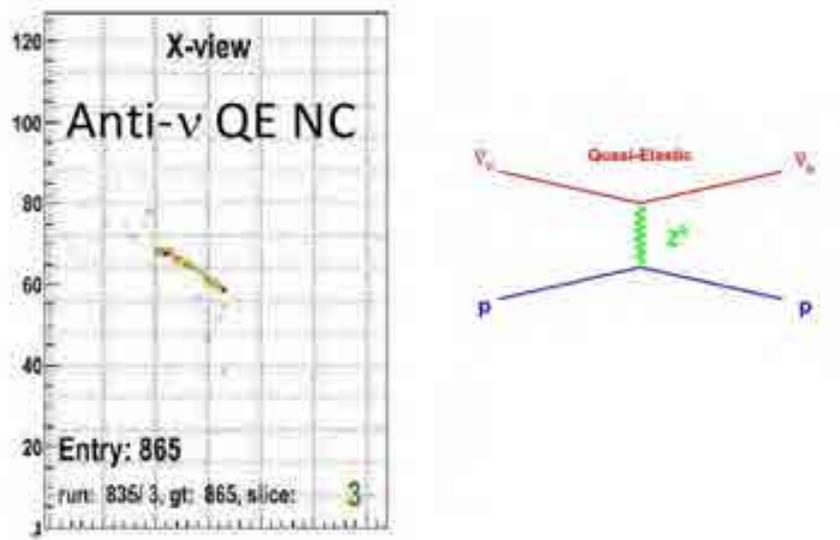


Figura 2.5: Al igual que la figura anterior, la imagen de la izquierda muestra la reconstrucción de un evento candidato a interacción de dispersión quasi-elástica para corriente neutra, al lado derecho se muestra su diagrama de Feynman que lo representa.

Reacciones quasi-elásticas de Corriente Cargada (CC)

Las interacciones quasi-elásticas de corriente cargada de neutrinos y anti-neutrinos están dadas por:

$$\nu_l + n \rightarrow p + l^- \quad (2.19)$$

$$\bar{\nu}_l + p \rightarrow n + l^+ \quad (2.20)$$

donde $l = e, \mu, \tau$. En la práctica, solo se dispone de haces de ν_e y ν_μ en laboratorios, los haces de ν_τ son generados en ambientes físicos y por interacciones de altas energías de rayos cósmicos con la superficie terrestre.

La ecuación 2.20 en el que $l = e$ es llamado también “decaimiento del neutrón inverso”, y ha sido utilizado en experimentos históricos como el de Cowan y Reines, donde los neutrinos fueron observados por primera vez. Considerando el caso de altas energías, en el que la diferencia de masas del neutrón y protón se puede despreciar, el proceso de dispersión $\nu_l - n$ de la ecuación 2.19 puede ser obtenido, a partir del proceso de decaimiento del neutrón $n \rightarrow p + e^- + \nu_e$.

Los eventos quasi-elásticos en MINER ν A brindarán una precisión sin precedentes sobre la respuesta Q^2 de las *weak nucleon currents* (interacciones de neutrinos con el protón o neutrón)

2.7.2. Dispersión Profundamente Inelástica

La característica única de corrientes débiles para “probar” sabores de quark específicos ayudan en los estudios de PDFs (parton distribution functions). Los ν interactúan con d, s, \bar{u} y \bar{c} , mientras que los $\bar{\nu}$ interactúan con u, c, \bar{d} y \bar{s} .

Las principales interacciones son:

reacciones CC :

$$\nu_l + N \rightarrow l^- + X$$

$$\bar{\nu}_l + N \rightarrow l^+ + X$$

reacciones NC :

$$\nu_l + N \rightarrow \nu_l + X$$

$$\bar{\nu}_l + N \rightarrow \bar{\nu}_l + X$$

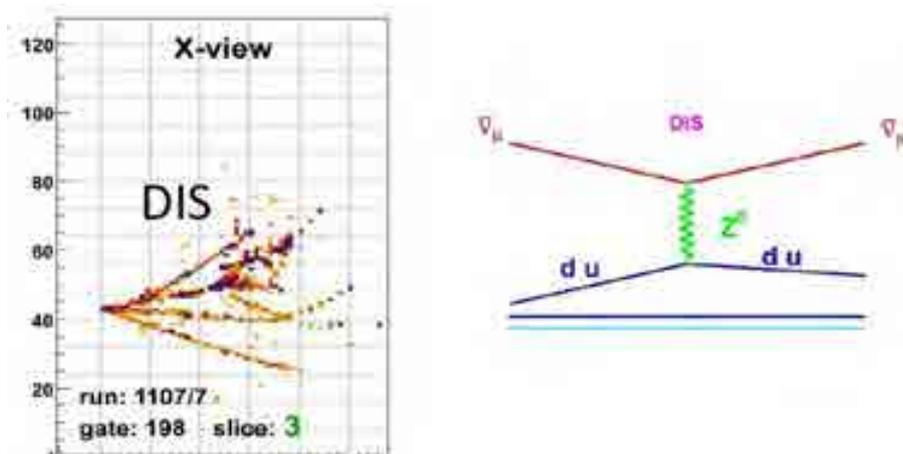


Figura 2.6: La figura del lado izquierdo muestra la reconstrucción de un evento candidato a interacción de dispersión profundamente inelástica para corriente neutra, al lado derecho se muestra el diagrama asociado a este tipo de interacción.

donde, $N = p, n$ y X denota cualquier serie final de hadrones.

Las mediciones de alta precisión de MINER ν A de la estructura partónica de los nucleones usando neutrinos, complementará los estudios de otros laboratorios utilizando sondas electromagnéticas.

2.7.3. Producción Coherente, Resonante de Piones

Los distintos blancos nucleares de MINER ν A, así como su granularidad fina, su fuerte capacidad de reconocimiento de patrones y buena calorimetría electromagnética, harán posible realizar estudios de producción coherente neutrino-núcleo de corriente neutra y cargada con una precisión nunca antes alcanzada.

La producción resonante en interacciones de neutrinos, es una parte significativa de la sección eficaz total, para el rango de algunos GeV, sin embargo, ésta es la parte menos certera en el marco de secciones eficaces. Las principales interacciones que generan producción resonante son:

$$\nu N \rightarrow \nu R \quad (2.21)$$

$$\nu N \rightarrow l^- R \quad (2.22)$$

donde R viene ser el producto de la resonancia ($R = N'\pi^+$).

Experimentos de estadísticas de desapariciones de neutrinos muónicos son particularmente sensibles a los estados finales hadrónicos, en partículas, el número, carga y cinemática de los estados finales de piones, la falta de conocimiento de estos estados finales contribuye a una incertidumbre en la energía total hadrónica y por tanto, en la estimación de la energía incidente de neutrino y el parámetro δm^2 . Los estudios sistemáticos y detallados que MINER ν A puede brindar son importantes para mejorar estos aspectos.

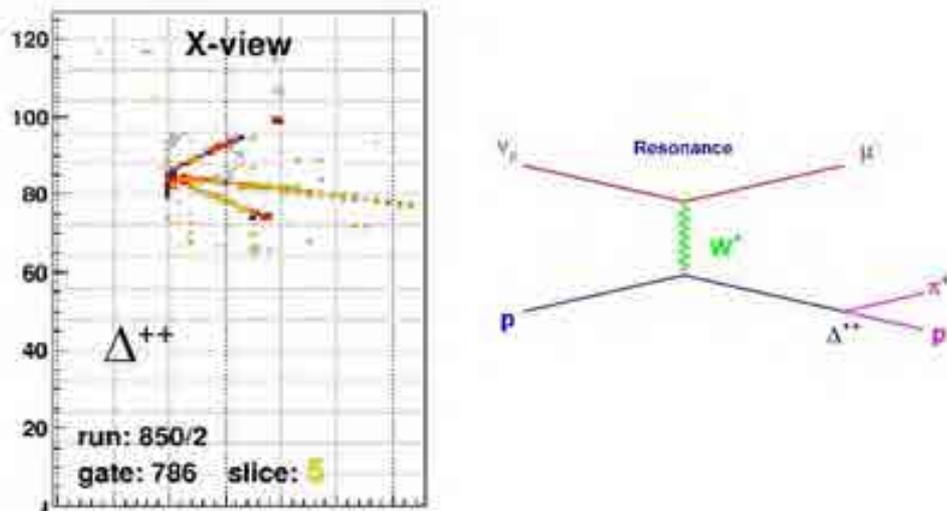


Figura 2.7: Reconstrucción de un evento candidato a producción resonante de piones, registrado por el detector MINERνA , al lado derecho se muestra su diagrama asociado a esta interacción.

3.1. Introducción

El Experimento MINERvA¹ [45], es una colaboración entre las comunidades de físicos de altas energías y físicos nucleares de medianas energías de diferentes instituciones alrededor del mundo (principalmente conformada por físicos que trabajan en el Fermilab), propuestos a aprovechar la oportunidad de acceder a un excelente programa amplio y rico en la física de dispersión de neutrinos [46].

Este experimento de dispersión de neutrinos de alta precisión [47], está designado al estudio de los estados finales de las interacciones neutrino-núcleo en un detalle sin precedentes [48], además de ello, realizará las medidas necesarias para ayudar a reducir el *background* de la señal de experimentos actuales y futuros de oscilación de neutrinos. MINERvA cuenta con un detector localizado a 100m bajo tierra en el Hall Numi del Fermilab, cerca de MINOS² Near Detector [49] los cuales son bombardeados con un haz de neutrinos provenientes del NuMI [50].

Actualmente el detector se encuentra completamente construido, inició a tomar

¹El nombre MINERvA viene de: Main INjector ExpeRiment ν -A

²El nombre MINOS viene de: Main Injector Neutrino Oscillation Search

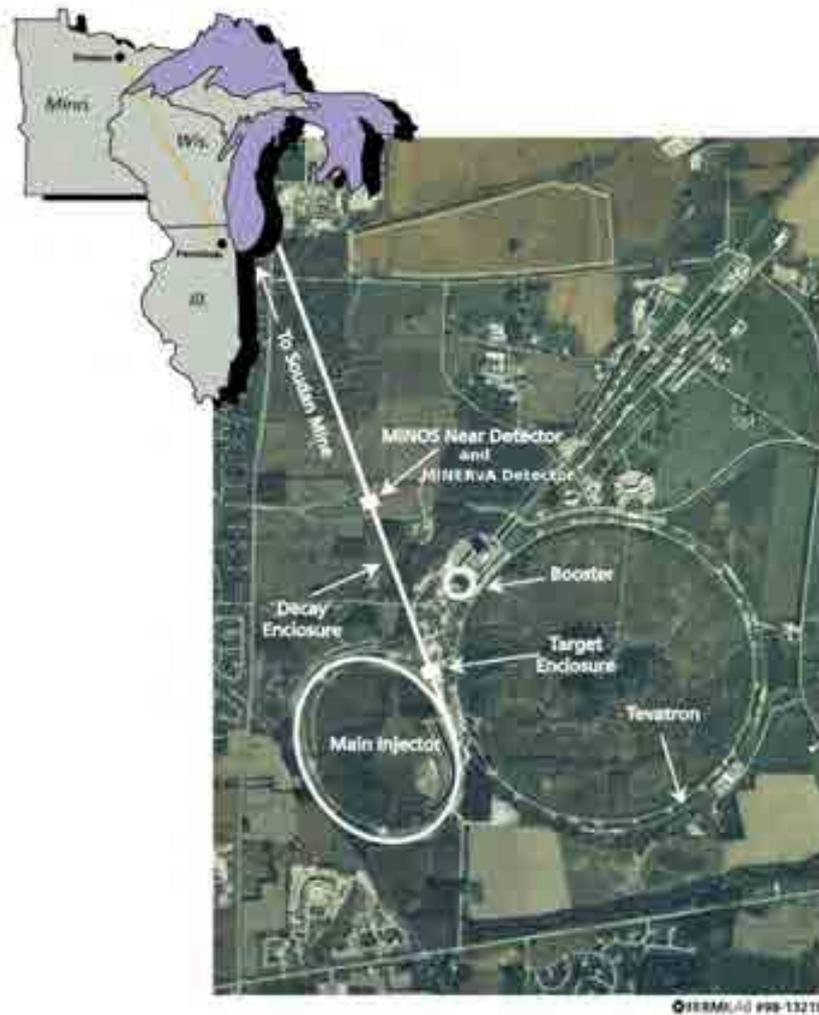


Figura 3.1: Vista aérea de los anillos del Main Injector y el Tevatron en donde son acelerados los protones, y la ubicación aproximada del detector MINER ν A y MINOS Near Detector.

datos en marzo del 2010 como MINER ν A full detector, la toma de datos tiene una duración prevista de cuatro años.

3.2. El haz del NuMI

El primer paso en la producción del haz del NuMI (Neutrinos at the Main Injector)[51] es dirigir un haz de protones a 120 GeV desde el Main Injector del Fermilab sobre un blanco de carbono. Las interacciones del haz de protones con el blanco produce

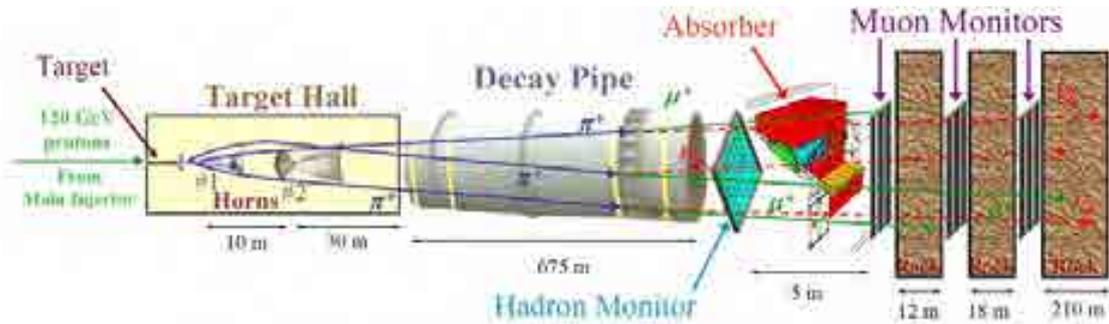


Figura 3.2: Descripción de los principales componentes del haz del NUMI. Viniendo de la izquierda podemos ver: el blanco de grafito (target), magnetos focalizadores (Horns) de los mesones positivos (π^+), el túnel de 675 m donde decaen estos mesones (Decay Pipe), el monitor de partículas hadronicas, las paredes absorvedoras, los monitores de muones y finalmente los neutrinos muonicos ν_μ en su mayoría

mesones cargados que en su mayoría son piones y kaones, estos son focalizados por un sistema de magnetos. Estos mesones decaen en muones y neutrinos durante su viaje a través de un largo túnel. Un absorvedor de hadrones elimina el resto de protones y mesones del haz. Los muones son absorbidos por los blindaje posteriores de tierra tal como se muestra en la figura 3.2, mientras que los neutrinos continúan su trayectoria atravesando los detectores de MINER ν A y MINOS Near Detector que se encuentran en el Fermilab. Luego, el haz de neutrinos continúa su trayectoria a través de la tierra llegando a pasar por MINOS Far Detector localizado en la caverna de la Mina de Soudan a 735 kilómetros de distancia en Minnesota, de allí en adelante salen al espacio. Tal como se ve en la parte izquierda de la Figura 3.1. Una descripción más detallada de la producción del haz se puede encontrar en las referencias [50, 51, 52].

3.3. Descripción del Detector MINER ν A

Los resultados y las metas de un experimento dependen bastante de las medidas o valores que se pueda obtener. Para que MINER ν A cumpla con sus metas, cuenta con un detector altamente equipado y haciendo uso de tecnología de última generación, sobre todo en la parte electrónica y de adquisición de datos. Esto es muy importante para poder cumplir con la metas trazadas dado que se requerirá datos de muy buena calidad. El detector es un híbrido de un calorímetro tradicional con un detector activo altamente segmentado. Se optó por el detector híbrido debido a que si fuese solamente

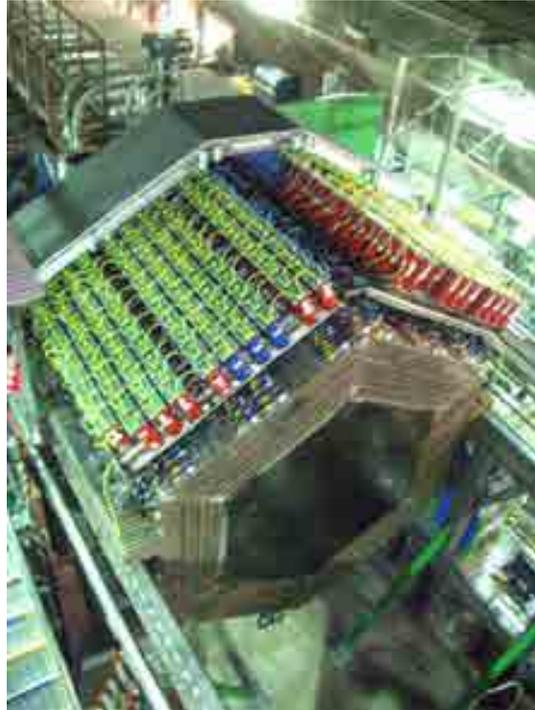


Figura 3.3: Vista superior del detector MINER ν A en su etapa de *Frozen Detector*, los tubos azules y rojos son los tubos fotomultiplicadores (PMTs), las tarjetas verdes colocadas sobre los tubos son los *Front End Board* (FEBs), los cables amarillos son que llevan la información de los PMTs al sistema de adquisición de datos, los cables celestes son para controlar el voltage de los PMTs. La parte exagonal externa es el Outer Detector y la interna el Iner Detector.

de material centellador tendría que ser sumamente grande para que sea capaz de frenar los chorros hadrónicos, esto generaba dos grandes problemas un mayor costo de dinero y lo otro era que no se podría colocar dentro del NuMI Hall debido a sus dimensiones. Las contribuciones que MINER ν A espera aportar a la física de neutrinos de acuerdo a su propuesta [53]son:

- Medidas de precisión de la sección eficaz quasi-elástica neutrino-núcleo, incluyendo la dependencia de la energía del neutrino (E_ν) y del momento transferido al cuadrado (q^2), y el factor de forma axial.
- Determinación de las secciones eficaces, en las regiones de resonancia para interacciones de corriente cargada (CC) y corriente neutra (NC).
- Estudio de los efectos nucleares en interacciones de neutrinos, incluyendo estados finales en núcleos pesados como carbón, hierro y plomo. Estos efectos juegan un

rol importante en los experimentos de oscilación de neutrinos.

- Estudio de los efectos nucleares en las medidas de $\text{sen}^2\theta_W$, y el ratio NC/CC para diferentes núcleos.
- Mejorar la determinación de la masa efectiva de quark charm o encanto.

Siendo el objetivo más importante minimizar las incertidumbres existentes en los experimentos de oscilación de neutrinos. Para cumplir estos objetivos el detector debe ser capaz de:

- Identificar los muones y medir su momentum con una buena precisión.
- Identificar hadrones y π^0 individualmente y medir su momentum.
- Medir la energía de la lluvia hadrónica y electromagnética con una muy buena precisión.
- Minimizar la confusión entre eventos de corriente-neutra y corriente-cargada.
- Poder colocar diversos blancos nucleares.

El detector MINER ν A está constituido básicamente en dos partes:

Inner Detector (ID) la figura 3.4 muestra que esta parte del detector está constituido por planos hexagonales segmentados en blancos nucleares y un núcleo activo formado por tiras sólidas de material centellador. Estos materiales de bajas densidades y muestras finas, aseguran que las medidas más difíciles puedan ser realizadas. Esto incluye entre otras, rastreamientos de fotones, detección de retroceso de protones en eventos cuasi-elásticos de baja transferencia de momentum al cuadrado (Q^2) y la identificación de partículas a través de dE/dx .

Outer Detector (OD) es la parte que envuelve al *Inner Detector* y está conformado por material mucho más denso, en su mayoría hierro, por eso representa la mayor cantidad en masa del detector. Su función principal es detener la mayor cantidad de partículas producidas por las interacciones $\nu - A$.

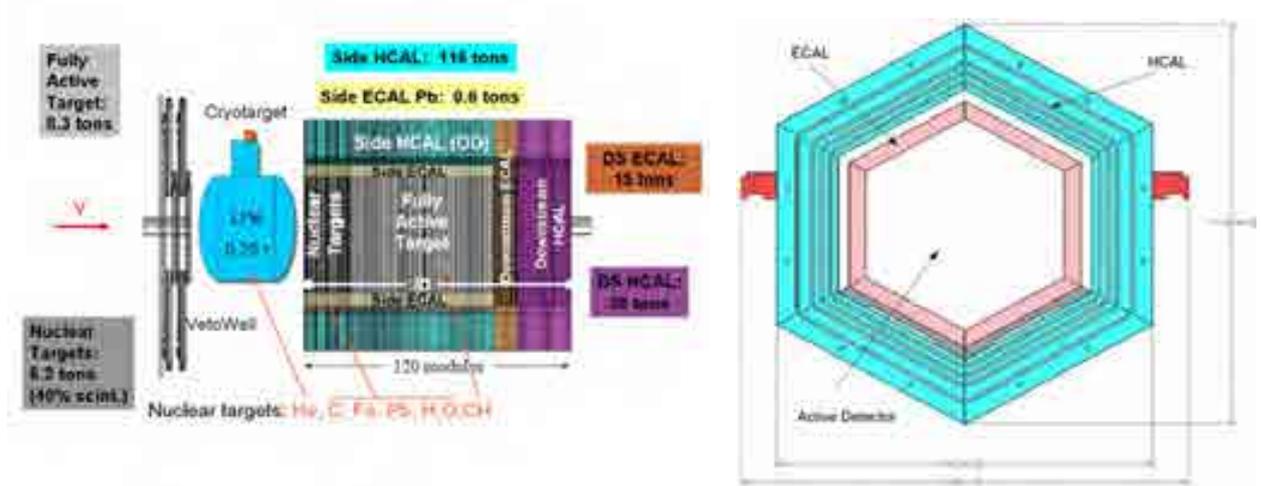


Figura 3.4: Izquierda: Corte lateral del detector MINERVA, aquí se puede ver la disposición de los calorímetros y blancos, la flecha roja nos indica la dirección del haz de neutrinos. Derecha: Vista frontal del detector, señalando la zona activa y los calorímetros electromagnético (ECAL) y hadrónico (HCAL).

3.4. Dispositivos Fotosensores

El mayor costo del experimento proviene en su mayoría de los dispositivos fotosensores y la electrónica asociada para la detección de señales de luz adquirida de cerca de 30.000 centelladores en el detector MINERVA, estas señales de luz son convertidas a señales eléctricas, la cual contiene información importante y precisa del tiempo y de la amplitud de la energía depositada. Para estas exigencias MINERVA emplea fotomultiplicadores multi-ánodo HAMAMATSU H8804 de 64 canales.

3.5. Elementos Centelladores

La parte más importante del detector es el *Inner Detector* (ID), aquí los elementos sensibles son las tiras centelladoras [54] en forma de prismas triangulares, de 17 mm de altura y 33 mm de base tal como se muestra en la figura 3.5(a), estas tiras están hechas de poliestireno extruido (Dow 663) y dopado con compuestos fluorescentes de emisión azul, una capa exterior co-extruida de TiO_2 para reflexividad y un orificio en el centro

para las fibras WLS ³ (fibras de longitud de onda cambiante) ver figura 3.5(b), estas fibras son las conductoras de los fotones originados en los centelladores hacia los tubos foto-multiplicadores multi-anodo. Para mejorar la resolución de las coordenadas, estas fibras son montadas en planos tal como se aprecia en las figuras 3.5(c); esto permite repartir la carga entre tiras de centelladores vecinos de un plano simple, para poder obtener por interpolación de la coordenada correspondiente.

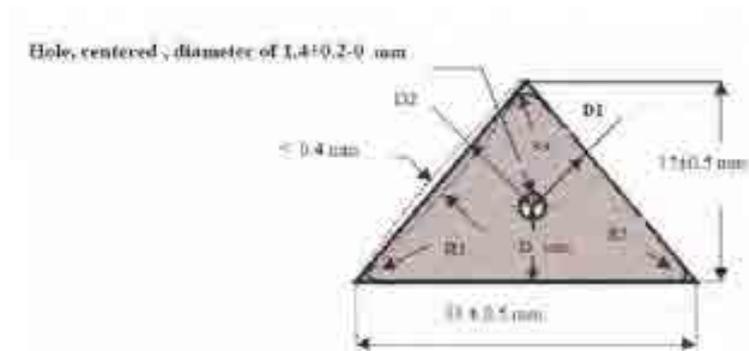
3.6. Calorímetros y blancos

Uno de los objetivos de MINERVA es mejorar la estimación de la energía incidente del neutrino basado en la energía visible. Para este propósito MINERVA necesita poder medir las energías de las partículas cargadas ($p, \pi^\pm, K^\pm, \mu^\pm$) y neutras (π^0, K^0) con energías de apenas unos pocos GeV. La mejor forma para alcanzar este objetivo es con un detector activo que contenga el 100 % de la energía. Pero el costo y los problemas para su ubicación, son un impedimento para construir este tipo de detector (un único detector activo), por este motivo se eligió un detector mixto con elementos estandares.

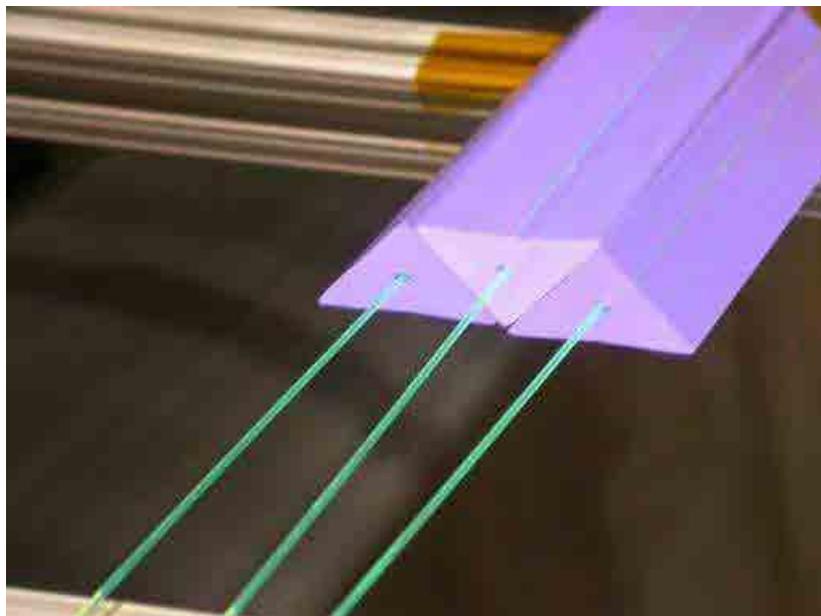
MINERVA posee los siguientes elementos: un detector totalmente activo en el centro, en su primera capa está rodeado de calorímetros electromagnéticos componiendo así el detector interno o más conocido como *Inner Detector* (ID), y la capa externa está rodeado por calorímetros hadrónicos el cual compone el detector externo o también conocido como el *outer Detector* (OD) Ver figura 3.4. La función de los calorímetros electromagnéticos y hadrónicos es poder contener las cascadas hadrónicas producidas en los blancos.

Dentro de los blancos que MINERVA pretende estudiar están: Helio, Carbono, Fierro y Agua Ver figura 3.4

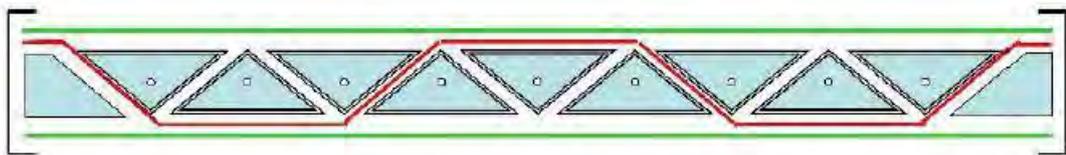
³WLS, Estos conectores ópticos fueron originalmente desarrollados para una actualización The Collider Detector at Fermilab (CDF) por Fujikura/DDK (un tipo de conector electrónico), en consulta con la Universidad de Tsukuba



(a) Corte transversal de un prisma centellador triangular.



(b) Centelladores triangulares conectados con la fibra WLS



(c) Corte transversal de un plano montado con centelladores, aislado ópticamente

Figura 3.5: Esta figura muestra las dimensiones y forma de las tiras centelladoras usadas en MINERVA, además muestra como están insertadas las fibras WLS en el centellador, también podemos ver el arreglo de prismas para formar un plano del detector.

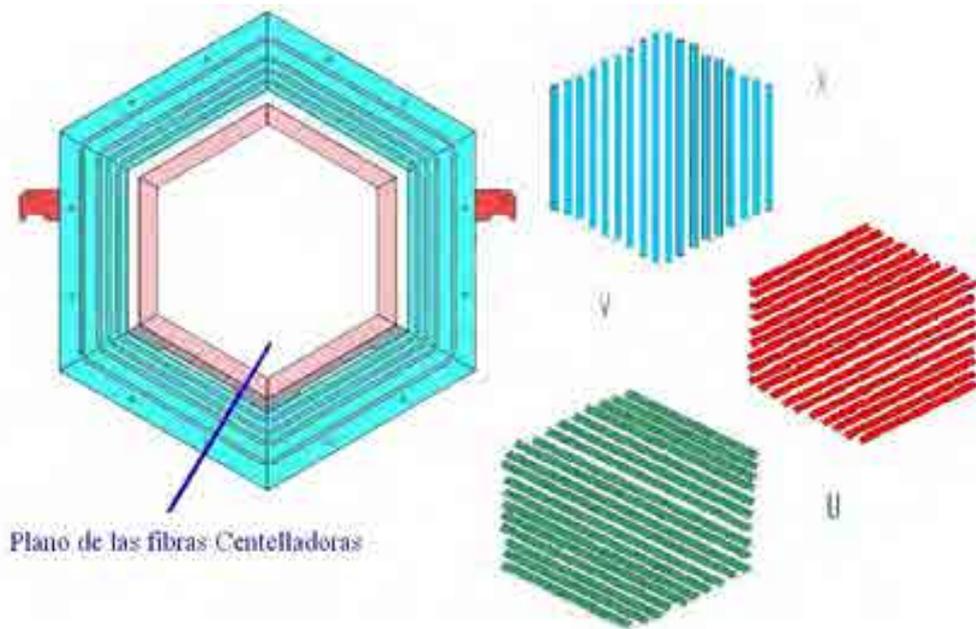
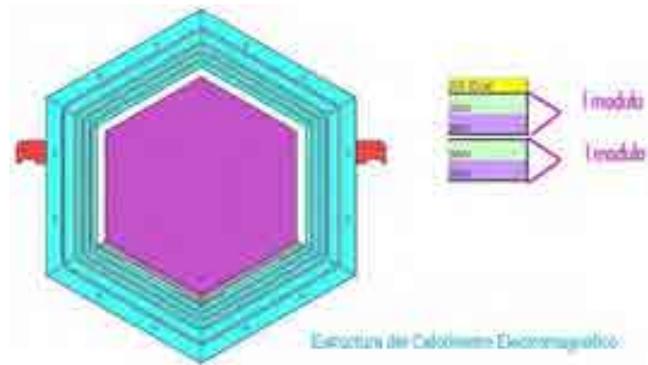


Figura 3.6: Vista esquemática de la disposición de las tiras centelladoras en los diferentes planos del detector MINERVA

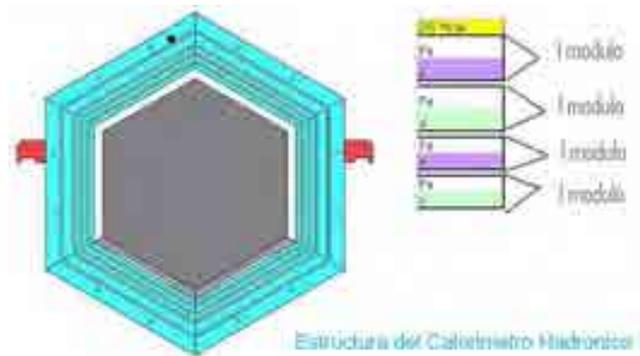
3.6.1. Calorímetro Electromagnético

La detección de fotones a altas energías se da a través de la producción de pares y bremsstrahlung las cuales conducen a cascadas de e^- , e^+ y γ . Debido a que la sección eficaz de la producción de pares es proporcional a Z^2 , para producir estas cascadas de tamaño razonable, generalmente se usan láminas de plomo. La longitud característica de estas cascadas varía con la energía, nuestro rango de energía que se espera es de unos pocos GeV. El 99 % de la energía será detenida en 4cm de plomo (esto corresponde alrededor de 7 longitudes de radiación).

El *downstream electromagnetic calorimeter* (DS ECAL) que se encuentra después del blanco activo, ver figura 3.7(a), está formado por 20 planchas de plomo de formas trapezoidales de 2mm de espesor, estas van intercaladas con planos formados de centelladores triangulares de 17mm de espesor (para ver el ordenamiento de los centelladores que hacen un plano ver la figura 3.5(c)), se optó este arreglo, porque ya ha sido usado ampliamente en experimentos pasados. Se espera una resolución de energía, $\Delta E/E$, de $6\%/\sqrt{E}$ (con E en GeV).



(a) Vista frontal de un módulo del calorímetro Electro-
magnético



(b) Vista frontal de un módulo del calorímetro Hadró-
nico

Figura 3.7: Vista de los calorímetros del Detector Minerva

Los calorímetros laterales que cubre los blancos nucleares y el blanco activo (ver figura 3.4), es bastante similar. Hojas trapezoidales de plomo, también de 2mm de espesor, intercaladas con planos de tiras centelladoras. Las planchas son extendidas 15cm dentro del área activa. Los fotones entrantes a éstos calorímetros serán completamente contenidos para ángulos menores a 25° con respecto al eje del haz de neutrinos. A mayores ángulos, la cascada no será completamente contenida, sino que penetrará en los calorímetros hadrónicos de la parte exterior del detector, en donde será completamente contenida.

3.6.2. Calorímetro Hadrónico

El *downstream hadronic calorimeter* (DS HCAL) ubicado en la parte final del detector después del *downstream electromagnetic calorimeter*, está compuesto de 20 capas de hierro, cada una es de 2.54cm de espesor, estas van intercaladas con un plano de material centellador. La combinación de 4cm de plomo y 50cm de hierro detendrán muones de hasta 600 MeV y protones de hasta 800 MeV. La longitud de una interacción nuclear para el hierro es de 16cm, por lo que para energías más altas de protones y/o piones serán generalmente detenidos.

Los calorímetros hadrónicos de los lados están constituidos por láminas de 55.9cm de espesor, con 5 slots de 2.5cm de ancho, llenadas con fibras centelladoras. El total de grosor de hierro es de 43.4 cm, o 340 g/cm^2 , el cual puede detener, pérdidas por ionización de protones de hasta 750 MeV a 90° y protones entrantes a 30° alrededor de 1GeV.

La resolución de energía, $\Delta E/E$, del calorímetro hadrónico, basado en los estudios de MINOS, se espera de $50\% \sqrt{E}$ (con E en GeV) para hadrones de energías por encima de 1 GeV. La resolución para partículas de bajas energías se espera que sea de 50% o menos, esto dependerá de la energía. La principal razón de ésta pobre resolución es la probable interacción de una partícula con un núcleo antes de detenerse, esto frecuentemente produce uno o más neutrones energéticos cuya energía es absorbida, haciendo difícil conseguir una buena resolución de energía.

Respecto a los calorímetros de la parte inicial del detector, y también de los calorímetros electromagnéticos, estos sirven como blancos nucleares, siendo sus diseño menos eficiente para detener protones de al menos 300 MeV que se originen en la región central activa.

3.6.3. Blancos Nucleares

Los blancos nucleares de MINERVA consisten en: carbon (C), hierro (Fe), y plomo (Pb), también se ha agregado Helio (He) y agua (H_2O). El hierro fue escogido por ser un material barato y además es usado como un absorbedor común en experimentos de neutrinos, como MINOS. El plomo fue seleccionado por ser un elemento de alta masa nuclear y es también fácilmente obtenible. Sería ideal que los blancos nucleares fueran

hecho de muchos blancos finos con varios planos rastreadores entre cada blanco, para poder determinar la multiplicidad de estados finales de las cantidades de energía de cada una de las partículas de baja energía.

La resolución espacial intrínseca del detector es del orden de 1cm en la dirección del haz, por este motivo blancos más finos serían ineficientes. MINOS usó láminas de hierro de 2.5cm , por lo que láminas más gruesas no serían una mejora significativa para el estudio de los espectros de partículas de bajas energías, el cual es uno de los objetivos de MINERVA. Para aumentar la estadística se debería tener cerca de 1 tonelada de cada blanco.

Material del Blanco	Masa (ton)	Muestra de corriente cargada
Helio	0,25	0,6 M
Hidrocarbano	3	8,6 M
Carbono	0,6	1,4 M
Fierro	1	2,9 M
Acero	1	2,9 M
Agua	0,6	1,4 M

Tabla 3.1: Cantidad de eventos de corriente cargada en los blancos nucleares con (M=1 millón)

La masa total de fierro es de 685kg y 855kg para el plomo. El número esperado de eventos para reacciones de corriente cargada (CC) esperado es de alrededor de 2 millones para el fierro, 2.5 millones para el plomo y 400K para el carbono.

El diseño decidido por MINERVA, considerando “F” como un marco XU o XV, y “FF” como un arreglo XUXV, ha sido el siguiente:

FF Pb/Fe |1| FFFF Pb/Fe |2| FFFF Pb/Fe/C |3| FFFF Pb|4| FFFF Pb/Fe |5|

Los blancos |1| y |2| serán de 2.5cm de grosor para Plomo y Fierro en un plano, cubriendo el fierro un área de 60 %, lo que da alrededor de 230kg de plomo y fierro en cada blanco en un radio de 80cm . El blanco |3| tendrá un área de cobertura de 50 % para el Carbono, 30 % Fierro y 20 % Plomo, dando 140kg de Carbono y 110kg de

plomo y hierro cada uno. Los blancos de plomo y hierro serán de 2.5cm de grosor y el de Carbono de 7.5cm. El blanco |4| será plomo puro de 0.75cm de grosor, con una masa de 170kg. El blanco |5| será de 1.25cm de grosor de plomo y hierro, nuevamente 60 % del área de cobertura será de 60 % hierro y 40 % plomo, con una masa de 115kg cada una.

Los blancos |1| y |2| tendrán el plomo y hierro rotados con respecto al otro para permitir chequeos por diferencias de detección, el blanco |3| permitirá estudios detallados de la dependencia de A con las interacciones. El blanco |4| es de plomo puro, para asegurarse de que cualquier fotón producido en los blancos comience a hacer cascada, la longitud de radiación del plomo es de 1.5, lo suficiente para hacer que la cascada comience, pero no para contenerla completamente. El blanco |5| permitirá el estudio de multiplicidad y distribuciones de partículas de bajas energías con buena resolución de energía.

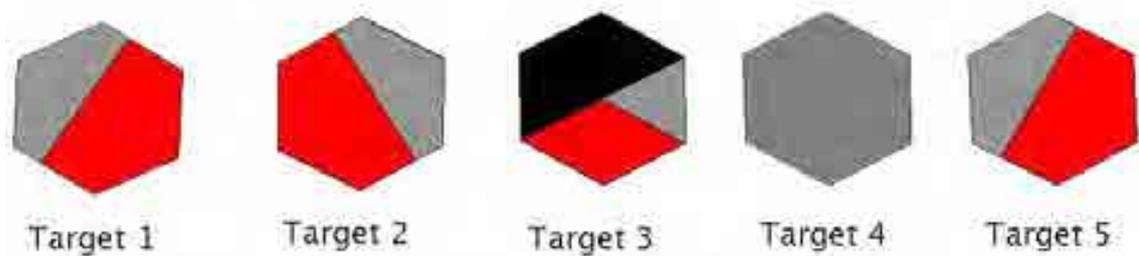


Figura 3.8: Blancos Nucleares: Rojo=Fe, Gris=Pb, Negro=C



Figura 3.9: Vista real de los diferentes Blancos Nucleares, los números hacen la correspondencia al gráfico anterior, el blanco número 6 corresponde a un blanco de agua

3.7. Parámetros del Detector MINERVA

La tabla 3.2 presenta el número total de canales del detector MINERVA en sus sub-detectores. Los canales son dominados por la granularidad de los blancos de plástico, Pb y Fe. En cuanto a la masa el domio es del *outer Detector* (OD). MINERVA emplea 19.2 toneladas de plástico centellador, cerca de 93km de fibra óptica clara entre el detector y los 587 tubos fotomultiplicadores multi-ánodo de 64 canales cada uno.

Sub-detector	Canales en ID	Canales en OD	masa (toneladas)
Blanco activo y ECAL de los lados	15.360	5.760	14,6
US ECAL (Blanco de Pb)	3.072	1.152	3,5
US HCAL (Blanco de Fe)	1.536	576	7,0
DS ECAL	2.560	960	19,8
DS HCAL	2.560	960	26,4
Veto	426	n.a.	15,1
MR/Toroide	2.556	n.a	90.80
OD Cubre la región de los blancos	n.a.	n.a.	126,5
Total	28.070	8.408	302,1

Tabla 3.2: Parámetros de MINERVA , US hace referencia al término *Upstream*.

3.8. Sistema Electrónico y de Adquisición de Datos (DAQ)

La tabla 3.3 agrupa un resumen de las exigencias para la electrónica de MINERVA . Estas exigencias son motivadas por los siguientes objetivos:

- Resolución espacial fina aprovechando la compartición de luz entre barras centelladoras vecinas.
- Identificación de π^\pm y p a través de la información de dE/dx .
- Reconocimiento de patrones eficientes, utilizando cronometraje electrónico para identificar dirección de trayectorias y separar interacciones que ocurran en un mismo ciclo (spill).

- Identificación de partículas *strange* y decaimiento de muones empleando técnicas de coincidencia.
- Tiempo muerto de lectura insignificante entre un ciclo.
- La tasa media de datos esperada para MINERVA es de aproximadamente $100kBytes/s$.

Las exigencias para el sistema de adquisición de datos de MINERVA son modestas debido a la tasa relativamente baja de eventos. El tiempo previsible del haz tiene un sistema de disparo complejo. En lugar de dicho sistema, simplemente tenemos una señal de *gate* que se abre justo antes de la llegada del haz, toda la información de la carga y tiempo de todo el detector son simplemente registradas durante la duración del *spill*

Parámetro	valor
Ciclo (<i>spill</i>)	12 μs
Tiempo de repetición	>1,9 s
Número de canales	30.972
Ocupación por ciclo	2 %
Variación de la ganancia del detector fotosensible	4,5 dB
Resolución temporal	3 ns

Tabla 3.3: Algunas de las exigencias y parámetros de la electrónica de MINERVA

3.8.1. Hardware y DAQ

Los sistemas de: adquisición de datos (DAQ), *slow control* (SC), y monitoreamiento *near-online* ("nearline"), están construidos específicamente para la lectura electrónica, ver figura 3.10. MINERVA usa plástico centellador como elemento principal del detector. La luz es colectada y enviada por fibras ópticas a los tubos fotomultiplicadores (PMTs) multiánodo Hamamatsu M64 de 64 canales [55]. Cada PMT a su vez, es leído por un *Front End Board* (FEB) [56] montado con seis chips ASIC (TriP-T chips) que digitaliza la data usando información de los ADCs. Un generador Cockroft-Walton suministra el *high voltage* de los PMTs controlado por un chip Spartan 3E FPGA en el FEB. Para la colección de datos, las tarjetas están colocadas en cadenas usando cables

de red estandar CAT5e y señales LVDS⁴.

Se utiliza dos módulos VME⁵ de interface con los FEB un módulo de controlador de lectura y tiempo y un módulo de activación. El primero es el *Chain ReadOut Controller* (CROC) [57]. En un CROC se montan cuatro canales *Front End* (FE) y cada uno sirve hasta una cadena de doce FEBs. Los canales FE contienen puertos duales de 6kB de memoria para almacenar mensajes de los FEBs. Los CROCs a su vez, recibe ordenes de sincronización y disparo (*trigger*) de un CROC Interface Module (CRIM) [57]. Como MINERVA no cuenta con un *trigger* en su lugar tiene una puerta (*gate*) sincronizada con el FNAL Main Injector (MI) timing signals. Finalmente, los CRIMs recibe información acerca de las las operaciones del experimento MINOS y el estado del Main Injector a través del MINERVA Timing Module (MTM, también llamado MvTM en algunas documentaciones) [58]. El módulo MTM no tiene una interface VME, pero utiliza el voltage estandar de la placa madre del Crate. el registro del tiempo de inicio de los *gates* para MINOS se da en sus coordenadas de tiempo como un número de 28-bit en la cabecera del DAQ del banco de datos. MINERVA usa dos VME crates, cada uno contiene un crate controlador CAEN V2718 [59], dos CRIMs, y aproximadamente media docena de CROCs. Es requerido solo un MTM para los servicios de tiempo que se necesitan. Cada crate es leído individualmente por una computadora montada con una tarjeta PCI CAEN A2818 [60] que se comunica con el controlador del módulo del crate a través de cable óptico.

La lectura de la electrónica se realiza principalmente en serie. En los FEBs, se abre un *gate* de integración con la llegada del *spill* del haz de neutrinos. El tiempo del *spill* que entrega el Main Injector dura aproximadamente 10 microsegundos y se repite en un periodo de 2.2 segundos. La puerta de lectura se abre 500 nanosegundos antes de la llegada del *spill* y permanece abierto hasta 5.5 microsegundos después del final del *spill*. Al final del cierre, el sistema de lectura hace un loop en todos los FEBs y recoge

⁴El sistema de señal diferencial de bajo voltaje o LVDS (low-voltage differential signaling), es un sistema de transmisión de señales a alta velocidad sobre medios de transmisión baratos, como puede ser el par trenzado.

⁵VME (Virtual Memory Extender) es un panel de control integrado que permite correr desktops, servidores y maquinas virtuales con hasta 64 GB de memoria virtual sin módulos físicos de memoria adicionales

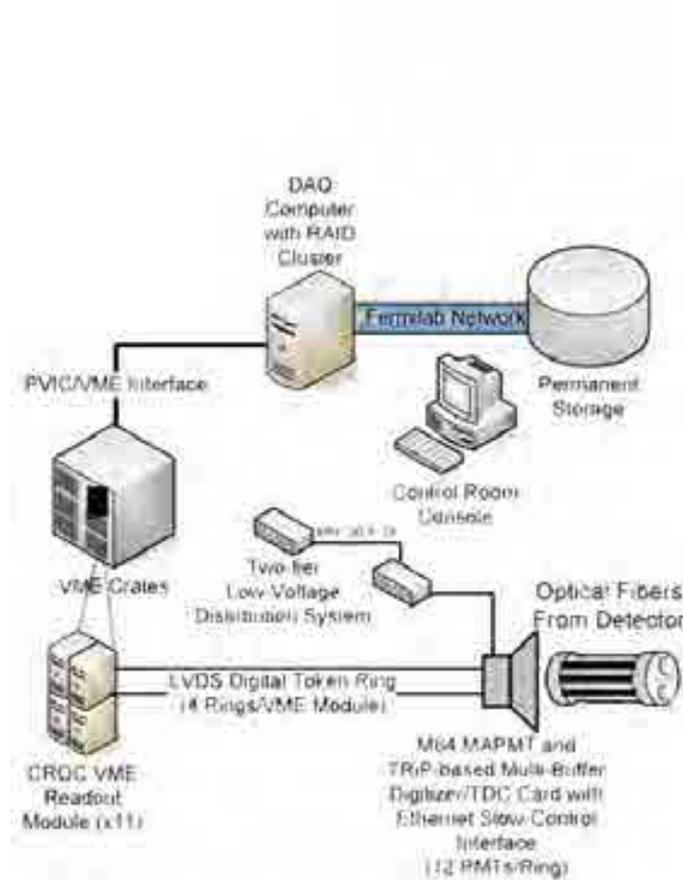


Figura 3.10: Vista esquemática del sistema de adquisición de datos

los datos en “frames” de uno en uno para los estados de *high-voltage*, *hit timing* y *hit blocks themselves*. Cada *frame* pasa a través de una cadena a un canal del CROC FE donde es almacenado brevemente antes de que los datos pasen a ser leídos y escritos por la computadora dentro de un buffer de memoria desde el cual este puede ser archivado o pasar a otra aplicación.

MINERVA puede leer en modo “*standard*”, donde la lectura para cada tarjeta empieza con la lectura del registro de programas FPGA. Estos registros contienen configuración de los datos, los intereses principales son el *high-voltage*, el *read-back* y el *gate time stamp* local. También puede leer en modo “*Zero suppression*”, en este modo, el DAQ primero lee los discriminadores para cada tarjeta y almacena los *frames* que contengan hits por encima del threshold.

A pesar de utilizar más de 32.000 canales activos en MINERVA, la cantidad de datos registrados de la interacción de los neutrinos por *spill* es poca debido a que su sección eficaz es muy pequeña. Con un ciclo de 2,2 segundos, se espera recoger aproximadamente 2 MB por *spill* para todo el detector, cerca de la mitad de los datos es del *spill* del haz y la otra mitad es la data de calibración. La calibración del *trigger* de MINERVA consiste en inyección destellos de luz (la luz se inyecta directamente en el PMT) [61] usados para el monitoreamiento de ganancias y pedestales.

3.8.2. DAQ Software

El software del DAQ esta escrito en C++ y corre sobre Scientific Linux Fermi 5.3, pero también se puede correr sobre otra plataforma. El código está dividido dentro de cuatro librerías.

1. **Hardware access:** Estas librerías son de acceso al hardware y se construyen en la parte superior de un conjunto de librerías de código cerrado propietario, proveídas por CAEN para el acceso de los crates controladores V2718 VME usando la tarjeta PCI A2818 como puente óptico. Usamos las llamadas funciones de las librerías CAEN que ponen a disposición gratuita de estos equipos en su sitio web. Estas librerías incluyen:
 - caeninterface
 - fermihardware
2. **Event structure:** Este set de librerías define los tipos y estructuras de los tipos de datos de MINERVA. Estas librerías incluyen:
 - event_builder
 - event_structure
3. **Acquisition control:** Estas librerías incluyen:
 - acquire_data
 - daq_master

- `daq_server`
- `main`
- `runthedaq`

4. **Buffer management and interprocess communication (IPC):** Son librerías de acceso al hardware, el código del Buffer management and IPC usa librerías externas. En particular, se usa el sistema de código abierto Event Transfer, basado en CODA, desarrollado en Thomas Jefferson Lab National Accelerator Facility (JLAB). Estas Librerías incluyen:

- `et_9.0`
- `event_builder`

El código está disponible en los repositorios CVS de MINERVA dentro del paquete “Online/mnvdaq”. los paquetes contienen varios archivos README, dos de estos detallan la construcción del código y de como correrlo por primera vez. Una información más precisa y detallada de la electrónica y DAQ se puede encontrar en [62].

3.9. Detector MINOS Como Espectrometro de Muones

El experimento MINOS (*Main Injector Neutrino Oscillation Search*) [49] designado a la observación del fenómeno de oscilación de neutrinos, un efecto que está relacionada con la masa de los neutrinos. Este experimento consta de dos detectores: el Near Detector localizado en el mismo Hall NuMI donde se encuentra el detector MINERVA, y el Far Detector localizado en las minas de Soudan en Minnesota. MINERVA se construyó justo antes de MINOS siguiendo la línea del haz de neutrinos, para poder aprovechar el espectrómetro de MINOS para determinar el momentum de los muones producidos en MINERVA producto de la interacción de los neutrinos con dicho detector y que atraviezan el Near Detector.

3.10. Pruebas Experimentales de Testeo

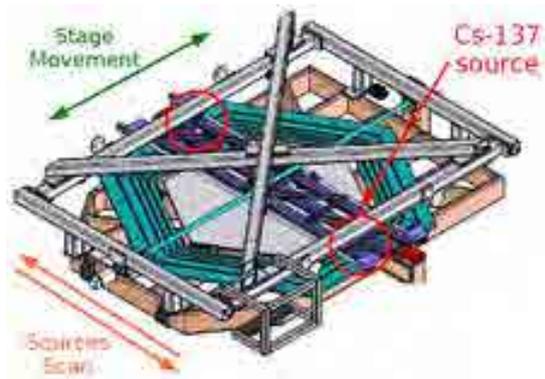
Como un paso previo a la instalación de los elementos del detector, estos pasan por una fase de testeo para verificar que tengan un funcionamiento bueno o que este dentro de lo permitido.

3.10.1. Mapeador

Previamente a la instalación de los módulos del detector, se mapearon cada uno de ellos. El propósito del mapeo fue encontrar la respuesta local de los centelladores. Este dispositivo consiste en un soporte metálico con dos fuentes radiactivas de Cs-137 sobre un soporte movable tal como se aprecia en la figura 3.11. Este sistema está conectado a un sistema de adquisición de datos que registra la respuesta de los centelladores como función de su posición. Estos datos luego de ser procesados nos permite identificar irregularidades en los centelladores.



(a) Soporte del Mapper



(b) Diseño del Mapper

Figura 3.11: Esta figura muestra el sistema de mapeo de los centelladores

3.10.2. Testeo de los Tubos Fotomultiplicadores PMTs

Como se mencionó en la parte de Dispositivos Fotosensores, MINERVA emplea fotomultiplicadores HAMAMATSU multi-ánodo de 64 canales, estos dispositivos pasan por testeos intensivos donde pulsos de luz son enviados a cada uno de los canales del fotomultiplicador en diversas configuraciones. Estas señales de luz son digitalizadas y almacenadas. Estos datos son usados para analizar la ganancia, diafonía, linealidad e



Figura 3.12: Laboratorio de testeo de los PMTs. En la figura podemos ver cuatro tubos azules que corresponden cada uno a un PMT, en los costados de los tubos están las fuentes de luz cada una de ellas ilumina dos PMTs también se puede ver la fuente de voltage, el osciloscopio digital, el VM crate y la computadora donde se recibe y procesa los datos

interferencia entre los canales. El sistema montado permite el testeo de cuatro PMTs tal como se puede apreciar en la figura 3.12.

3.10.3. Detector de Testeo (TestBeam)

El detector de testeo es una réplica del *Inner Detector* de MINERVA a menor escala en tamaño, pero de igual resolución. En el siguiente capítulo se hace una descripción detallada de este detector conocido como TestBeam, ahí también se detalla el propósito de la construcción de este detector para el experimento.

3.11. Fases del Detector

El detector MINERVA ha pasado por varias fases durante la etapa de su construcción, cada una de ellas con la finalidad de asegurar un correcto funcionamiento en la detección y adquisición de datos de las interacciones. La fase de testeos comenzó en octubre del 2008 y se extendió hasta el segundo semestre del 2009.

3.11.1. Tracking Prototype

El prototipo de rastreamiento consistió en el 20% del detector total [63], poseía calorimetría y parte del detector central, ver figura 3.13. El objetivo de este prototipo fue construir un número significativo de módulos del detector MINERVA y probar su rendimiento, en el rastreo de rayos cósmicos, además, permitió verificar la operación y función del detector antes del montaje total, aquí se realizaron pruebas de hardware, PMT's, estabilidad del software de adquisición de datos y algunas reconstrucciones de eventos. Esta parte se monto con 100 PMTs lo cual implicaba una cantidad de cerca de 200kB de eventos, la figura 3.14 muestra la parte de el *Tracking Prototype*.

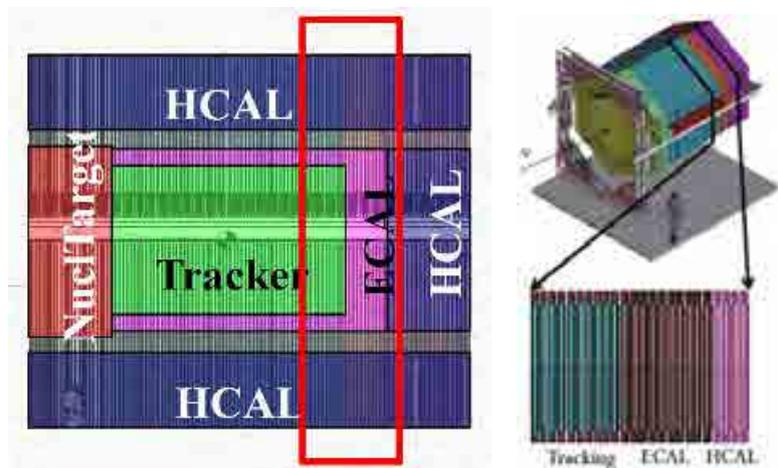


Figura 3.13: Esquema del detector MINERVA mostrando la parte correspondiente al *prototipo de rastreamiento* (Tracking Prototype)



Figura 3.14: Vista del detector en su fase de *prototipo de rastreamiento*

3.11.2. Frozen Detector

Esta parte del detector ya instalada en el NuMI hall constaba con 64 módulos completamente instalados, lo que corresponde a un $\sim 55\%$ del detector completo. La configuración de los módulos fueron: 34 módulos de blanco activo, 10 módulos de calorímetro electromagnético y 20 módulos de calorímetro hadrónico. Cabe mencionar que dentro de esta configuración se añadió un blanco nuclear de 1/4ton de Fe y 1/4ton de PB para el 50 % de las corridas. El detector contaba con 272 PMTs instalados lo cual corresponde a un aproximado de 17,000 canales. La toma de datos se inició en Noviembre del 2009, en la figura 3.3 podemos apreciar una foto del frozen detector.

3.11.3. Full Detector

Esta parte corresponde a la instalación del detector completo con la configuración de: 60 módulos de blanco activo, 24 módulos de blanco nuclear, 10 módulos de calorímetro electromagnético y 20 módulos de calorímetro hadrónico. Empleando 491 PMTs instalados, que corresponden a unos 31,424 canales. La toma de datos empezó el 22 de marzo del 2010. La figura 3.15 muestra una foto de la culminación del ensamblado del detector en su etapa *Full Detector*.

3.12. Toma de Datos

Como se menciona en la parte de fases del detector, MINERVA empezó con la fase de testeo del *Tracking Prototype* con rayos cósmicos, luego fue llevado al NuMI hall al lado de MINOS Near Detector. en abril del 2009 el experimento inicia la fase de toma de datos con 24 módulos completos para el testeo respectivo haciendo uso del haz del NuMI, con el cual se verificó el *hardware* y *software* del sistema de adquisición de datos del experimento.

La figura 3.16 muestra un evento registrado por el detector, que sugiere como candidato a la interacción ($\nu_e + n \rightarrow e^- + p$) se le llama candidato dado que se asemeja bastante a los eventos simulados para este tipo de interacción, aun no se ha realizado un estudio fino que garantice que se trata exclusivamente de dicho evento. Lo importante en esta parte es que se verificó que tanto el hardware como el software del sistema de adquisición estaban trabajando como se esperaba. Algunos eventos y explicaciones



Figura 3.15: Fotografía del detector MINERVA y parte de las personas que integran la Colaboración, aquí se aprecia la parte frontal del detector por donde incide el haz de neutrinos (ν)

más detalladas de esta parte del detector se pueden ver en [64, 65]

Una vez que se verificó el funcionamiento correcto del *Tracking Prototype*, se empezó con el montaje sistemático de los módulos para el *Frozen Detector*. Las corridas en cada una de las etapas, no solo servían para verificar que el detector está tomando datos, sino, también para corregir algunos errores que no se pueden detectar fácilmente en el software, tal como nos muestra la figura 3.17, aquí muestra que el plex⁶ no está funcionando correctamente, dado que al hacer la correspondencia uno a uno entre las señales y la posición con relación al sistema coordinado del detector, no está claro en este evento, esto se puede ver en la parte resaltada con un círculo en la gráfica del *event display*, más eventos y información del *Frozen Detector* se puede ver en la referencia [66].

⁶El Plex, es parte del software de procesamiento de datos que define la posición de la señal dentro de la geometría del detector

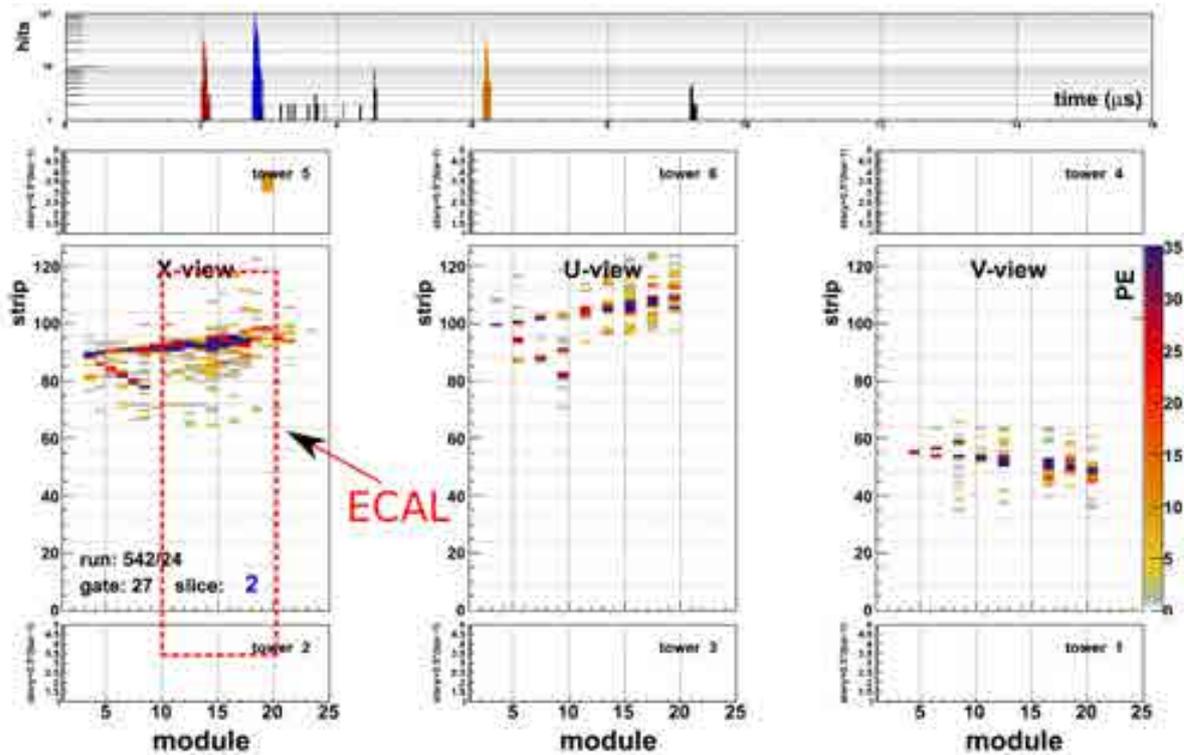


Figura 3.16: Evento registrado por el *tracking prototype* con el 20 % del detector este evento se puede calificar como un candidato de $(\nu_e + n \rightarrow e^- + p)$, el cuadro rojo muestra la parte correspondiente al calorímetro electromagnético

Entre enero y marzo del 2010 se terminó con la instalación y testeo del detector completo, luego de esto se empezó con la toma de datos con el haz de neutrinos, en la figura 3.18 al igual que en la figura correspondiente al *Frozen Detector* se muestra un problema que ocurrió cuando se implemento el detector completo el plex volvió a fallar mostrando una discontinuidad en la trayectoria del candidato a *Rock Muon*⁷ esto se puede ver en la parte resaltada con un círculo rojo donde no solo se ve la discontinuidad, sino, que la señal se muestra por debajo de la proyección de la trayectoria.

Las Figuras 3.19 y 3.20 muestran los patrones más comunes de los eventos que se están registrando actualmente en el detector, cabe mencionar que el detector se encuentra en la fase de toma de datos para neutrinos de bajas energías. Los tipos de

⁷*Rock Muon*, se refiere a los muones producido en las rocas de la caberna donde se encuentra el detector

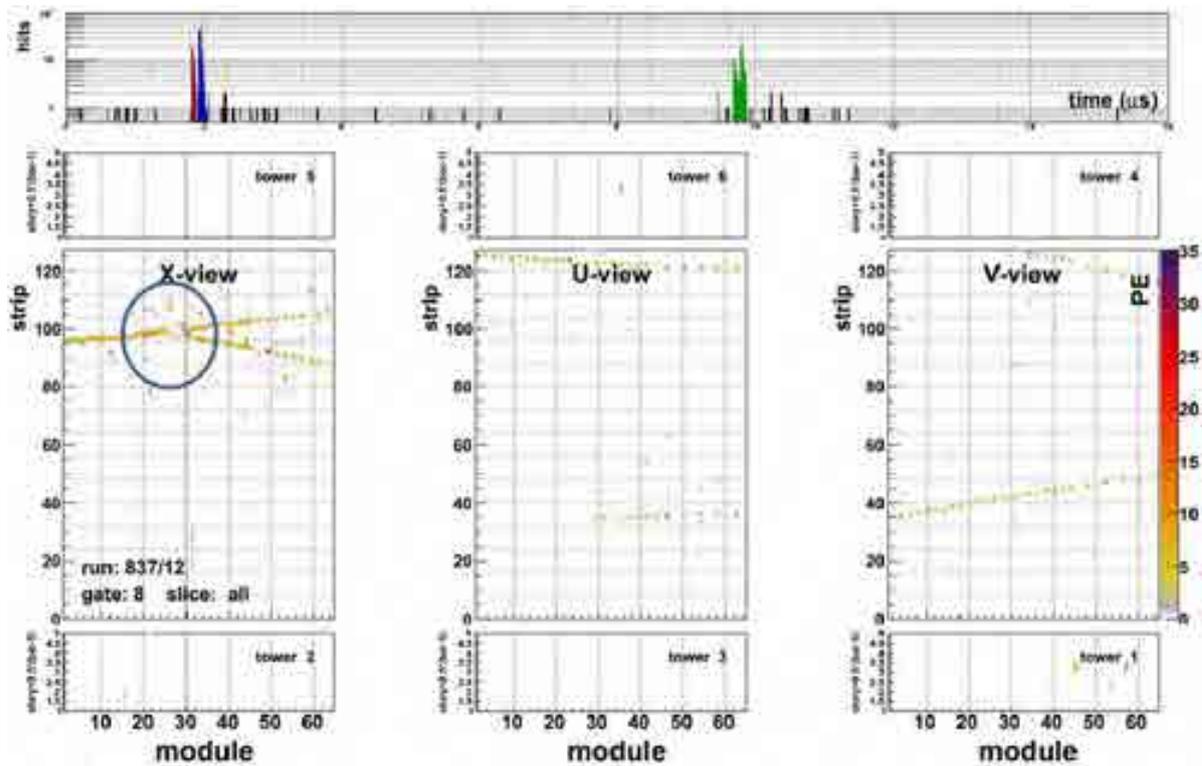


Figura 3.17: Evento registrado en el *Frozen Detector* con el 55% del detector, el círculo azul muestra una discontinuidad en la trayectoria del evento, esto nos indica que uno de los problemas puede ser el paquete que relaciona la geometría del detector con la electrónica (Plex).

eventos registrados, corresponden a lo esperado. Para encontrar una mayor cantidad de eventos clasificados, ver la referencia [67]

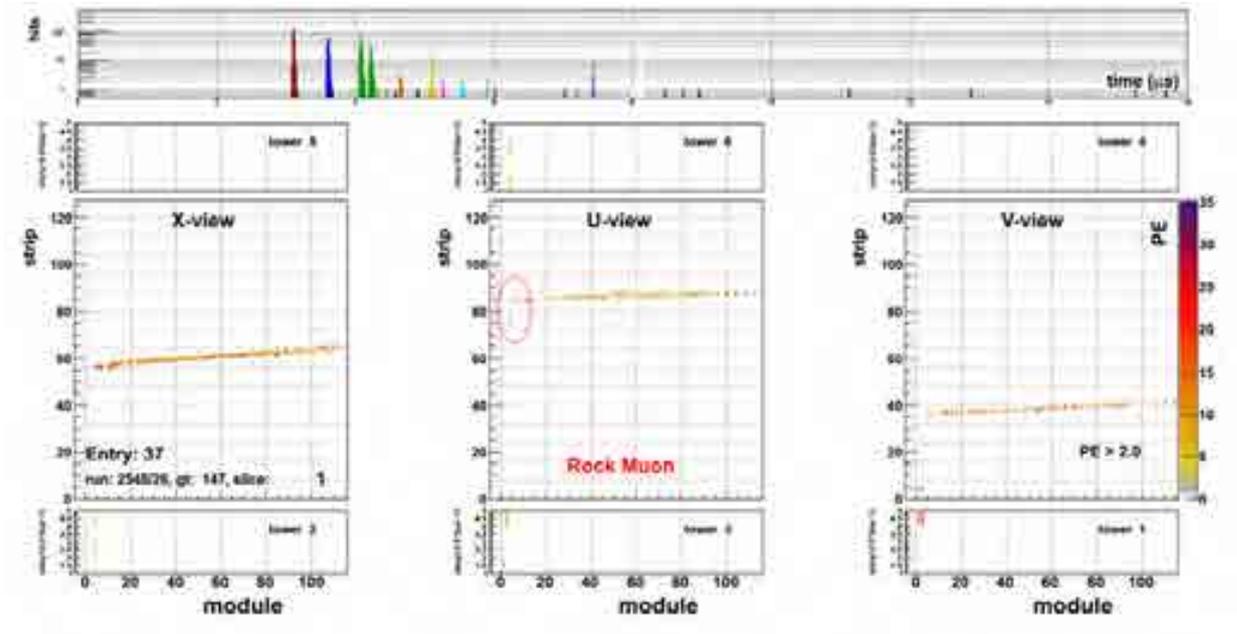


Figura 3.18: Este evento muestra un problema con el plex para el detector completo, el círculo rojo muestra la discontinuidad de la trayectoria de la partícula.

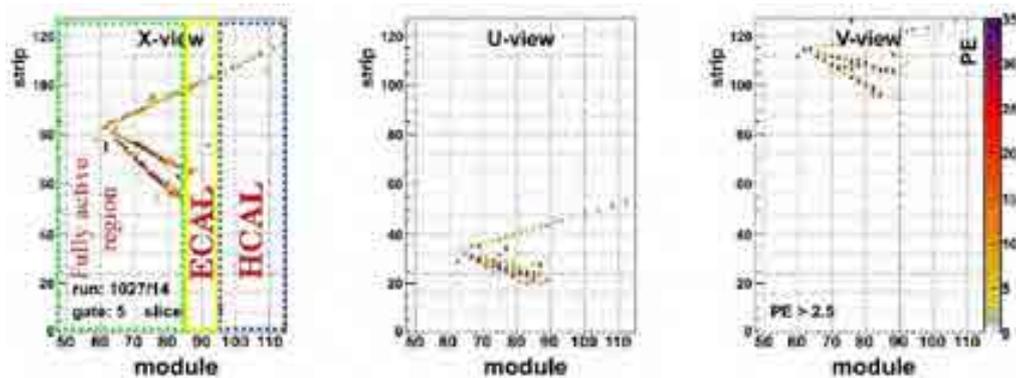


Figura 3.19: Evento para el período de la toma de datos con anti-neutrinos, la figura muestra las partes del detector como son la región activa, ECAL y HCAL

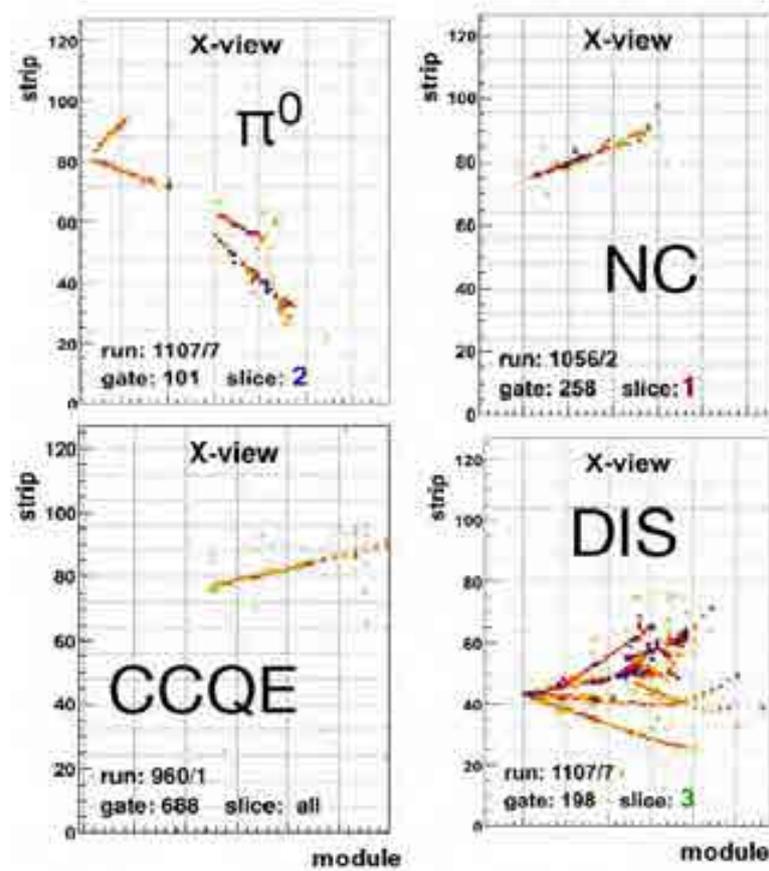


Figura 3.20: Esta figura nos muestra cuatro eventos candidatos a producción de pi cero (π^0), Corriente neutra (NC), quasi-elástico con corriente cargada (CCQE) y dispersión profundamente inelástica (DIS) respectivamente

4.1. Introducción

Para varios de los principales resultados de MINER ν A , tales como las mediciones cinemáticas para aislar la dispersión coherente, o mediciones de cada una de las energías de estados finales de los hadrones como apoyo a las medidas de oscilación, esto será clave para el entendimiento de la respuesta del detector. Desafortunadamente, hay incertidumbres significativas que afectan a este, en particular, las interacciones de los piones π^\pm, π^0 en el detector [68].

Las interacciones de los piones con los núcleos son grandes y complejos, además en la sección eficaz usual elástica y quasi-elástica, el pion puede experimentar un cambio de carga, conduciendo a la producción de π^0 para interacciones de piones cargados, o ser completamente absorbido, produciendo solo nucleones en sus estados finales. Particularmente en la región de resonancia, la sección eficaz es extremadamente grande. Una mejor información acerca de la interacción de los piones se puede encontrar en la referencia [69].

La interacción del pión con los núcleos fueron estudiados ampliamente en los proyectos: LAMPF, PSI, y TRIUMF desde finales de 1970 hasta principios de 1990. Los

piones con energías más alta se consiguieron en LAMPF con una energía máxima alrededor de los 575 MeV. Aunque el haz de piones de más alta energía fue conseguido en KEK y BNL, el número de mediciones realizadas fueron muy limitados. Las medidas más amplias en núcleos pesados se realizaron en LAMPF con piones de hasta 300 MeV de energía [70], y 500 MeV [71]. A pesar de la incertidumbre en la sección eficaz total para núcleos pesados, típicamente se sabe de un 5-10 %, lo que se sabe del desglose entre las sub-secciones eficaz es muy pobre, con incertidumbres en la sección eficaz de absorción que suelen ser de un 10-20 % o más. No hay mediciones de la relación de las contribuciones de la sección eficaz inelástica y la absorción de las energías del pión por encima de 500 MeV.

El tema crítico para las medidas de neutrinos que planea MINER ν A es la relación entre la energía observada y la energía total de los piones. Los piones creados a partir de interacciones de los neutrinos tendrán energías en unos pocos cientos de MeV. Las secciones eficaces son tan grandes en ese rango de energía que una gran parte de los piones tendrán dispersión inelástica o serán absorbidas completamente antes de detenerse. Las mediciones de Jones [71] muestra que la absorción del π^+ casi siempre conduce a la emisión de al menos un neutrón. Incluso en el carbono, normalmente más de la mitad de la energía total del pión es tomada por los neutrones. La determinación de la relación entre la energía total del pión y la energía observada en el detector, es clave para la determinación de la energía incidente del neutrino en las regiones de resonancia y de dispersión profundamente inelástica (*deep inelastic scattering*). Incluso unas mediciones estadísticas relativamente limitadas, ayudaría considerablemente al entendimiento de la respuesta del detector para los piones.

4.2. Diseño conceptual del Haz terciario

La fuente del haz usado para todos los experimentos en el Fermilab es hidrógeno ionizado H^- [72]. Para poder obtener el haz terciario para el detector TestBeam, este empieza con la ionización del H^- en el *Cockroft-Walton multiplier*, aquí los átomos de hidrógeno son ionizados por la adición de electrones y acelerados electrostáticamente hasta una energía de 750eV, luego de ésta pre-aceleración son pasados a un acelerador lineal *LINear ACcelerator* (LINAC), este acelerador de aproximadamente 150m los

acelera hasta unos 400MeV haciendo uso de las cavidades RF [73], que definen también la estructura temporal del haz. Al final del LINAC los iones pasan por una fina capa de plomo eliminando así los electrones y dejando pasar solo los protones. Luego pasan al *Booster*, este es un pequeño sincrotrón¹ que acelera las partículas hasta los 8GeV. El diseño del *Booster* permite 84 bunches por rotación a una velocidad de $1.6\mu s$ es decir están espaciados $19ns$. Una vez salido el haz del *Booster* pasan dentro del *Main Injector* (MI), este sincrotrón es siete veces más grande lo cual hace que aloje 7 veces más bunches que el *Booster*. Dentro del MI las partículas son aceleradas llegando alcanzar una energía de 150GeV que le permite transitar el MI en $11\mu s$. Además de acelerar, el MI también actúa como distribuidor pasando p y \bar{p} al *Tevatron*² y al *Switchyard*. Este último distribuye protones a 120GeV para dos líneas de haces: *The NuMI Beamline* y *The Meson Beamline*. Como se mencionó anteriormente MINERνA usa el haz del NuMI. Para el detector TestBeam usaremos el haz del *Meson Beamline*.

4.2.1. El Haz de Mesones (*The Meson Beam*)

El haz de mesones son el resultado de las colisiones de protones a 120GeV contra un blanco de 30cm de aluminio. los productos de esta interacción son desviadas por un magneto que hace la selección de los productos. Hay cinco áreas experimentales que pueden hacer uso de este haz. Una de estas áreas es el *Meson Test Hall* (MTest), donde diversos experimentos pueden estudiar la respuesta de sus detectores a un haz mono energético de hadrones.

4.2.2. El Haz Terciario

El haz terciario debe tener las siguientes características:

1. Proveer partículas de e^- , e^+ , π^- , π^+ y protones con momenta en el rango de 300MeV a 1500MeV.

¹El sincrotrón es un acelerador de partículas que acelera partículas cargadas inicialmente en un recipiente toroidal.

²Tevatrón es el nombre que recibe el acelerador de partículas circular del Fermilab ubicado en Batavia, Illinois (Estados Unidos).

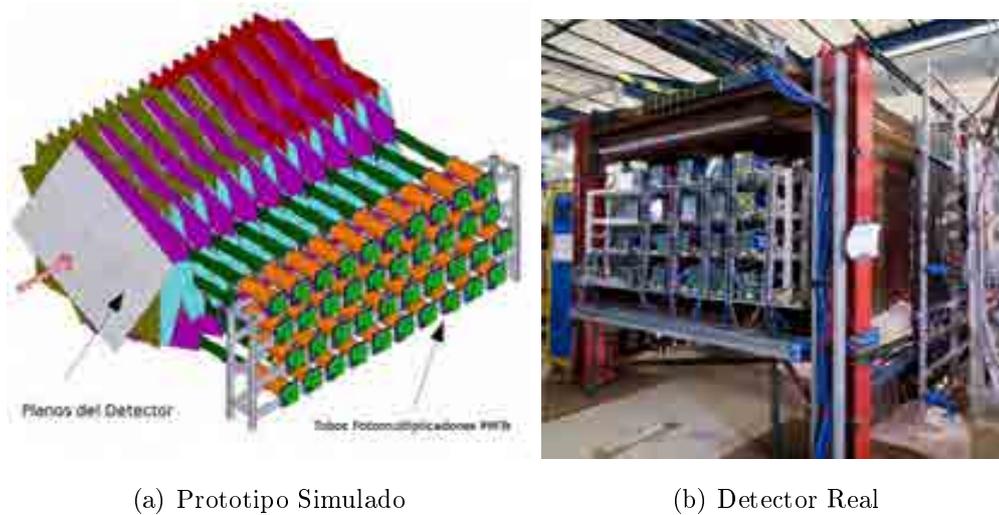
2. Debe tener un buen balance en el rango de eventos, compatibles con un DAQ lento, como el de MINER ν A .
3. Informar al DAQ las características específicas de las partículas

Una baja mixtura del haz, está designado a atender todos los requerimientos. Los productos terciarios que han sido producidos por el blanco de cobre, luego serán seleccionado con un espectrómetro de momentum (dos magnetos) y pasarán a través de un sistema de tiempo de vuelo y cámaras multialámbricas antes de interactuar con el detector.

4.3. Descripción del Detector TestBeam

El objetivo principal del detector TestBeam es medir la respuesta de las partículas individuales en el detector MINER ν A , especialmente protones y piones. Esto incluye información sobre: la energía total de la lluvia hadrónica dE/dx a lo largo de los tracks, resolución de energía para estas dos cantidades, la topología del desarrollo de la lluvia y el ID de las partículas. También, tomará datos para calibrar el efecto de enfriamiento del centellador (Ley de Birk's), el cual es una entrada a la simulación del detector. Estos datos nos permitirán confirmar o ajustar la simulación detector basado en GEANT4, y calibrar la reconstrucción de la energía de hadrones. También será de vital importancia en el desarrollo del patrón de reconocimiento, y medición de la eficiencia para separar eventos de los neutrinos cuasi-elásticos, resonancia, y la producción multiple de piones. La estrategia para estos propósitos se seguirá de una forma similar a las pruebas de los detectores SciBar [74] y MINOS [75].

La absorción y dispersión del impulso moderado de los piones en los núcleos es de particular importancia para la física de MINER ν A , en las actuales simulaciones de Monte Carlo no están bien modelados, además de la dispersión de piones en su recorrido por el detector de MINER ν A , estas medidas ayudarán al modelamiento de el re-scattering y absorción de piones similares inmediatamente después de la interacción a medida que salen del nucleo objetivo. A bajas energías, esta entrada es necesaria para entender la aceptación de los piones de las reacciones de resonancia nuclear, ya sea debido a la modificación de la distribución del ángulo del pión, o porque el pión fue absorbido, causando que el evento sea reconstruido como un evento cuasi-elástico,



(a) Prototipo Simulado

(b) Detector Real

Figura 4.1: Vista del Prototipo simulado y el Detector real. En el detector simulado podemos ver los 40 PMTs en un solo lado, en el real se colocó la mitad en cada lado

o porque múltiples piones salen del núcleo debido a re-scattering.

Para este proposito se construyó una réplica pequeña de una sección del detector MINER ν A (*inner detector*), el cual tuvo lugar en el Mtest Facility del Fermilab. Este detector fue construido con pequeñas piezas de centelladores igual que el detector MINER ν A , en la parte electrónica también se usó las mismas targetas FEBs y fotomultiplicadores HAMAMATSU al igual que MINER ν A , para la parte de la lectura de datos.

Este detector cuenta con 40 planos de centelladores, cada plano con 74 barras de centellador de 1m cada uno. Al igual que en MINER ν A , la luz será colectada a través de las fibras WLS colocadas al centro de la sección axial de las barras centelladoras. Los planos se colocaron alternadamente con una rotación de $\pm 60^\circ$ uno respecto del otro en series de tres haciendo la misma configuración que los planos de MINER ν A XUXV la figura 4.1(a) y 4.1(b) muestra el diseño hecho a computadora y del detector real.

La construcción de este detector se realizó con módulos removibles para poder cambiar los diferentes calorímetros del detector MINER ν A que se deasean analizar. En las

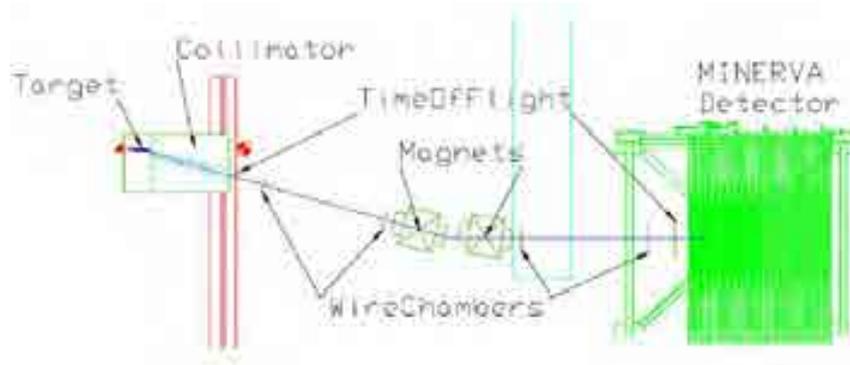


Figura 4.2: Vista del diseño del sistema Beamline

corridas del mes de junio del 2010 se tomó datos de dos configuraciones. La primera configuración estaba compuesta por 20 calorímetros electromagnéticos y 20 calorímetros hadrónicos respectivamente de cara al haz entrante. La segunda configuración se construyó con 20 planos de tracker y 20 calorímetros electromagnéticos.

En la figura 4.4 muestra el lugar donde se posicionaron el detector y el *Beamline*.

4.4. Diseño del BeamLine

El sistema BeamLine consiste en el conjunto de dispositivos electrónicos que se colocaron en la línea del haz de partículas previo al detector, para poder identificar los tipos de partículas y su momentum asociado a cada una de ellas. Para esto se diseñó un sistema para el cálculo del tiempo de vuelo conformado por dos estaciones de hodoscopios, para determinar su momentum se usó el campo magnético generado por dos magnetos y cuatro cámaras multialámbricas. Los principales elementos que lo conforman son los siguientes:

1. Un blanco de cobre
2. Un colimador de acero
3. Cuatro cámaras multialámbricas
4. Ocho Hodoscopios

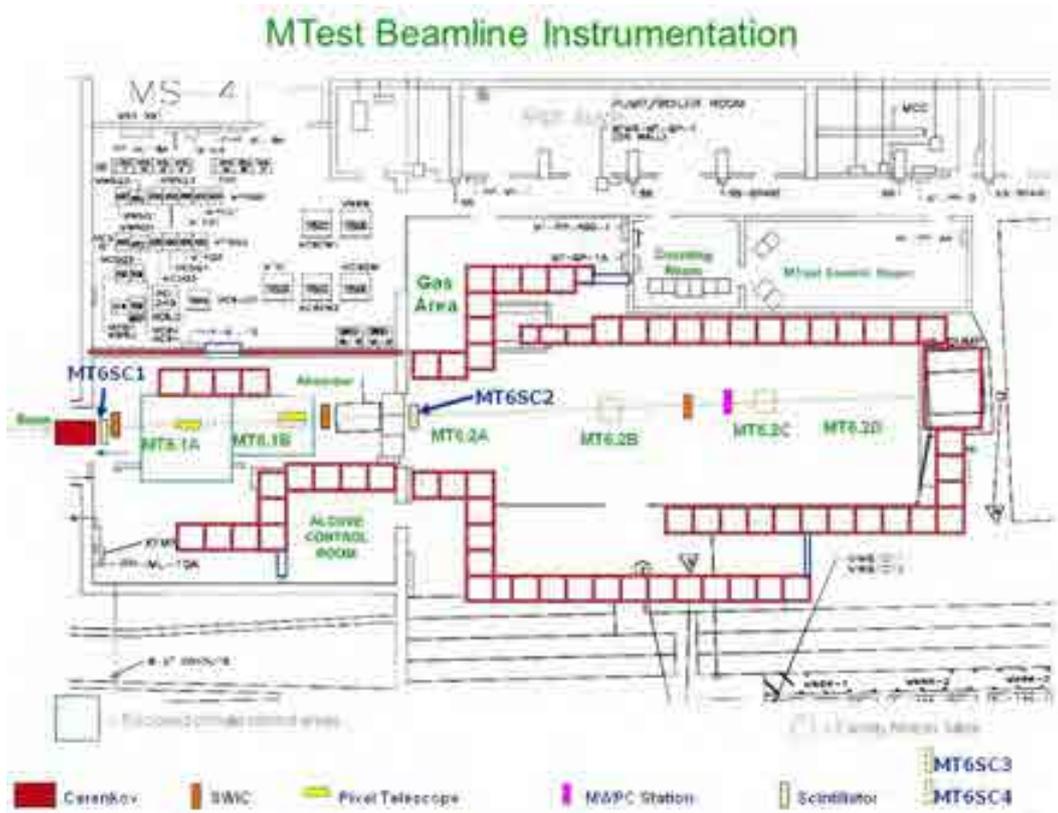


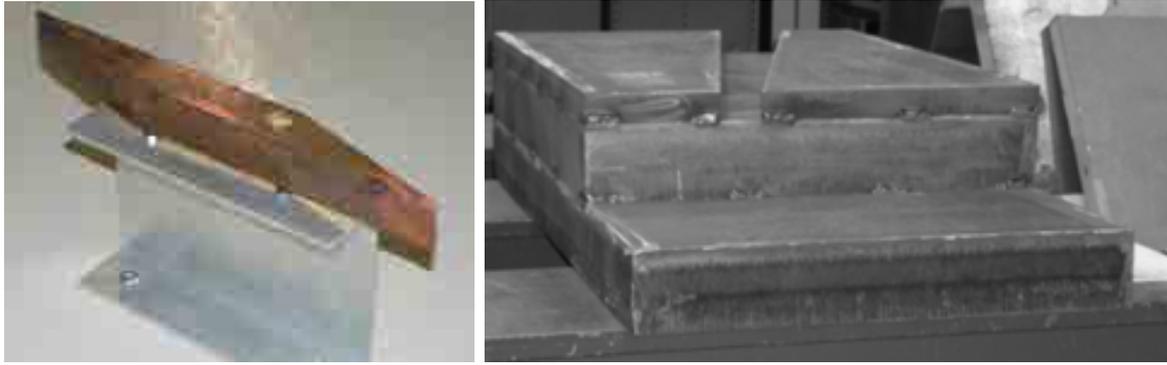
Figura 4.3: Área de testeo de los mesones en el Fermilab, para el testeo del haz del experimento se ocupó las áreas MT6-2A, MT6-2B, MT6-2C

5. Dos dipolos magnéticos (magnetos)

Todos estos dispositivos fueron posicionados de acuerdo al esquema de la figura 4.2. El sistema BeamLine y el detector Testbeam fueron armados en TestBeam Facility del Fermilab. La figura 4.4 muestra el plano de lugar mencionado y las áreas usadas para el experimento.

4.4.1. Blanco de Cobre

La figura 4.4(a) muestra el blanco de cobre usado para generar el haz terciario a partir de los $8\text{GeV}/c$ del haz secundario, se escogió este blanco debido a su baja actividad. En la referencia [76] podemos encontrar una muestra de la dependencia de la multiplicidad de partículas producidas por el haz en el blanco con respecto a su longitud, donde se sugiere que una espesura de 21,1cm es la adecuada para una producción del haz exigido.



(a) Blanco de Cobre

(b) Corte del Colimador de Acero

Figura 4.4: Fotografías del Blanco de cobre y el Colimador de acero

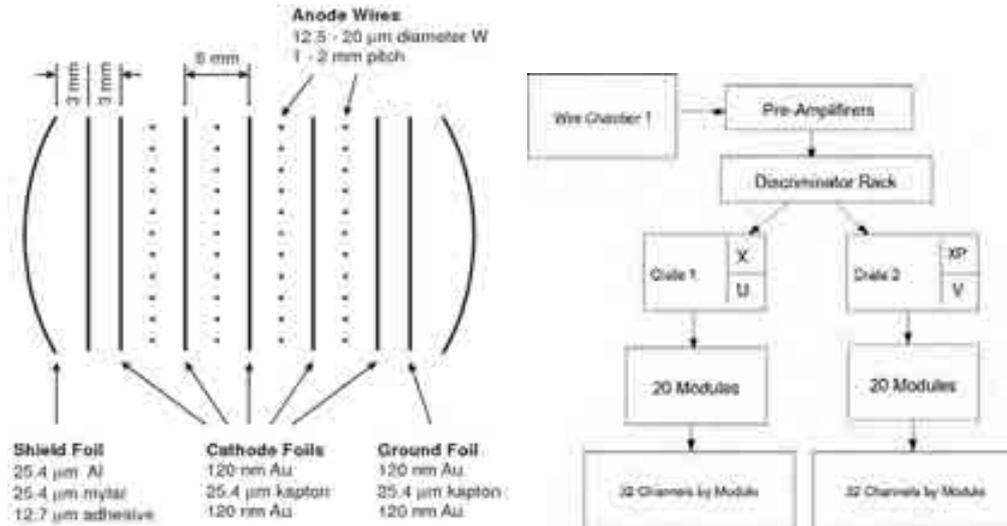
4.4.2. Colimador de Acero

La figura 4.4(b) muestra un corte del colimador de acero, su ubicación se encuentra después del blanco de cobre, tal como se puede ver en la figura 4.2 su función es seleccionar las partículas que salen con un ángulo de 16° , para una información detallada de su diseño, características, medidas y más se puede revisar la referencia [76].

4.4.3. Cámaras Multialámbricas (Wire Chambers)

Las cámaras multialámbricas que se utilizaron fueron construidas y usadas inicialmente por el experimento Hypercp[80] como elementos de rastreo del haz, para el estudio de la espectrometría de partículas cargadas. El propósito de estas en nuestro experimento sirvió también como elementos de rastreamiento y como ayuda para la determinación del momentum de las partículas cargadas del haz. Motivo por el cual están dispuestas a lo largo del trayecto del haz de partículas, las dos primeras cámaras 1 y 2 se colocaron entre el colimador y los magnetos, las otras dos se colocaron entre los magnetos y el detector TestBeam tal como se puede ver en la figura 4.2. Cada una de estas consiste en 4 planos de hilos (X-U-V-X') ver el diseño en la figura 4.5(a) una mayor descripción de ellas se puede encontrar en la referencia del experimento Hypercp[80] cap.8 *Multiwire proportional chambers*.

En la tabla 4.1 se muestran algunas de las características de las cámaras, de acuerdo



(a) Sección eficaz de las *wire chambers* (b) Esquema de conexión de la *wire chambers*

Figura 4.5: Esta figura muestra el esquema de la sección eficaz las Cámaras multialámbricas (*wire chambers*) y el esquema de conexión que se uso para integrarlo al sistema de adquisición de datos

a estas medidas se puede observar que las cámaras uno y dos son mas pequeñas en comparación con la tres y cuatro. La cantidad de canales efectivos para las cuatro fueron la misma cantidad (320 canales).

Camara	Abertura interna	Distancia entre los hilos	Diametro de los hilos
1	45,72cm x 25,40cm	1,016 mm	12,5μm
2	45,72cm x 25,40cm	1,016 mm	12,5μm
3	55,88cm x 30,48cm	1,270 mm	12,5μm
4	55,88cm x 30,48cm	1,270 mm	12,5μm

Tabla 4.1: Algunas características de las Cámaras Multialámbricas.

4.4.4. Hodoscopios

Los Hodoscopios consisten en una placa centelladora asociada a un fotomultiplicador. Para armar las estaciones de tiempo de vuelo, se utilizó ocho hodoscopios. Para la estación TOF1 se utilizarón dos hodoscopios colocados a la salida del colimador, como la abertura de este es pequeña no hay mucha área que cubrir por esa razón dos fueron

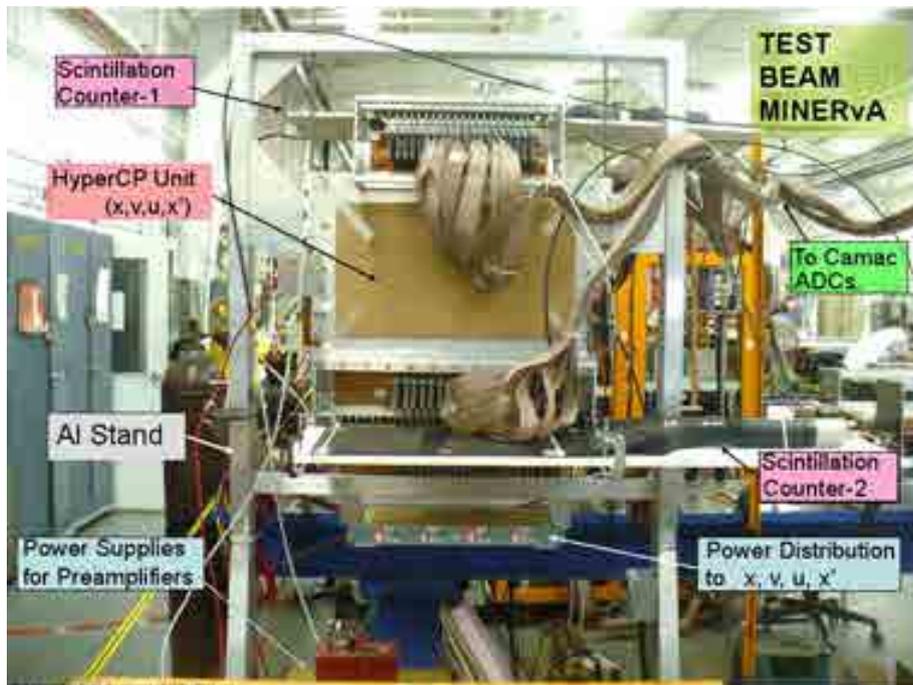


Figura 4.6: Descripción de algunos de los dispositivos que utiliza las Wire Chamber

suficientes. Para la estación TOF2 se utilizó seis colocados de dos en dos paralelamente a la salida de la wire chamber cuatro. esto se puede apreciar claramente en las figuras 5.8(a) y 5.8(b), luego de pasar por todo el sistema del beamline el haz se va extendiendo de forma cónica por eso en la estación TOF2 se trato de cubrir el mayor área posible.

4.4.5. Magnetos

La figura 4.7 muestra los dos magnetos dipolares de una apertura de 30cm por 15cm aproximadamente por donde pasaba el flujo del haz de partículas. Previamente a la corrida del experimento se hicieron simulaciones de estos magnetos usando el programa SUPERFISH donde muestra que los magnetos pueden generar una campo magnético constante de 3.4kGauss para una corriente de 100A por un largo periodo de tiempo sin calentamiento, esta información se puede encontrar en la referencia [77]. Posteriormente se realizó un mapeo espacial del campo magnético en los 3 ejes, esta información se puede encontrar en [65] y [78]. Durante las corridas del experimento se pudo monitorear la temperatura y el rampeo de corriente del magneto a través de la



Figura 4.7: Fotografía de los magnetos usados por el experimento

consola ACNET³, aparte de esto se tenía colocado un teslometro que medía el campo magnético generado por los magnetos.

³ACNET significa: Accelerator Control NETwork

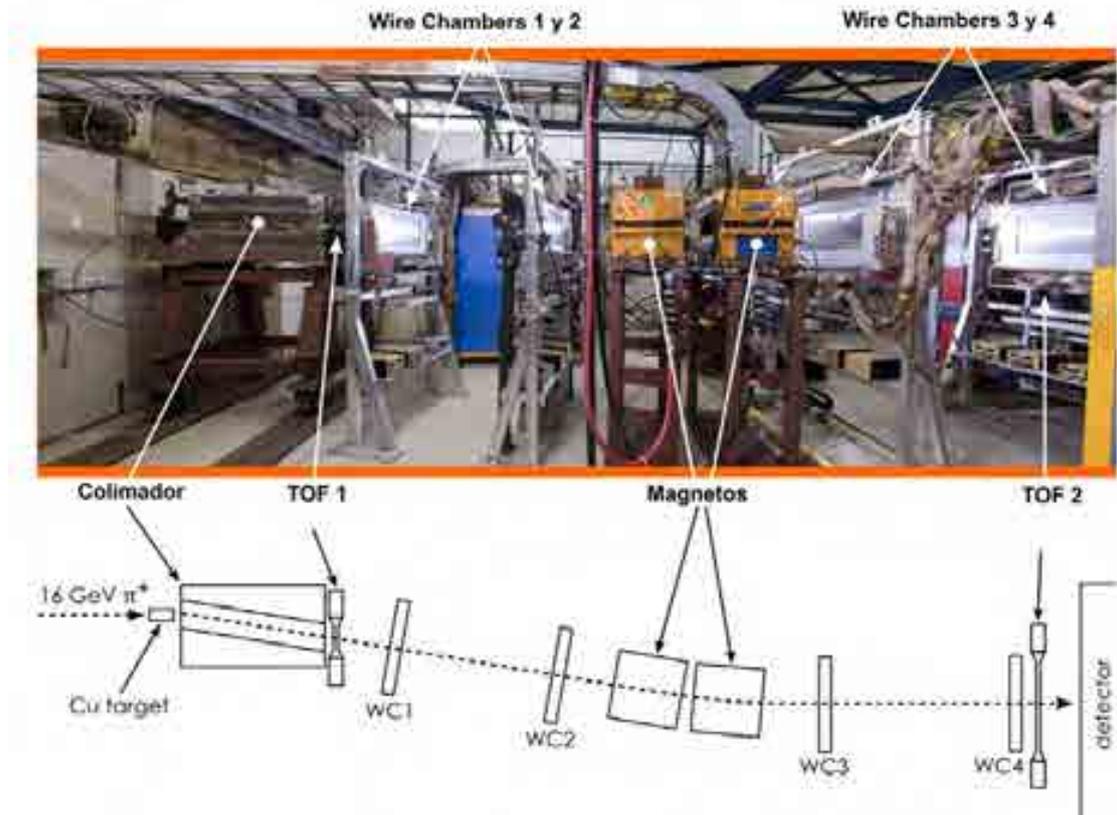


Figura 4.8: Esta imagen muestra la correspondencia de la fotografía con el esquema del sistema beamline

5.1. Introducción

La instrumentación de los dispositivos de la línea del haz (sistema beamline), instalación y configuración del sistema de adquisición de datos (DAQ), se llevó a cabo durante el período de noviembre del 2009 a enero del 2010. El objetivo principal fue dejar funcionando correctamente todo el *sistema beamline* para la toma de datos. Para cumplir con este objetivo se empezó con el testeo de cada uno de los componentes, esta etapa, nos sirvió para entender el funcionamiento de cada uno de ellos, luego de testear y verificar su funcionamiento, se montó el sistema completo y se le testó con el haz del Main Injector. Este testeo fue el más importante porque permitió hacer la sincronización de todo el sistema y hacer los ajustes de acuerdo a los requerimientos exigidos. En este capítulo se describe las partes más importantes.

5.2. Testeo de las Cámaras Multialámbricas

El testeo de las cámaras multialámbricas (wire chambers) se realizó de dos formas: el primero testeo se realizó de forma individual a cada una de las cámaras haciendo uso de una fuente radiactiva de estroncio **Sr-90**, el segundo testeo se realizó de forma conjunta haciendo uso del haz terciario (haz de mesones), en este segundo testeo la



(a) Cambiando los preamplificadores

(b) Wire Chamber reparada

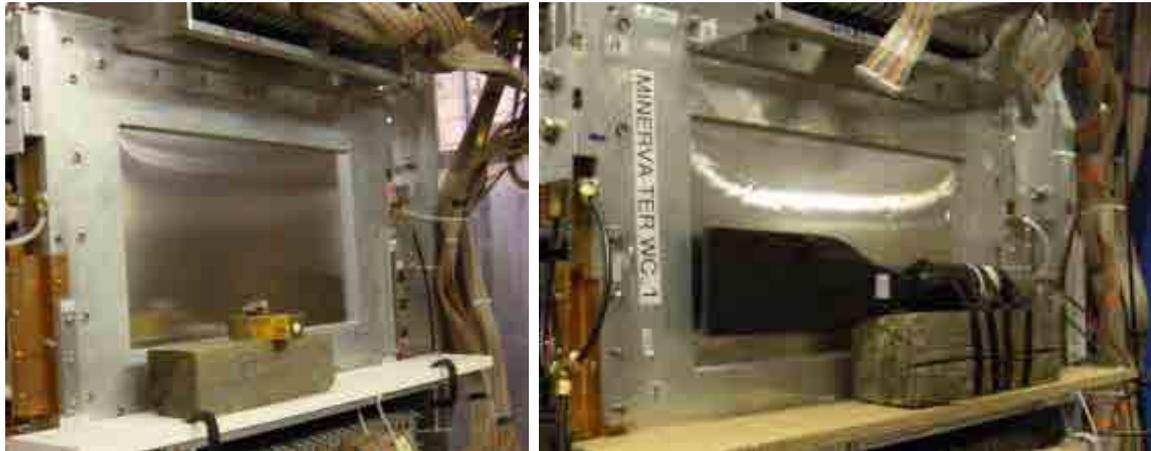
Figura 5.1: La figura (a) muestra uno de las muchas reparaciones que se realizó durante el testeo de las cámaras multialámbricas, aquí se desmontó todos los preamplificadores para la reparación de los hilos de uno de sus planos, la figura (b) muestra la cámara multialámbrica lista para su uso

intención fue analizar el desempeño completo del sistema Beamline (wire chambers, magnetos, sistema TOF y el sistema de adquisición de datos).

5.2.1. Testeo de las Cámaras Multialámbricas con Sr-90

El propósito principal de este testeo era analizar cada uno de los canales ¹ de cada plano de las cámaras multialámbricas, el hacer esto implicaba analizar todo el sistema de cada una de ellas, para verificar si estaba funcionando correctamente, esto implicaba un análisis desde las fuentes de voltaje de los planos de hilos, los preamplificadores (cada preamplificador amplificaba la señal de 16 canales), los discriminadores de señal, los camac (Computer Automated Measurement And Control), los crate (Paneles donde se colocaban los camac) y la lectura del sistema de adquisición de datos DAQ. Para poder tener un buen desempeño de cada uno de estos equipos se trabajó arduamente en la calibración, reparación y/o cambio de cada dispositivo electrónico involucrado,

¹Cada canal de lectura corresponde a una fibra de un plano



(a) Iluminando con la fuente radiactiva

(b) Testeando con el fotomultiplicador

Figura 5.2: La figura (a) y (b) son las dos caras de una misma cámara multialámbrica, en (a) se muestra la fuente radiactiva de estroncioa apuntado a un pequeño sector de la cámara multialámbrica, para tener información de todos los canales se hacia un barrido de izquierda a derecha. En (b) se muestra el fotomultiplicador con su plastico centellador, esto nos servía para el conteo de las partículas.

ejemplo ver figura 5.1(a). Los desperfectos o mala calibración de algún dispositivo se veía reflejado una vez que se procesaban los datos de las lecturas obtenidas. A continuación se muestra el procedimiento que se siguió:

- Primero se cableaba y verificaba que todas las conexiones eléctricas estén conectadas correctamente, luego se procedía con el encendido de: las fuentes de voltaje de cada uno los planos de las cámaras multialámbricas, el *high voltage* de las cuatro cámaras multialámbricas, los discriminadores de señal, la fuente de voltaje del tubo fotomultiplicador PMT, los Camacs Crate, etc.
- Luego se colocaba en un lado de la cámara multialámbrica la fuente radiactiva de Sr-90 y en el otro un paddle centellador conectado al PMT como se puede observar en la figura 5.2(a) y 5.2(b) una vez colocado, se activaba la llave de la fuente radiactiva que tiene en la parte superior.
- Luego se hacia correr el DAQ de 3 a 5 minutos, luego se procesaban esos datos usando el paquete MTestreco el cual generaba unos archivos root para el cual se tuvo que hacer pequeños programas en ROOT framework para graficarlos y poder tener una visión gráfica como se puede ver en la gráfica de la figura 5.3

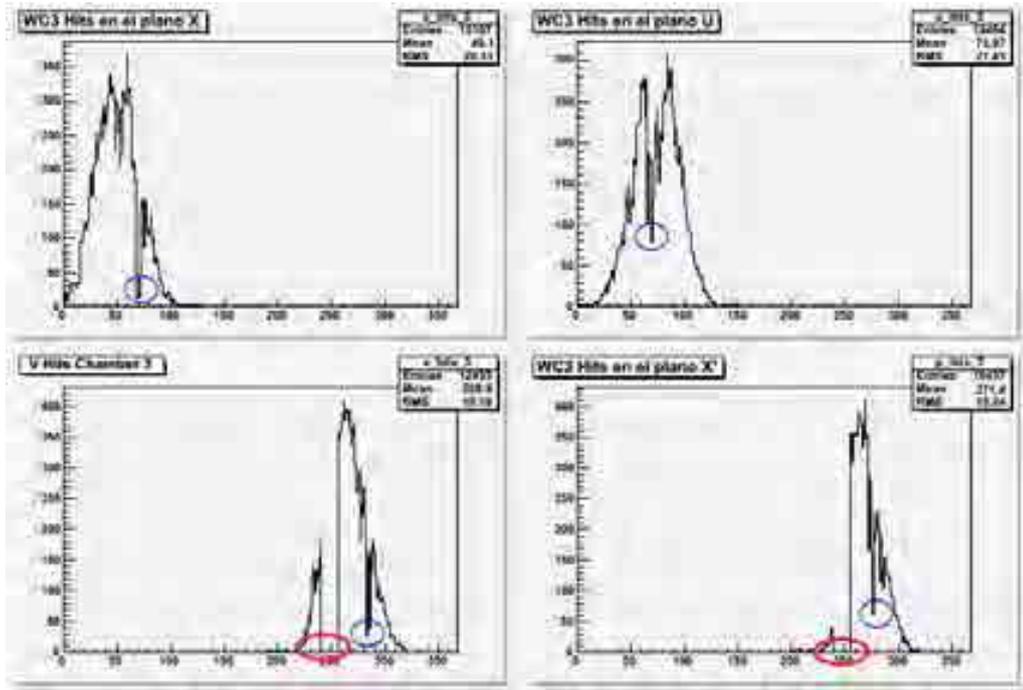
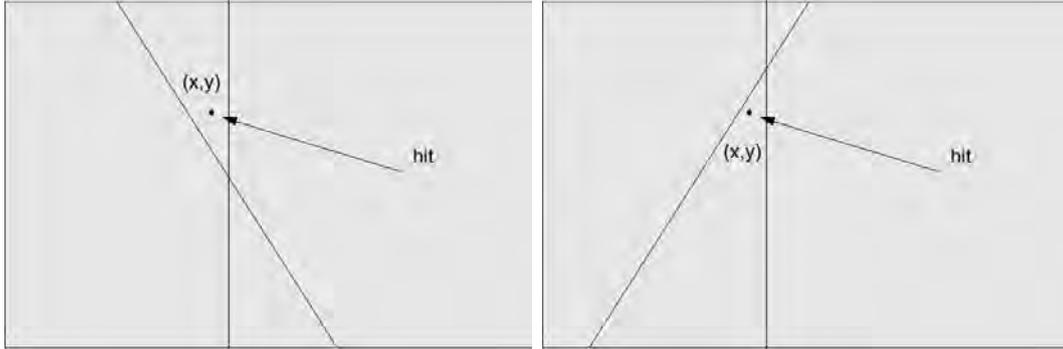


Figura 5.3: Esta gráfica muestra los eventos registrados por los cuatro planos de la cámara multialámbrica 3. Los círculos en azul muestra los canales que registraron una baja estadística de eventos, los círculos rojos muestran canales muertos (no registraron ningún evento).

La figura 5.3 muestra algunos de los problemas que se tuvo que resolver, por ejemplo los círculos de canales rojos muestran un bloque de canales muertos, como se mencionó anteriormente los preamplificadores amplifican la señal de 16 canales lo cual parece bastante claro en este gráfico que es el origen del problema, lo cual nos sugiere que el preamplificador está malogrado o probablemente mal conectado.

5.2.2. Reconstrucción de los hits en las Cámaras Multialámbricas

Como se menciona en el capítulo anterior las cámaras multialámbricas constan de cuatro planos (X,U,V,X') donde en los planos X y X' los hilos están colocados verticalmente, y en los planos U y V los hilos están colocados con un ángulo de inclinación igual al $\pm \arctan(1/2)$ con la vertical. En las figuras 5.4(a) y 5.4(b) se puede ver la representación de un hit que atravieza los cuatro planos de una cámara multialámbrica, para determinar la posición de este hit, podemos representar cada hilo



(a) Hit entre los planos X y U

(b) Hit entre los planos V y X'

Figura 5.4: Determinación de la posición de un hit en la cámara multialámbrica

como una recta y solo quedaría aplicar la ecuación de la distancia mínima entre un punto y una recta, a partir de esto podemos construir una función arbitraria tal como se describe en la siguiente ecuación,

$$f(x_0, y_0) = \sum_i^n \frac{(y_0 - m_i x_0 - b_i)^2}{1 + m_i^2} + \sum_j^l (x - x_j)^2 \quad (5.1)$$

donde el primer término de la igualdad corresponde a los planos U y V dado que sus hilos están colocadas haciendo una pendiente con el eje vertical y se les podría representar con la ecuación $y + m_i x + b_i = 0$, el segundo término corresponde a los planos X y X' dado que sus hilos de estos planos son verticales y podríamos representarlo con la ecuación $y = c_i$. partiendo de este criterio se puede determinar los puntos (x, y) que se muestra en la siguiente ecuación.

$$x = \frac{AF + E(D - C)}{E(B + L) - A^2}, \quad y = \frac{F(B + L) + A(D - C)}{E(B + L) - A^2} \quad (5.2)$$

Donde los términos A, B, C, D, E y F están definidos como sigue:

$$\begin{aligned} A &= \sum_i^n \frac{m_i}{1+m_i^2} & B &= \sum_i^n \frac{m_i^2}{1+m_i^2} & C &= \sum_i^n \frac{m_i b_i}{1+m_i^2} \\ D &= \sum_j^l x_j & E &= \sum_i^n \frac{1}{1+m_i^2} & F &= \sum_i^n \frac{b_i}{1+m_i^2} \end{aligned}$$

Haciendo uso de este criterio, se realizó la reconstrucción de los hits que atravesaron las cámaras multialámbricas, luego se implemento en el código de procesamiento de datos MtestReco que fue programado por Lee Patrick. En las figura 5.5(a) se muestra la

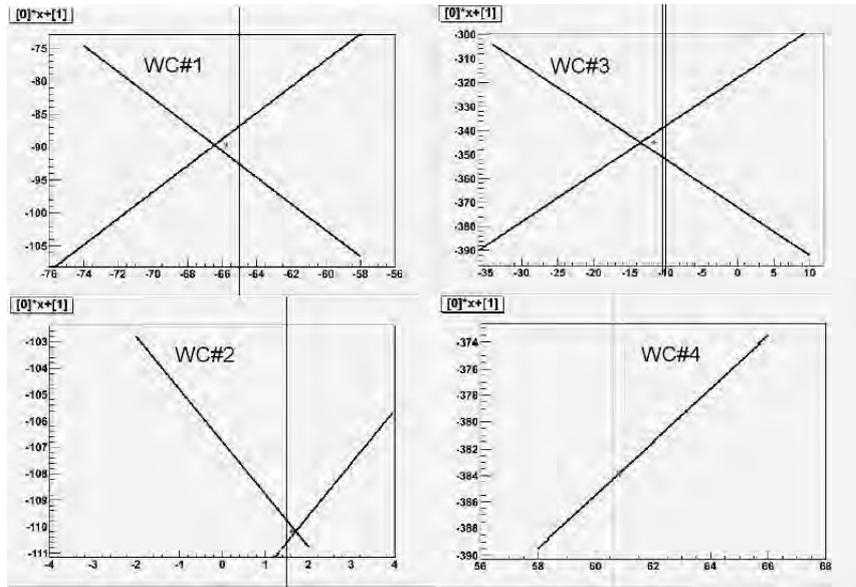
reconstrucción de un evento random que atraviesa las cuatro cámaras multialámbricas, el asterisco rojo representa la partícula y las líneas representan los hilos de las cámaras multialámbricas. En la figura 5.5(b) se muestra la reconstrucción de la posición de 433 partículas, donde cada punto representa una partícula.

La estructura del código de lectura de las cámaras multialámbricas se puede ver en el diagrama de la figura 5.6 donde cada cuadrado celeste representa una clase en el código de programación. La conexión electrónica tiene la misma estructura, es decir, la wire chamber uno está conectada a los Crates uno y dos, cada crate tiene 20 módulos con 32 canales cada uno, aquí se conectan los cables flat que salen de los discriminadores Rack. Cada crate es capaz de recibir información de la lectura de dos planos de una wire chamber.

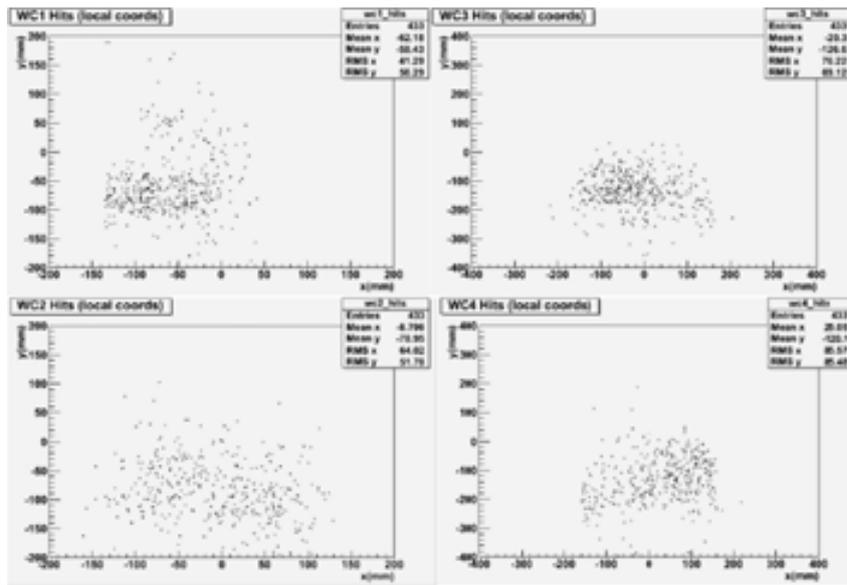
5.3. Distribución de Momentum de las partículas

La estimación del cálculo de los momenta de las partículas del haz se puede hacer en cuatro etapas. Como ejemplo tomaremos una partícula que atraviesa las cámaras multialámbricas y los magnetos tal como se puede apreciar en la figura 5.7(b).

- El primer paso consiste en la obtención de las coordenadas (x,y,z) del evento registrado en cada una de las cuatro wire chambers, de las coordenadas x e y (ya se explicó su cálculo), la coordenada z no cambia en las cámaras multialámbricas así que esto se agregó como una constante dentro del código.
- El segundo paso consiste en construir dos vectores: el primer vector se forma con las coordenadas de la wire chamber uno y dos, el segundo vector se forma con las coordenadas de las cámaras multialámbricas tres y cuatro tal como se muestra en la figura 5.7(b) (ver los segmentos de recta de color rojo).
- Cálculo del ángulo entre los vectores en el plano de la trayectoria del haz.
- Empleando el valor del campo magnético y la desviación de la partícula se puede estimar el valor del momentum haciendo uso de la ecuación $p = qB\rho$ donde: q es la carga de la partícula, B es el campo magnético y ρ es radio de giro de la partícula producida por el campo magnético.



(a) Evento Random



(b) Varios eventos

Figura 5.5: La figura (a) muestra la reconstrucción de la posición de un evento registrado en las cuatro cámaras multilámbricas, el punto rojo muestra la posición de dicho evento y las líneas representan los planos de cada una de las wire chambers. En la figura (b) se muestra la reconstrucción de la posición de 433 eventos registrados.

Esto sería suficiente si el campo magnético entre la cámara multilámbrica dos y tres fuera constante. Como esto no sucede, la corrección se hizo con un algoritmo de

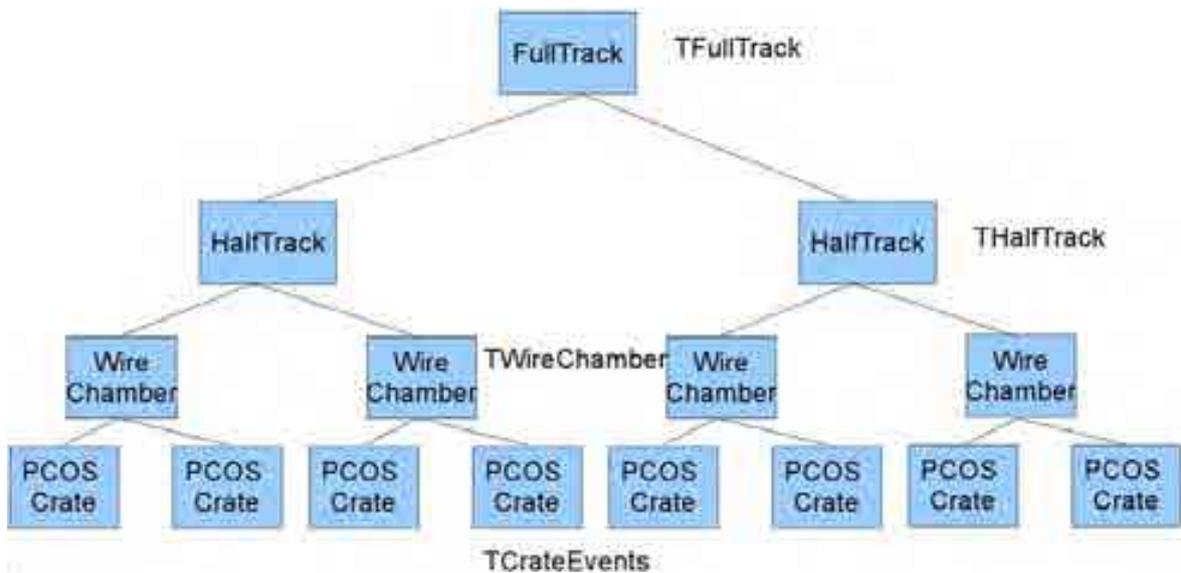


Figura 5.6: Esta figura muestra el diagrama de la estructura de las clases del código de programación de la lectura de datos de las cámaras multialámbricas, cada caja celeste representa una clase.

Runge Kutta y el paquete MINUIT 2 que fue usado para ajustar mejor la trayectoria de la partícula debido a la desviación producida por el campo magnético, y así poder tener una mejor estimación del momentum.

Estos cálculos requieren de toda la información de las posiciones espaciales de los componentes del beamline en la línea del haz como son las cámaras multialámbricas, el sistema de tiempo de vuelo y magnetos. Estos datos fueron obtenidos a través del levantamiento de dimensiones y demarcaciones realizado por un equipo especializado del FERMILAB, estos datos se incluyeron en un archivo de configuración que son leídos por los programas de procesamiento de datos. Este archivo de configuración también contiene modelos de campos magnéticos que se realizaron con simulaciones y comparado con los datos obtenidos experimentalmente.

5.4. sistema del Tiempo de Vuelo (TOF)

El sistema de Tiempo de Vuelo conocido como TOF por sus siglas de inglés *Time of flight* diseñado para medir el tiempo de vuelo de las partículas, está ubicado en el MTest tertiary beamline en el FERMILAB. Este sistema se basa principalmente

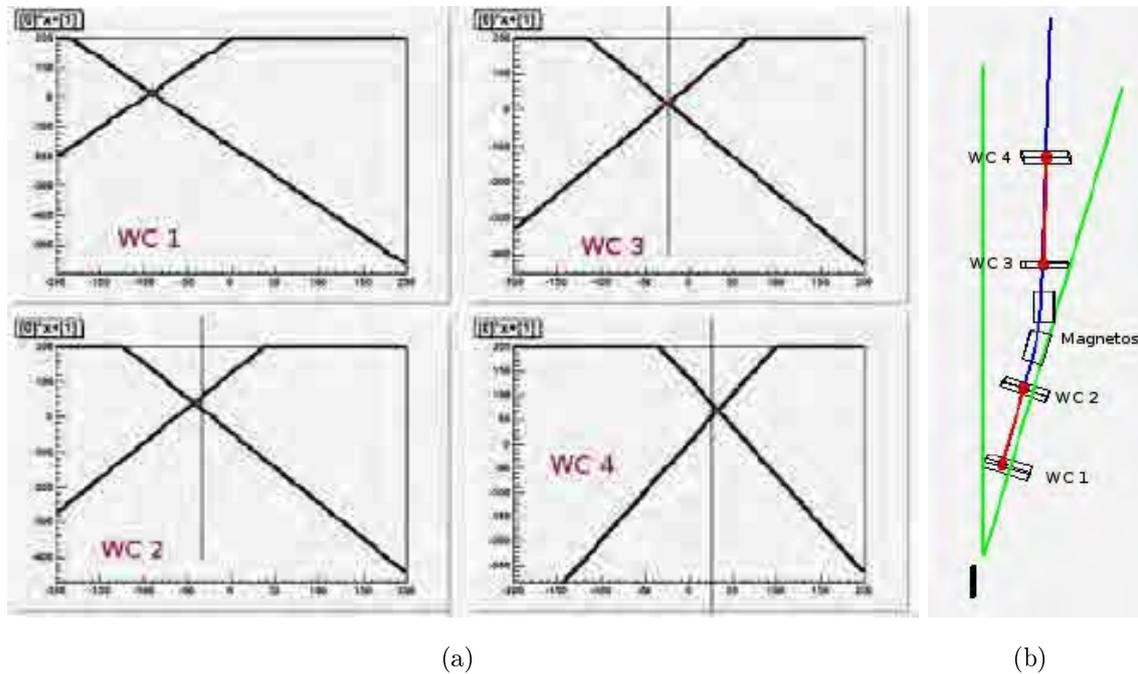


Figura 5.7: La figura (a) muestra la marca dejada por una partícula al atravesar las 4 cámaras multialámbricas. En la figura (b) se muestra a la partícula atravesando el sistema beamline, la línea azul representa el recorrido de la partícula y los segmentos rojos muestra como se construirán los vectores para el cálculo del momentum.

en barras centelladoras y tubos fotomultiplicadores dispuestos de la siguiente manera: El TOF 1 o *upstream*, está ubicado entre el colimador y la cámara multialámbrica 1 consta de una barra centelladora con 2 tubos fotomultiplicadores en sus extremos tal como se puede observar en la figura 5.8(a); el TOF 2 o *downstream*, está ubicado entre la cámara multialámbrica 4 y el detector TestBeam consta de 3 barras centelladoras posicionadas una sobre otra y 6 tubos fotomultiplicadores tal como se puede observar en la figura 5.8(b).

La señal del ánodo de los PMT es mandada a un discriminador de señal *constant fraction discriminator* (CFD), siendo el inicio y terminación de los convertidores de tiempo *time analog converter* (TAC).

El principio físico que se usa para la determinación de las partículas del haz se basa en la medición de su masa tal como lo describe la siguiente ecuación.

(a) TOF *upstream*(b) TOF *downstream*

Figura 5.8: Sistema del tiempo de vuelo TOF

$$\beta\gamma = \frac{p}{Mc} \quad (5.3)$$

Donde p es el momentum de la partícula, M la masa en reposo, c la velocidad de la luz en el vacío, $\beta = \frac{v}{c}$ (v : velocidad de la partícula, c : velocidad de la luz) y $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$.

La diferencia del tiempo de vuelo de 2 partículas de masas M_1 y M_2 , en una distancia L , está dada por:

$$\Delta t = \frac{L}{c} \left(\sqrt{1 + \frac{M_1^2 c^2}{p^2}} - \sqrt{1 + \frac{M_2^2 c^2}{p^2}} \right) \quad (5.4)$$

5.4.1. Disparador de la Medida del Tiempo de Vuelo

Para que el sistema de adquisición de datos del beamline (DAQ Beamline) entienda cuando registrar un evento relacionado a una partícula proveniente del haz que atravesó las 2 configuraciones del TOF, de otro evento (rayos cósmicos, ruido, etc.), este necesita una configuración electrónica capaz de poder diferenciar estos tipos de eventos de cualquier otro. Para este propósito se construyó el **Generador de disparo del TOF** conocido como *Fastsum Trigger* el cual consiste en evaluar las coincidencias registradas

en el tramo de los 2 TOFs, inicialmente se usó un tercer TOF llamado β que se colocó entre las cámaras multialámbricas 3 y 4 tal como se puede ver en la figura 5.13(a), luego se sacó este último y se empezó a usar la señal registrada por los crates de las cámaras multialámbricas.

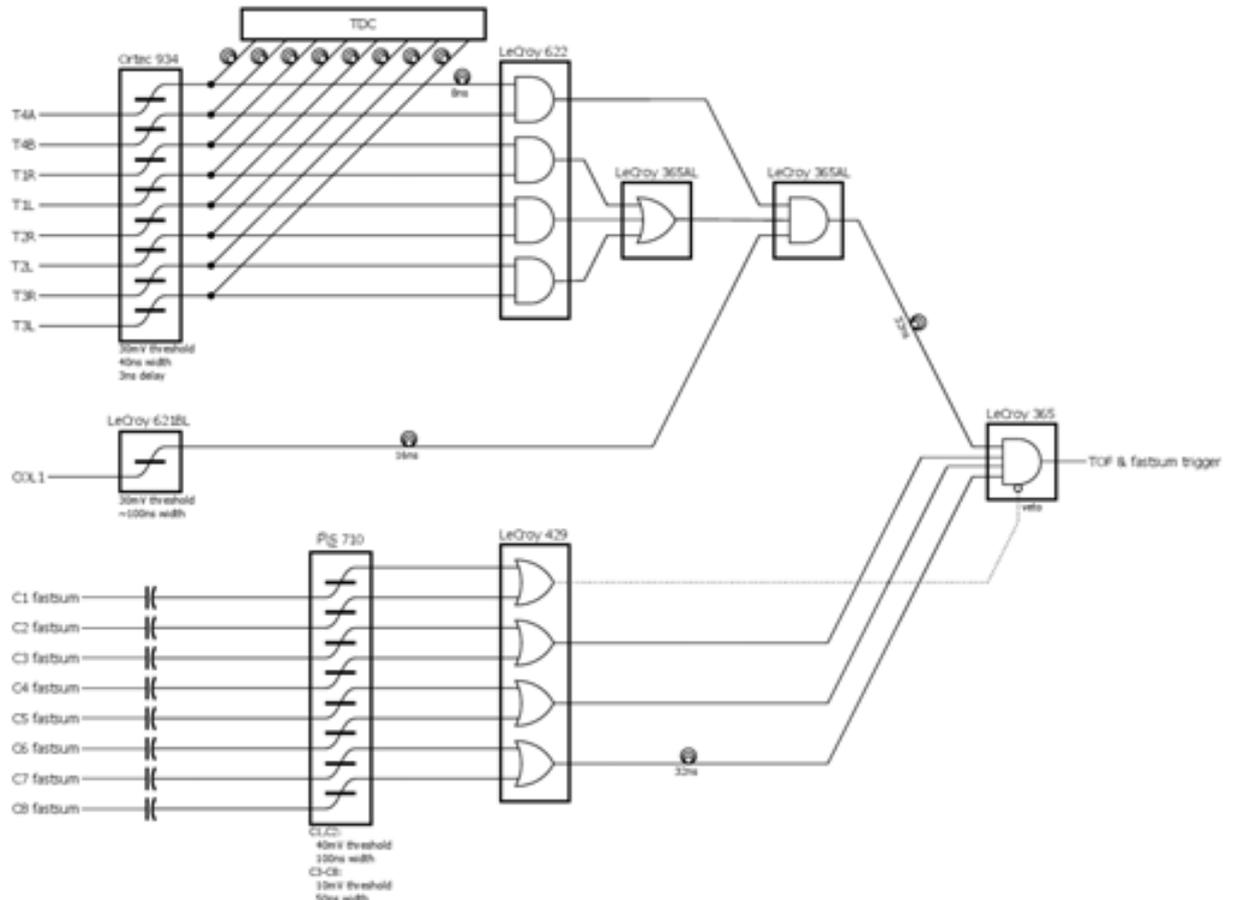


Figura 5.9: Diagrama del sistema eléctrico del TOF Fastsum Trigger

La idea es simple, un evento es registrado cuando la partícula ha sido detectada en los 2 TOFs y los crates de las wire chambers que se están usando. Si solo se registra en alguno de ellos, este no cuenta como un evento. Este disparador es muy importante debido a que también sirvió como disparador del DAQ del detector TestBeam, es decir se sincronizaron los 2 DAQs para que los eventos que se registraron en el DAQ del Beamline sean los mismos que registre el DAQ del detector TestBeam. Así en el análisis de datos uno pueda hacer el seguimiento de los eventos desde el ingreso de la partícula

al Beamline hasta su salida o interacción en el detector TestBeam.

Se probaron varias configuraciones con los diferentes crates de las wire chambers quedando las configuraciones que se muestran en las figuras 5.9, 5.10.

5.4.2. Identificación de Partículas del Haz

La identificación de partículas con el sistema TOF se realiza midiendo la diferencia (tiempo de vuelo) en el tiempo de llegada de la partícula al centelleador del TOF 1 y el tiempo de llegada al TOF 2. La masa de la partícula se determina a partir del momento de la partícula (p), la longitud de camino atravesado (L) y el tiempo de vuelo. La distancia (L) se calcula midiendo la traza de la partícula entre el TOF1 y TOF2 en este recorrido las partículas atraviesan cuatro cámaras multialámbricas y los dos magnetos que se encuentran en el centro haciendo que las partículas cargadas hagan una curva en su trayectoria, el momentum (p) es obtenido a partir de la información de la cámara multialámbrica y el campo magnético generado por los magnetos.

La tabla 5.1 muestra algunos tiempos de vuelo para 4 tipos de partículas para un mismo valor de momentum[65].

Partícula	Masa (GeV)	Tiempo de vuelo (ns)
p	938.0	470.3
π	140.0	20.090
e^+, e^-	0.5	20.002

Tabla 5.1: Tiempo de vuelo para las partículas del haz con $0,5\text{GeV}/c$ de momentum y una distancia de $6m$ entre los hodoscopios

5.4.3. Calibración y resolución del tiempo de vuelo

Las medidas del tiempo de vuelo contienen offsets ocasionados por la longitud de los cables y retrasos de la electrónica el cual debe ser medida con una precisión por debajo de los nano segundos. Estos offsets se midieron usando una corrida dedicada a la calibración, sin embargo los datos indican que las medidas del TOF varían cuando están en uso por varias horas. Esto implica que la dependencia del offset con el tiempo

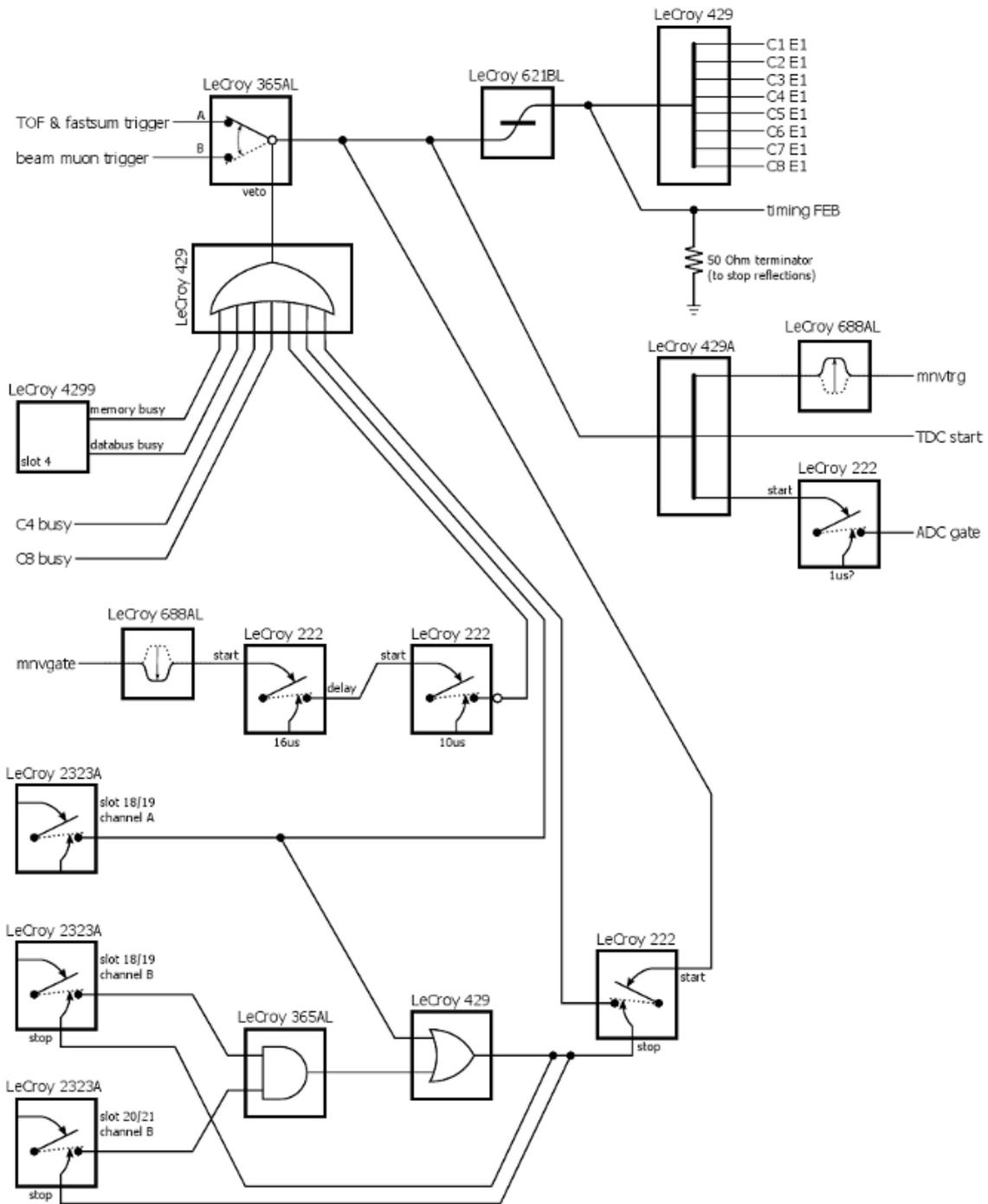


Figura 5.10: En esta Figura podemos ver la disposición final de los elementos que conforman el (Trigger + Veto), esta configuración se logró luego de muchas variaciones y quedando esta como la mejor configuración

se debe tener en cuenta para los softwares de reconstrucción.

PMT	TDC	PMT-Discrim.($\pm 0,5ns$)	Discrim.-TDC($\pm 1ns$)	Total(ns)
4A	3	143.0	229.0	372.0
4B	12	159.0	199.0	258.0
T1L	5	113.5	199.0	312.5
T1R	6	113.0	199.0	312.0
T2L	7	115.5	199.0	314.5
T3R	8	113.0	197.0	310.0
T3L	9	117.0	196.0	313.0
T3R	10	113.0	198.0	311.0

Tabla 5.2: Asignación de los canales TDC a los PMT, medidas de los pulsos en el osciloscopio y de la longitud de los cables entre los PMT, discriminador y TDC. T4A y T4B son las unidades de entrada. Los otros seis son las unidades de salida del haz.

Las lecturas de los TDC *Time to Digital Converter* de los 2 PMTs que reciben la señal de una barra centelladora se promedian para ayudar a eliminar las variaciones resultantes de la posición de la partícula a lo largo de la longitud del centellador. El TDC se establece en 25ps/count con un alcance máximo de ($2^{16} = 4096$), resultando en una ventana de 100 ns. Se debe determinar 3 offsets correspondientes a las 3 unidades de salida que son afectadas, un mapeo de los canales TDC del PMT y la medida de los retrasos de los cables con el osciloscopio son mostradas en la tabla 5.2. los errores de la longitud de los cables son de $\pm 0,5ns$ para (*PMT – Discriminador*) y de $\pm 1ns$ para (*Discriminador – TDC*) correspondiente a un pixel en el osciloscopio (dividido entre 2 por la reflexión).

El método empleado para determinar los offsets en las medidas del tiempo de vuelo fue moverlos físicamente las dos unidades de sus stands y luego se les colocó sobre una mesa ordenandolo tal como se muestra la figura 5.11. la idea consiste en tener rayos cósmicos (muones) que atraviesen transversalmente las barras centelladoras por ese motivo se colocó el centellador del TOF 1 ortogonalmente a los de los TOF 2 y adicionalmente se colocó uno nuevo en la base también perpendicular al TOF 2 para así tener una medida clara de esos pequeños tiempos de vuelo. La longitud recorrida

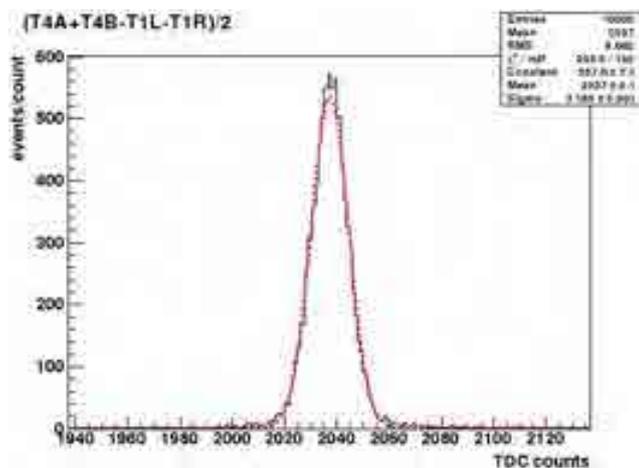
se puede medir fácilmente con una regla. La lógica se dispuso para que el *trigger* haga una coincidencia de los nueve PMTs. Un total de 10.000 entradas se registraron en esta configuración durante la noche del 27 de julio del 2010 en un periodo de 12,4 horas. Las figuras 5.12(a), 5.12(b) y 5.12(c) muestran la diferencia de los tiempos de vuelo calculado entre las unidades del TOF1 y TOF 2 uno a uno.

La tabla 5.3 muestra un resumen del promedio y sigma de la Gaussiana para los 3 ajustes. La longitud de recorrido para una partícula que incide perpendicularmente se midió asumiendo $\beta = 1$, pudiendo así calcular en tiempo. De estos promedios, los offsets en el tiempo de vuelo pueden ser determinados.

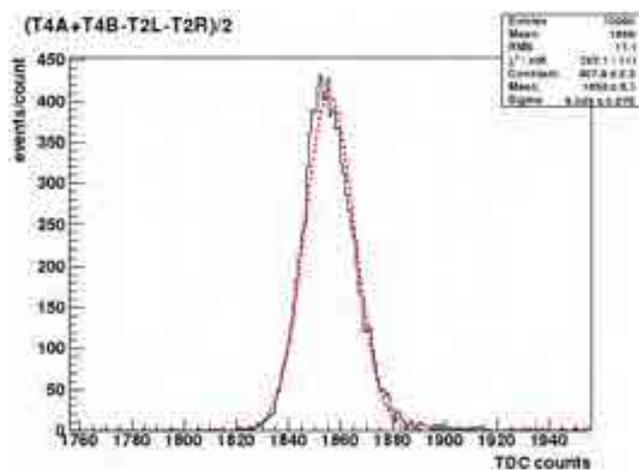
La precisión del sistema TOF se refleja en los valores de sigma de la gaussiana donde la resolución está dada por ($\text{sigma} * 25ps$) de esta forma obtenemos los valores de: 180ps, 238ps y 145ps para $T4 \rightarrow T1$, $T2$ y $T3$, respectivamente. Esto es suficiente



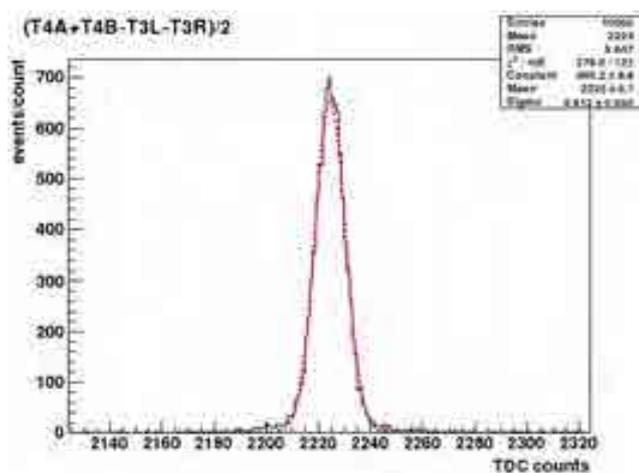
Figura 5.11: Aquí se muestra la disposición de las barras centelladoras con sus respectivos PMTs para la toma de datos, para esta parte se hizo uso de los rayos cósmicos (principalmente muones) para el cálculo de la resolución



(a)



(b)



(c)

Figura 5.12: Eventos vs la diferencia del *tiempo de vuelo* calculado de las configuraciones de los centelladores apilados. Los gráficos corresponden a: (a) $T4 \rightarrow T1$, (b) $T4 \rightarrow T2$ y (c) $T4 \rightarrow T3$. Un TDC count = 25PS. La curva roja punteada es el ajuste gaussiano

	Promedio	Sigma	Longitud de recorrido (plg.)	Tiempo (ns)	offset (ns)
T4 \rightarrow T1	2037.4	7.2	7.28	0.62	51.55
T4 \rightarrow T2	1855.8	9.5	4.63	0.39	46.79
T4 \rightarrow T3	2224.6	5.8	2.06	0.17	55.79

Tabla 5.3: Resumen de las corridas y cálculo en la configuración de los centelladores apilados. Media y sigma en el recuento de TDC ($1\text{cuenta} = 25\text{ps}$). Ajuste de errores de $\pm 0,1$ cuentas para la media y menos de $\pm 0,1$ cuentas de sigma.

para la identificación de partículas por debajo de $1,5\text{GeV}/c$ de momentum, límite superior del espectrómetro magnético.

Primer Evento	Último Evento	$T4 \rightarrow T1(ns)$	$T4 \rightarrow T2(ns)$	$T4 \rightarrow T3(ns)$
0	44k	51.47	46.70	56.06
44k	66k	51.36	47.10	55.89
66k	75k	51.34	47.16	56.01
75k	88k	51.37	47.15	55.94
88k	117k	51.33	47.12	55.93
117k	145k	51.19	47.02	55.83
145k	152k	51.33	47.13	56.10
152k	165k	51.38	47.15	56.00
165k	225k	51.35	47.15	55.97
225k	249k	51.55	47.11	55.91
249k	258k	52.02	47.09	55.91
Promedio		51.43	47.08	55.96
Desvi. Estandar		0.22	0.13	0.08

Tabla 5.4: Cálculo de los Offsets durante las corridas del verano del 2010 (junio y julio). El valor absoluto del tiempo de vuelo determinado por el ajustes del momentum y la longitud de la trayectoria de un pion.

5.5. Sistema de Adquisición de Datos ACNET

Previamente a la toma de datos con el sistema completo TOF, wire chambers y el detector, se realizaron varios testeos. Entre ellos se verificó el sistema de adquisición de datos del beamline. Para este propósito se hizo uso del registro de la base de datos del Fermilab para comparar con los valores obtenidos para el DAQ del beamline.

El sistema *Accelerator Control NETWORK* ACNET del Fermilab es un sistema de computadoras que monitorea y controla el complejo del acelerador. La interfaz del usuario es a través de una consola hecho en Java ² en el MCR u otro lugar remoto con los permisos necesarios para el acceso. Esta consola es sumamente importante dado que desde aquí se monitorea en tiempo real los siguiente: la intensidad y rampeo de la corriente, la temperatura de los magnetos y las cuentas por *spill* en cada una de los diferentes contadores tal como se puede apreciar en las figuras 5.14(a) y 5.14(b). El manejo no es difícil, una vez que se tiene conectado todos los dispositivos correspon-

²Java es un lenguaje de programación orientado a objetos, desarrollado por Sun Microsystems a principios de los años 90

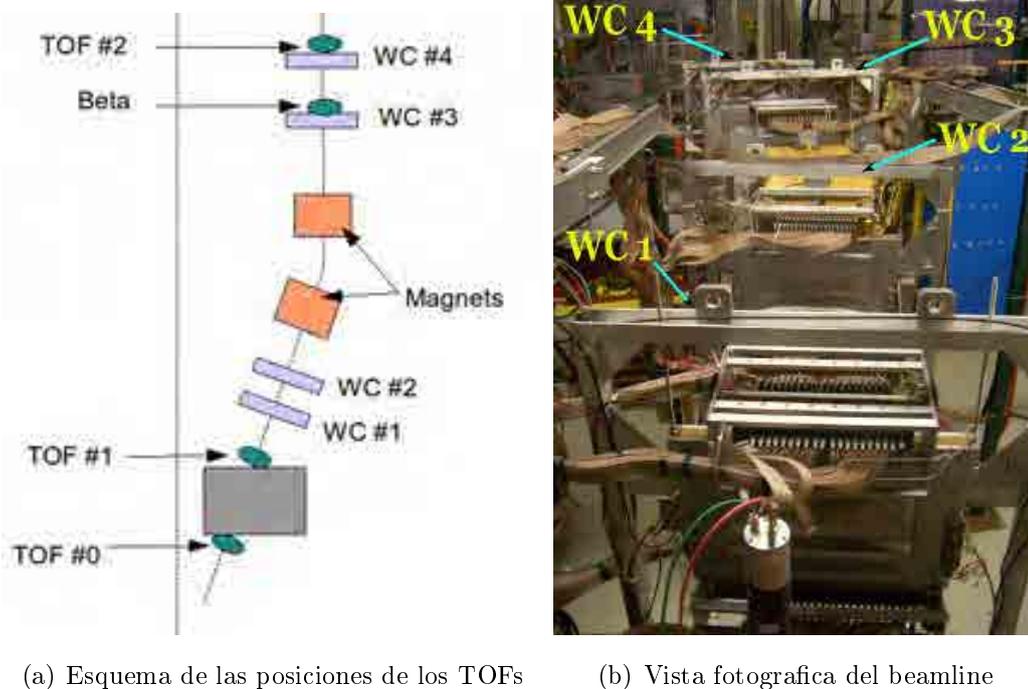
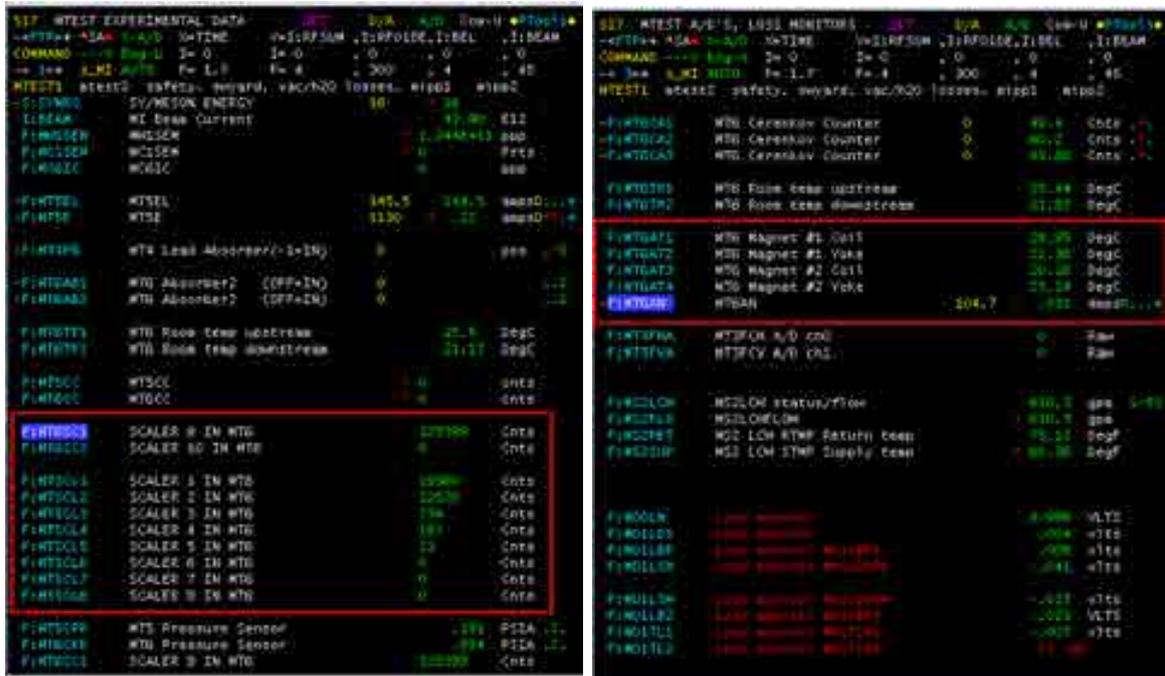


Figura 5.13: Descripción de los MTSCs en el beamline



(a) Ventana 1 de la consola ACNET

(b) Ventana 3 de la consola ACNET

Figura 5.14: Consolas de Monitoreamiento de los datos a través de las consolas ACNET. en la figura (a) dentro del cuadrado rojo se puede ver los contadores del spill, su correspondencia de cada uno se puede ver en la tabla 5.5. En la figura (b) muestra la temperatura de los magnetos y la intensidad de la corriente en Amperios.

dientes, su uso de esta consola es multiple y se puede sacar bastante información y verificar muchas mas cosas como el comportamiento del haz a través de las cámaras multialámbricas.

Para nuestro experimento el ACNET mostró y guardó la información de la data a través los contadores MT6SC1, MTSC11, MTSC12, MTSC13, MTSC14, MTSC15, MTSC16, MTSC17 y MTSC18, cada uno de estos contadores son independientes y se pueden usar los que sean necesarios, en nuestro caso, para los primeros testeos usamos del 1 al 5 tal como se describe en la la tabla 5.5.

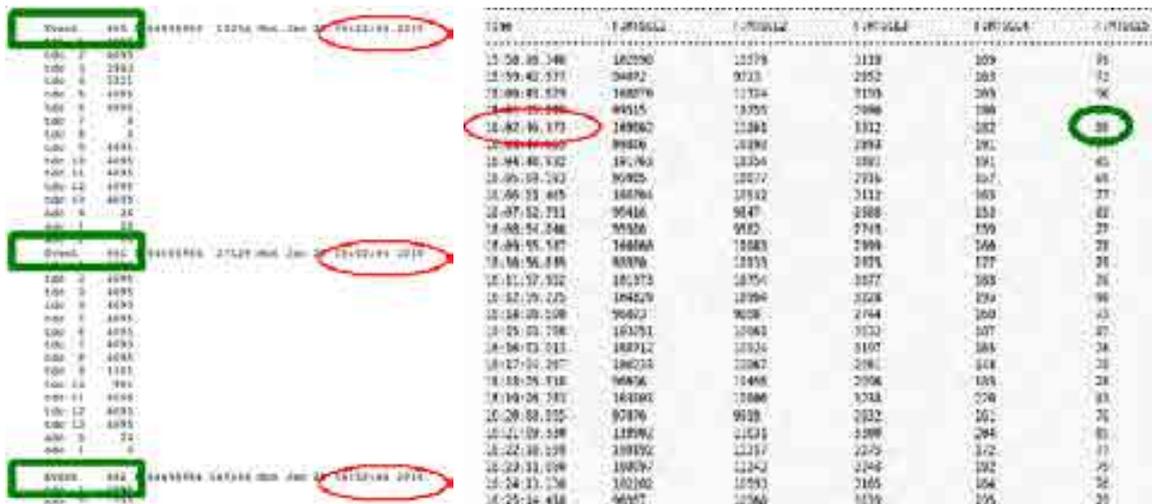
Para extraer los datos del ACNET se entra a través de la consola mencionada anteriormente y se solicita la data especificando la fecha (incluir hora de inicio y final), luego se indica los contadores o MTSCs que se desean en un orden matricial, luego

ACNET	DAQ Beamline
MTSCL1	TOF #0
MTSCL2	TOF #1
MTSCL3	TOF #2
MTSCL4	Coincidencias entre TOF #1 y TOF #2
MTSCL5	Coincidencias entre TOF #1,TOF #2 y beta

Tabla 5.5: Valores de correspondencia de el ACNET respecto del beamline de acuerdo a la figura 5.13(a)

estos datos te son enviados al email que se introduce a la hora de petición la figura 5.15(b) muestra la forma como te llega la data solicitada.

Por otra parte el sistema de adquisición de datos del beamline almacena los datos registrando evento por evento tal como se muestra en la figura 5.15(a), para ordenarlo de forma parecida a los datos obtenidos del ACNET se tomo estos archivos de datos y se creo un programa en python para procesarlo la distribución del procesamiento para algunos contadores se puede ver en la figura 5.16, la comparación entre los datos registrados por el DAQ y del ACNET se puede ver en las figuras 5.17(a) 5.17(b).



(a) Datos del DAQ del beamline

(b) Datos del ACNET

Figura 5.15: Esta figura muestra la diferencia en la escritura de los datos registrados (a) por el DAQ del beamline y (b) por el ACNET

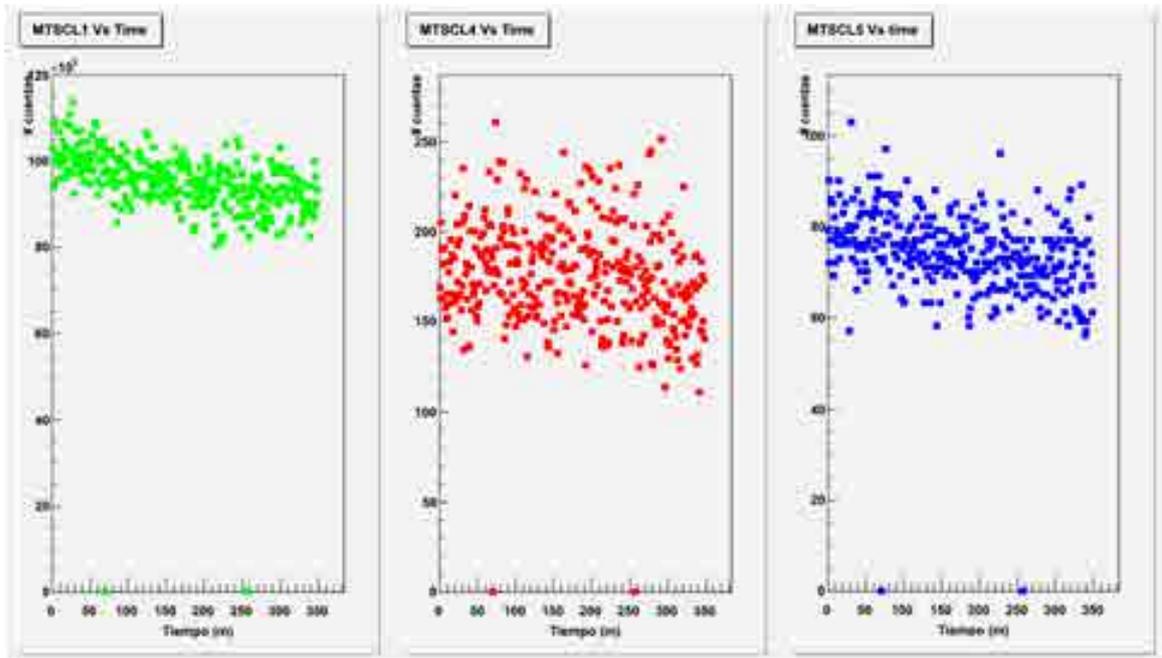
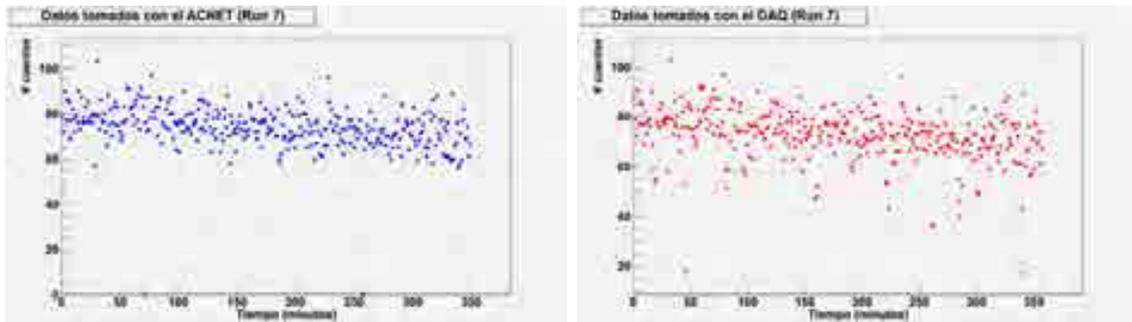


Figura 5.16: Distribucion de los valores registrados por el ACNET para la corrida #7 del 25 de enero del 2010 en esta gráfica se muestran los valores del MTSC1 (valores de entrada neto), MTSC4 (coincidencia entre los TOF1 y TOF2) y MTSC5 (coincidencia entre TOF1, TOF2 y beta)



(a) Datos tomados por el ACNET

(b) Datos tomados por el DAQ

Figura 5.17: comparacion entre ACNET y DAQ

Como objetivo final de esta parte se procesaron los datos para las corridas de los dias 24 y 25 de enero del 2010 tal como se ve en la tabla 5.6 la idea principal era la verificar que el DAQ del beamline estaba registrando correctamente, los resultados fueron positivos eso lo podemos ver al comparar los valores promedios del MTSC5 y

del DAQ en la tabla 5.6.

Dia 24 de enero del 2010							
	Run1	Run2	Run3	Run4	Run5	Run6	Run7
# spills	67	48	225	27	59	13	98
MTSCL1	97476.37	95202.1	95274.59	95276.89	91470.36	57895.54	93722.58
MTSCL2	12854.09	12496.23	12295.58	11315.07	10665.08	4300.69	7196.26
MTSCL3	3236.24	3146.06	3091.12	3133.15	3023.25	3021.23	3454.28
MTSCL4	120.97	130.6	126.93	252.04	248.36	65.23	93.85
MTSCL5	120.97	67.4	65.06	84.89	83.61	25.69	47.51
DAQ	64.38	67.23	64.01	85	80.95	27.92	47.14
Dia 25 de enero del 2010							
	Run1	Run2	Run3	Run4	Run5	Run6	Run7
# spills	196	74	43	50	31	98	349
MTSCL1	102424.35	100204.18	100635.65	100052.6	98863.68	99568.78	94576.38
MTSCL2	10539.37	10246.2	10314.4	10196.66	10134.61	10256.19	9756.17
MTSCL3	3132.87	2984.34	3007.7	2967.52	2951.13	3005.6	2871.17
MTSCL4	193.47	165.73	172.02	167.62	167.81	176.28	174.75
MTSCL5	72.84	77	78.37	76.98	76.13	78.59	73.86
DAQ	71.47	75.13	76.75	75.61	76.43	77.61	74.73

Tabla 5.6: Aquí se puede ver los valores promedios de lo que registraba el ACNET (MTSCL#) y el DAQ. En esta tabla los valores importantes son los del MTSCL5 y el DAQ ya que ambos corresponden al número de coincidencias entre TOF1, TOF2 y beta

Luego de estos resultados, se implemento el código en Python para que procese los datos de todos los MTSCLs que se iba a utilizar para las siguientes corridas, este código debería ser capaz de leer los archivos de datos obtenidos del ACNET ordenarlos, hacer la suma de eventos, sacarle la desviación estandar y el promedio para cada MTSCL.

5.6. Respuesta del sistema al haz de partículas

Una vez que todos los sistemas fueron testeados y calibrados independientemente, se puso a prueba el sistema completo del beamline con el haz los días 24 y 25 de enero del 2010, cada día se corrió siete corridas de las cuales la más estable y con mejor data fue la corrida numero siete del día 25 de enero, debido a que en las corridas previas se estuvo corrijendo algunas fallas de la electrónica.

5.6.1. Espectro del Tiempo de vuelo

Las figuras 5.18(a) y 5.18(b) muestran los espectros de los eventos seleccionados por el sistema de tiempo de vuelo. La primera muestra las coincidencias entre los sistemas de tiempo de vuelo, la segunda muestra las coincidencias entre estas más las wire chambers. Lo importante de esto es que en ambos casos los picos (mayor cantidad de partículas registradas) se dan en los mismos tiempos (alrededor de 20, 40, 60, 80 y 100 nanosegundos), y como era de esperar a mayor cantidad de coincidencias requeridas por el tiempo de disparo (trigger) la estadística disminuye.

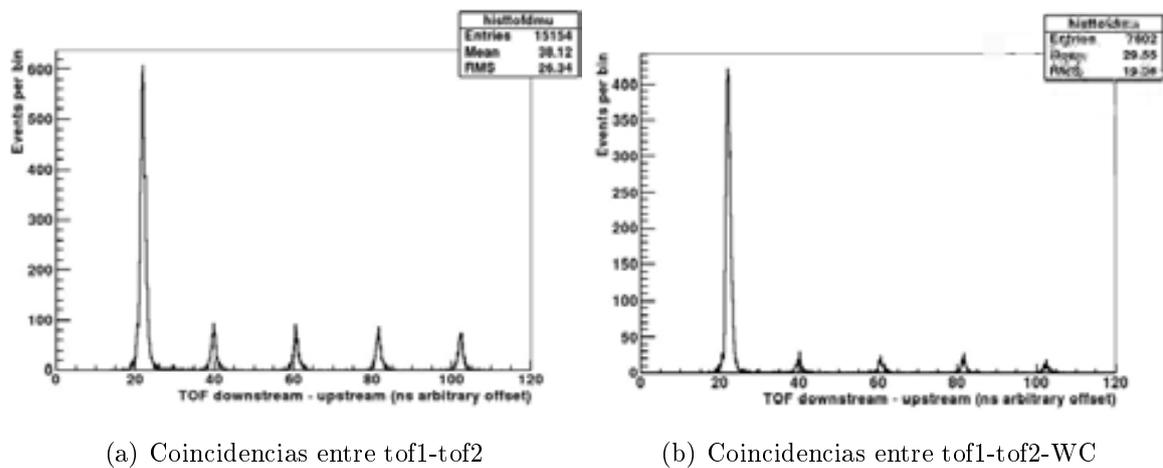


Figura 5.18: Espectro del tiempo de vuelo (a) solo coincidencias entre los TOF de entrada y salida, (b) Coincidencias entre TOF entrada, salida y las wire chambers. En las figura se puede ver la diferencia en la cantidad de eventos.

5.6.2. Respuesta de las Wire Chambers

En la figura 5.19 podemos ver la respuesta inicial de las cuatro wire chambers al haz de partículas, en la wire chamber uno se pone el orden correspondiente a los planos internos de cada una de ellas para las cuatro el orden es el mismo. Como referencia del haz, este ingresa por el plano X y sale por el plano XP. En los círculos enumerados se muestran algunos de los problemas encontrados, estos son:

- (1) Es un ejemplo de canales muertos, esto puede significar que algunos hilos puedan estar rotos o desconectados
- (2) Mala conexión de cables, esto se determinó luego de que se verificara que el preamplificador correspondiente a esta parte no estaba bien conectado
- (3) Ruido, esto se puede ver de la alta estadística que se registra en esta región

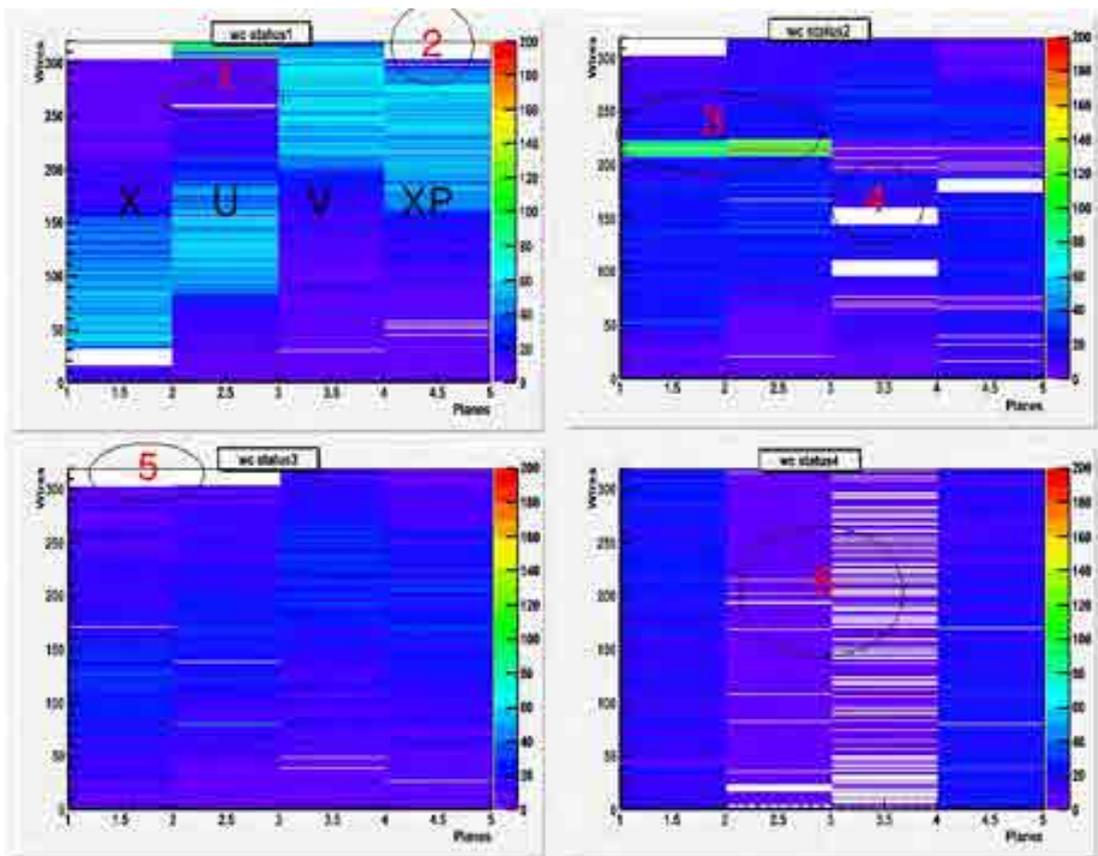


Figura 5.19: Muestra enumeradamente alguno de los problemas que se puede apreciar en las wire chambers, luego de procesar los datos iniciales.

de una wire chamber intermedia

- (4) Problemas con el discriminador threshold
- (5) Módulo malogrado o mal conectado, eso se puede ver dado que la cantidad de canales muertos corresponde a 32 canales consecutivos
- (6) Baja estadística en los plano U y V de la wire chamber 4

En la figura 5.20 se muestra el resultado final del testeo de las wire chambers durante las corridas del mes de enero del 2010, aquí se puede apreciar una alta estadística en los datos registrados, en la wire chamber uno la estadística es mucho mayor que las demás, esto se debe a que su posición se encuentra cerca de la salida del colimador.

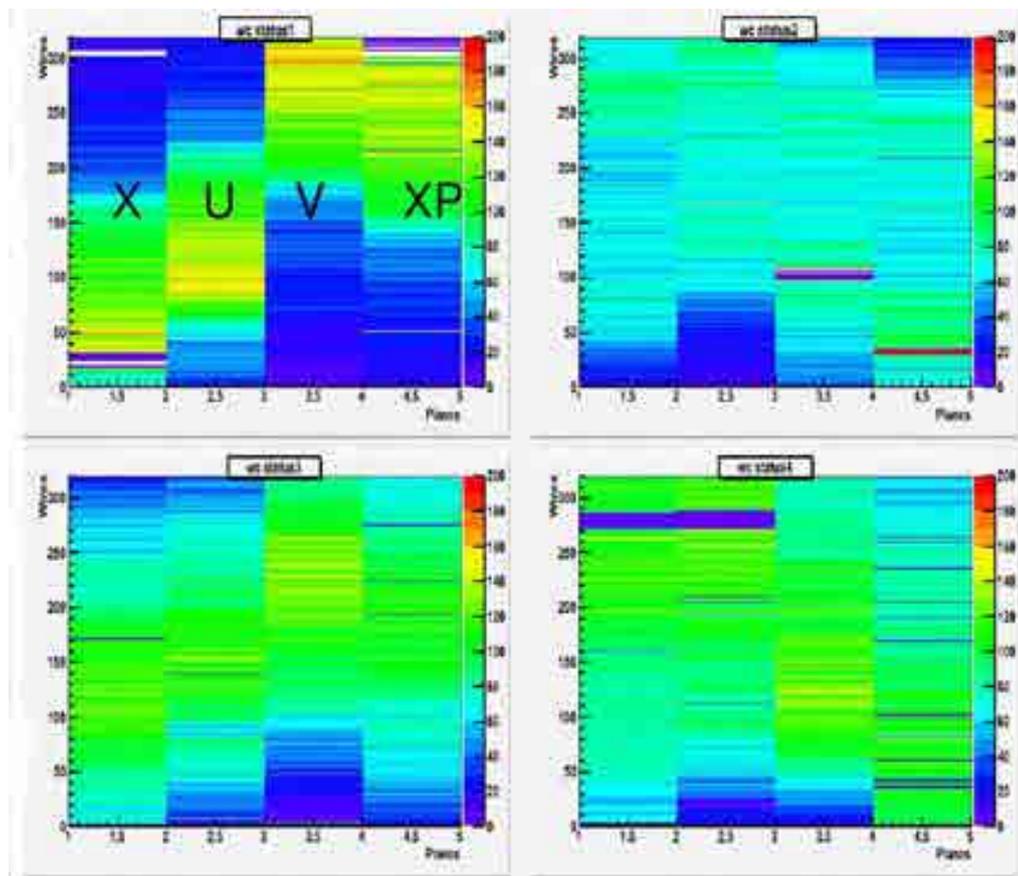


Figura 5.20: Resultado final después de los ajustes de testeo de las wire chambers con el haz durante las corridas del mes de enero del 2010.

6.1. Introducción

El detector de calibración TesBeam exige un haz de hadrones entre 300 y 1500 MeV/c para poder analizar la respuesta de los principales componentes del detector MINER ν A . Como una medida de verificación de los datos registrados durante los meses de junio y julio del 2010 se realizó la simulación de la distribución de partículas del haz. Por otro lado se empezó a estudiar las trazas de algunas partículas al interactuar con los diferentes calorímetros del detector Testbeam.

6.2. Simulación del haz de partículas del Beamline

La fuente del Haz de 120 GeV/c (haz de protones) provenientes del Main Injector, colisionan contra un blanco de aluminio de 30cm de espesor produciendo partículas secundarias que son curvadas por la acción de los magnetos colocados en la línea del haz para separar las partículas cargadas y dirigirlas hacia el detector. Para verificar estas partículas se simuló el haz y se comparó con los datos, para esto se tuvo en cuenta los cambios de polaridades del magneto para las diferentes corridas que se realizaron. Las partículas positivas de mayor importancia en el haz son: los piones π^+ , kaones K^+ , protones p y positrones e^+ . Las partículas negativas más importantes son: los

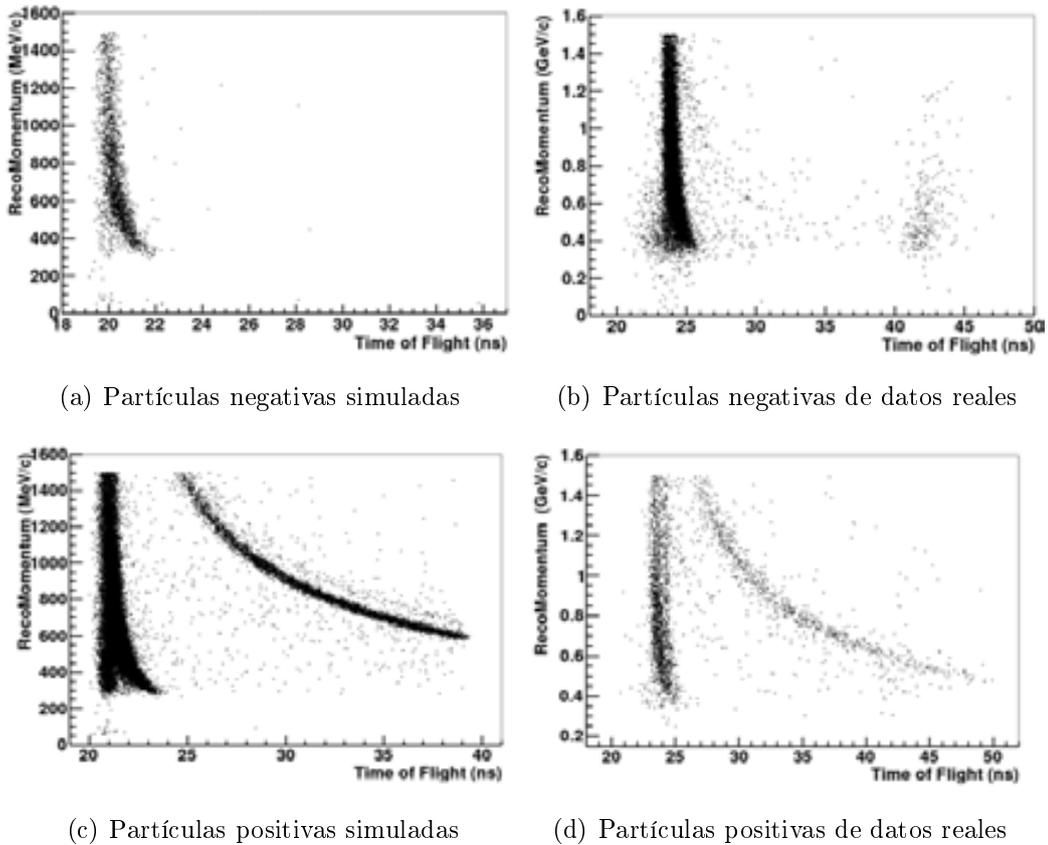


Figura 6.1: Estos gráficos muestran las distribuciones de los datos simulados por Monte-Carlo y los obtenidos en el experimento.

mounes μ^- , piones π^- , kaones K^- y electrones e^- . El software para la simulación fue cedida por el profesor Rick Gran de la Univerisdad de Minessota Duluth a través de su alumno Mark Lanari. Los datos que se utilizaron para comparar fueron de las corridas de enero y junio del 2010, en este trabajo solo se tuvo encuentra los datos registrados por el sistema de Tiempo de Vuelo y de las Wire Chambers. Para mayor información se puede ver la referencia [81]

6.2.1. Simulación de partículas negativas

En la figura 6.1(a) podemos observar la distribución total de partículas para la configuración del haz negativo predichas por Monte-Carlo para la simulación, en el rango de energía de cero a $1.6 \text{ GeV}/c$ de momentum. En la figura 6.1(b) podemos ver la distribución de los datos reales en el mismo rango de momentum. Haciendo un

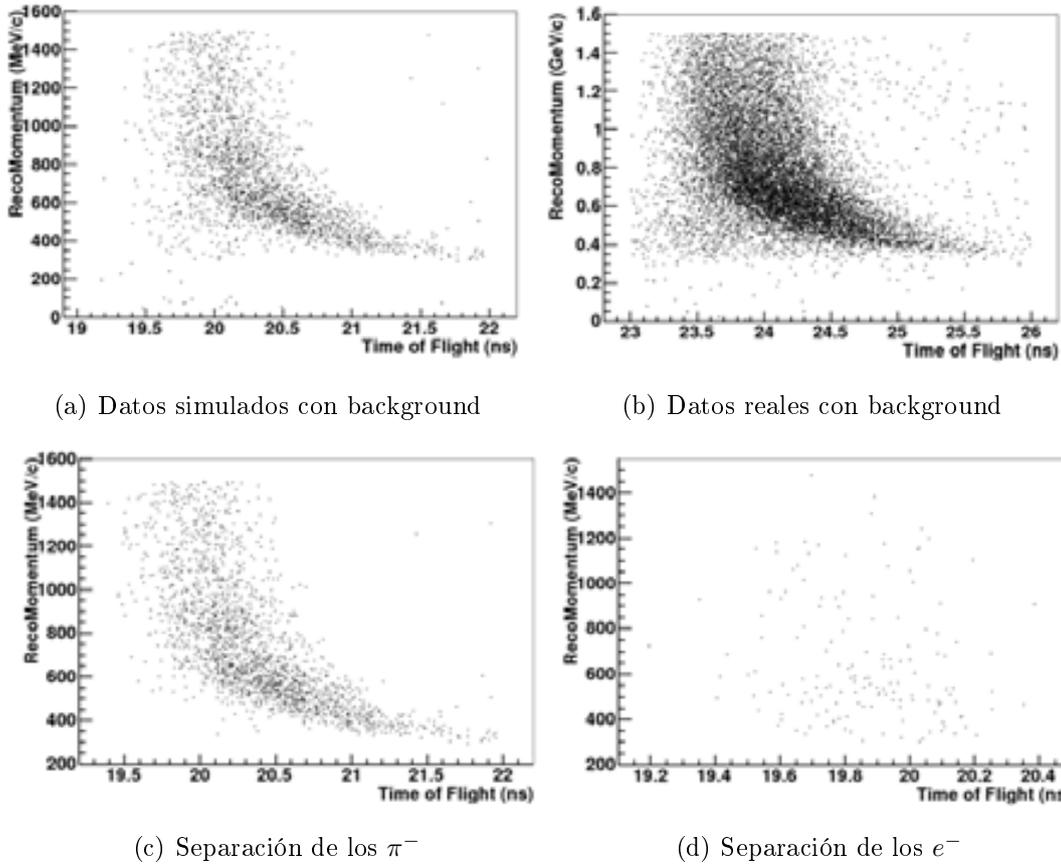


Figura 6.2: Estos gráficos muestran la comparación entre los datos simulados por Monte-Carlo y los obtenidos en el experimento en el rango de 19 a 22 nanosegundos, además de los cortes se puede apreciar la distribución de los piones negativos y los electrones para la configuración del haz negativo.

corte en el rango del tiempo de vuelo tal como se muestran en las figuras 6.2(a) y 6.2(b) podemos ver que ambas distribuciones se corresponden, además contienen las partículas más livianas. Para esta configuración del haz, las partículas más livianas son los piones π^- y electrones e^- , luego haciendo uso de los PID de las partículas las podemos separar tal como se aprecia en las figuras 6.2(c) y 6.2(d), para obtener estas distribuciones se hicieron cortes en el rango de momentum y tiempo de vuelo, también se usó el PID en las Wire Chambers tal como se muestra en el siguiente recuadro.

- $0 < \text{RecoP} < 1500 \text{ MeV}$
- $19 < \text{TOF2-TOF1} < 22 \text{ ns}$
- PID de la partícula en la WC1 == PID de La partícula en la WC4

Donde la variable $RecoP$ corresponde al momentum de la partícula entre 0 y 1500 MeV , la diferencia entre $TOF2-TOF1$ corresponde al tiempo que recorre la partícula entre las estaciones uno y dos del tiempo de vuelo, y el PID es el código de identificación de la partícula.

6.2.2. Simulación de partículas positivas

La figura 6.1(c) muestra la distribución de partículas positivas en el rango de cero a 1.6 GeV/c de momentum generadas por la simulación, la figura 6.1(d) muestra la distribución de los datos reales, la mayor cantidad de eventos generados por la simulación hace que se vea una mayor densidad respecto de los datos reales pero pese a ello se puede apreciar que ambas distribuciones tienen un mismo patrón, lo cual verifica que los eventos registrados en la toma de datos están dentro de los requerimientos exigidos por el experimento. Aprovechando los datos simulados y reales, y haciendo uso de algunos criterios para hacer cortes dentro del código se separaron los protones del resto de partículas, para ello usamos el siguiente criterio.

$$\frac{x_1}{v} < TOF < \frac{x_2}{v} \quad (6.1)$$

donde

$$v = \frac{RecoP}{\sqrt{m_p^2 + RecoP^2}} \quad (6.2)$$

Esta ecuación se puede deducir fácilmente de la ecuación de la masa relativista, donde los términos $RecoP$ es el momentum de la partícula y m_p la masa de la partícula que en este caso corresponde al proton. Haciendo uso de estas ecuaciones, el PID de las partículas y los tiempos de vuelo se separaron los protones de la configuración del haz positivo tal como se puede apreciar en las figuras 6.3(a) y 6.3(b). Es importante crear filtros muy precisos que nos ayuden a diferenciar una partícula de otra para poder hacer los estudios correspondientes de la interacción de cada una de ellas con el detector. Este trabajo corresponde al inicio de los estudios minuciosos que se están haciendo actualmente en la colaboración del experimento para obtener los resultados que requiere MINER ν A .

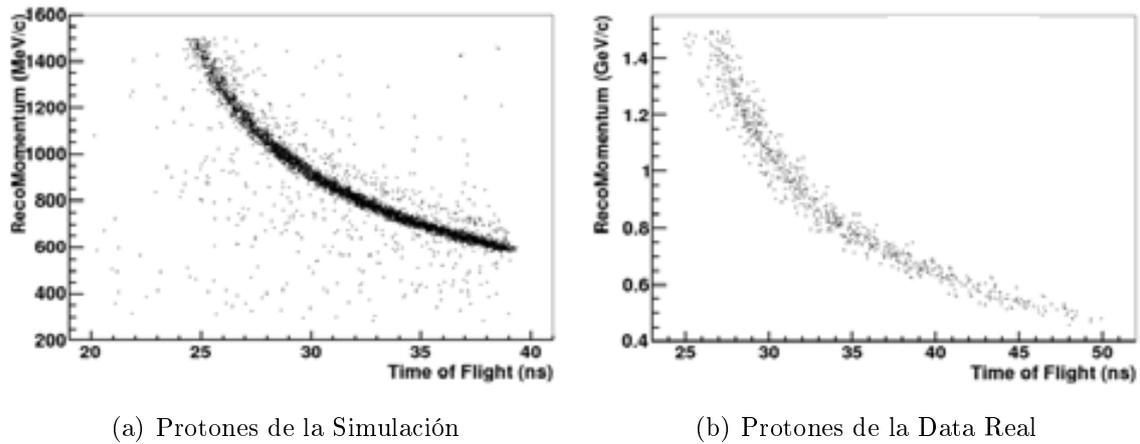
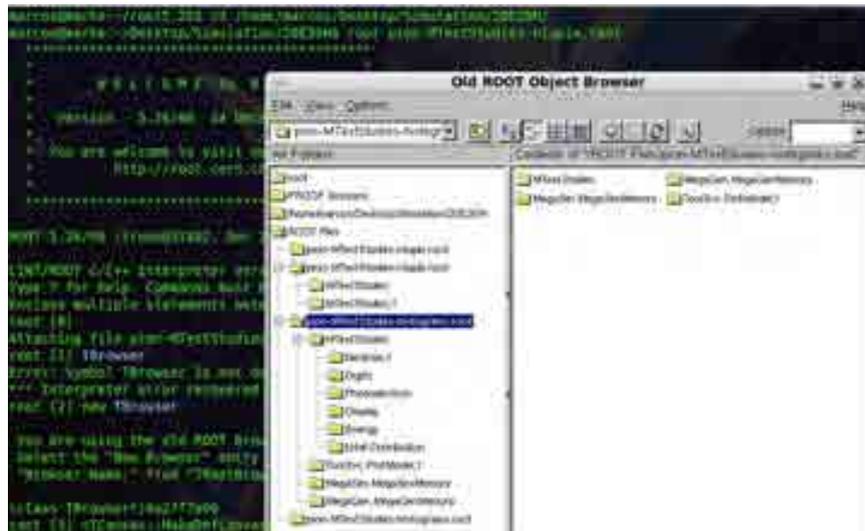


Figura 6.3: Los gráficos muestran los protones producidos tanto por la simulación como los obtenidos por la data real

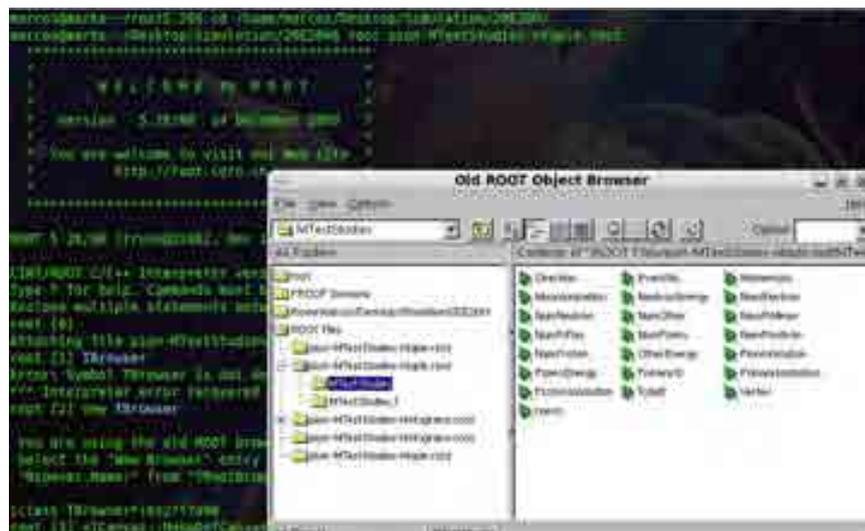
6.3. Simulación del Detector Testbeam

La simulación del detector TestBeam será un fuerte soporte para los estudios, análisis y validez del tratamiento de los datos obtenidos, los análisis se centran principalmente en los estudios de la interacción de los piones (π^\pm), electrones (e^-) y muones (μ^-) en los diferentes calorímetros y en las interfaces entre ellos ya que esto es de vital importancia para las exigencias del experimento MINER ν A. El código de los paquetes usados en la simulación al igual que el software MINER ν A han sido programados en Gaudi. Estos paquetes simulan la respuesta de la electrónica al paso de las partículas en los diferentes calorímetros, también se puede hacer un análisis más profundo en la física de las interacciones haciendo uso de los diferentes modelos físicos que esta nos provee. El trabajo realizado se ha enfocado principalmente en el estudio de la traza o huella de la partícula que se reconstruye a partir de la cantidad de fotoelectrones que son depositados en cada plano que atravieza la partícula.

Los paquetes que se utilizaron para la simulación son: *Det/MinervaDDDB*, *Sim/Readout* y *Sim/MTestStudies* en el apéndice podemos ver una descripción detallada de como configurarlo y de lo que hace cada uno de ellos. Luego de terminar de ejecutar la simulación obtenemos dos archivos con toda la información, estos archivos son : *MTestStudies-histograms.root* y *MtestStudies-ntuple.root* la información que contienen estos archivos lo podemos ver en las figuras 6.4(a) y 6.4(b). A partir



(a) MTestStudies-histograms.root



(b) MtestStudies-ntuple.root

Figura 6.4: Los gráficos muestran los archivos generados por la simulación dentro de los dos archivos principales MTestStudies-histograms.root y MtestStudies-ntuple.root

de la información que contienen estos archivos se empieza a desarrollar códigos de programación para hacer los estudios que se requieran, si la información requerida no es suficiente, se tiene que modificar y/o agregar líneas de código dentro de los paquetes de la simulación.

En el capítulo 2 se describe a MINER ν A como un detector híbrido, esto hace que uno de los principales objetivos del TestBeam sea analizar el comportamiento de las

partículas en las diferentes interfaces de los calorímetros, El rango de energía a estudiar que exige el detector MINER ν A es de 0 a 1.5 GeV, motivo por el cual se configuro el haz incidente dentro de ese rango de energía que se usó para el TestBeam. Se decidió montar el detector en dos configuraciones: la primera configuración se construyó con 20 calorímetros electromagnéticos y 20 calorímetros Hadrónicos, la segunda configuración se construyó con 20 planos de tracker y 20 calorímetros electromagnéticos. Inicialmente en la simulación utilizamos ambas configuraciones para observar las trayectorias de las partículas en el detector, esta parte sirvió para corregir los plex (parte del código que nos da la información de la posición de la partícula dentro de la geometría del detector).

En algunos casos se tuvo que implementar el código dentro de los paquetes de la simulación para obtener información más detallada, el paquete más importante es el paquete `Sim/MTestStudies` aquí se implemento código para poder obtener la distribución de fotoelectrones de cada uno de los eventos en los 40 planos del detector, también para la distribución de la suma total de eventos tal como se puede ver en la figura 6.5.

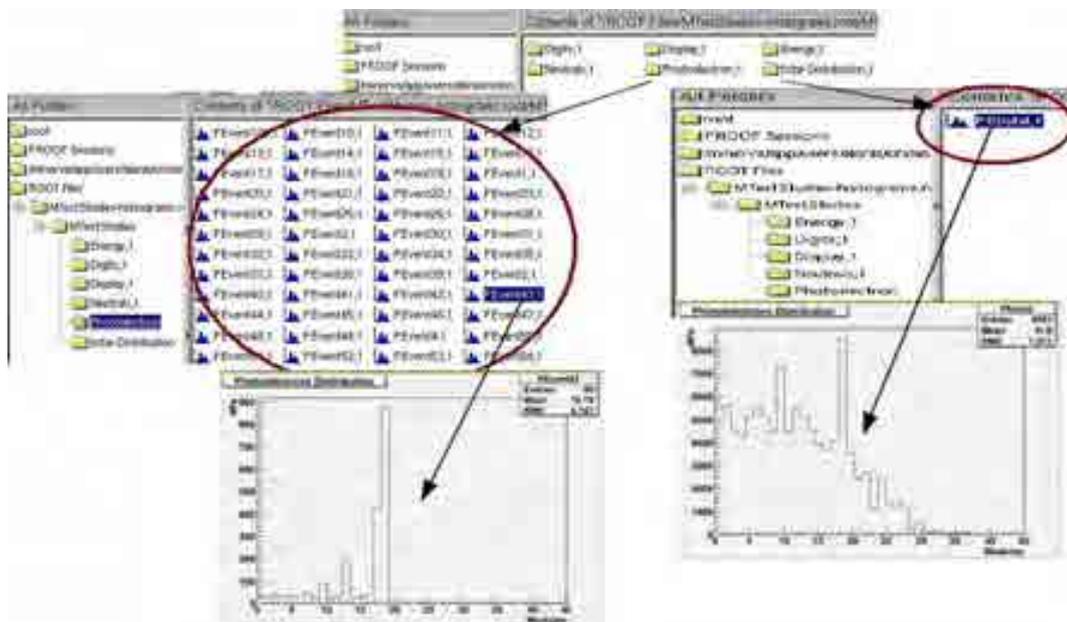


Figura 6.5: En este gráfico podemos ver los histogramas producidos por la implementación en el código para la visualización de la distribución de fotoelectrones de cada uno de los eventos y la distribución total

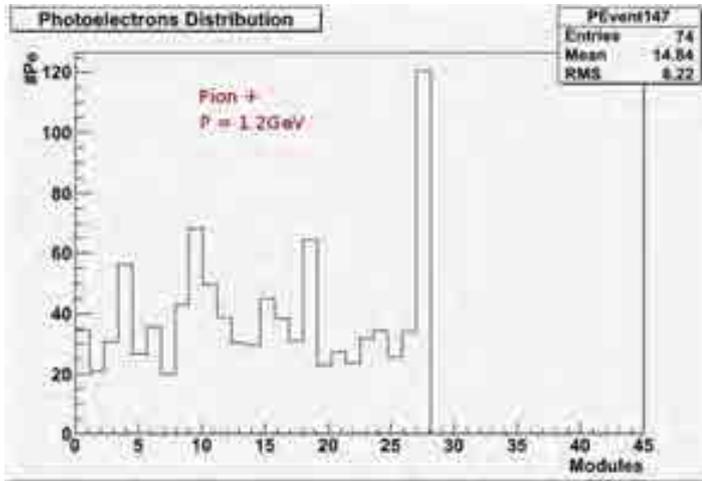
La deposición de fotoelectrones es una forma de ver la pérdida de energía de las partículas al atravesar el detector, a partir de su distribución podemos ver en que planos perdió más energía y donde fue detenido totalmente, un claro ejemplo nos muestra la figura 6.6(a) donde podemos ver que un pion positivo de 1.2GeV de momentum es detenido totalmente en el módulo 28 correspondiente al calorímetro hadrónico.

En la simulación podemos manipular fácilmente los rango de energía o simular para una cantidad de momentum determinado, en las figuras 6.6(a), 6.6(c) y 6.6(e) podemos ver 3 eventos, donde 2 de ellos son del mismo valor de momentum (1.2GeV) y tanto la distribución de electrones como la huella dejada en el detector son diferentes. En la primera figura 6.6(a) podemos ver que la mayor deposición de energía (fotoelectrones) tuvo en el módulo 28 y en su traza se puede ver como una línea continua que termina justamente en ese módulo, este evento se puede interpretar como un pion que atravesó el calorímetro electromagnético y fue detenido por el calorímetro hadrónico. En la figura 6.6(e) se puede ver que la mayor deposición de energía tuvo en el módulo 10 luego decae lentamente llegando hasta el módulo 20 donde justamente termina el calorímetro electromagnético, en su traza o huella dejada en el detector se ve claramente un cambio en la dirección además se ven más de una trayectoria, este evento se puede interpretar como un pion que interacciona con un núcleo de los componentes del calorímetro electromagnético generando una cascada de hadrones. Estas cascadas o lluvias hadrónicas producidos por estos tipos de eventos son de particular importancia para MINERvA las cuales están siendo estudiadas detalladamente.

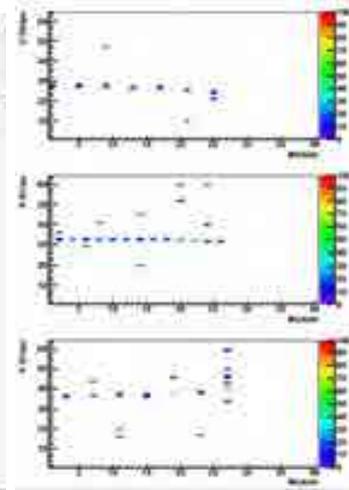
Dentro de las principales partículas a analizar están los piones, electrones, positrones y protones en el rango de momentum de 0 a 1.5GeV, según lo requiere el detector MINERvA. En la figura 6.3 podemos ver un evento de un pion positivo de 1.2GeV de momentum que tiene la mayor deposición de fotoelectrones en el módulo 28 que corresponde a la sección de calorímetros hadrónicos, este pico en la deposición de fotoelectrones nos dice que la partícula fue absorbida por el material del calorímetro hadrónico.

Al observar la distribución de los fotoelectrones (figura 6.7(a) y 6.7(b)) de todos los eventos generados por la simulación en un solo gráfico, se aprecia que los módulos 10 y 20 tienen la mayor deposición de fotoelectrones donde el módulo 10 y 20 son los planos

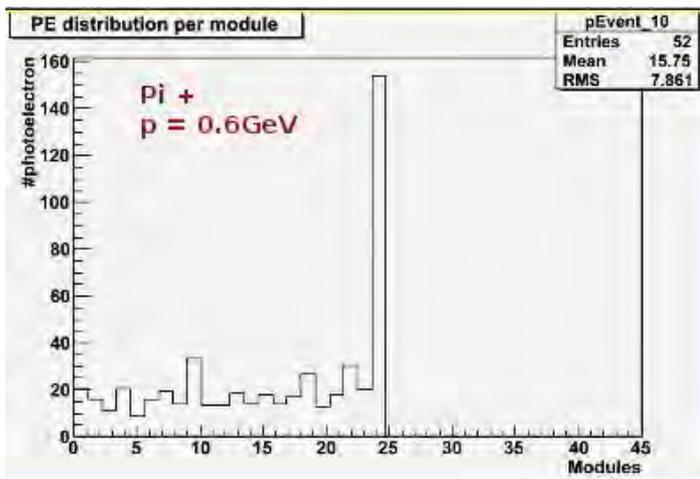
intermedio final del primer calorímetro.



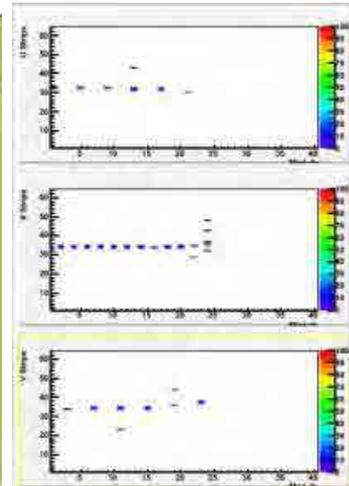
(a) Distribución de fotoelectrones



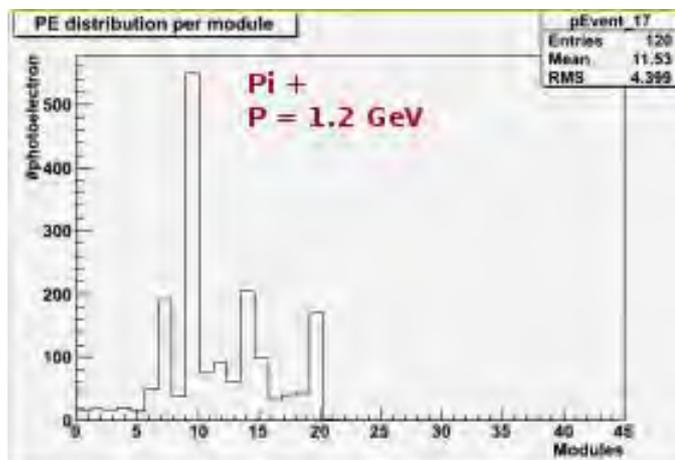
(b) Huella en el detector



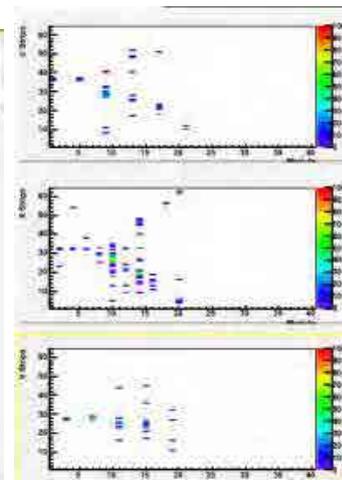
(c) Distribución de fotoelectrones



(d) Huella en el detector

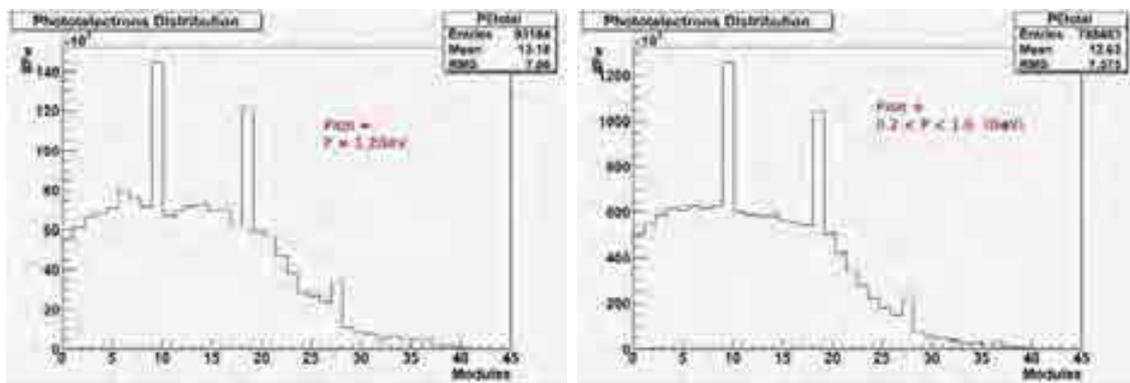


(e) Distribución de fotoelectrones



(f) Huella en el detector

Figura 6.6: Estas figuras muestran los eventos característicos de la interacción de los piones con el detector para una configuración de 20 calorímetros electromagnéticos y 20 calorímetros hadrónicos



(a) fotoelectrones

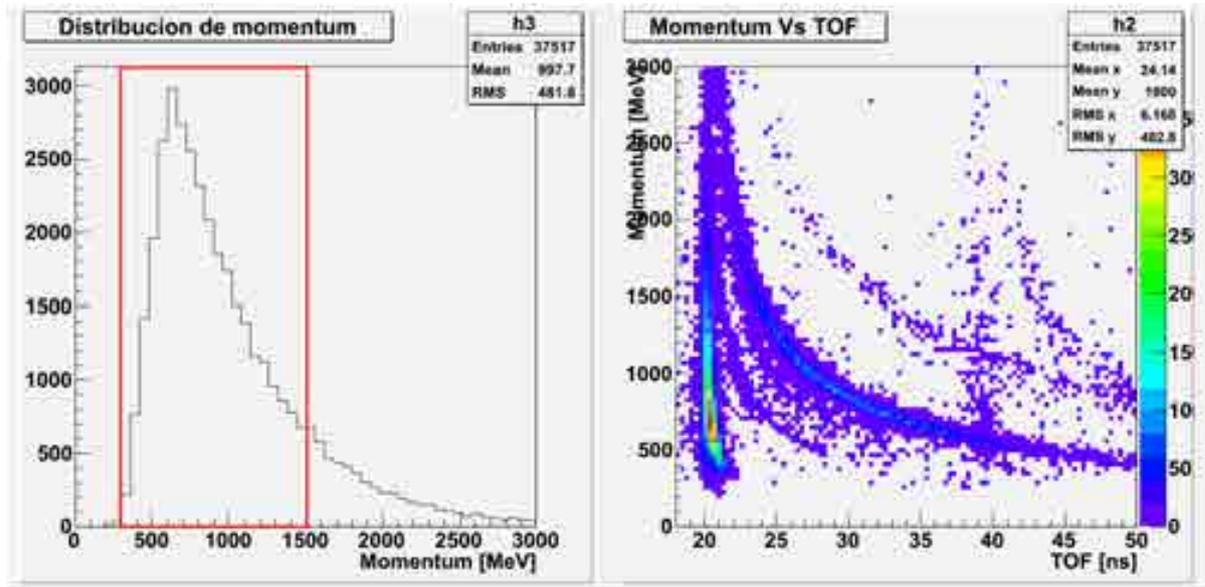
(b) Distribución

Figura 6.7: La figura (a) muestra la distribución total de fotoelectrones de una corrida de 1000 eventos para una energía de 1.2 GeV, La figura (b) corresponde a la distribución de fotoelectrones de una corrida 1000 eventos en un rango de energía de 0.2 GeV a 1.6 Ge V

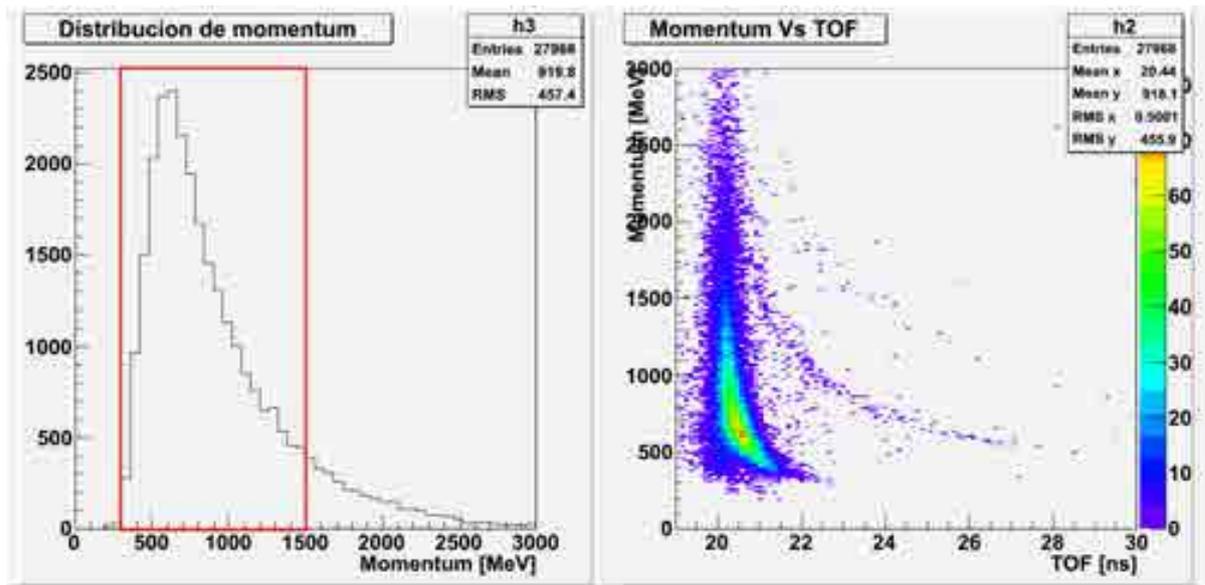
Análisis de Datos del Detector Testbeam

Como primer paso para observar la distribución de las partículas registradas por el detector, se ploteo las gráficas 7.1(a) y 7.1(b), estos eventos corresponden a la primera configuración del detector, los primeros 20 planos corresponden al calorímetro electromagnético y los 20 planos restantes corresponden al calorímetro hadrónico. Para realizar estas gráficas se consideraron todos los archivos DST registrados durante la toma de datos de Junio del 2010. En estas gráficas, el rectángulo rojo del lado izquierdo muestra la región de momentum de interés para el experimento. En la parte derecha se puede apreciar los plots de los tiempos de vuelo vs el momentum para las configuración del haz positivo y negativo.

Como segundo paso, se empezó con un análisis de los eventos a simple vista buscando patrones comunes que se repitan, para esto se uso primeramente el *event display*, herramienta que reproduce graficamente en slides los datos obtenidos de la interacción de una partícula al atravesar el detector, luego se desarrolló código en root para mostrar graficamente su distribución de fotoelectrones de dicho evento y poder ver su comportamiento a través de los planos del detector, también se iban comparando los eventos con igual huella (igual distribución de fotoelectrones) en el *event display*. La idea principal era separar eventos característicos de un tipo de partícula, motivo por el cual se les llamó *eyescan candidates*. Para identificar estos candidatos se siguió



(a) Distribución de eventos registrados para el Haz positivo



(b) Distribución de eventos registrados para el Haz negativo

Figura 7.1: En la figura (a) en parte izquierda podemos ver la distribución de momentum de las partículas positivas, el rango seleccionado por el recuadro rojo nos muestra el rango de mayor importancia para el estudio que exige MINER ν A , al lado derecho se muestra una distribución del momentum del haz respecto de su tiempo de vuelo. La figura (b) muestra la misma descripción que la figura (a) para la configuración del haz negativo.

el siguiente proceso:

- Identificación de eventos con similar característica
- Distribución de fotoelectrones
- Simulaciones para diferentes tipos de partículas mostrando su distribución de fotoelectrones

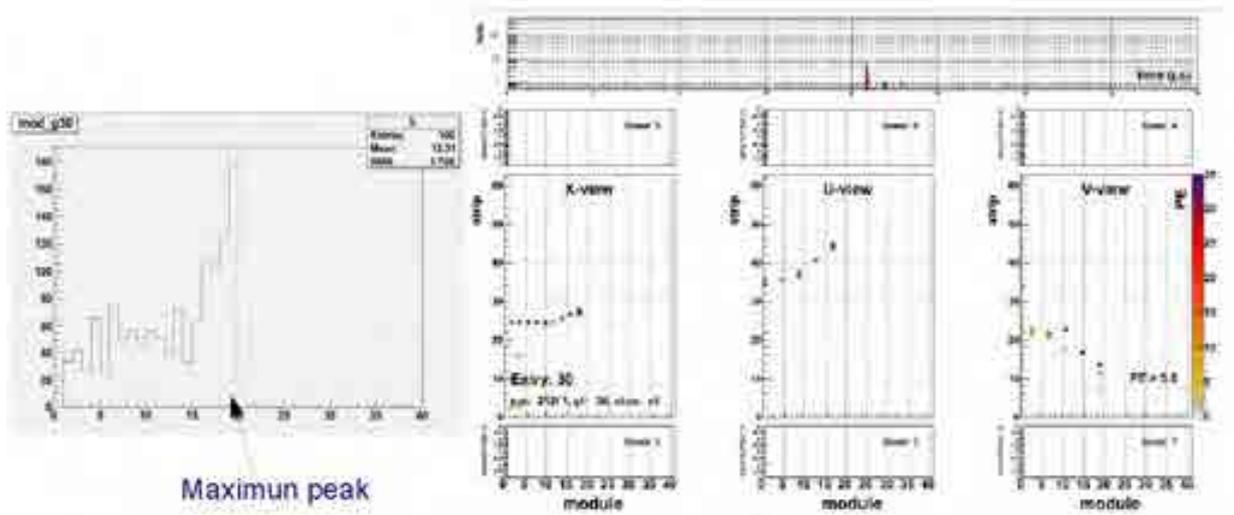
En las figuras 7.2(a) y 7.2(b) se muestran dos eventos seleccionados aplicando el criterio antes mencionado, en la distribución de fotoelectrones de ambos eventos se puede observar que los dos tienen una mayor deposición de fotoelectrones en el módulo 20. Esto también se puede comprobar con el *event display*, además se puede ver que la marca dejada a través de los planos del detector corresponden a una partícula que ha sido absorbida o frenada. Para determinar que tipo de partícula se tiene que hacerle un seguimiento en sus variables de momentum y tiempo de vuelo.

Inicialmente, para determinar la masa de las partículas apartir de los datos obtenidos, se realizaron varios trabajos de calibración de los sistemas de tiempo de vuelo para determinar los valores de los offsets, también se hizo incapie en la longitud entre las dos estaciones de tiempo de vuelo, debido a que en este recorrido las partículas recorren una trayectoria curvada producto de la interaccion con el campo magnético generado por los dos magnetos. La partícula con la que se inició los cálculos fue el pion, dado que de era la partícula de mayor concentración en el haz. Haciendo uso de los valores de la trayectoria medida y introduciendo los valores del offset en el tiempo de vuelo se ajusto el valor de la masa tal como se puede apreciar en las figuras 7.3(a) y 7.3(b), cabe mensionar que como parte del filtro se uso las partículas con momentum por debajo de 1.5Gev/c y las que comprendian entre 20 y 22 nanosegundos de tiempo de vuelo. El método se basa en la aplicación de las siguientes expresiones:

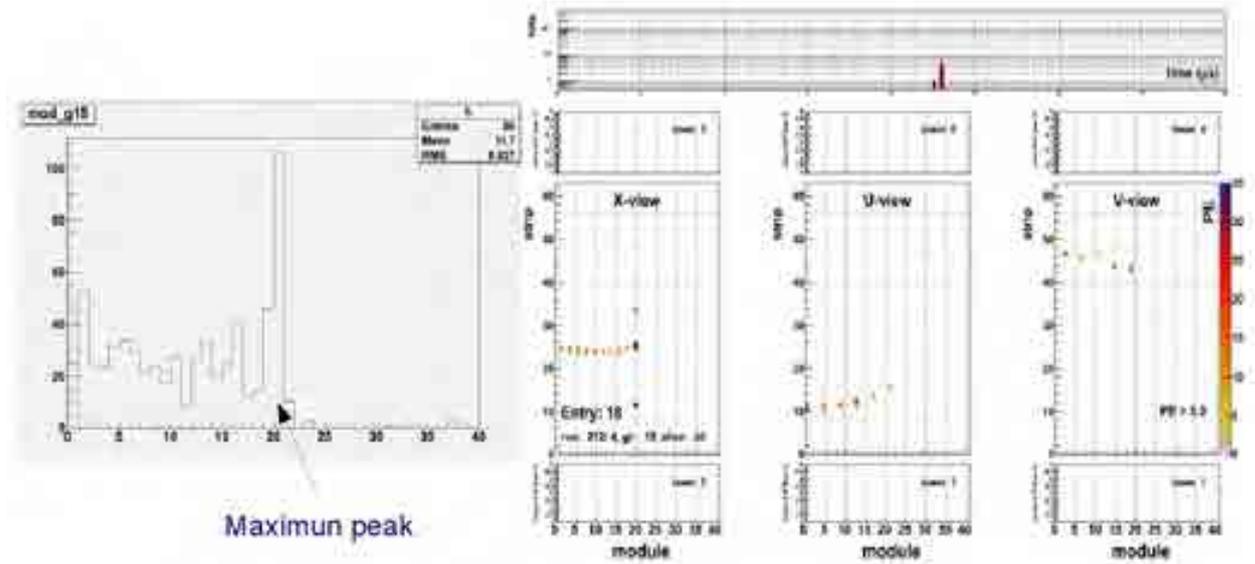
$$m = \sqrt{\frac{p^2(1 - \beta^2)}{\beta^2}} \quad (7.1)$$

$$\beta = \frac{v}{c} \quad (7.2)$$

donde m es la masa de la partícula, p representa el momentum con que atravieza el sistema de tiempo de vuelo, v es la velocidad de la partícula y c es la velocidad de la



(a) Evento #30 de la corrida 212 - 1



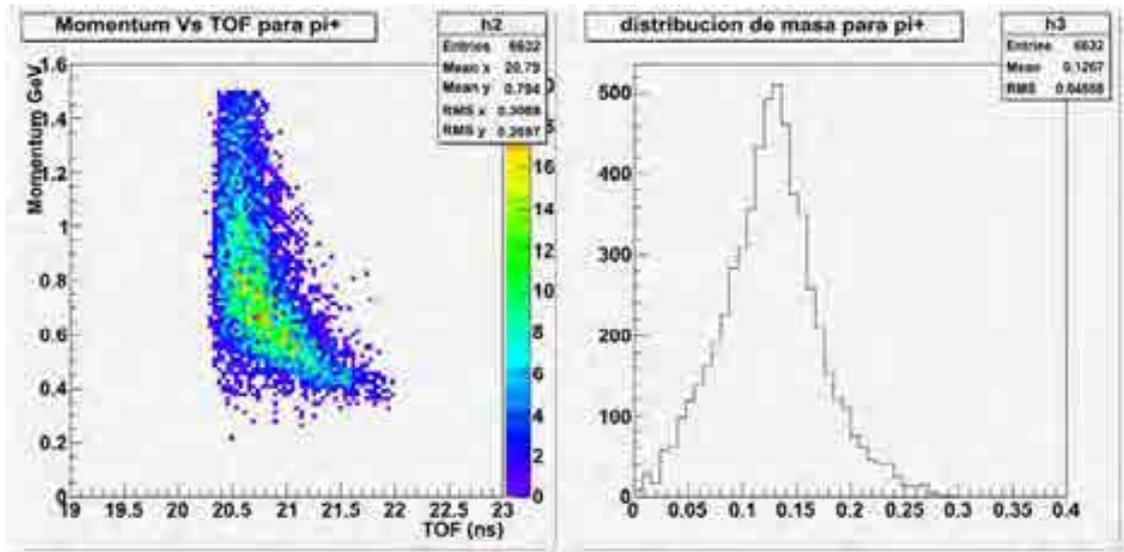
(b) Evento #18 de la corrida 212 - 4

Figura 7.2: En estas figuras, haciendo uso del event-display podemos ver la marca dejada por dos eventos diferentes de una misma corrida que tienen huellas parecidas. En el evento de la parte superior se ve una mayor deposición de fotoelectrones, esto se puede deducir de la cantidad de entradas que se registran en parte izquierda donde se muestra la distribución de fotoelectrones, en la parte derecha se muestra las huellas dejadas en el detector

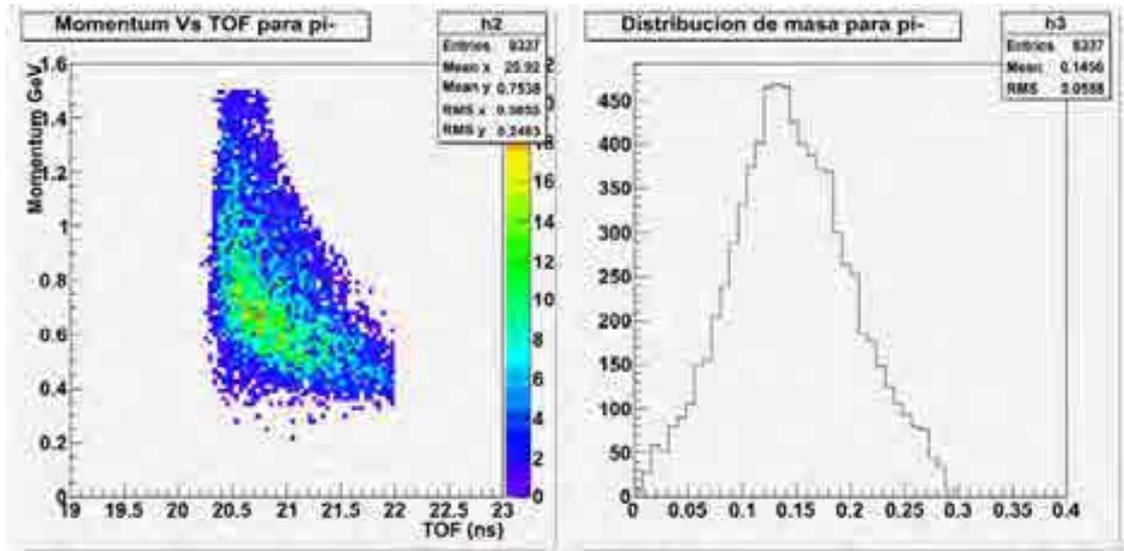
luz en el vacío. Luego, para determinar la velocidad de la partícula usamos la expresión siguiente.

$$v = \frac{L_{tof2} - L_{tof1}}{tof} \quad (7.3)$$

Siendo $L_{tof2} - L_{tof1}$ la distancia recorrida por la partícula entre las dos estaciones de tiempo de vuelo y tof es el tiempo de vuelo que recorre la partícula en esta distancia.



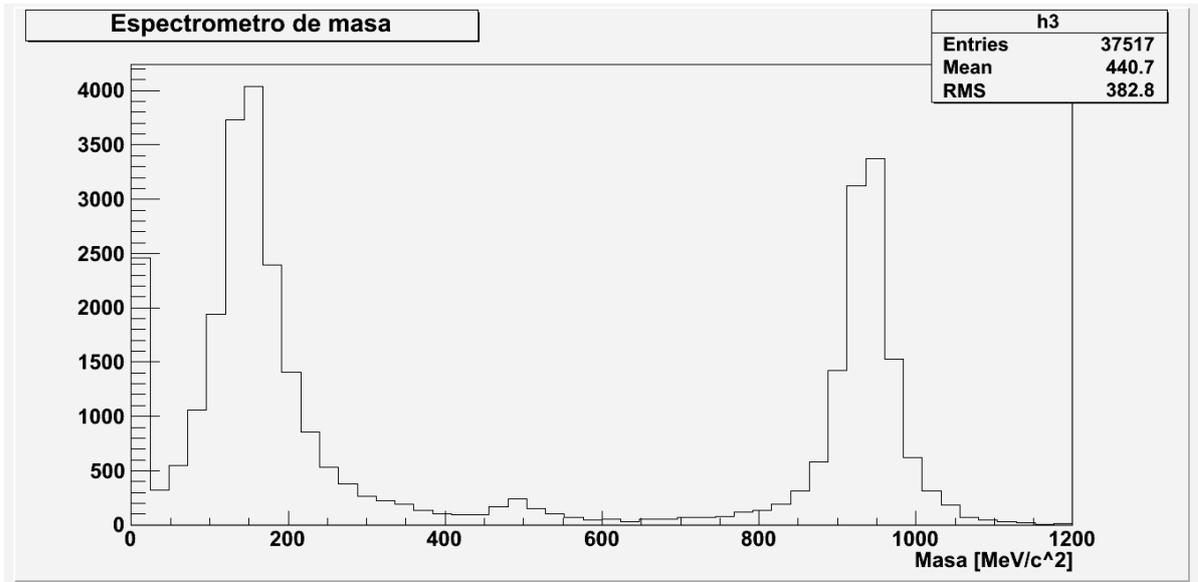
(a) Distribucion de la masa para los π^+



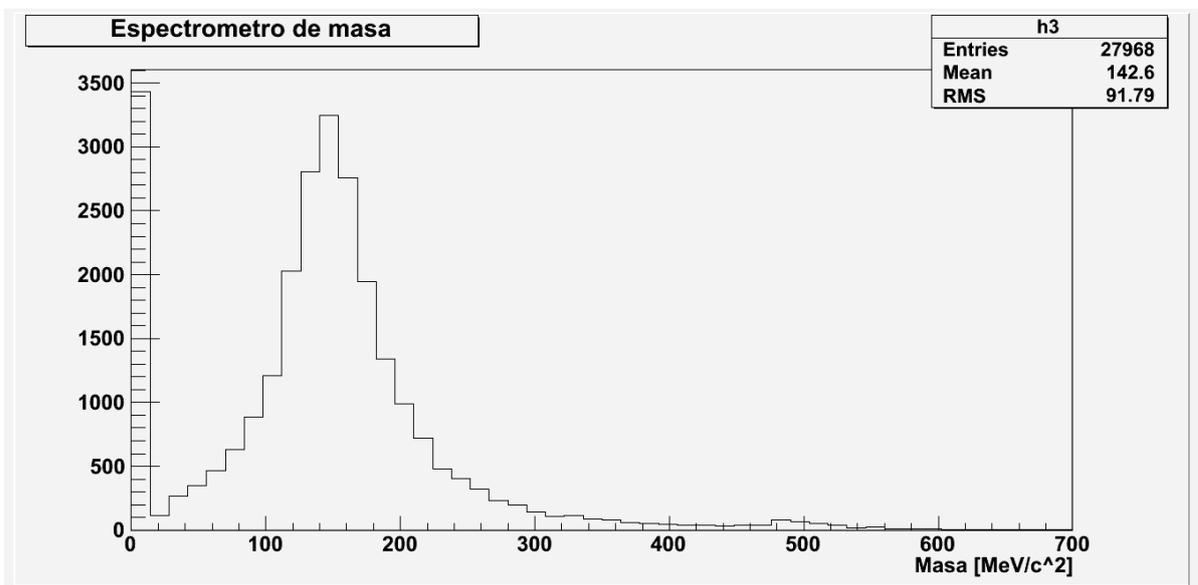
(b) Distribucion de la masa para los π^-

Figura 7.3: Esta figura muestra la distribución de masa de los piones positivos y negativos.

Luego de las calibraciones y medidas previas de los sistemas se incorporó dentro del código de procesamiento de datos como una variable de masa al que se le puso *mtest_mass* quedando así para su uso en el análisis de datos al usar las ntuplas de los archivos DST.



(a) espectrometro de masas para el haz positivo



(b) Espectrometro de masas para el haz negativo

Figura 7.4: Espectrometros de masas de las dos configuraciones del haz para la primera configuración del detector

7.1. Filtrando eventos con patrones comunes

Luego de ver la distribución de fotoelectrones de la mayoría de los eventos, se pudo apreciar que la mayoría tenían un patrón igual y/o parecido a los eventos mostrados en las figuras 7.2(a) y 7.2(b), es decir la mayor deposición de fotoelectrones ocurría 1, 2 o 3 módulos antes de que sea frenado por completo dicha partícula, usando este criterio se desarrollo un código que sea capaz de filtrar todos estos eventos con esta característica se uso este criterio para descartar las partículas que decayeron a mitad del camino formando nuevas partículas (creando una lluvia hadrónica), dejando así solo las partículas frenadas al final de su recorrido, también se aprovecho el mismo código para plotear los módulos finales para poder ver donde terminaron su recorrido la mayor cantidad de partículas, esto se puede ver en las figuras 7.5(a) y 7.5(b) donde muestra para los dos tipos de configuración del haz.

De estas figuras se puede observar que en el módulo 35 se dió la mayor cantidad de deposición de fotoelectrones para las dos configuraciones del haz, también se puede ver que la mayoría de los eventos tuvo sus picos máximos de deposición pasando el módulo

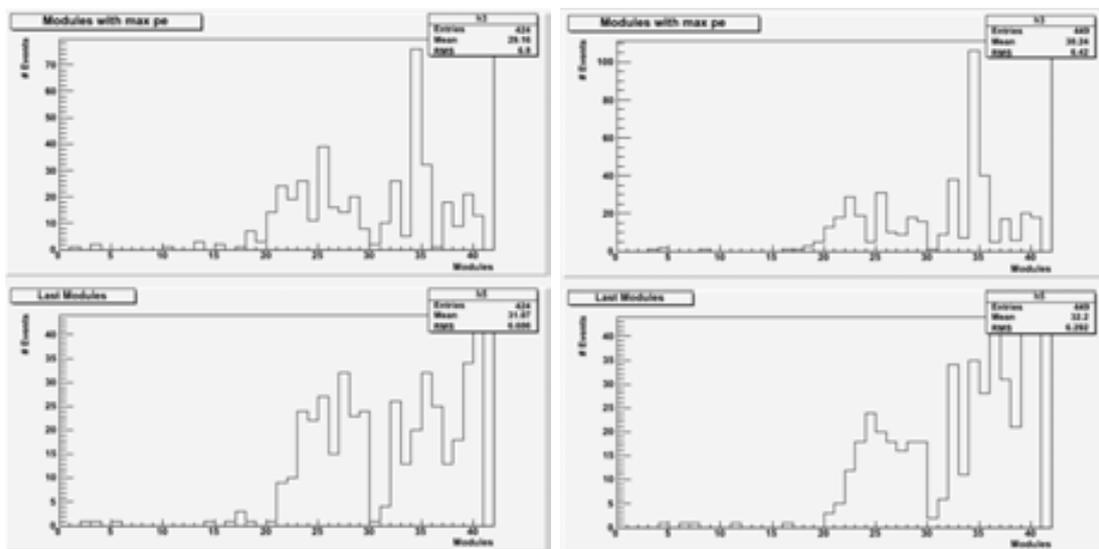
(a) Módulos con max pe π^+ (b) Módulos con max pe π^-

Figura 7.5: Las figuras de la parte superior muestran los módulos con mayor deposición de fotoelectrones para el negativo y el haz positivo, las figuras de la parte inferior muestra los módulos donde terminaron el recorrido las partículas a las que nos referimos como módulos finales.

20 que corresponde a la mitad del detector y final del primer calorímetro.

Para filtrar los piones positivos y negativos del resto de partículas se hizo uso de tres variables de los archivos procesados (archivos DST), estas variables son las siguientes:

- La variable de masa ($mtest_mass$)
- La variable del tiempo de vuelo ($mtest_tof$)
- la variable del momentum ($mtest_p$)

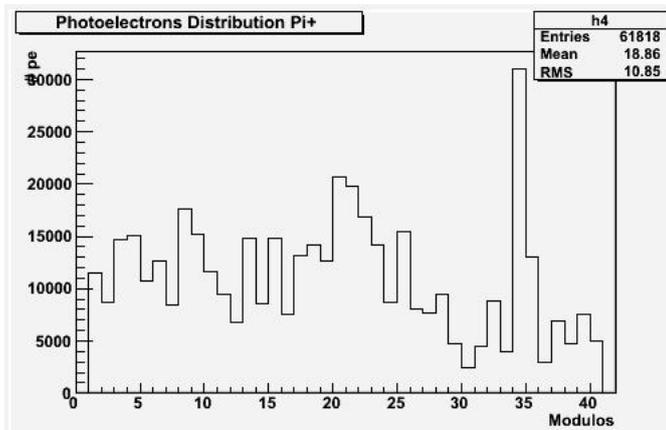
Los rangos de restricción de cada una de las variables se puede ver en el siguiente recuadro.

```
mtest_tof>20 && mtest_tof<22  
mtest_p>0 && mtest_p<1.2  
mtest_mass>0.001 && mtest_mass<0.3
```

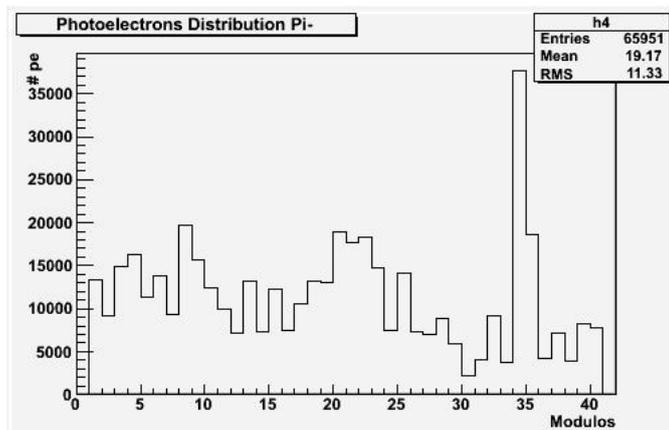
El corte o restricción del tiempo de vuelo se hizo por la mayor densidad de eventos registrados en ese período de tiempo, el corte del momentum se hizo porque es el rango más confiable, y el corte en la variable masa se hizo para separar principalmente a los piones.

Las figuras 7.6(a) y 7.6(b) muestran la suma total de los fotoelectrones depositados a lo largo del recorrido de las partículas filtradas dentro del detector, tal como se mencionaba anteriormente el pico de las deposiciones se da en el módulo 35 para ambos tipos para los piones positivos la cantidad de fotoelectrones son un poco mas de 30,000 y para los piones negativos estan por encima de los 35,000. al hacer la división de estos valores se puede ver que están alrededor de uno tal como se ve en la figura 7.6(c) lo cual indica que la cantidad de partículas positivas y negativas filtradas son similares.

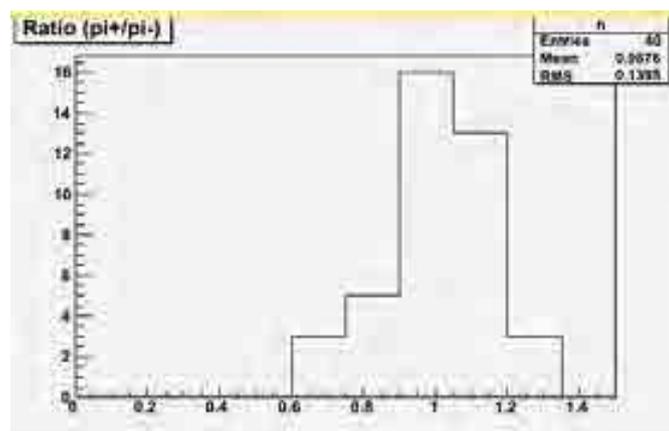
Cabe mencionar que los eventos filtrados son candidatos a piones positivos y/o negativos, no se puede asegurar que son exclusivamente estas partículas, dado que estos son estudios preliminares, actualmente se continuan haciendo estudios más refinados que puedan dar una mejor precisión en la separación de estas partículas. El filtrado no solo depende del código que se construya para separar las partículas, también depende de que tan bien refinadas están las variables usadas en dicho proceso, cuando menciona variable hace referencia a las variables de los archivos de procesamiento de los datos (archivos DST).



(a) Distribución de π^+



(b) Distribución de π^-



(c) ratio

Figura 7.6: distribución de los valores de la división de la figura (a) entre la figura (b).

Resultados y Conclusiones

Los resultados del detector TestBeam será crucial para los resultados que se esperan del Detector MINERvA, especialmente en las mediciones cinemáticas para aislar la dispersión coherente, o mediciones de las energías finales de los hadrones. Motivo por el cual se busca medir la respuesta individual de cada una de las partículas en el detector.

El trabajo realizado con el grupo asignado a esta parte del experimento fue montar el sistema beamline y posteriormente el detector de prueba. Se inicio con el testeo individual de cada una de sus componentes y la integración entre ellas de todo el sistema beamline, realizando lo siguiente:

- Se realizó el mapeo del campo magnético generado por los dos magnetos a lo largo de la línea que recorre el haz de partículas.
- Se monto y testeo cada una las cuatro wire chambers y sus sistemas electrónicos quedando dentro de los parametros requeridos.
- Se monto, testeo y calibró los dos sistemas de hodoscopios que forman el sistema de tiempo de vuelo, al que se agregó un circuito unido a las wire chambers para generar el trigger adecuado.

- Se desarrollo el codigo empleado por el sistema de adquisicion de datos, para la lectura de cada una de sus componentes.
- Luego de una semana de prueba del sistema con el haz producido por el Fermilab se verificó el funcionamiento del sistema haciendo los ajustes correspondientes, quedando dentro de los parametros exigidos por el experimento.

Concluido el testeado y desempeño del sistema beamline, se monto el detector TestBeam (se monto dos configuraciones diferentes) con la ayuda del equipo técnico del Fermilab, en esta parte se hicieron:

- Testeo de cada uno de los cuarenta planos usados para cada configuración.
- Testeo de cada uno de los tubos fotomultiplicadores con una fuente de iluminación de leds.
- se conecto los tubos fotomultiplicadores a los cables de fibra óptica que van desde los PMTs a los centelladores en cada uno de los módulos (planos) del detector verificando su funcionamiento correcto.
- se conecto toda la electrónica relacionando los CRIM, CROC y FEB asociado a cada PMT.
- se instaló y configuró el sistema de adquisición de datos del detector.

Como último paso antes de la toma de datos, se sincronizo los dos sistemas de adquisición de datos (DAQ) del beamline y el detector usando como trigger el sistema de tiempo de vuelo.

Producto de todo este trabajo, durante los meses de Junio y Julio del 2010 se realizó la toma de datos para las dos configuraciones del detector En la primera configuración (20ECAL 20HCAL) la toma de datos se realizó del 9 de junio al 27 de junio consiguiendo 17 corridas buenas focalizadas al haz negativo, y 17 corridas focalizaadas al haz positivo. En la segunda configuración (20TRK 20ECAL) la toma de datos se realizó del 1 de julio al 16 de julio consiguiendo 24 corridas buenas focalizada al haz positivo, y 7 corridas buenas focalizadas en el haz negativo. Para verificar si los datos tomados eran correctos se simuló el haz y se comparo con los datos reales estando dentro de los parametros esperados.

Actualmente los datos obtenidos continuan sometidos a estrictos estudios para poder cumplir los con los resultados esperados

Testeo de los Tubos Fotomultiplicadores PMTs

Los tubos fotomultiplicadores (PMTs), constituyen los principales dispositivos de medición de los detectores MINERvA y Testbeam. Razón por la cual son testeados cuidadosamente ya que cualquier error de estos se reflejará directamente en la medición de los datos tomados por el detector. Para el testeo de estos dispositivos se dispuso de un ambiente en el Laboratorio F del FERMILAB equipado con una fuente de voltage, un osciloscopio digital, cuatro targetas FEB (Front End Board), un módulo VME crate, un CROC, dos fuentes de iluminación de led, una computadora conectada al sistema tal como se puede apreciar en la figura 3.12 del capítulo 2.

A.1. Pasos del testeo

Conecciones

Primeramente se conectan los 4 PMTs a testear a cada uno de los 4 FEBs, luego conectamos los cables de alimentación de los FEBs, seguidamente en la parte posterior del PMT se conectan los cables de LI (*Light Injection*) de las fuentes de luz (son dos cables por PMT) las demás entradas se taparon con conectores del mismo tipo que el cable de LI, en los costados de estas también hay dos agujeros que se le tiene que cubrir con una tuerca de tal forma que quede sellada y no haya filtración de luz a la

parte interna del tubo. Una vez realizado y verificado todo este procedimiento en los cuatro tubos, se puede prender la fuente de voltage.

Toma de datos

Para la toma de datos se puede hacer localmente o remotamente desde otra computadora, si se hace remotamente se puede hacer haciendo uso del siguiente comando

```
$ ssh -Y tbonline@mnvtbonline.fnal.gov
```

Una vez dentro, seteamos los siguientes paquetes:

```
mnvtbonline1.fnal.gov> source dispatcher.sh  
mnvtbonline1.fnal.gov> source runcontrol.sh
```

Luego, se verifica que todos los PMTs esten correctamente conectados y se enciende la fuente de voltage (los voltages usuales que se ve en la fuente son 0.30, 0.31 ó 0.32, si la fuente muestra valores diferentes se apaga y se hace una nueva verificación) después de esto se setea el siguiente comando:

```
mnvtbonline1.fnal.gov> source slowcontrol.sh
```

Al ejecutar el último comando se abre una ventana con el mismo nombre “slowcontrol” aquí vamos al menu luego a *file -> load fromfile* y cargamos el archivo

```
/home/tbonline/pmtXTalkStand_4FEB_li_apr22.hwcfg
```

Luego de cargar el archivo leemos los cuatro FEBs y chequeamos el voltage y el período hasta que llegue a los valores adecuados, una vez listos se empieza la toma de datos con la ventana del runcontrol“ para el pedestal se pone 1000 eventos y para la señal de luz 3000 eventos. Todos estos datos son guardados en:

```
/work/data/rawdata
```

Procesamiento de datos

Para el procesamiento de los datos tomados se necesita el paquete `DaqRecv` y el software `MINERvA`, dado que en esta maquina no se tiene el software `MINERvA` se copian los datos a una de las maquinas del cluster haciendo usando el comando

```
scp -r <RawData.dat> alania@if04.nal.gov:/minerva/app/users/alania/input_files/
```

Luego de copiar los archivos se setea el software `MINERvA` y el paquete `DaqRecv` ejecutando los comandos:

```
<if04.fnal.gov> source setupv7r3p1.sh
<if04.fnal.gov> cd cmtuser/Minerva_v7r2/DaqRecv/v7r2/cmt/
<if04.fnal.gov> cmt config
<if04.fnal.gov> make
<if04.fnal.gov> source setup.sh
```

Una vez terminado se va al directorio de los `/minerva/app/users/alania/input_files` y se hace correr el scrip `bash dstruner_labf.sh` especificando el archivo a procesar (en esta parte del procesamiento se corta el nombre del archivo suprimiendo el time-stamp) todo este proceso se realiza para cada archivo ejecutando el siguiente comando:

```
<if04.fnal.gov> ./dstrunner_labf.sh -d <file RawData.dat>
```

En este proceso genera un archivo `<file>_DST.root` que se guarda en la carpeta `/minerva/app/users/alania/output_files/`, para poder ver los resultados de este archivo root es conveniente pasarlo a una maquina local y poder visializarlo con los códigos desarrollados `qlabf_ana.C` y `run_labf.sh2` que muestran los resultados gráfica y numericamente. Como ejemplo ponemos los resultados del PMT-116

```
*****
Date = May 21 2010

Pedestal file = ../output_files/FT_00000033_0001_pdstl_v05_1005211716_DST.root
LI file = ../output_files/FT_00000033_0002_pdstl_v05_1005211717_DST.root

PMT = 116
FEB address = 2
```

APÉNDICE A. TESTEO DE LOS TUBOS FOTOMULTIPLICADORES PMTS115

Time Integration = Long

CROSS TALK REQUESTED FOR PIXELS: 9, 13, 50, 54

Pixel	Left %	Right %	Top %	Bot %	Cor %	L-R %	T-B %	Total %
9	2	1.7	1.6	1.3	0.55	0.31	0.33	7.2
13	1.2	1.3	1.2	1.5	0.46	-0.14	-0.28	5.6
50	1.4	1.5	1.4	1.4	0.45	-0.095	-0.03	6.2
54	1.4	1.5	1.4	1.3	0.4	-0.075	0.12	6

Average over Four pixels

	Q
Left	= 1.5%
Right	= 1.5%
Top	= 1.4%
Bot	= 1.4%
4 Crn	= 0.47%
Total	= 6.3%
Total 4nn	= 5.8%

PIXELS WITH HIGH DARK COUNTS :

Pixel Counts RMS

APÉNDICE A. TESTEO DE LOS TUBOS FOTOMULTIPLICADORES PMTs116



Figura A.1: Distribución de ADCs por pixel

APÉNDICE A. TESTEO DE LOS TUBOS FOTOMULTIPLICADORES PMTs117

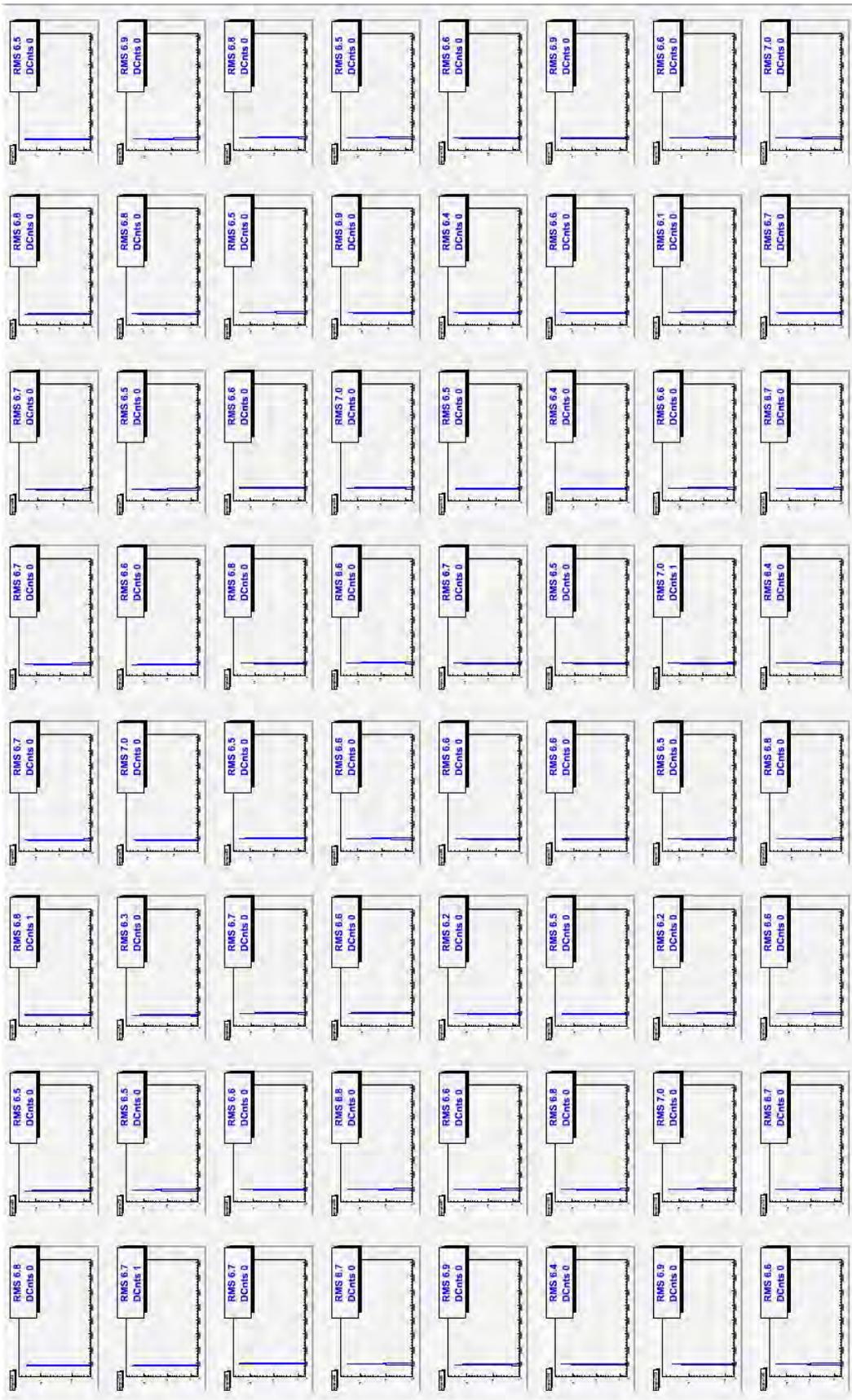


Figura A.2: Distribución del pedestal en ADCs por pixel

APÉNDICE A. TESTEO DE LOS TUBOS FOTOMULTIPLICADORES PMTS118



Figura A.3: Distribución de carga por pixel

Introducción a los paquetes usados para la simulación

Previamente a la instalación de los paquetes de la simulación se contruye un escritorio donde se instala una de las versiones del software MINERvA, dentro de ella se puede instalar los paquetes que encontremos en los respositorios CVS. En mi caso mi area de trabajo se encuentra en la siguiente dirección

```
/minerva/app/users/alania/cmtuser/Minerva_v7r7/
```

para instalar los paquetes se ejecuta los siguientes comandos

```
>getpack Sim/MTestStudies
```

```
>getpack Sim/Readout
```

```
>getpack Det/MinervaDDDB
```

Luego de ejecutar este comando nos pedirá la versión que se desea instalar. Una ves instalado nos movemos dentro de la carpeta *cmt* de cada uno de los paquetes y se ejecuta los siguientes comandos:

```
>cmt config
```

```
>make
```

```
>source setup.sh
```

Esto se hace solo la primera ves o cuando se haya hecho modificaciones dentro de los scripts de la carpeta *src*, para las próximas ejecuciones solo bastará con hacer un

```
>source setup.sh
```

Sim/MTestStudies

Es el paquete principal de la simulación su estructura se puede ver en la figura B el código esta hecho en gaudi, este paquete es el que genera las ntuplas y histogramas en archivos root al final de la simulación.

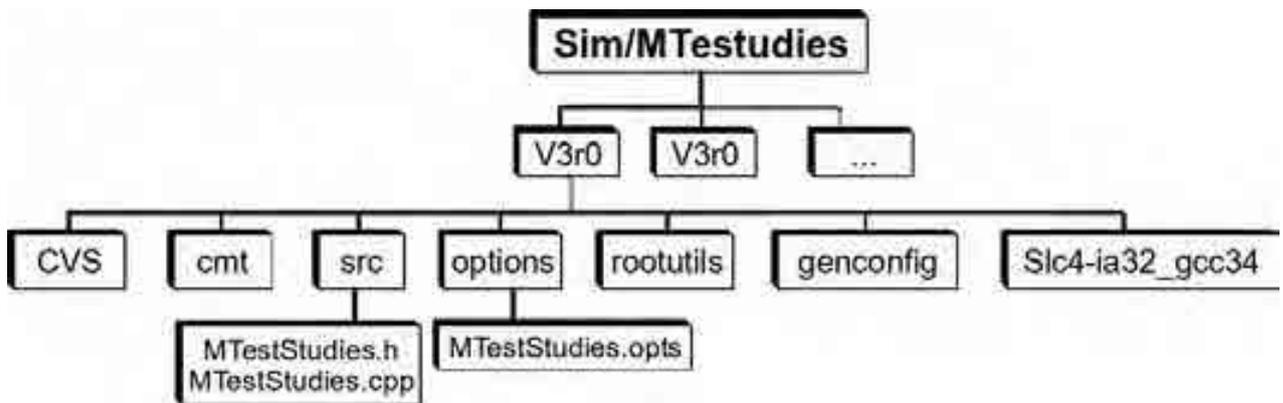


Figura B.1: Estructura del paquete

en el script `Sim/MTestStudies/v3r0/options`

```
//ParticleCannon.GeneralParticles.PdgCodes = {13,211};
ParticleCannon.GeneralParticles.PdgCodes = {-211};
ParticleCannon.GeneralParticles.MinMomentum = 0.2*GeV;
ParticleCannon.GeneralParticles.MaxMomentum = 1.6*GeV;
ParticleCannon.GeneralParticles.MinTheta = 0.0*rad;
ParticleCannon.GeneralParticles.MaxTheta = 0.0*rad;
ParticleCannon.GeneralParticles.MinPhi = 0.0*rad;
ParticleCannon.GeneralParticles.MaxPhi = 0.0*rad;
```

En esta parte del código se puede elegir el tipo de partícula que se desea simular poniendo su PID de la partícula en este caso -211 corresponde a los piones negativos, si se desea simular para un rango de momentum se pone el mínimo y el máximo y si se desea simular para un momentum específico, se pone la misma cantidad en el momentum mínimo y máximo. De la misma forma se procede para los ángulos de incidencia.

```
//DetectorDataSvc.DetDbLocation = "$MINERVADDDDBROOT/DDDB/MTest-10T-20E-10H.xml";
DetectorDataSvc.DetDbLocation = "$MINERVADDDDBROOT/DDDB/MTest-00T-20E-20H.xml";
//DetectorDataSvc.DetDbLocation = "$MINERVADDDDBROOT/DDDB/MTest-20T-20E-00H.xml";
```

Aquí se elige el tipo de geometría a usar. Originalmente establecido por *Mega* y *ReadoutSim* dado que este tendrá prioridad para todos los algoritmos que se necesiten para la geometría. Aquí se muestra tres versiones de la geometría siendo la primera la que viene por defecto cuando se obtiene el paquete del CVS.

```
ApplicationMgr.EvtMax = 1000;
```

En esta parte se define la cantidad de eventos que se desea simular, en este caso son para mil eventos

```
NTupleSvc.Output={"FILE1 DATAFILE='20E20H/pion-negative-MTestStudies-ntuple.root' OPT='NEW' TYP='ROOT'" };
HistogramPersistencySvc.OutputFile="20E20H/pion-negative-MTestStudies-histograms.root";
```

Estos son los archivos de salida de la simulación.

Sim/Readout

Este paquete al igual que los demás también está programado en GAUDI, se consigue fácilmente a partir de los repositorios CVS. La función de este paquete es importante dentro de la simulación ya que su trabajo es simular la lectura electrónica de los dispositivos usados por el detector, para su aplicación no se tiene que modificar o agregar ya que dentro de su estructura está definido para los diferentes prototipos de detectores usados por el experimento. Su estructura del paquete se puede ver en la figura B.

Det/MinervaDDDB

Al igual que todos los paquetes, este lo bajamos de los repositorios CVS. La función de este paquete es definir el tipo de configuración del detector que

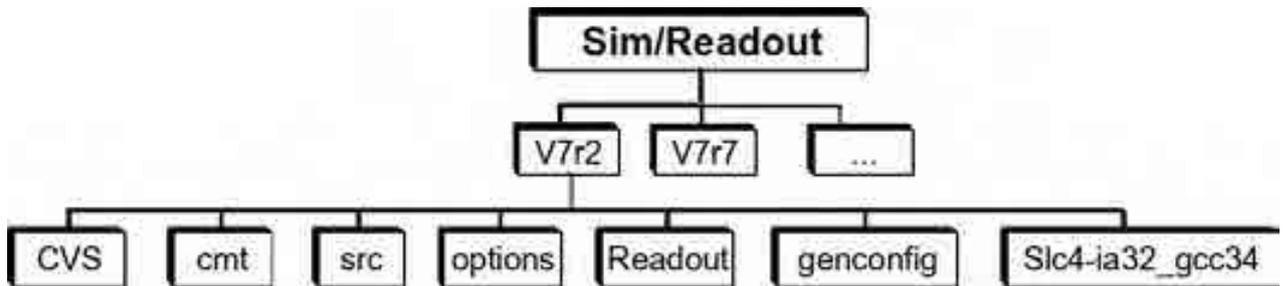


Figura B.2: Estructura del paquete

deseamos simular. La estructura de este paquete lo podemos ver en la figura B. Una vez instalado y seteado el paquete Det/MinervaDDDB, se necesita modificar la configuración del detector. Todas las herramientas para esto se encuentran en el directorio Det/MinervaDDDB/v6r2p1/gen. El archivo principal a editar es mtconf.py, en el que se tiene el control sobre el números de calorímetros del detector. La siguiente línea de código, por ejemplo, especifica un detector de seguimiento con 10, 20 ECAL, y 10 módulos HCAL.

```
MT_MOD_TYPE_N = [00,20,20]
```

Donde el primer número hace referencia a la cantidad de módulos tracker, el segundo a la cantidad de calorímetros electromagnéticos y el tercer número a la cantidad de módulos del calorímetro hadrónico.

En este escript también se puede cambiar la longitud de los strips y la separación entre los diferentes tipos de calorímetros tal como se muestra a continuación

```
# Test beam scintillator is 63 strips by 107 cm long
MaxStripLength="107*cm"

# Strips per plane for MTest only
StripsPerPlane="63.0"

# MTestTrackerPlanePitch Minimums
# 2.0 cm absolute smallest, 3.5 cm one-sided PMT readout, 4.8 uniform.
MTestTrackerPlanePitch="2.0*cm"
```

```
# MTestEcalPlanePitch
# Minimums 3.5 smallest assuming 1/2 inch Pb framing, 4.8 uniform with hcal.
MTestEcalPlanePitch="3.5*cm"
# MTestHcalPlanePitch Minimum 4.8 gives a pretty tight spec.
# Bob's default was originally two inches = 5.08 cm.
MTestHcalPlanePitch="4.8*cm"
```

Luego de editar el escript `mtconf.py` se tiene que modificar también en el escript `Makefile` que se encuentra en el mismo directorio en la línea

```
NAME := MTest-00T-20E-20H
```

luego de editarla se compila ejecutando el siguiente comando

```
make -f Makefile mtest
```

tener en cuenta que para que se implemente la nueva geometría en el `Sim/MTestStudies`

```
DetectorDataSvc.DetDbLocation = "$MINERVA_DDBROOT/DDDB/minerva-MTest-00T-20E-20H.xml"
```

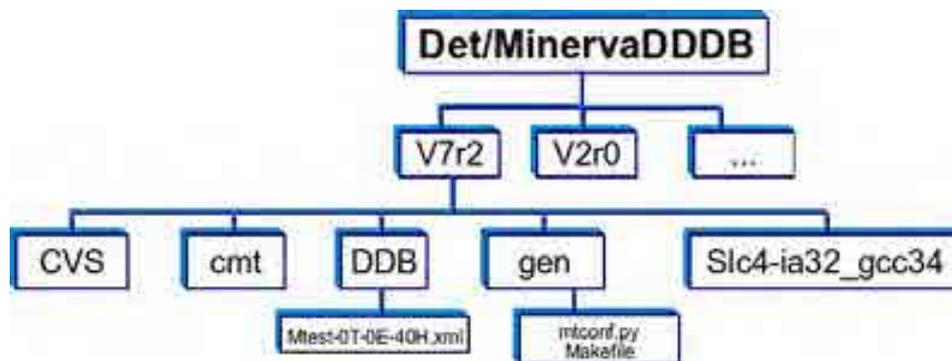


Figura B.3: Estructura del paquete `Det/MinervaDDB`

B.1. Localización de las Wire chambers y TOFs

La posición de las Wire Chambers está de acuerdo al archivo `config/config-2010june.pot` registrado en los CVS.

B.1.1. Wire Chamber 1

```
location = '-16.095 615.526 1921.906' # [mm]
orientation = 16.0953 # [degrees]
spacing = 1.016 # [mm]
xcent_ch = 159
pcent_ch = 159
ucent_ch = 200
vcent_ch = 200
```

B.1.2. Wire Chamber 2

```
location = '-5.529 925.761 3233.007' # [mm]
orientation = 17.709 # [degrees]
spacing = 1.016 # [mm]
xcent_ch = 159
pcent_ch = 159
ucent_ch = 200
vcent_ch = 200
```

B.1.3. Wire Chamber 3

```
#location = '-7.015 1285.1 5318.8' # [mm]
#location = '-6.910 1289.83 5343.93' # [mm]
# The above is as found WC_4 center upstream metal face docdb:5101 June8-9
# Adjust this so that the center the real center, half of 63.5mm thickness.
# Should also do the trigonometry to adjust the XY coordinates, like WC12
location = '-6.910 1289.83 5312.18' # [mm] adjusted only Z 0.5*63.5mm
orientation = 0.544718 # [degrees]
spacing = 1.270 # [mm]
xcent_ch = 159
pcent_ch = 159
ucent_ch = 200
vcent_ch = 200
```

B.1.4. Wire Chamber 4

```
#location = '-13.490 1586.72 7140.27' # [mm]
#location = '-13.490 1510.52 7140.27' # [mm]
#location = '-13.484 1503.28 7118.33' # [mm] as found June
# The above is as found WC_4 center upstream metal face docdb:5101 June8-9
# Adjust this so that the center the real center, half of 63.5mm thickness.
# Should also do the trigonometry to adjust the XY coordinates, like WC12
location = '-13.484 1503.28 7150.08' # [mm] adjusted only Z 0.5*63.5mm
orientation = 0.1313 # [degrees]
spacing = 1.270 # [mm]
xcent_ch = 159
pcent_ch = 159
ucent_ch = 200
vcent_ch = 200
```

La posición de los sistemas de tiempo de vuelo esta de acuerdo al archivo TFullTrack.cxx

B.1.5. Posición de los TOFs

```
// Double_t tof1zpos = 128.5410 + 5.00; // Pre-June crude estimate.
// Is now WC1_CT (Downstream) - 6.35 (wc thickness) - 55.88 cm (22" gap).
Double_t tof1zpos = 195.12 - 6.35 - 55.88;
Double_t thisdeltaz = tof1zpos-ivect[2]; //dz, final - initial.
Double_t thisdeltax = thisdeltaz * ivect[3] / ivect[5];
Double_t thisdeltay = thisdeltaz * ivect[4] / ivect[5];
// Now this seeds the pathlength.
PathLength = TMath::Sqrt(thisdeltax*thisdeltax + thisdeltay*thisdeltay
+ thisdeltaz*thisdeltaz);
// But the stepper will step only as far as WC4.
// The downstream TOF is a little further downstream 11.55 plus 3.175 cm
// Add it here and now, as if we were already at the end.
PathLength += 11.55 + 3.175;
```

APÉNDICE C

Codigos desarrollados

C.0.6. códigos para procesamiento de la data del ACNET

mtsclfilter.py

```
# Este codigo es para filtrar, ordenar, sumar, media y desviacion standar de los datos ACNET
import os.path
import glob
import sys
import string

## ----- ##

def my_arrange(f_name):

    infile = open(fname,'r')
    data = infile.readlines()
    infile.close()

    outfile = open('tmp.txt','w')

    for line in data:
        tmp_line = line.split()

        if len(tmp_line) == 5:
            s = "%s %s %s %s %s \n" % (tmp_line[0],tmp_line[1],tmp_line[2],tmp_line[3],tmp_line[4])
            outfile.write(s)

    outfile.close()
```



```

        tmp_add2+= (int(line2[4])-aver[1])**2
        tmp_add3+= (int(line3[4])-aver[2])**2
        tmp_add4+= (int(line4[4])-aver[3])**2
        tmp_add5+= (int(line5[4])-aver[4])**2
        tmp_add6+= (int(line6[4])-aver[5])**2
        tmp_add7+= (int(line7[4])-aver[6])**2
        tmp_add8+= (int(line8[4])-aver[7])**2

    k+=1

    if (operation == "sum"):
        res1 = tmp_add1
        res2 = tmp_add2
        res3 = tmp_add3
        res4 = tmp_add4
        res5 = tmp_add5
        res6 = tmp_add6
        res7 = tmp_add7
        res8 = tmp_add8
        outfile.close()

    if (operation == "aver"):
        res1 = tmp_add1/k
        res2 = tmp_add2/k
        res3 = tmp_add3/k
        res4 = tmp_add4/k
        res5 = tmp_add5/k
        res6 = tmp_add6/k
        res7 = tmp_add7/k
        res8 = tmp_add8/k

    if (operation == "sd"):
        from math import sqrt
        res1 = sqrt(tmp_add1/(k-1))
        res2 = sqrt(tmp_add2/(k-1))
        res3 = sqrt(tmp_add3/(k-1))
        res4 = sqrt(tmp_add4/(k-1))
        res5 = sqrt(tmp_add5/(k-1))
        res6 = sqrt(tmp_add6/(k-1))
        res7 = sqrt(tmp_add7/(k-1))
        res8 = sqrt(tmp_add8/(k-1))

#    print res1,res2,res3,res4,res5,res6,res7,res8
    return res1,res2,res3,res4,res5,res6,res7,res8

## ----- ##

def my_result(f_name,rsum,raver,rsd):

    infile = open(fname,'r')
    data = infile.readlines()

```

```

infile.close()

ntot = len(data)

outfile = open('output/may1.txt','w')

for j in range(1,9):
    if j == 1: llim=0; ulim=5
    if j == 2: llim=5; ulim=10
    if j == 3: llim=10; ulim=15
    if j == 4: llim=15; ulim=20
    if j == 5: llim=20; ulim=25
    if j == 6: llim=25; ulim=30
    if j == 7: llim=30; ulim=35
    if j == 8: llim=35; ulim=40

    for i in range(0,ntot):
        line = data[i].split()
        l=line[llim:ulim]
        print i,l[0],l[1],l[2],l[3],l[4]

        s = "%s %s %s %s %s \n" % (l[0],l[1],l[2],l[3],l[4])
        outfile.write(s)

    print "SUM: ",rsum[j-1]
    print "AVERAGE: ",raver[j-1]
    print "STDEV: ",rsd[j-1]

    s = "SUM: %s \n" % rsum[j-1]
    outfile.write(s)

    s = "AVERAGE: %s \n" % raver[j-1]
    outfile.write(s)

    s = "STDEV: %s \n" % rsd[j-1]
    outfile.write(s)

outfile.close()

## ----- ##

for fname in glob.glob('input/may1.txt'):
    if os.path.isfile(fname):
        my_arrange(fname) #ordena el archivo sin headers

for fname in glob.glob('tmp.txt'):
    if os.path.isfile(fname):

        my_sum = my_operator(fname,"sum","")

```

```

my_aver = my_operator(fname,"aver","")

my_sd = my_operator(fname,"sd",my_aver)

for fname in glob.glob('tmp2.txt'):
    if os.path.isfile(fname):
        my_result(fname,my_sum,my_aver,my_sd)

```

acnet.C

```

//Programa para plotear las distribuciones de los valores tomados por el ACNET
void acnet(){

    ifstream file("data.txt");

    double MTACL1[30];
    double MTACL2[30];
    double MTACL3[30];
    double Time[30];

    int i = 0;

    while(!file.eof()){
        file >> Time[i] >> MTACL1[i] >> MTACL2[i] >> MTACL3[i];
        i++;
    }
    file.close();

    TCanvas *c1 = new TCanvas("c1","Graph Draw Options",1400,900);
    c1->Divide(3,1);
    c1->cd(1);

    TGraph *gr = new TGraph(29,Time,MTACL1);
    gr->SetMarkerColor(3);
    gr->SetMarkerStyle(21);
    gr->GetXaxis()->SetTitle("Event");
    gr->GetYaxis()->SetTitle("Radios");
    gr->GetXaxis()->CenterTitle();
    gr->Draw("AP");
    gr->SetMinimum(0.0);
    gr->SetMaximum(120000);
    c1->cd(2);

    TGraph *ab = new TGraph(30,Time,MTACL2);
    ab->SetMarkerColor(2);
    ab->SetMarkerStyle(21);
    ab->GetXaxis()->SetTitle("Position");
    ab->GetYaxis()->SetTitle("B2 (Gauss)");
    ab->GetXaxis()->CenterTitle();

```

```

ab->SetTitle("B2 Vs Position");
ab->Draw("AP");
c1->cd(3);

TGraph *b = new TGraph(30,Time,MTSCL3);
b->SetMarkerColor(4);
b->SetMarkerStyle(21);
b->GetXaxis()->SetTitle("Position");
b->GetYaxis()->SetTitle("B3 (Gauss)");
b->GetXaxis()->CenterTitle();
b->SetTitle("B3 Vs Position");
b->Draw("AP");
}

```

C.0.7. Códigos usados en la simulación

eventdisplay.C

```

{
int      done = 0;
string   myString;
string   lastString = "0";
string   xPath;
string   uPath;
string   vPath;
int      value;
int      width=400;
int      length=600;

ThreeViewsCanvas = new TCanvas("ThreeViewsCanvas","Three views",100,100,width,length);
ThreeViewsCanvas->Divide(1,3);

while (!done) {

    gROOT->SetStyle("Plain");
    gStyle->SetOptStat(kFALSE);
    gStyle->SetOptTitle(kFALSE);
    gStyle->SetLineWidth(2);
    gStyle->SetHistLineWidth(2);
    int myFavoriteFont = 62;
    float myFavoriteFontSize = 0.06;
    gStyle->SetLabelFont(myFavoriteFont,"XYZ");
    gStyle->SetLabelSize(myFavoriteFontSize,"XYZ");
    gStyle->SetTitleFont(myFavoriteFont,"XYZ");
    gStyle->SetTitleSize(myFavoriteFontSize,"XYZ");
    gStyle->SetTitleYOffset(0.80);
    gStyle->SetPadTopMargin (0.05);
    gStyle->SetPadBottomMargin (0.12);
    gStyle->SetPadRightMargin (0.1);
    gStyle->SetPadLeftMargin (0.1);

```

```

gROOT->ForceStyle();

std::cout << std::endl;
std::cout << std::endl;
std::cout << std::endl;
std::cout << " Options:" << std::endl;
std::cout << "--> Enter event number you wish to view" << std::endl;
std::cout << "--> \'n\' for next event display" << std::endl;
std::cout << "--> \'p\' for previous event display" << std::endl;
std::cout << "--> \'r\' to redraw canvas with a different size" << std::endl;
std::cout << "--> \'s\' to save current display" << std::endl;
std::cout << "--> \'q\' to quit" << std::endl;
std::cin >> myString;

if (myString.find('q')!=string::npos)
    break;
if (myString.find('n') != string::npos) {
    value = atoi(lastString.c_str());
    value++;
    std::stringstream temp;
    temp << value;
    temp>>lastString;
    myString = lastString;
}
else if (myString.find('p') != string::npos) {
    value = atoi(lastString.c_str());
    value--;
    std::stringstream temp;
    temp << value;
    temp>>lastString;
    myString = lastString;
}
else if (myString.find('r') != string::npos) {
    std::cout << "Current dimensions are: " << std::endl;
    std::cout << "Width: " << width << " length: " << length << std::endl;
    std::cout << "Enter the new width: ";
    std::cin >> width;
    std::cout << "Enter the new length: ";
    std::cin >> length;

    ThreeViewsCanvas = new TCanvas("ThreeViewsCanvas","Three views",100,100,width,length);
    ThreeViewsCanvas->Divide(1,3);

    myString = lastString;
}
else if (myString.find('s') != string::npos) {
    ThreeViewsCanvas->Print(lastString, "eps");
    myString = lastString;
}
else {
    lastString = myString;
}

```

```

}

std::cout << "***Processing event " << myString << "***" << std::endl;

xPath = "MTestStudies/Display/XEvent_" + myString;
uPath = "MTestStudies/Display/UEvent_" + myString;
vPath = "MTestStudies/Display/VEvent_" + myString;

TFile file0("pion12-MTestStudies-histograms.root");
XView = (TH1F*) file0.Get(xPath.c_str());
UView = (TH1F*) file0.Get(uPath.c_str());
VView = (TH1F*) file0.Get(vPath.c_str());

gStyle->SetPalette(1,0);

int MyMaximum = 100;

ThreeViewsCanvas->cd(1);
UView->SetMaximum(MyMaximum);

UView->Draw("COLZ");
ThreeViewsCanvas->cd(2);
XView->SetMaximum(MyMaximum);
XView->Draw("COLZ");

ThreeViewsCanvas->cd(3);
VView->SetMaximum(MyMaximum);
VView->Draw("COLZ");

}
}

```

C.0.8. Código para el procesamiento de datos

fistcre.py

```

#Este codigo permite crear una lista de archivos DSTs para que sean llamados por el codigo del TAnalysis.C
import os.path, glob, sys
import string

indir = "20Ecal20Hcal/PiMinus/"
pattern = "TB*"

# print isrun, esrun

outfile = open('20Ecal20HcalPiMinus.txt', 'w')

for folder in glob.glob(indir):

    for file in glob.glob(folder + '/' + pattern):

```

```

    print file
    s = "%s \n" % file
outfile.write(s)

```

TBanalisis.C

```

//Codigo para hacer los cortes y filtrar pions
//-----librerias-----
#include <iostream>
#include <iomanip>
#include <fstream>
#include <string>

gROOT->Reset();

TTree *t; // minerva tree
TChain* chain; // DST chain
//-----Definicion de constantes-----

static const int m_maxNumFebs          = 1000;    //[n_febs]
static const int m_maxNumHits          = 50000;   //[n_rawhits]
static const int m_maxNumSlices        = 25;      //[n_slice_containers]
static const int m_maxNumClusters      = 5000;   //[n_clusters]
static const int m_maxNumTracks        = 1000;   //[n_tracks]

//-----Declaracion del tipo de hojas usar-----
int          ev_sub_run;
int          ev_run;
int          ev_gate;
int          n_rawhits;
int          n_slices;
int          hit_module[m_maxNumHits];          // [n_rawhits]
int          n_tracks;

double       trk_vis_energy[m_maxNumTracks];   //[n_tracks]
double       hits_total_pe[m_maxNumHits];
double       hit_pe[m_maxNumHits];            // [n_rawhits]
double       mtest_tof;
double       mtest_p;
double       mtest_mass;

int          n_entries;

//-----Inicio del codigo-----
TCanvas *c1 = new TCanvas("c1","c1",1100,700);
TH2F *h7 = new TH2F("h7","Momentum vs Module",42,0.4,1.3,2000,0,1600);
TProfile *h1 = new TProfile("h1","Photoelectrons Distribution Pi+;modules;# pe",42,0,42);
//TH1F *h1 = new TH1F("h1","Photoelectrons Distribution Pi+;modules;# pe",42,0,42);
TH1F *h2 = new TH1F("h2","Momentum Distribution pi+",100,0.4,1.2);
TH1F *h3 = new TH1F("h3","Modules with max pe;Modules;# Events",42,0,42);

```

```

TProfile *h4 = new TProfile("h4","Photoelectrons Distribution Pi+;Modulos;# pe",42,0,42);
TH1F *h5 = new TH1F("h5","Energy;trk energy;# nums",1000,0,500);
// ----- //

void TBanalysis()
{

    string filelist = "20Ecal20HcalPiPlus.txt"; // carga la lista de DSTs
    ifstream filestream( filelist.c_str() );

    chain = new TChain("minerva");

    char fname[100];
    char filename[100];

    while ( filestream >> filename ){
        sprintf(fname, "%s",filename);
        cout << " Adding " << fname << " to list..." << endl;
        chain->Add(fname);
    }

    Ev_calc();

}

// ===== //

void Ev_calc()
{
    //-----lista de branches-----

    chain->SetBranchAddress("ev_sub_run",&ev_sub_run);
    chain->SetBranchAddress("ev_run",&ev_run);
    chain->SetBranchAddress("ev_gate",&ev_gate);
    chain->SetBranchAddress("n_slices",&n_slices);
    chain->SetBranchAddress("n_rawhits",&n_rawhits);
    chain->SetBranchAddress("n_tracks",&n_tracks);
    chain->SetBranchAddress("hit_module",hit_module);
    chain->SetBranchAddress("trk_vis_energy",trk_vis_energy);
    chain->SetBranchAddress("hits_total_pe",hits_total_pe);
    chain->SetBranchAddress("hit_pe",hit_pe);
    chain->SetBranchAddress("mtest_tof",&mtest_tof);
    chain->SetBranchAddress("mtest_p",&mtest_p);
    chain->SetBranchAddress("mtest_mass",&mtest_mass);
    //-----

    n_entries = chain->GetEntries();

    int contador = 0;

    if (n_slices <3){

```

```

    for(int jentry = 0; jentry<n_entries; jentry++) {
        chain->GetEntry(jentry);
//-----
        int Lastmodule_pe = 0; // Variable para encontrar el ultimo modulo con fotoelectrons
        int MaxPe_module=0;
        int Sum_pe = 0;
        double mtest_pe = 0;
//-----
        for (Int_t i=0; i<n_rawhits; i++){
            if (hit_pe[i]>0 ){ // condicion para el conteo de los hits
                Sum_pe += hit_pe[i]; // contador de los hits totales por evento
                if (hit_module[i] > Lastmodule_pe) { // condicion -> modulo con mayor numero de fotoelectrones
                    Lastmodule_pe = hit_module[i];
                }
            }
            h1->Fill(hit_module[i],hit_pe[i]);
        }
//-----filtros-----
        if (mtest_tof>20 && mtest_tof<22 && mtest_p>0.5 && mtest_p<1.2 && mtest_mass>0.001 && mtest_mass<0.3){

            if (fabs(Lastmodule_pe - h1->GetMaximumBin()) < 4){ // && hit_module[i] <20) {

                contador++;
                mtest_pe = h1->GetMaximum();
                MaxPe_module = h1->GetMaximumBin() - 1;

                //for ()

                // cout << "-----">>trk_vis_energy[i]>>"-----" << endl;
                cout << contador<<endl;
                cout << "Run = "<<ev_run<<"-<<ev_sub_run<<"   Event = "<<ev_gate<<endl;
                cout <<"momentum = "<< mtest_p<<"   Last Module = "<< Lastmodule_pe <<endl;
                cout << "Module with Max pe = "<< MaxPe_module <<"   # Pe = " << mtest_pe <<endl;
                cout <<"Total_pe = "<< Sum_pe << endl;
                cout << "-----"<< endl;

                h2->Fill(mtest_p);
                h3->Fill(MaxPe_module);
                h4->Add(h1);
                h5->Fill(trk_vis_energy[contador]);
                h7->Fill(mtest_p,mtest_pe);
            }
        }
//-----
        h1->Reset();

    }
}

delete c1;
delete h1;

```

```
//-----Guardar los histos-----
TFile f("PionPlus/mttest_p.root", "new"); //guardar
h2->Write();
TFile f1("PionPlus/mttestpVSmodule.root", "new");
h7->Write();
TFile f2("PionPlus/photoelectronsdistrib.root", "new");
h4->Write();
TFile f3("PionPlus/last modules.root", "new");
h5->Write();
// f->Write(); //para guardad todos los histogramas =)

//-----
TCanvas *graficos = new TCanvas();
gStyle->SetPalette(1); //para poner colores
graficos->Divide(2,2);
graficos->cd(1);
h2->DrawCopy();
graficos->cd(2);
h7->DrawCopy("colz");
graficos->cd(3);
h4->DrawCopy("hist");
graficos->cd(4);
h5->DrawCopy();

}
//=====//
```

DivideHist.C

//Este codigo permite dividir dos histogramas con diferentes entradas

```
void DivideHist(){

float bin, bin1, bin2;

float binx;

TH1F* h = new TH1F("h", "Ratio (pi+/pi-)", 10, 0, 1.5);

TFile* f = new TFile("PionPlus/photoelectronsdistrib.root");
TH1F* h3 = f->Get("h4");
TFile* f1 = new TFile("PionMinus/photoelectronsdistrib.root");
TH1F* h2 = f1->Get("h4");

for ( bin=0; bin<= 42; bin++) {

    cout<<"----- " <<bin<<" -----" <<endl;
    bin1 = h3->GetBinContent(bin);
    bin2 = h2->GetBinContent(bin);
    cout<<"bin2 = " <<bin1<<" " <<"bin1 = " <<bin2<<endl;
}
```

```

    if (bin1>0 && bin2>0){
        binx = bin1/bin2;
        cout<<"binx(bin1/bin2) = "<<binx<<endl;
        cout<<"-----"<<endl;

        h->Fill(binx);
    }
}

```

```

TCanvas* plots = new TCanvas();
plots->Divide(2,2);
plots->cd(1);
h3->DrawCopy();
plots->cd(2);
h2->DrawCopy();
plots->cd(3);
h->DrawCopy();
}

```

redhist.C

```

void readhist(){

TH1F *h1 = new TH1F("h1","prueba",100,0.4,1.2);

TFile* f = new TFile("PionPlus/mtest_p.root");
TH1F* histo = f->Get("h2");
TFile* f1 = new TFile("PionMinus/mtest_p.root");
TH1F* hist = f1->Get("h2");

h1->Add(histo/hist)

TCanvas *graficos = new TCanvas();
gStyle->SetPalette(1);
graficos->Divide(1,0);
graficos->cd(1);
h1->DrawCopy();
}

b

```

Bibliografía

- [1] Demonstration of Communication using Neutrinos. C. J. Solano Salinas, M. Alania, K. Hurtado, A. Chamorro et. al. Modern Physics Letters A Vol.27, (2012)1250077 (10 pages)
- [2] Arachne - A web-based event viewer for MINERvA. C. J. Solano Salinas et. al. Nucl. Inst. Meth.A 676 (2012) 44-49
- [3] A. Pais, Inward Bound (Oxford, Oxford University Press, 1986), p. 151-160.
- [4] C.D. Ellis, B.A. Wooster, The average energy of desintegration of Radium E, Proc. Roy. Soc. A117(1927) 109-123
- [5] W. Pauli, Carta enviada a la conferencia de fisica en Tübingen, Alemania, Dic-1930.
- [6] E. Fermi, Z. Physik, 88 161(1934).
- [7] F. Reines and C.L. Cowan, The neutrino, Nature 178 (1956)446.
- [8] V.N. Gribov and B. Pontecorvo, Phys. Lett B 28(1969)493.
- [9] M. Goldhaber, L. Grodzins, and A.W. Sunyar, Helicity of neutrinos, Phys. Rev. 109 (1958)1015.
- [10] R. Davis and D.S. Harmer, Attempt to Observe the $Cl^{37}(\nu, e^-)Ar^{37}$ Reaction Induced by Reactor Antineutrinos, Bull. Am. Phys. Soc. 4, (1959)217.
- [11] G. Danby et al., Observation of high-energy neutrino reactions and the existence of two kinds of neutrinos, Phys. Rev. Lett. 9 (1962)36.
- [12] <http://public.web.cern.ch/public/>
- [13] <http://www.stanford.edu/>
- [14] Gargamelle Neutrino Collaboration: F.J. Hasert et al., Observation of neutrino-like interactions without muon or electron in the Gargamelle neutrino experiment, Phys. Lett. B 46 (1973)138.
- [15] <http://www.fnal.gov/>
- [16] C.S. Wu et al., Phys. Rev. 105 (1957)1413.

- [17] OPAL Collaboration:M.Z. Akrawy et al.,Measurement of the Z0 Mass and Width with the OPAL Detector at LEP, Phys. Lett. B bf 231 (1989)530.
- [18] M. Alania, I. Araya, A. Chamorro, H. Martínez, A. Parra, and J. Knappe, Air Shower Simulations, Proceedings of the 3rd School on Cosmic Rays and Astrophysics.
- [19] Direct Measurements of Cosmic Rays (up to TeV and beyond). C. J. Solano Salinas et. al. AIP Conf. Proc. 1123:51-64, 2009
- [20] S. Fukuda et al. [The Super-Kamiokande Collaboration], Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A 501, 418 (2003).
- [21] Takashi Iida, Search for Supernova Relic Neutrino at Super-Kamiokande, Tesis de doctorado, Universidad de Tokyo, 18 Diciembre 2009
- [22] B. Louis, V. Sandberg, G. Garvey, H. White, G. Mills, et al. The evidence for oscillations. Los Alamos Sci., 25:116, 1997.
- [23] <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/about/intro-e.html>
- [24] W.W.M Allison et al.. Phys. Lett.B391(1997)491.
- [25] Syunsuke Kasuga,Observation of a Small ν_μ/ν_e Ratio of Atmospheric Neutrinos in Super-Kamiokande by the Method of Particle Identification, Universidad de Tokio, enero de 1998
- [26] SNO Collaboration:Q.R. Ahmad et al.,Direct evidence for neutrino flavor transformation from neutral-current interactions in the Sudbury Neutrino Observatory, Phys. Rev. Lett. 89, (2002)01131.
- [27] <http://hep.bu.edu/~schol/gc.html>
- [28] Charles Peck, The MACRO Experiment at Gran Sasso, Fest, Caltech, 2005
- [29] <http://icecube.wisc.edu/>
- [30] K2K Collaboration: M.H. Ahn et al.,Measurement of neutrino oscillation by the K2K experiment, Phys. Rev. D 74 (2006)072003.
- [31] MINOS Collaboration:D.G. Michael et al., Observation of Muon Neutrino Disappearance with the MINOS Detector in the NuMI Neutrino Beam, Phys. Rev. Lett. 97 (2006)191801.
- [32] Introduction to Elementary Particle Physics. C. J. Solano Salinas, K. Hurtado, C. Romero. AIP Conf. Proc. 1123:13-29, 2009
- [33] Marco Antonio Moreira, Revista Brasileña de Enseñanza de Física, 31(1): 1306, 2009.
- [34] Particle Data Group, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 33 (2006).
- [35] D. Perkins, "Introduction to High Energy Physics", 4th edition, Cambridge University Press, 246 (2000).
- [36] K. Zuber, "Neutrino Physics", Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, Oxford, 22,32,57(2004).
- [37] W.N. Cottingham and D.A Greenwood, "An Introduction to the Standard Model of Particle Physics", Second Editions, Cambridge University, xv,42 (2001).

- [38] D. Griffiths, "Introduction to Elementary Particles", John Wiley and Sons, Inc, (1987).
- [39] A. Thomas and W. Weise, "The structure of the nucleon", Wiley-VCH, 8 (2001)
- [40] "Introduction to Particle Physics", C.J. Solano Salinas, K. Hurtado, C. Romero. AIP Conf.Proc.1123:13-29,2009.
- [41] F. Cavanna and O. Palamara. Geneve: A monte carlo generator for neutrino interactions in the intermediate-energy range. *Nucl. Phys. Proc. Suppl.*, 112:183–187, 2002.
- [42] Y. Hayato. *Neut. Nucl. Phys. Proc. Suppl.*, 112:171–176, 2002.
- [43] F. Cavanna and O. Palamara. Geneve: A monte carlo generator for neutrino interactions in the intermediate-energy range. *Nucl. Phys. Proc. Suppl.*, 112:183–187, 2002.
- [44] Véase la serie de conferencias NUINT.
- [45] <http://minerva.fnal.gov/>
- [46] Proposal to perform a High Statistics Neutrino Scattering Experiment using a fine-grained detector in the NUMI beam , <http://minerva.fnal.gov/proposal.pdf>
- [47] "MINERvA, a neutrino nucleus interaction experiment", C. J. Solano Salinas et al. AIP Conf.Proc.947:239-244,2007.
- [48] MINERvA, a Neutrino – Nucleus Interaction Experiment. C.J. Solano Salinas. AIP Conf. Proc. 947:239-244, 2007
- [49] <http://www-numi.fnal.gov/Minos/>
- [50] S. Kopp, THE NUMI NEUTRINO BEAM AT FERMILAB, Department of Physics, University of Texas, Austin, TX 78712, U.S.A.
- [51] J. Hylen et al., NuMI Technical Design Handbook, Internal NuMI report (2003).
- [52] R. M. Zwaska, Accelerator Systems and Instrumentation for the NuMI Neutrino Beam, PhD thesis University of Texas at Austin, 2005.
- [53] MINERvA Collaboration, "MINERvA Technical Design Report", (2006).
- [54] Studies of light collection in depolished inorganic scintillators using Monte Carlo Simulations. C. J. Solano Salinas, A. Altamirano, D. Wahl. AIP Conf. Proc. 1123:235-236, 2009
- [55] Hamamatsu M64 PMT. <http://sales.hamamatsu.com/en/products/electron-tube-division/detectors/photomultiplier-tubes/part-r7600-00-m64.php>
- [56] C.Gingu and P.Rubinov. Minerva Master/Slave Data Acquisition Board Description and Measurement Result, 2005.
- [57] B. Baldin. VME Data Acquisition Modules for MINERvA Experiment. FERMILAB-TM-2458-PPD, 28pp.
- [58] T. Fitzpatrick and C. Rotolo. MINOS Master Clock System Preliminary Design Specification. NUMI-NOTR-ELEC-827, Fermilab, 2000.
- [59] The CAEN v2718 VME Crate Controller. <http://www.caen.it/nuclear/product.php?mod=V2718>.
- [60] The CAEN a2818 PCI Optical Bridge. <http://www.caen.it/nuclear/product.php?mod=A2818>.
- [61] S. Dytman. LI Summary. MINERvA Doc-DB 4033.

- [62] Gabriel Perdue, The MINERvA DAQ, February 8, 2011
- [63] Calibración del detector MINERvA mediante la detección de Muones. Kenyi Paolo Hurtado Anampa. Maestría en Física de FC-UNI (10 de Noviembre de 2009).
- [64] T. Kafka, V. Paolone, Prospects and Status of the MINERvA Experiment at FNAL <http://minerva-docdb.fnal.gov:8080/cgi-bin/ShowDocument?docid=4026>
- [65] David A. Martinez, Comissionamento e Análise do Feixe de Teste do Experimento MINERvA, tesis de maestría, CBPF, Brasil, julio 2010.
- [66] V. Paolone, First Look at Frozen Detector Data, November 20, 2009 http://minerva-docdb.fnal.gov:8080/cgi-bin/RetrieveFile?docid=4327&version=1&filename=FD_data_minerva_091120.pdf
- [67] <http://substitute.pas.rochester.edu/mediawiki/index.php?search=event+display&go=Go>
- [68] Proposal for MINERvA MRI to Support Nuclear Targets and Calibration System, MINERvA document 465 (2006). <http://minerva-docdb.fnal.gov:8080/cgi-bin/RetrieveFile?docid=465&version=1&filename=proposal-MRI2006-expunged.pdf>
- [69] T.-S. H. Lee and R.P. Redwine, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 52, 23 (2002)
- [70] D. Ashery et al., Phys. Rev. C 23, 2173 (1981)
- [71] M. K. Jones et al., Phys. Rev. C 48, 2800 (1993)
- [72] Fermilab. Booster. <http://www-ad.fnal.gov/proton/booster/booster.html>.
- [73] 621.384.SCH. Particle accelerators and their uses. IDonKnow, IDK.
- [74] T. Nakaya, [K2K SciBar group] personal communication.
- [75] M. Kordosky, P. Vahle, et al., [MINOS Collaboration], MINOS Internal Documents 945, 946, 947 (2003), 1454 (2006).
- [76] Pérez Lara, C.E., Design, Simulation, Commissioning and Test of the Tertiary Beam at Fermilab, Tesis de Maestría, Pontificia Universidad catolica, Lima, Peru (2010)
- [77] D. Jansen. Private Communication, June 2008.
- [78] R.Gran, D.Martinez, L.Patrick. First go at a field map for Magnet NDB21 in MTest.
- [79] arXiv:0808.0199v1 [physics.ins-det] 1 Aug 2008
- [80] R.A. Burnstein et al., Hypercp: A high-rate spectrometer for the study of charged hyperon and kaon decays. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 541 (2005)516-565
- [81] M. Lanari, J. Devan y M. Alania Observing Protons to determine the direction of the Magnetic Field in the MTest Beamline june 25 2010
- [82] <http://minerva-docdb.fnal.gov:8080/cgi-bin/ShowDocument?docid=390>
- [83] <http://cern.ch/gaudi>
- [84] <http://root.cern.ch/root>

[85] <http://wwwinfo.cern.ch/asd/lhc++/AIDA/>

[86] <http://seal.cern.ch>

[87] <http://www.nongnu.org/cvs/>

[88] <http://www.openafs.org/>

[89] <http://web.mit.edu/Kerberos/>